

# Physikalisch- Technische Bundesanstalt



---

**Richtlinie  
DKD-R 6-2**

**Kalibrierung von  
Messmitteln für Vakuum**

Teil 2

Messunsicherheiten

---

Ausgabe 09/2018

<https://doi.org/10.7795/550.20180828AK>



	Kalibrieren von Messmitteln für Vakuum Teil 2: Messunsicherheiten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828AK">https://doi.org/10.7795/550.20180828AK</a>	DKD-R 6-2 Teil 2	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	2/17

## 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: (05 31) 5 92-8021

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

	Kalibrieren von Messmitteln für Vakuum Teil 2: Messunsicherheiten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828AK">https://doi.org/10.7795/550.20180828AK</a>	DKD-R 6-2 Teil 2	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	3/17

*Zitiervorschlag für die Quellenangabe:*

*Richtlinie DKD-R 6-2, Teil 2, Kalibrieren von Messmitteln für Vakuum – Messunsicherheiten, Ausgabe 09/2018, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin. DOI: <https://doi.org/10.7795/550.20180828AK>*

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 in der Zeit von 1999 bis 2009.

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>Kalibrieren von Messmitteln für Vakuum</b> <b>Teil 2: Messunsicherheiten</b> <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828AK">https://doi.org/10.7795/550.20180828AK</a>	DKD-R 6-2 Teil 2	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	4/17

## 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.

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 dafürsprechen.

Die vorliegende Richtlinie wurde vom Fachausschuss *Druck und Vakuum* in Zusammenarbeit mit der PTB und akkreditierten Kalibrierlaboratorien bereits 1999 erstellt.

Die vorliegende geänderte Neuauflage enthält lediglich ein aktualisiertes Impressum.

Sie ist inhaltsgleich mit der DAkkS-DKD-R 6-2 Teil 2 (Ausgabe 2010). Die DAkkS wird die DAkkS-DKD-R 6-2 Teil 2 spätestens zum 01.01.2021 zurückziehen.

Ausgabe: 1999, veröffentlicht vom DKD

1. Neuauflage: 03/2002, überarbeitet durch den DKD
2. Neuauflage: 2010, durch die DAkkS
3. Neuauflage: 2018, durch den DKD, inhaltsgleich mit der 2. Neuauflage

## Inhalt

1	Geltungsbereich .....	5
2	Definition .....	5
3	Modell.....	5
3.1	Summe-/Differenzmodell.....	5
4	Berechnung der Messunsicherheit.....	6
4.1	Unsicherheitsbeitrag $u_N$ des Normals.....	6
4.2	Unsicherheitsbeitrag $u_{KG}$ des Kalibriergegenstandes .....	7
4.3	Unsicherheitsbeitrag des Kalibrierverfahrens .....	9
5	Besonderheiten bei der Kalibrierung von Vakuummetern .....	9
5.1	Definition des Messbereiches bei Wärmeleitungsvakuummetern und Angabe der Messunsicherheit.....	10
6	Erweiterungsfaktor $k$ .....	10
7	Darstellung der Messunsicherheit im Kalibrierschein .....	10
8	Beispiele.....	10
8.1	Membran-Vakuummeter .....	10
8.2	Wärmeleitungs-Vakuummeter.....	14
	Literaturhinweise .....	17

	Kalibrieren von Messmitteln für Vakuum Teil 2: Messunsicherheiten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828AK">https://doi.org/10.7795/550.20180828AK</a>	DKD-R 6-2 Teil 2	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	5/17

## 1 Geltungsbereich

Der vorliegende Teil behandelt die Bestimmung, Quantifizierung und Budgetierung der Messunsicherheiten für das Kalibrieren von Vakuummetern nach dieser Richtlinie.

## 2 Definition

Die Messunsicherheit<sup>i</sup> wird definiert als Kennwert, der zusammen mit dem Messergebnis angegeben wird, d.h. dem Messergebnis durch die Messung beigeordnet wird, und den Bereich der Werte charakterisiert, die der Messgröße durch die Messung vernünftigerweise zugeschrieben werden können.

## 3 Modell

Die Unsicherheitsanalyse erfolgt grundsätzlich nach den in der Schrift DAkKS-DKD-3 beschriebenen Vorgaben.

Für die Kalibrierung von Vakuummetern hat sich, unter der Voraussetzung, dass die Einflussgrößen unkorreliert sind, das Summe-/Differenzmodell als geeignet erwiesen.

### 3.1 Summe-/Differenzmodell

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

$Y$	Ergebnisgröße
$X$	wertbestimmende Eingangsgröße(n)
$\delta X_i$	unbekannte Messabweichung(en)

Bei der Kalibrierung von Vakuummetern ist – in der überwiegenden Zahl der Fälle – die zu ermittelnde Größe die Messabweichung  $\Delta p$ . Damit wird aus dem allgemeinen Summe-/Differenzmodell die Gleichung:

$$\Delta p = p_{\text{Anzeige}} - p_{\text{Normal}} + \sum_i \delta p_i$$

mit	
$p_{\text{Anzeige}}$	Anzeige des Vakuummessgerätes
$p_{\text{Normal}}$	Wert des Normals
$\delta p_i$	weitere unbekanntete Messabweichungen

In der Vakuummesstechnik wird aus Gründen der Übersichtlichkeit bevorzugt eine Einteilung der unbekannteten Messabweichungen in Kalibriergegenstand, Normal und Verfahren vorgenommen.

$$\Delta p = p_{\text{KG}} - p_{\text{N}} + \delta p_{\text{V}}$$

mit	
$p_{\text{N}}$	richtiger Wert des Normals (Abschnitt 4.1)
$p_{\text{KG}}$	(Mess-) Wert des Kalibriergegenstandes (4.2)
$\delta p_{\text{V}}$	durch das Kalibrierverfahren bedingte Abweichungen (4.3),

<sup>i</sup> Zur Terminologie s. DIN EN 13005

	Kalibrieren von Messmitteln für Vakuum Teil 2: Messunsicherheiten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828AK">https://doi.org/10.7795/550.20180828AK</a>	DKD-R 6-2 Teil 2	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	6/17

Richtiger Wert des Normals heißt, dass am angezeigten Wert alle bekannten Korrekturen angebracht wurden (Anzeigeabweichung gemäß Kalibrierschein, Offset, Temperaturkorrektur usw.).

