

Physikalisch- Technische Bundesanstalt



Expertenbericht Rückführung von **DKD-E 4-1** Gewindemessgrößen

Ausgabe 09/2022

<https://doi.org/10.7795/550.20220914>



| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|
|  | Rückführung von Gewindemessgrößen https://doi.org/10.7795/550.20220914 | DKD-E 4-1 | |
| | | Ausgabe: | 09/2022 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 2 / 42 |

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 592-8021

Internet: www.dkd.eu

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|
|  | Rückführung von Gewindemessgrößen https://doi.org/10.7795/550.20220914 | DKD-E 4-1 | |
| | | Ausgabe: | 09/2022 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 3 / 42 |

Zitiervorschlag für die Quellenangabe:

Expertenbericht DKD-E 4-1 Rückführung von Gewindemessgrößen, Ausgabe 09/2022, Revision 0, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig und Berlin.

DOI: 10.7795/550.20220914

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: Marlen Krause, Achim Wedmann, Martin Stein;
Physikalisch Technische Bundesanstalt, Braunschweig

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

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|
|  | Rückführung von Gewindemessgrößen https://doi.org/10.7795/550.20220914 | DKD-E 4-1 | |
| | | Ausgabe: | 09/2022 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 4 / 42 |

Vorwort

DKD-Expertenberichte verfolgen das Ziel, Hintergrundinformationen und Hinweise zu geben, die im Zusammenhang mit anderen DKD-Dokumenten stehen, wie z. B. den DKD-Richtlinien, jedoch z. T. weit darüber hinausgehen. Sie ersetzen die originären DKD-Dokumente nicht, geben jedoch zahlreiche wissenswerte Zusatzinformationen. In den Expertenberichten wird nicht notwendigerweise in allen Details die Sichtweise des Vorstands oder der Fachausschüsse des DKD wiedergegeben.

Die DKD-Expertenberichte sollen wesentliche Aspekte aus dem Bereich des Kalibrierwesens darstellen und durch die Publikation im Rahmen des DKD der großen Gemeinschaft der Kalibrierlaboratorien national und international zugänglich gemacht werden.

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|
|  | Rückführung von Gewindemessgrößen https://doi.org/10.7795/550.20220914 | DKD-E 4-1 | |
| | | Ausgabe: | 09/2022 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 5 / 42 |

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Einleitung | 6 |
| 2 | Anwendungsbereich | 7 |
| 3 | Bestimmungsgrößen am Gewinde | 7 |
| 4 | Übersicht der gebräuchlichen Messverfahren..... | 11 |
| 4.1 | Dreidraht- und Zweikugelmethode..... | 11 |
| 4.2 | Tastschnittverfahren..... | 13 |
| 4.3 | 3D-Messverfahren..... | 15 |
| 4.4 | Optische Messverfahren | 16 |
| 4.5 | Empfehlungen zum Kalibrierumfang..... | 17 |
| 5 | Messunsicherheit | 18 |
| 5.1 | Einflussgrößen | 18 |
| 5.1.1 | Einflüsse am Längenmessgerät: Dreidraht- und Zweikugelmethode (1D) | 19 |
| 5.1.2 | Einflüsse am Konturenmessgerät: Tastschnittverfahren (2D)..... | 25 |
| 5.1.3 | Einflüsse am Koordinatenmessgerät: Zweikugelmethode (1D) kombiniert mit Profilsan (2D) | 26 |
| 5.1.4 | Einflüsse am Koordinatenmessgerät: 3D-Messverfahren mit Drehtisch | 27 |
| 5.2 | Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit..... | 28 |
| 6 | Rückführung und Normale..... | 31 |
| 6.1 | Allgemeines | 31 |
| 6.2 | Hilfsmittel zur Kalibrierung..... | 32 |
| 6.2.1 | Rückführung Gewindemessdrähte | 32 |
| 6.2.2 | Rückführung Doppelkugeltaster | 32 |
| 6.3 | Rückführung der Messgeräte zur Gewindekalibrierung | 35 |
| 6.3.1 | Längenmessgeräte | 35 |
| 6.3.2 | Konturenmessgeräte | 35 |
| 6.3.3 | Dreidimensionale Koordinatenmessgeräte | 36 |
| 6.4 | Aufgabenspezifische Rückführung mittels Substitutionsnormalen | 36 |
| 6.5 | Empfehlungen für Rekalibrierfristen von Bezugsnormalen und Hilfsmitteln | 37 |
| 7 | Maßnahmenkatalog für Kalibrierlaboratorien | 38 |
| 8 | Literaturverzeichnis | 40 |

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|
|  | Rückführung von Gewindemessgrößen https://doi.org/10.7795/550.20220914 | DKD-E 4-1 | |
| | | Ausgabe: | 09/2022 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 6 / 42 |

1 Einleitung

In der Qualitätssicherung der Gewindeproduktion spielt die Messtechnik eine wesentliche Rolle. Während die Prüfung von Werkstückgewinden typischerweise durch Lehren erfolgt, müssen die verwendeten Lehrdorne und -ringe zuvor mit geeigneten Messverfahren kalibriert werden. Die Kalibrierung von Gewindelehren geschieht in Deutschland in derzeit 47 für Gewindemessgrößen durch die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS) akkreditierten Kalibrierlaboratorien. Diese Laboratorien wiederum führen ihre Messungen über Bezugsnormale auf nationale Normale der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) oder anderer Nationaler Metrologieinstitute (NMI) zurück, die über primäre Messverfahren direkt an den Meter, die Einheit der Länge im internationalen Einheitensystem (SI), angeschlossen sind. Das Prinzip dieser ununterbrochenen Kette von Vergleichsmessungen mit jeweils bekannter Messunsicherheit wird als Rückführung bezeichnet und ist ein zentraler Bestandteil der Qualitätsinfrastruktur (Abbildung 1).

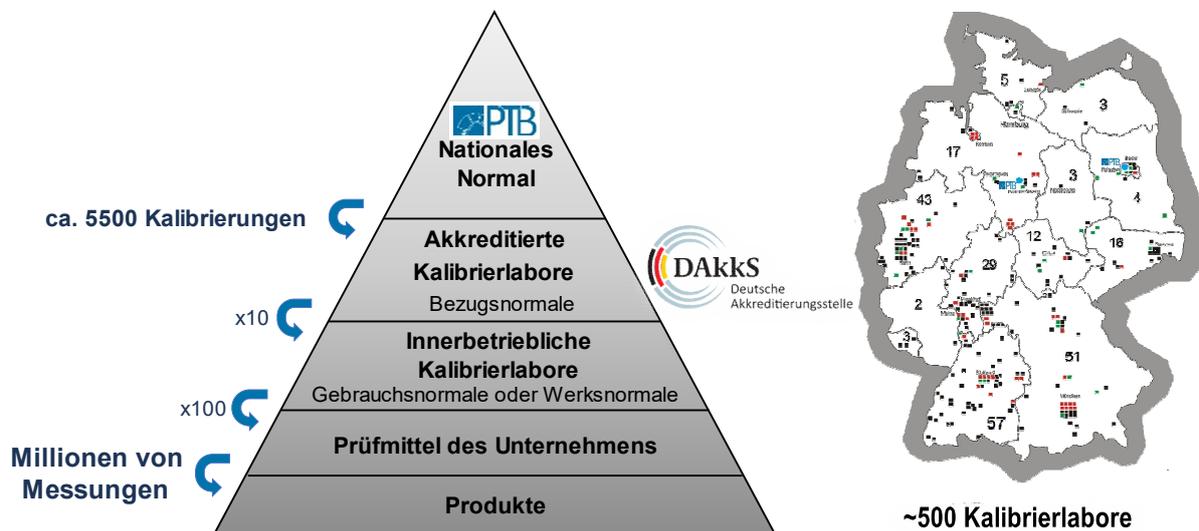


Abbildung 1: Die Kalibrierpyramide illustriert insbesondere das Zusammenwirken von DAkkS und PTB als Teil der nationalen Qualitätsinfrastruktur