(Mess-)Wert des Kalibriergegenstandes heißt, dass am angezeigten Wert Offset- und z.B. Höhenkorrektur angebracht wurden.

## 4 Berechnung der Messunsicherheit

Für die Berechnung der erweiterten Messunsicherheit  $U$  gilt:

$$U = k \cdot \sqrt{u_N^2 + u_{KG}^2 + u_V^2}$$

mit

- $k$  Erweiterungsfaktor
- $u_N$  Unsicherheitsbeitrag der korrigierten Druckanzeige des Normals
- $u_{KG}$  Unsicherheitsbeitrag der korrigierten Druckanzeige des Kalibriergegenstandes
- $u_V$  Unsicherheitsbeitrag des Kalibrierverfahrens

Vereinfachend wurden hier die Indizes der Drücke in der Modellgleichung verwendet (statt  $u_{p_N}$  :  $u_N$ ).

Die Sensitivitätskoeffizienten haben i. Allg. den Betrag eins, d.h. die dem Ergebnis beizuordnenden Unsicherheitsbeiträge sind dem Betrag nach gleich den Standardmessunsicherheiten der Eingangsgrößen.

### 4.1 Unsicherheitsbeitrag $u_N$ des Normals

Die Standardmessunsicherheiten der Messwerte des Normals sind durch seine Kalibrierung gegeben. Beim Einsatz im Kalibrierlaboratorium sind jedoch von der Langzeit-Instabilität und den jeweiligen Kalibrierbedingungen abhängige Einflüsse zu berücksichtigen.

Typischerweise gilt für den (Mess-)Wert des Normals folgendes Modell:

$$p_N = p_{Anz,N} - p_{Offs,N} + \delta p_{D,N} + \delta p_{Cal,N} + \delta p_{L,N} + \delta p_{T,N} + \delta p_{S,N}$$

mit

- $p_N$  richtiger Wert
- $p_{anz,N}$  Anzeige
- $p_{offs,N}$  Offset (Nullpunktabweichung) des Normals. Bemerkung: Wenn der Offset im Gerät selbst abgezogen oder auf Null justiert wird, ist  $p_{offs,N} = 0$ .
- $\delta p_{D,N}$  Abweichung des Offsets infolge Drift
- $\delta p_{Cal,N}$  Korrektur gemäß Kalibrierschein (Messabweichung)
- $\delta p_{L,N}$  Abweichung infolge Langzeit-Instabilität (Annahme: Meist ist  $\delta p_L = 0$ )
- $\delta p_{T,N}$  Abweichung der Anzeige infolge Temperatureinfluss im Kalibrierlaboratorium
- $\delta p_{S,N}$  Abweichung infolge anderer Einflüsse (z.B. Neigung des Geräts etc.)

Für die Standardmessunsicherheit, die den Werten des Normals beizuordnen ist, gilt folgende Beziehung:

$$u_N = \sqrt{u_{Anz,N}^2 + u_{Offs,N}^2 + u_{D,N}^2 + u_{Cal,N}^2 + u_{L,N}^2 + u_{T,N}^2 + u_{S,N}^2}$$

mit

	Kalibrieren von Messmitteln für Vakuum Teil 2: Messunsicherheiten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828AK">https://doi.org/10.7795/550.20180828AK</a>	DKD-R 6-2 Teil 2	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	7/17

- $u_{anz,N}$  Unsicherheitsanteil der Werte des Normals aufgrund unzureichender Wiederholbarkeit zum Zeitpunkt der Kalibrierung des Kalibriergegenstandes (Streuung der Messwerte um einen Mittelwert einschließlich Streuung durch Digitalisierung, Auflösung etc.)  
 Bemerkung:  
 Oft gibt es nur einen Messwert. In diesem Fall muss der Unsicherheitsanteil aus Erfahrungswerten (einschließlich Unsicherheitsanteil, hervorgerufen durch Digitalisierung, Offsetschwankungen etc.) abgeschätzt werden.
- $u_{offs,N}$  Unsicherheit der Offsetwerte zum Zeitpunkt der Messung des Offsets (ohne Wiederholpräzision des Offsets).  
 Bemerkung: Es kann häufig vorkommen, dass die Unsicherheit des Offsetwertes lediglich durch die Digitalisierung oder die Auflösung des Geräts verursacht ist. Wird die Wiederholbarkeit des Offsets (Offsetschwankungen) nicht bei  $u_{anz,N}$  berücksichtigt (weil z.B. nur ein Messwert genommen wird), ist sie hier zu berücksichtigen. Auch wenn  $p_{offs,N} = 0$ , z.B., weil der Offset bereits vom Messgerät selbst abgezogen wird, ist  $u_{offs,N} > 0$ .
- $u_{D,N}$  Unsicherheitsanteil des Offsets zum Zeitpunkt der Kalibrierung des Kalibriergegenstandes durch Offsetdrift oder andere systematische Abhängigkeiten des Offsets (z.B. aufgrund der Drehzahlabhängigkeit bei Gasreibungsvakuummetern).
- $u_{cal,N}$  Unsicherheitsanteil des Normals gemäß Kalibrierschein
- $u_{L,N}$  Unsicherheitsanteil, der die Langzeit-Instabilität berücksichtigt (Erfahrungswert oder Typ B-Unsicherheit<sup>ii</sup>, teilweise statistisch gesichert)
- $u_{T,N}$  Unsicherheitsanteil, der auf den Temperatureinfluss unter den Bedingungen des Kalibrierlabors zurückzuführen ist
- $u_{S,N}$  Unsicherheitsanteil, der durch die besonderen Bedingungen im Kalibrierlabor zustande kommt (z.B. andere Einbaulage bei Einbaugeräten usw.)

Die Standardmessunsicherheit der Messwerte der Normale beim Einsatz im Kalibrierlaboratorium weicht oftmals, bedingt durch große Langzeit-Instabilitäten, erheblich von der Standardmessunsicherheit zum Zeitpunkt ihrer eigenen Kalibrierung ab. Nationale metrologische Labors und Kalibrierlabors mit langjähriger Praxis verfügen oft über Erfahrungswerte, auf die u. U. zurückgegriffen werden kann.