Die seitens der Industrie stets wachsende Forderung nach genauerer Messtechnik zur Sicherstellung einer steigenden Produktionsqualität mit immer kleineren Fertigungstoleranzen hat auch in der Gewindemesstechnik in den vergangenen Dekaden zur Entwicklung innovativer Messverfahren geführt. So werden etablierte Methoden wie das Dreidraht- bzw. Zweikugelverfahren mittlerweile vielerorts durch Tastschnittverfahren und Koordinatenmessungen ergänzt. Darüber hinaus existieren Ansätze auf der Grundlage optischer oder anderer berührungsloser Sensoren. Die Vielfalt der verfügbaren Messverfahren verlangt dabei in besonderer Weise nach Harmonisierung, weil sichergestellt werden muss, dass verschiedene Methoden vergleichbare Messergebnisse liefern. Dabei stellt sich heraus, dass die Schwierigkeiten bereits bei der Definition von Bestimmungsgrößen anfangen, die für alle Messverfahren gleichermaßen eindeutig und zugänglich sein müssen [1].

Die messtechnischen Grundlagen und Prüfanweisungen für zylindrische Gewindedorne und -ringe sind in den Richtlinien VDI/VDE/DGQ 2618 Blatt 4.8 und 4.9:2006-04 beschrieben [2][3]. Eine ausführliche Darstellung der Vorgehensweise zur Bestimmung des Flankendurchmessers mit der Dreidraht- bzw. Zweikugelmethode nach Berndt [4] sowie Kochsiek und Lerch [5] findet sich im europäischen Leitfaden EURAMET cg-10:2012-12 [6]. Die genannten Richtlinien sind in ihrer Anwendung explizit auf zylindrische Gewinde

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|
|  | Rückführung von Gewindemessgrößen https://doi.org/10.7795/550.20220914 | DKD-E 4-1 | |
| | | Ausgabe: | 09/2022 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 7 / 42 |

beschränkt. Außerdem enthalten sie eher technische Details zur Messung und Berechnung der Bestimmungsgrößen als grundsätzliche Aussagen zur Realisierung einer zuverlässigen und aufgabenspezifischen Rückführung.

Die Norm ISO/IEC 17025 ist der weltweit gültige Standard für die Akkreditierung von Prüf- und Kalibrierlaboratorien und legt allgemeine Anforderungen zur Qualitätssicherung fest. Die deutsche Ausgabe der revidierten Fassung DIN EN ISO/IEC 17025:2018-03 ist spätestens seit dem 1. Juli 2021 bindend für DAkkS-Akkreditierungen. Zur Sicherstellung der Validität von Messergebnissen schreibt die Norm insbesondere in Abschnitt 7.7.2 die Teilnahme an Vergleichsmessungen mit anderen Laboratorien vor [7].

Ein umfangreicher Ringvergleich für Gewindemessgrößen wurde zuletzt vom Fachausschuss *Länge* im Deutschen Kalibrierdienst (DKD) organisiert und fand im Zeitraum Juni 2016 bis März 2017 mit 20 teilnehmenden Laboratorien statt. Der Vergleichsbericht ist im Dezember 2017 erschienen und dokumentiert die Messergebnisse an je zwei metrischen Gewindelehndornen und -ringen [8]. Zusammenfassend waren von insgesamt 711 Einzelergebnissen 110 Ergebnisse nicht zufriedenstellend im Sinne von DIN EN ISO/IEC 17043:2010-05 und verursachten demnach eine „Meldung zum Handeln“ [9]. Es ist nicht zuletzt dieser Ringvergleich, dessen Resultat Anlass für eine umfassende Behandlung des Themas Rückführung bei Gewindekalibrierungen gibt.

Der vorliegende Bericht soll einen vertiefenden Überblick über die Anforderungen geben, die an verlässliche und rückgeführte Gewindemessungen gestellt werden müssen, um die Vergleichbarkeit sowohl zwischen verschiedenen Laboratorien als auch bei Verwendung unterschiedlicher Messverfahren sicherzustellen. Dafür werden zunächst der Anwendungsbereich festgelegt und die wichtigsten Bestimmungsgrößen an Gewinden zusammengefasst. Kapitel 4 gibt eine Übersicht der derzeit im Kalibrierwesen verbreiteten Messverfahren. Im 5. Kapitel werden die Messunsicherheitseinflüsse je nach verwendetem Verfahren beschrieben sowie verschiedene Methoden zu ihrer Ermittlung diskutiert. Das Thema Rückführung und die damit verbundenen Anforderungen an Messgeräte und -mittel wird in Kapitel 6 erörtert. Schließlich werden im 7. Kapitel im Rahmen eines Maßnahmenplans ganz konkrete Handlungsempfehlungen für die praktische Anwendung in Kalibrierlaboratorien aufgelistet.

2 Anwendungsbereich

Dieser Bericht gilt für ein- und mehrgängige zylindrische und kegelige Gewindedorne und -ringe mit geradlinigen Flanken und positiven Flankenwinkeln.

3 Bestimmungsgrößen am Gewinde

Im Umgang mit einigen Bestimmungsgrößen an Gewinden kommt es erfahrungsgemäß immer wieder zu Missverständnissen. So ist z. B. die Bedeutung der verschiedenen Flankendurchmesserkonzepte schwer verständlich. Auch die Begriffe Steigung und Teilung werden oft ungenau verwendet. Dabei ist ein solides Verständnis dieser Größen eine der wichtigsten Voraussetzungen für die zuverlässige Kalibrierung eines Gewindes. Die wesentlichen Begriffe zur Gewindekalibrierung sind in Tabelle 1 aufgelistet und in Abbildung 2 am Beispiel eines eingängigen Außengewindes dargestellt.

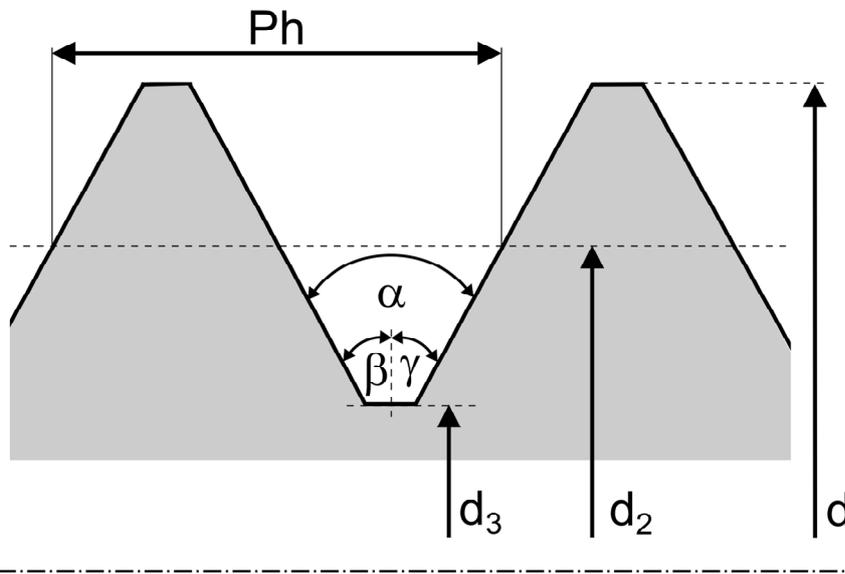


Abbildung 2: Bestimmungsgrößen am eingängigen Außengewinde gemäß DIN 2244:2002-05