#### 4.2 Unsicherheitsbeitrag $u_{KG}$ des Kalibriergegenstandes

Der Unsicherheitsbeitrag der (Mess-)Werte des Kalibriergegenstandes zum Zeitpunkt seiner Kalibrierung wird u.a. bestimmt durch Auflösung (analog oder digital), Temperaturabhängigkeiten der Messglieder (z.B. Fühler, Verstärker), Nullpunkt- bzw. Offsetschwankungen und -drift.

Typischerweise gilt für die Abweichung des Kalibriergegenstandes zum Zeitpunkt der Kalibrierung folgendes Modell:

$$p_{KG} = p_{Anz,KG} - p_{Offs,KG} + \delta p_{D,KG} + \delta p_{n,KG}$$

mit

- $p_{KG}$  (Mess-) Wert des Kalibriergegenstandes  
 $p_{anz,KG}$  Anzeige  
 $p_{offs,KG}$  Offset (Nullpunktabweichung)  
 $\delta p_{D,K}$  Offsetdrift oder andere systematische Abweichungen  
 $\delta p_{n,KG}$  Summe von Abweichungen, die nicht einzeln aufgeführt sind (z.B. Höhenkorrektur)

<sup>ii</sup> s. DAkKS-DKD-3

	Kalibrieren von Messmitteln für Vakuum Teil 2: Messunsicherheiten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828AK">https://doi.org/10.7795/550.20180828AK</a>	DKD-R 6-2 Teil 2	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	8/17

Die Ermittlung der Standardmessunsicherheit des Kalibriergegenstandes erfolgt nach einem der folgenden vier Fälle:

- a) Die Standardmessunsicherheit  $u_{KG}$  des Kalibriergegenstandes ist bekannt.  
 $u_{KG}$  kann dem Betrag nach vom Hersteller (oder Antragsteller) als Gesamtheit der Unsicherheitsbeiträge angegeben sein und ist zu verwenden, wenn die vom Hersteller spezifizierten Anwendungsbedingungen vom Kalibrierlaboratorium eingehalten werden.
- b) Die o.g. Abhängigkeiten bzw. Werte sind bekannt

In diesem Fall gilt für die Berechnung der Standardmessunsicherheit:

$$u_{KG} = \sqrt{u_{Anz,KG}^2 + u_{Offs,KG}^2 + u_{D,KG}^2 + \sum u_{n,j,KG}^2}$$

mit

$u_{anz,KG}$  Unsicherheitsanteil aufgrund unzureichender Wiederholbarkeit (Streuung der Messwerte um einen Mittelwert einschließlich Unsicherheit durch Digitalisierung, Auflösung, etc.)

Bemerkung: Oft gibt es nur einen Messwert. Dann muss der Unsicherheitsanteil aus Erfahrungswerten abgeschätzt werden.

$u_{offs,KG}$  Unsicherheitsanteil des Offsets zum Zeitpunkt der Messung des Offsets (ohne Wiederholpräzision des Offsets).

Häufig wird die Messunsicherheit des Offsets lediglich durch die Auflösung des Kalibriergegenstandes verursacht. Auch wenn  $p_{offs} = 0$ , z.B., weil der Offset bereits vom Messgerät selbst abgezogen wird, ist  $u_{offs,KG} > 0$ .

$u_{D,KG}$  Unsicherheitsanteil des Offsets durch Offsetdrift oder andere systematische Abhängigkeiten (z.B. aufgrund der Drehzahlabhängigkeit beim Gasreibungsvakuummeter)

$u_{n,j,KG}$  Weitere, hier nicht spezifizierte Unsicherheitsanteile, die ebenfalls vom Kalibriergegenstand herrühren können, z.B. Temperatureinflüsse.

- c) Die o.g. Abhängigkeiten bzw. Werte sind nicht bekannt, werden aber vom Kalibrierlaboratorium eingeschätzt bzw. es liegen Erfahrungswerte zum Gerätetyp vor. Es wird analog zu Abschnitt b) verfahren.

- d) Die o.g. Abhängigkeiten bzw. Werte sind
- nicht bekannt,
  - können vom Kalibrierlaboratorium nicht eingeschätzt werden und
  - es liegen hierzu keine Angaben vom Hersteller vor.

In diesem Fall sind mindestens zwei Wiederholungsmessungen an verschiedenen Tagen durchzuführen.

Der Unsicherheitsanteil der Werte des Kalibriergegenstandes ist wie folgt zu ermitteln:

$$u_{KG} = u_{Rep,KG}$$

mit

$u_{Rep,KG}$  Wiederholbarkeit (Standardabweichung) der für einen Druck ermittelten Messwerte

	Kalibrieren von Messmitteln für Vakuum Teil 2: Messunsicherheiten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828AK">https://doi.org/10.7795/550.20180828AK</a>	DKD-R 6-2 Teil 2	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	9/17

### 4.3 Unsicherheitsbeitrag des Kalibrierverfahrens

Die Summe  $\delta p_V$  der bei der Kalibrierung auftretenden Abweichungen kann sich u. a. aus den Temperaturbedingungen des Kalibrierlaboratoriums, der Gleichverteilung und Konstanz des eingestellten Druckes und der Messmethodik (z.B. Wartezeiten) ergeben.

Typischerweise gilt für den Unsicherheitsbeitrag des Kalibrierverfahrens folgendes Modell:

$$\delta p_V = \delta p_{T,V} + \delta p_{K,V} + \delta p_{M,V}$$

mit

$\delta p_{T,V}$  Abweichungen der Drücke an den Anschlussflanschen infolge unterschiedlicher Temperaturen

$\delta p_{K,V}$  Abweichungen der Drücke an den Anschlussflanschen infolge von Gasabgabe, Lecks, Strömungsverhältnissen, Saugvermögen (z.B. bei Kaltkathoden-Ionisationsvakuummetern)

$\delta p_{M,V}$  Abweichungen, die auf die Messmethodik zurückzuführen sind (z.B. zeitliche Änderung des Kalibrierdruckes bei nicht gleichzeitiger Ablesung von Normal und Kalibriergegenstand)

Für die Ermittlung des Unsicherheitsanteiles  $u_V$  gilt:

$$u_V = \sqrt{u_{T,V}^2 + u_{K,V}^2 + u_{M,V}^2}$$

mit

$u_{T,V}$  Unsicherheitsanteil der Abweichungen der Drücke an den Anschlussflanschen infolge unterschiedlicher Temperaturen