Tabelle 1: Bestimmungsgrößen am Gewinde gemäß DIN 2244:2002-05

| Bestimmungsgröße | Symbol |
|------------------------------|-----------------------------|
| | Außengewinde / Innengewinde |
| Flankendurchmesser | d_2 / D_2 |
| einfacher Flankendurchmesser | d_{2s} / D_{2s} |
| Paarungsflankendurchmesser | d_{2P} / D_{2P} |
| Außendurchmesser | d / D_4 |
| Kerndurchmesser | d_3 / D_1 |
| Teilung | P |
| Steigung | Ph |
| Gewindeprofilwinkel | α |
| Gewindeflankenwinkel | β, γ |

Die Begriffe und Bestimmungsgrößen für zylindrische Gewinde mit aus Dreiecken abgeleiteten Profilen sind in der DIN 2244:2002-05 [10] aufgeführt. Auf internationaler Ebene bildet die ISO 5408:2009-06 [11] das Gegenstück. Hier werden Begriffe für zylindrische und kegelige Gewinde mit symmetrischen und unsymmetrischen Profilen definiert. In Deutschland ist die DIN 2244:2002-05 vorrangig gültig, jedoch werden hier die kegeligen Gewinde bislang nicht berücksichtigt. Die Symbole aus der Tabelle 1 entsprechen weitestgehend denen in der ISO-Norm, lediglich für die Gewindeflankenwinkel werden dort β_1 und β_2 verwendet. Im Folgenden wird auf deren Bedeutung und die Unterschiede der Normen eingegangen.

Die letzte Überarbeitung der DIN 2244 fand im Jahr 2002 statt und ersetzte die Version von 1977. Es wurden Gewindepassungen, -toleranzen und -abweichungen hinzugefügt. Einige Grundbegriffe wurden ergänzt und Symbole geändert, manche Begriffe wurden in Einklang zur ISO 5408:1983 gebracht. Eine wesentliche Änderung betraf die Aufgliederung der

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|
|  | Rückführung von Gewindemessgrößen https://doi.org/10.7795/550.20220914 | DKD-E 4-1 | |
| | | Ausgabe: | 09/2022 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 9 / 42 |

Gewindeachse in die Achse des einfachen Flankendurchmessers, die Achse des Flankendurchmessers und die Achse der Schraubenlinie mit jeweils eigenen Definitionen. Dies ermöglicht eine genauere Beschreibung der zu kalibrierenden Größen, bringt aber gleichzeitig eine größere Fülle an Begriffen mit sich, die das Verständnis erschweren. Der Hintergrund war die Erkenntnis, dass die ursprüngliche Gewindeachse für wirkliche Gewinde ungenügend definiert war [10].

Neben den vorgenannten Bestimmungsgrößennormen spielt für die Nomenklatur in der Gewindemetrologie die europäische Kalibrierrichtlinie EURAMET cg-10 eine entscheidende Rolle [6]. Die dort erstmals formulierten fünf unterschiedlichen Kalibrieroptionen sind in nationale Richtlinien wie [2] und [3] übernommen worden und bilden heute die wesentliche Grundlage für die Arbeit von Kalibrierlaboratorien. Diese Kalibrieroptionen sollen einen messtechnischen Zusammenhang zu den geometrisch definierten Bestimmungsgrößen, insbesondere den unterschiedlichen Konzepten des Flankendurchmessers, herstellen. Die Übereinstimmung der Größen, die sich durch die Festlegung der Mess- bzw. Auswertbedingungen in der EURAMET cg-10 ergeben, mit den rein geometrisch definierten Bestimmungsgrößen aus DIN 2244 bzw. ISO 5408 ist jedoch zumindest in einigen Fällen fraglich. Das wird allein dadurch deutlich, dass die EURAMET cg-10 fünf Optionen für die Auswertung von nur drei Bestimmungsgrößen definiert. In der Konsequenz geben DAkkS-akkreditierte Kalibrierlaboratorien und NMI in Kalibrierscheinen und Vergleichsberichten explizit die verwendete Option nach EURAMET cg-10 bzw. [2] oder [3] an, da der reine Bezug zu geometrisch definierten Bestimmungsgrößen keine Vergleichbarkeit gewährleistet [12].

Um die Schwierigkeiten zu verdeutlichen, werden die drei in DIN 2244 und ISO 5408 definierten Flankendurchmesserkonzepte kurz gegenübergestellt.

- Der **einfache Flankendurchmesser** d_{2s} / D_{2s} ist nach DIN 2244 der Durchmesser des geometrisch-idealen Kreiszylinders, dessen Mantellinien das Gewinde so schneiden, dass die Abschnitte in den Gewindelücken gleich der halben Teilung sind.
- Der **Flankendurchmesser** d_2 / D_2 ist nach DIN 2244 der Durchmesser eines geometrisch-idealen Kreiszylinders, dessen Mantellinien das Gewinde so schneiden, dass die durch eine Gewindelücke und einen benachbarten Gewindezahn desselben Gewingeganges gebildeten Abschnitte der Mantellinie gleich lang sind.
- Der **Paarungsflankendurchmesser** d_{2p} / D_{2p} ist gemäß DIN 2244 der Flankendurchmesser eines geometrisch-idealen Gewindes, das sich im Bereich der Gewindeflanken spielfrei gerade noch mit dem Werkstückgewinde auf einer definierten Einschraublänge verschrauben lässt.

Für geometrisch-ideale Gewinde fallen alle drei Begriffe zusammen. Bei wirklichen Gewinden ergeben sich aber im Allgemeinen drei verschiedene Werte.

Beim einfachen Flankendurchmesser wird nur in der Lücke gemessen und deren Weite mit dem Nominalwert der Teilung verglichen¹. Die EURAMET cg-10 unterscheidet zusätzlich, ob für den Gewindepfildwinkel der Nominalwert (Option 1a) oder der Messwert (aus einer zusätzlichen Messung) verwendet wird (Option 1b).

¹ Im Wortlaut der DIN 2244 ist von der Teilung die Rede. Gemeint ist aber die Nennteilung, also ihr Nominalwert. Anderenfalls wären einfacher Flankendurchmesser und Flankendurchmesser stets identisch. Siehe dazu auch [1].

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|
|  | Rückführung von Gewindemessgrößen https://doi.org/10.7795/550.20220914 | DKD-E 4-1 | |
| | | Ausgabe: | 09/2022 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 10 / 42 |

Der Flankendurchmesser berücksichtigt stattdessen den Istwert der Teilung, der folglich aus einer zusätzlichen Messung bestimmt werden muss. Wieder unterscheidet die EURAMET cg-10, ob für den Gewindeprofilwinkel der Nominalwert (Option 2a) oder der Messwert (aus einer zusätzlichen Messung) verwendet wird (Option 2b).

Der Paarungsflankendurchmesser hebt sich in seiner Definition am deutlichsten von den anderen beiden Größen ab. Anstelle der Betrachtung gewisser Abstände im jeweiligen Achsschnitt des Gewindes wird hier die Paarungsfähigkeit mit einem ideal-geometrischen Gegengewinde als Bedingung formuliert. Das macht den Paarungsflankendurchmesser einerseits zu einer sehr aussagekräftigen Größe, da seine Angabe allein ausreicht, um die Paarungsfähigkeit mit einem anderen Gewinde zu beschreiben. Andererseits erweist sich der Paarungsflankendurchmesser als die aus messtechnischer Sicht herausforderndste Größe am Gewinde. Eine definitionsgemäße Bestimmung (im Sinne von DIN 2244 bzw. ISO 5408) erfordert die flächenhafte Messung der gesamten Gewindeflanken sowie eine mathematisch aufwändige Bestimmung des zugehörigen Hüll- bzw. Pferchgewindes.