$u_{K,V}$  Unsicherheitsanteil der Abweichungen der Drücke an den Anschlussflanschen infolge Gasabgabe, Lecks, Strömungsverhältnissen, Saugvermögen

$u_{M,V}$  Unsicherheitsanteil der Abweichungen, die auf die Messmethodik zurückzuführen sind

## 5 Besonderheiten bei der Kalibrierung von Vakuummetern

In der Vakuummesstechnik gelten folgende Besonderheiten:

- a) Die Langzeit-Instabilität der Normale ist oft größer als ihre erweiterte Messunsicherheit bei ihrer Kalibrierung
- b) Der Messbereich der zu kalibrierenden Geräte erstreckt sich über mehrere Zehnerpotenzen. Im Allgemeinen werden bei einer Kalibrierung in einem einmaligen Aufwärtsgang die Anzeigen von Normal und Kalibriergegenstand bei fortschreitend höheren Drücken verglichen und die Abweichung der Anzeige des Kalibriergegenstandes vom Kalibrierdruck berechnet. Jede Wiederholungsmessung würde einen unverhältnismäßig hohen Aufwand bedeuten und keine signifikante Verringerung der Messunsicherheit des Kalibriergegenstandes beim Einsatz beim Anwender mit sich bringen. Hysterese-Effekte sind im Allgemeinen vernachlässigbar.
- c) In einigen Fällen (z.B. Wärmeleitungsvakuummeter) ist es sinnvoll, das elektrische Ausgangssignal oder ein Äquivalent (z.B. Röhrenkonstante bei Ionisationsvakuummeterrohren) als Funktion des Kalibrierdruckes aufzunehmen.

	Kalibrieren von Messmitteln für Vakuum Teil 2: Messunsicherheiten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828AK">https://doi.org/10.7795/550.20180828AK</a>	DKD-R 6-2 Teil 2	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	10/17

## 5.1 Definition des Messbereiches bei Wärmeleitungsvakuummetern und Angabe der Messunsicherheit

Oftmals ist bei Wärmeleitungsvakuummetern das Ausgangssignal eine Spannung. Bei der Kalibrierung ist diese Spannung als Funktion des Druckes zu ermitteln. Wird in einem Diagramm die gemessene Spannung über dem Druck (in logarithmischer Skalierung) aufgetragen, ergibt sich im Allgemeinen ein S-förmiger Verlauf. Die größte Steilheit wird etwa in der Mitte des gesamten gemessenen Bereiches liegen. Sowohl am unteren als auch am oberen Ende des Bereiches wird sich ein sehr flacher Verlauf ergeben. Die Messunsicherheit steigt an den Enden des Bereiches extrem an. Es ist zulässig, als „Messbereich“ **den** Bereich festzulegen, in dem die Steigung mindestens 30 % der maximalen Steigung beträgt und einen Wert für die Messunsicherheit für diesen Bereich anzugeben.

Bei dieser Art der Kalibrierung ist, wenn vom Hersteller keine Angaben zum Unsicherheitsbeitrag des Kalibriergegenstandes vorliegen, die Messunsicherheit abzuschätzen.

## 6 Erweiterungsfaktor $k$

Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass bei den Kalibrierungen der Erweiterungsfaktor  $k = 2$  anwendbar ist.

## 7 Darstellung der Messunsicherheit im Kalibrierschein

Die Messunsicherheiten werden in der zweckmäßigsten Form dargestellt:

- in einer Tabelle
- in Form einer Gleichung
- als Diagramm
- als Konformitätsbescheinigung

Weitere Einzelheiten hierzu enthält die Richtlinie DAkKS-DKD-5.

## 8 Beispiele

### 8.1 Membran-Vakuummeter

Normal: Membran-Vakuummeter mit Digitalanzeige 5,5-stellig  
 Messbereich: 0,001 bis 100 mbar

Kalibriergegenstand (KG): Membran-Vakuummeter mit Digitalanzeige 4,5-stellig  
 Messbereich: 0,01 bis 100 mbar

Kalibrierdruck (nominell): 5 mbar  
 Anzeige des Normals: 5,078 mbar

Einflüsse durch das Kalibrierverfahren:

Höhendifferenz der Anschlussstellen von Normal und KG:  $15 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$

Raum- und Apparatetemperatur:  $23,0 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$

	Kalibrieren von Messmitteln für Vakuum Teil 2: Messunsicherheiten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828AK">https://doi.org/10.7795/550.20180828AK</a>	DKD-R 6-2 Teil 2	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	11/17

### Unsicherheitsbeitrag $u_N$ des Normals

$u_{Anz,N}$  Das Betriebsgerät verfügt über die Option, eine Mittelwertbildung der Druckmessungen durchzuführen. Dadurch wird die Druckanzeige stabilisiert und die Streuung der Messwerte reduziert. Die Unsicherheit wird auf  $\pm 1 \cdot 10^{-4}$  mbar geschätzt.  
 $u(2a) = 2 \cdot 10^{-4}$  mbar

$u_{Offs,N}$  Die Unsicherheit der Offsetwerte (Nullpunkt) kann durch den Temperaturkoeffizienten für den Nullpunkt berechnet werden.

$$\begin{aligned} \text{Temperaturkoeffizient/Nullpunkt} &= 0,0004 \text{ \% vom Endwert/}^\circ\text{C} \\ &= 0,000004 \cdot 100 \text{ mbar/}^\circ\text{C} \\ &= 4 \cdot 10^{-4} \text{ mbar/}^\circ\text{C} \\ &= \text{Sensitivitätskoeffizient } c_i \end{aligned}$$

(Die Temperaturschwankung beträgt  $\pm 1$  °C)

$u_{D,N}$  Messunsicherheit des Normals aufgrund einer Drift des Nullpunktes seit seiner Einstellung. Diese Messunsicherheit wird aus den beobachteten Nullpunktfluktuationen abgeleitet.

$$u(2a) = 6 \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$$

$u_{Cal,N}$  Unsicherheitsanteil des Normals gemäß Kalibrierschein:

$$u(2\sigma) = 0,15 \text{ \% v. Messwert} = 0,0015 \cdot 5 \text{ mbar} = 7,3 \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$$

$u_{L,N}$  Unsicherheitsanteil, der die Langzeit-Instabilität berücksichtigt.