Zur Bestimmung des nach EURAMET cg-10 „definierten“ Paarungsflankendurchmessers müssen zusätzlich zu den in Option 2b angegebenen Größen beide Teilflankenwinkel gemessen werden, um eine mögliche Asymmetrie des Gewindeprofils zu berücksichtigen. Außerdem müssen zwei Korrekturbeträge addiert werden, die den Abweichungen der Steigung und der Winkel von ihren Nennwerten Rechnung tragen. Die Übereinstimmung der so ermittelten Größe mit dem in DIN 2244 bzw. ISO 5408 definierten Paarungsflankendurchmesser ist allenfalls näherungsweise gegeben. Der Vorteil der EURAMET-cg-10-Definition ist jedoch die vergleichsweise einfache messtechnische Ermittlung und die Schaffung einer Basis für die Vergleichbarkeit von Messergebnissen.

Neben den verschiedenen Flankendurchmesserkonzepten sollen hier die unterschiedlichen Begriffe für Steigung Ph und Teilung P am Gewinde im messtechnischen Zusammenhang betrachtet werden. Leider werden diese beiden Begriffe häufig vermischt, was auch von einigen Unsauberkeiten, mindestens aber didaktisch fragwürdigen Anmerkungen, in den Bestimmungsgrößennormen herrührt. So gestattet die DIN 2244 in einer Fußnote zur Definition 3.3.18 *Steigung Ph* explizit, bei eingängigen Gewinden das Symbol P anstelle von Ph für die Steigung zu verwenden. Im Grunde beschreiben Steigung und Teilung jedoch ganz unterschiedliche Merkmale des Gewindes. Die Steigung ist eine individuelle Eigenschaft jeder einzelnen Flanke des Gewindes, während die Teilung die Lage zweier benachbarter Flanken zueinander beschreibt. Da die Begriffe für eingängige Gewinde offenbar zusammenfallen, ist die Angabe einer Teilung eigentlich nur für mehrgängige Gewinde sinnvoll.

Zur Illustration zeigt Abbildung 3 ein dreigängiges Außengewinde. Hier wird der Unterschied zwischen den beiden Größen deutlich. Die Bezeichnungen Ph_i und $P_{j,k}$ sind derzeit nicht normkonform, denn die DIN 2244 enthält in der aktuellen Version keine Vorgaben für die Zählweise.

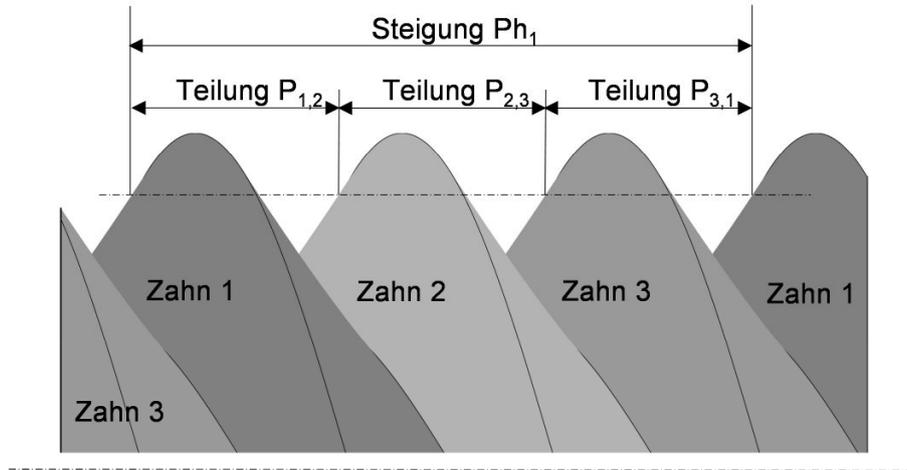


Abbildung 3: Teilung und Steigung am dreigängigen Außengewinde. Dargestellt sind die Größen exemplarisch jeweils nur für eine Flankenrichtung. Für die anders gerichteten Flanken ergeben sich entsprechend zusätzliche Bestimmungsgrößen.