$$\text{Erfahrungswerte der PTB: } 0,1 \text{ \% v. M. } u = 0,001 \cdot 5 \text{ mbar} = 0,005 \text{ mbar}$$

$u_{T,N}$  Unsicherheitsanteil, der auf den Temperatureinfluss unter den Bedingungen des Kalibrierlabors zurückzuführen ist.

$$\begin{aligned} \text{Temperaturkoeffizient/Verstärkung} &= 0,001 \text{ \% vom Messwert/}^\circ\text{C} \\ &= 0,00001 \cdot 5 \text{ mbar/}^\circ\text{C} \\ &= 0,00005 \text{ mbar/}^\circ\text{C} \\ &= \text{Sensitivitätskoeffizient } c_i \end{aligned}$$

(Die Temperaturschwankung beträgt  $\pm 1$  °C)

$u_{S,N}$  Unsicherheitsanteil, der durch die besonderen Bedingungen im Kalibrierlabor zustande kommt. Es sind keine weiteren Einflüsse auf die Messunsicherheit bekannt. Dieser Unsicherheitsanteil ist deshalb = 0.

### Unsicherheitsbeitrag $u_{KG}$ des Kalibriergegenstandes

$u_{Anz,KG}$  Unsicherheitsanteil aufgrund unzureichender Wiederholbarkeit. Angabe laut Hersteller: 0,08 % v. M.  $u(2\sigma) = 0,0008 \cdot 5 \text{ mbar} = 0,004 \text{ mbar}$

$u_{Offs,KG}$  Unsicherheitsanteil des Offsets zum Zeitpunkt der Messung des Offsets. Diese Unsicherheit ist im Wesentlichen durch die digitale Auflösung gegeben:

$$u(2a) = 2 \cdot 10^{-3} \text{ mbar}$$

$u_{D,KG}$  Unsicherheit des Offsets zum Zeitpunkt der Kalibrierung durch Offsetdrift. Die Unsicherheit der Offsetwerte (Nullpunkt) kann durch den Temperaturkoeffizienten für den Nullpunkt berechnet werden.

$$\begin{aligned} \text{Temperaturkoeffizient/Nullpunkt} &= 0,002 \text{ \% vom Endwert/}^\circ\text{C} \\ &= 0,00002 \cdot 100 \text{ mbar/}^\circ\text{C} \\ &= 2 \cdot 10^{-3} \text{ mbar/}^\circ\text{C} \\ &= \text{Sensitivitätskoeffizient } c_i \end{aligned}$$

(Die Temperaturschwankung beträgt  $\pm 1$  °C)

	Kalibrieren von Messmitteln für Vakuum Teil 2: Messunsicherheiten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828AK">https://doi.org/10.7795/550.20180828AK</a>	DKD-R 6-2 Teil 2	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	12/17

$u_{T,KG}$  Unsicherheitsbeitrag, der auf den Temperatureinfluss zurückzuführen ist.  
 Temperaturkoeffizient/Spanne = 0,01 % v. M./°C  
 = 0,0001 · 5 mbar/°C  
 = 0,0005 mbar/°C  
 = Sensitivitätskoeffizient  $c_i$

(Die Temperaturschwankung beträgt  $\pm 1$  °C)

### Unsicherheitsbeitrag des Kalibrierverfahrens

$u_{T,V}$  Unsicherheitsanteil der Abweichung der Drücke an den Anschlussflanschen infolge unterschiedlicher Temperaturen. Die Differenz der Gastemperaturen an den Anschlussflanschen wird maximal als 0,02 °C abgeschätzt (bedingt durch Luftströmungen). Da das Volumen konstant ist, kann die resultierende Druckdifferenz durch das Gesetz von Gay-Lussac errechnet werden.

$$p/p_0 = T/T_0 = 296,17 \text{ °C}/296,15 \text{ °C} = 1,000068,$$

d.h. 0,0068 %v.  $p/^\circ\text{C} = 0,00034 \text{ mbar}/^\circ\text{C} = \text{Sensitivitätskoeffizient } c_i$

(Hinweis: Dieser Unsicherheitsanteil hat keinen Korrekturanteil, ergibt aber einen Beitrag zur Messunsicherheit.)

$u_{K,V}$  Unsicherheitsanteil, bedingt durch die hydrostatische Druckdifferenz bei unterschiedlicher Höhe der Anschlussflansche:

$\Delta p$	$= p \cdot g \cdot h$	Einheit
	$= 1,27 \cdot 10^{-3} \cdot (p / \text{mbar}) \cdot 9,81 \cdot (h / \text{m})$	$\text{kg m}^{-3} \text{ m s}^{-2} \text{ m}$
	$= 1,2 \cdot 10^{-2} \cdot (p / \text{mbar}) \cdot (h / \text{m})$	$\text{kg m s}^{-2} \text{ m}^{-2}$
	$= 1,2 \cdot 10^{-2} \cdot (p / \text{mbar}) \cdot (h / \text{m})$	$\text{N m}^{-2}$
	$= 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (p / \text{mbar}) \cdot (h / \text{m})$	$\text{Pa} \cdot 0,01 \text{ mbar} / \text{Pa}$
	$= 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (p / \text{mbar}) \cdot (h / \text{m})$	mbar

mit

$$\rho = \rho_0 \cdot p/p_0 = 1,2929 \text{ kg m}^{-3} \cdot \rho / 1013 \text{ mbar} = 1,27 \cdot 10^{-3} \cdot (\rho / \text{mbar}) \text{ kg m}^{-3}$$

mit  $\rho_0 = 1,2929 \text{ kg m}^{-3}$  (273,15 °K ; 1013,25 mbar)

(Hinweis: Bei der Berechnung von  $\Delta\rho$  muss der Druck  $p$  in mbar und die Höhe  $h$  in m eingesetzt werden. Der resultierende Zahlenwert für  $\Delta\rho$  ist dann in mbar angegeben.)

Die Abweichung bei 5 mbar und einer Höhendifferenz von 0,15 m beträgt:

$$\Delta\rho = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (5 \text{ mbar} / \text{mbar}) \cdot (0,15 \text{ m} / \text{m}) = 0,00009 \text{ mbar}$$

Der Sensitivitätskoeffizient  $c_i = \rho \cdot g = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (\rho / \text{mbar}) \text{ mbar m}^{-1}$ . Bei einem Messdruck von 5 mbar ist der Sensitivitätskoeffizient  $c_i = 0,0006 \text{ mbar} / \text{m}$

Die Unsicherheit der Höhendifferenz beträgt  $\pm 0,01 \text{ m}$ .

$u_{M,V}$  Unsicherheitsanteil der Abweichungen, die auf die Messmethodik zurückzuführen sind. Bei einer Leckrate von  $5 \cdot 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$  steigt der Druck im Kessel (20 l) in 20 s um  $5 \cdot 10^{-6} \text{ mbar}$  an. Diese Druckänderung wird nicht als Korrektur verwendet, ergibt aber einen Beitrag zur Messunsicherheit.

**Messunsicherheitsbudget für ein Membran-Vakuummeter bei einem Kalibrierdruck von 5 mbar:**

Größe	Schätzwert	Breite der Verteilung	Verteilung <sup>*)</sup>	Teiler	Unsicherheit	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Index	
$X_i$	$x_i$	$2a$			$u(x_i)$	$c_i$	$u_i(y)$		
	mbar						mbar	%	
$p_{\text{Anz,N}}$	5,078	2,00E-04 mbar	R	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-05 mbar	1,0	5,77E-05	0,0	
$p_{\text{Offs,N}}$	0	2 °C	R	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-01 °C	4,0E-04 mbar/°C	2,31E-04	0,2	
$\delta p_{\text{D,N}}$	0	6,00E-04 mbar	R	$2 \cdot \sqrt{3}$	1,73E-04 mbar	1,0	1,73E-04	0,1	
$\delta p_{\text{Cal,N}}$	-0,003	7,30E-03 mbar	N	2	3,65E-03 mbar	1,0	3,65E-03	48,5	
$\delta p_{\text{L,N}}$	0	1,00E-02 mbar	R	$2 \cdot \sqrt{3}$	2,89E-03 mbar	1,0	2,89E-03	30,3	
$\delta p_{\text{T,N}}$	0	2 °C	R	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-01 °C	5,0E-05 mbar/°C	2,89E-05	0,0	
$\delta p_{\text{S,N}}$	0	0				1,0	0	0,0	
<b><math>p_{\text{N}}</math></b>	<b>5,075</b>						<b>0,0047</b>	<b>79,1</b>	
$p_{\text{Anz,KG}}$	5,140	0,004 mbar	N	2	2,00E-03 mbar	1,0	2,00E-03	14,5	
$p_{\text{Offs,KG}}$	0	2,00E-03 mbar	R	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-04 mbar	1,0	5,77E-04	1,2	
$\delta p_{\text{D,KG}}$	0	2 °C	R	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-01 °C	2,0E-03 mbar/°C	1,15E-03	4,8	
$\delta p_{\text{T,KG}}$	0	2 °C	R	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-01 °C	5,0E-04 mbar/°C	2,89E-04	0,3	
<b><math>p_{\text{KG}}</math></b>	<b>5,140</b>						<b>0,0024</b>	<b>20,9</b>	
$\delta_{\text{T,V}}$	0	0,02 °C	R	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-03 °C	3,4E-04 mbar/°C	1,96E-06	<b>0,0</b>	
$\delta p_{\text{K,V}}$	-9,0E-05	0,02 m	R	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-03 m	6,0E-04 mbar/m	3,46E-06	<b>0,0</b>	
$\delta p_{\text{M,V}}$	0	5,00E-06 mbar	R	$2 \cdot \sqrt{3}$	1,44E-06 mbar	1,0	1,44E-06	<b>0,0</b>	
<b><math>\delta p_{\text{V}}</math></b>	<b>-9,0E-05</b>						<b>0,00000</b>	<b>0,0</b>	
<b><math>\Delta p</math></b>	<b>0,0649</b>	<b>Erweiterte Messunsicherheit <math>U = k \cdot u</math> (<math>k = 2</math>):</b>						<b>0,0106</b>	<b>100,0</b>

\* R = Rechteckverteilung  
 N = Normalverteilung

**Ergebnis:**

Die Messabweichung des Kalibriergegenstandes beträgt somit:

$$\Delta p = 0,0649 \text{ mbar} \pm 0,0106 \text{ mbar}$$

Anmerkung: Die in der Spalte Index angegebenen Werte stellen den prozentualen Anteil der Teilmessunsicherheiten an der Gesamtmessunsicherheit dar und veranschaulichen die Gewichtung der einzelnen Einflussgrößen. Ihre Berechnung ist nicht vorgeschrieben, sie zeigt jedoch, wo sinnvollerweise angesetzt werden muss, wenn Wege zur Minderung der Messunsicherheit gesucht werden.

	Kalibrieren von Messmitteln für Vakuum Teil 2: Messunsicherheiten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828AK">https://doi.org/10.7795/550.20180828AK</a>	DKD-R 6-2 Teil 2	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	14/17

## 8.2 Wärmeleitungs-Vakuummeter

Normal: Membran-Vakuummeter mit Digitalanzeige 5,5-stellig  
 Messbereich: 0,00001 bis 1 mbar

Kalibriergegenstand (KG): Wärmeleitungs-Vakuummeter mit Digitalanzeige  
 Messbereich: 0,001 bis 100 mbar

Kalibrierdruck: 0,2 mbar

Einflüsse durch das Kalibrierverfahren:

Höhendifferenz der Anschlussstellen von Normal und KG:  $0 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$

Raum- und Apparatetemperatur:  $23,0 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$

### Unsicherheitsbeitrag $u_N$ des Normals

$u_{\text{Anz},N}$  Das Betriebsgerät verfügt über die Option, eine Mittelwertbildung der Druckmessungen durchzuführen. Dadurch wird die Druckanzeige stabilisiert und die Streuung der Messwerte reduziert. Die Unsicherheit wird auf  $\pm 1 \cdot 10^{-5}$  mbar geschätzt.  
 $u(a) = 2 \cdot 10^{-5}$  mbar

$u_{\text{Offs},N}$  Die Unsicherheit der Offsetwerte (Nullpunkt) kann durch den Temperaturkoeffizienten für den Nullpunkt berechnet werden.

Temperaturkoeffizient/Nullpunkt = 0,0004 % vom Endwert/°C  
 =  $0,000004 \cdot 1 \text{ mbar/°C}$   
 =  $4 \cdot 10^{-6} \text{ mbar/°C}$   
 = Sensitivitätskoeffizient  $c_i$

(Die Temperaturschwankung beträgt  $\pm 1 \text{ °C}$ )

$u_{D,N}$  Messunsicherheit des Normals aufgrund einer Drift des Nullpunktes seit seiner Einstellung. Diese Messunsicherheit wird aus den beobachteten Nullpunktfluktuationen abgeleitet.

$u(2a) = 6 \cdot 10^{-6}$  mbar

$u_{\text{Cal},N}$  Unsicherheitsanteil des Normals gemäß Kalibrierschein:

$u(2\sigma) = 0,3 \text{ \% v. Messwert} = 0,003 \cdot 0,2 \text{ mbar} = 6 \cdot 10^{-4}$  mbar

$u_{L,N}$  Unsicherheitsanteil, der die Langzeit-Instabilität berücksichtigt.

Erfahrungswerte der PTB: 0,35 % v. M.

$u(2a) = 0,0035 \cdot 0,2 \text{ mbar} = 7 \cdot 10^{-4}$  mbar

$u_{T,N}$  Unsicherheitsanteil, der auf den Temperatureinfluss unter den Bedingungen des Kalibrierlabors zurückzuführen ist.

Temperaturkoeffizient/Verstärkung = 0,001 % vom Messwert/°C  
 =  $0,00001 \cdot 0,2 \text{ mbar/°C}$   
 =  $0,000002 \text{ mbar/°C}$   
 = Sensitivitätskoeffizient  $c_i$

(Die Temperaturschwankung beträgt  $\pm 1 \text{ °C}$ )

$u_{S,N}$  Unsicherheitsanteil, der durch die besonderen Bedingungen im Kalibrierlabor zustande kommt. Es sind keine weiteren Einflüsse auf die Messunsicherheit bekannt. Dieser Unsicherheitsanteil ist deshalb = 0.

	Kalibrieren von Messmitteln für Vakuum Teil 2: Messunsicherheiten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828AK">https://doi.org/10.7795/550.20180828AK</a>	DKD-R 6-2 Teil 2	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	15/17

### Unsicherheitsbeitrag $u_{KG}$ des Kalibriergegenstandes

$u_{Anz,KG}$  Unsicherheitsanteil aufgrund unzureichender Wiederholbarkeit. Der Erfahrungswert für dieses Vakuummeter beträgt 2 % v. M.

$$u(2a) = 0,02 \cdot 0,2 \text{ mbar} = 0,004 \text{ mbar}$$

$u_{Offs,KG}$  Unsicherheitsanteil des Offsets zum Zeitpunkt der Messung des Offsets. Diese Unsicherheit ist im Wesentlichen durch die digitale Auflösung

$$u(2a) = 2 \cdot 10^{-3} \text{ mbar gegeben.}$$

$u_{D,KG}$  Die Unsicherheit des Offsets wird auf  $u(2a) = 2 \cdot 10^{-4}$  mbar geschätzt.

$u_{T,KG}$  Unsicherheitsbeitrag, der auf den Temperatureinfluss zurückzuführen ist.

$$\begin{aligned} \text{Temperaturkoeffizient /Spanne} &= 3 \% \text{ v. M./}^\circ\text{C} \\ &= 0,03 \cdot 0,2 \text{ mbar/}^\circ\text{C} \\ &= 0,006 \text{ mbar/}^\circ\text{C} \\ &= \text{Sensitivitätskoeffizient } c_i \end{aligned}$$

(Die Temperaturschwankung beträgt  $\pm 1$  °C)

### Unsicherheitsbeitrag des Kalibrierverfahrens

$u_{T,V}$  Unsicherheitsanteil der Abweichung der Drücke an den Anschlussflanschen infolge unterschiedlicher Temperaturen. Die Differenz der Gastemperaturen an den Anschlussflanschen wird maximal als 0,02 °C abgeschätzt (bedingt durch Luftströmungen). Da das Volumen konstant ist, kann die resultierende Druckdifferenz durch das Gesetz von Gay-Lussac errechnet werden.

$$p/p_0 = T/T_0 = 296,17 \text{ }^\circ\text{C}/296,15 \text{ }^\circ\text{C} = 1,000068,$$

$$\text{d.h. } 0,0068 \% \text{ v. } p \text{ /}^\circ\text{C} = 0,000014 \text{ mbar/}^\circ\text{C} = \text{Sensitivitätskoeffizient } c_i$$

(Hinweis: Dieser Unsicherheitsanteil hat keinen Korrekturanteil, ergibt aber einen Beitrag zur Messunsicherheit.)

$u_{K,V}$  Unsicherheitsanteil, bedingt durch die hydrostatische Druckdifferenz bei unterschiedlicher Höhe der Anschlussflansche:

$\Delta p$	=	$p \cdot g \cdot h$	Einheit
	=	$1,27 \cdot 10^{-3} \cdot (p \text{ / mbar}) \cdot 9,81 \cdot (h \text{ / m})$	$\text{kg m}^{-3} \text{ m s}^{-2} \text{ m}$
	=	$1,2 \cdot 10^{-2} \cdot (p \text{ / mbar}) \cdot (h \text{ / m})$	$\text{kg m s}^{-2} \text{ m}^{-2}$
	=	$1,2 \cdot 10^{-2} \cdot (p \text{ / mbar}) \cdot (h \text{ / m})$	$\text{N m}^{-2}$
	=	$1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (p \text{ / mbar}) \cdot (h \text{ / m})$	$\text{Pa} \cdot 0,01 \text{ mbar / Pa}$
	=	$1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (p \text{ / mbar}) \cdot (h \text{ / m})$	mbar

mit

$$p = p_0 \cdot p/p_0 = 1,2929 \text{ kg m}^{-3} \cdot p \text{ / } 1013 \text{ mbar} = 1,27 \cdot 10^{-3} \cdot (p \text{ / mbar}) \text{ kg m}^{-3}$$

$$\text{mit } p_0 = 1,2929 \text{ kg m}^{-3} \text{ (273,15 }^\circ\text{K; 1013,25 mbar)}$$

(Hinweis: Bei der Berechnung von  $\Delta p$  muss der Druck  $p$  in mbar und die Höhe  $h$  in m eingesetzt werden. Der resultierende Zahlenwert für  $\Delta p$  ist dann in mbar angegeben.)

Der Sensitivitätskoeffizient  $c_i = p \cdot g = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (p \text{ / mbar}) \text{ mbar m}^{-1}$ . Bei einem Messdruck von 0,2 mbar ist der Sensitivitätskoeffizient  $c_i = 0,000024 \text{ mbar/ m}$ .

Die Unsicherheit der Höhendifferenz beträgt 0,01 m.

$u_{M,V}$  Unsicherheitsanteil der Abweichungen, die auf die Messmethodik zurückzuführen sind. Bei einer Leckrate von  $5 \cdot 10^{-6} \text{ mbar} \cdot \text{l/s}$  steigt der Druck im Kessel (20 l) in 20 s um  $5 \cdot 10^{-6} \text{ mbar}$  an. Diese Druckänderung wird nicht als Korrektur verwendet, sondern nur als Beitrag zur Messunsicherheit.

**Messunsicherheitsbudget für ein Wärmeleitungs-Vakuummeter bei einem Kalibrierdruck von 0.2 mbar**

Größe	Schätzwert	Breite der Verteilung	Verteilung <sup>*)</sup>	Teiler	Unsicherheit	Sensitivitätskoeffizient	Unsicherheitsbeitrag	Index	
$X_i$	$x_i$	$2a$			$u(x_i)$	$c_i$	$u_i(y)$		
	mbar						mbar	%	
$p_{\text{Anz,N}}$	0,20077	2,00E-05 mbar	R	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-06 mbar	1,0	5,77E-06	0,0	
$p_{\text{Offs,N}}$	0	2 °C	R	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-01 °C	4,0E-06 mbar/°C	2,31E-06	0,0	
$\delta p_{\text{D,N}}$	0	6,00E-06 mbar	R	$2 \cdot \sqrt{3}$	1,73E-06 mbar	1,0	1,73E-06	0,0	
$\delta p_{\text{Cal,N}}$	-0,00156	6,00E-04 mbar	N	2	3,00E-04 mbar	1,0	3,00E-04	0,5	
$\delta p_{\text{L,N}}$	0	0,0007 mbar	R	$2 \cdot \sqrt{3}$	2,02E-04 mbar	1,0	2,02E-04	0,2	
$\delta p_{\text{T,N}}$	0	2 °C	R	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-01 °C	2,0E-06 mbar/°C	1,15E-06	0,0	
$\delta p_{\text{S,N}}$	0	0					0	0,0	
<b><math>p_{\text{N}}</math></b>	<b>0,19921</b>						<b>0,00036</b>	<b>0,8</b>	
$p_{\text{Anz,KG}}$	0,200	0,004 mbar	N	2	2,00E-03 mbar	1,0	2,00E-03	24,3	
$p_{\text{Offs,KG}}$	0	2,00E-03 mbar	R	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-04 mbar	1,0	5,77E-04	2,0	
$\delta p_{\text{D,KG}}$	0	0,0002 mbar	R	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-05 mbar	1,0	5,77E-05	0,0	
$\delta p_{\text{T,KG}}$	0	2 °C	R	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-01 °C	6,0E-03 mbar/°C	3,46E-03	72,9	
<b><math>p_{\text{KG}}</math></b>	<b>0,200</b>						<b>0,0040</b>	<b>99,2</b>	
$\delta_{\text{T,V}}$	0	0,02 °C	R	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-03 °C	1,4E-05 mbar/°C	8,083E-08	<b>0,0</b>	
$\delta p_{\text{K,V}}$	0	0,02 m	R	$2 \cdot \sqrt{3}$	5,77E-03 m	2,4E-05 mbar/m	1,386E-07	<b>0,0</b>	
$\delta p_{\text{M,V}}$	0	5,00E-06 mbar	R	$2 \cdot \sqrt{3}$	1,44E-06 mbar	1,0	1,443E-06	<b>0,0</b>	
<b><math>\delta p_{\text{V}}</math></b>	<b>0</b>						<b>0,00000</b>	<b>0,0</b>	
<b><math>\Delta p</math></b>	<b>0,00079</b>	<b>Erweiterte Messunsicherheit <math>U = k \cdot u</math> (<math>k = 2</math>):</b>						<b>0,0080</b>	<b>100,0</b>

<sup>\*)</sup> R = Rechteckverteilung  
N = Normalverteilung

**Ergebnis:**

Die Messabweichung des Kalibriergegenstandes beträgt somit:

$$\Delta p = 0,00079 \text{ mbar} \pm 0,0080 \text{ mbar}$$

Anmerkung: Die in der Spalte Index angegebenen Werte stellen den prozentualen Anteil der Teilmessunsicherheiten an der Gesamtmessunsicherheit dar und veranschaulichen die Gewichtung der einzelnen Einflussgrößen. Ihre Berechnung ist nicht vorgeschrieben, sie zeigt jedoch, wo sinnvollerweise angesetzt werden muss, wenn Wege zur Minderung der Messunsicherheit gesucht werden.

	Kalibrieren von Messmitteln für Vakuum Teil 2: Messunsicherheiten <a href="https://doi.org/10.7795/550.20180828AK">https://doi.org/10.7795/550.20180828AK</a>	DKD-R 6-2 Teil 2	
		Ausgabe:	09/2018
		Revision:	0
		Seite:	17/17

## Literaturhinweise

Grundlage der Messunsicherheitsbetrachtung sind folgende Dokumente:

### ISO:

*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*  
1<sup>st</sup> Edition 1993, ISO, Genève, CH, ISBN 92-67-10188-9

### DIN V ENV 13005

*Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen*  
Deutsche Fassung ENV 13005:1999

### EA-4/02:

*Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*  
December 1999

### DAkKS-DKD-3:

*Angabe der Messunsicherheiten bei Kalibrierungen*  
DAkKS, 1. Neuauflage 2010, Deutsche Fassung der Publikation EA-4/02: *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*

### DAkKS-DKD-3-E1: Ergänzung 1

*Angabe der Messunsicherheiten bei Kalibrierungen, Beispiele*  
DAkKS 1. Neuauflage 2010, Deutsche Fassung der Publikation EA-4/02-S1: *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, Examples*

### DIN 1319-3:

*Grundlagen der Messtechnik, Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Messgröße, Messunsicherheit*, 1996

Weitere Normen und Literaturhinweise enthält Teil 1 Grundlagen.