Bei Messungen in Zweiflankenanlage auf Koordinatenmessgeräten (KMG) bzw. bei simulierter Zweiflankenanlage aus Tastschnittmessungen (siehe Kapitel 4.2) werden typischerweise die Größen Zweiflankensteigung und Zweiflankenteilung ermittelt (siehe [10], 3.3.17 und 3.3.19). Da diese Größen explizit als Bestimmungsgrößen in DIN 2244 und ISO 5408 definiert sind, sollten sich die Angaben bei Kalibrierungen und Vergleichsmessungen auch darauf beziehen, um Missverständnisse zu vermeiden.

4 Übersicht der gebräuchlichen Messverfahren

In diesem Abschnitt werden die meistgenutzten Methoden zur Kalibrierung von Gewinden vorgestellt. Die Erläuterungen dienen als Grundlage zur Diskussion der jeweiligen Messunsicherheitseinflüsse und Rückführungsnachweise in den Kapiteln 5 und 6.

4.1 Dreidraht- und Zweikugelmethode

Sowohl die Dreidrahtmethode als auch die Zweikugelmethode finden vorzugsweise auf Längenkomparatoren Anwendung. Die Dreidrahtmethode ist nur zur Messung von Außengewinden (Lehrdornen) geeignet. Es wird das Prüfmaß m gemessen, das zur Berechnung des Flankendurchmessers benötigt wird. Die Drähte sind zumeist aus Hartmetall (Lehrenstahl) oder seltener auch aus Keramik gefertigt und werden jeweils zu drei Drähten mit möglichst gleichem Durchmesser verwendet. Dabei werden zwei Vorgehensweisen unterschieden. Zum einen werden die Drähte frei hängend verwendet, zum anderen werden sie in Aufsteckhaltern mit Aufnahmebohrung zur Befestigung auf dem Messbolzen von Längenkomparatoren angeboten. In beiden Fällen muss darauf geachtet werden, dass jeder der Drähte an jeweils beiden Gewindeflanken anliegt (siehe Abbildung 4).

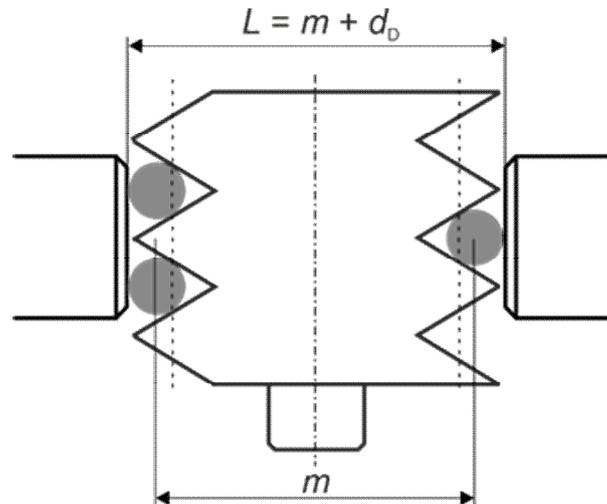


Abbildung 4: Messung Prüfmaß m an einem eingängigen Außengewinde mittels Dreidrahtmethode

Bei Verwendung eines Halters ist es wichtig, dass die Drähte frei beweglich sind und nicht im Halter klemmen. Es werden auf einer Seite zwei Drähte und gegenüberliegend ein Draht in die Gewindelücken des gleichen Gewindeganges eingelegt, so dass beim Messen keine Querkräfte auftreten. Der Durchmesser der Messdrähte muss so gewählt werden, dass die Gewindeflanken möglichst nahe am nominellen Flankendurchmesser angetastet werden. Der optimale Drahtdurchmesser d_o wird durch die folgende Gleichung (1) ermittelt (siehe [6]):

$$d_o = \frac{P}{2 \cdot \cos \alpha / 2} \quad (1)$$

Je größer die Differenz zwischen Ist-Drahtdurchmesser und dem optimalen Drahtdurchmesser ist, desto ungenauer ist die Bestimmung des Flankendurchmessers. Das hat eine Erhöhung der Messunsicherheit zur Folge (siehe Kapitel 5). Mit einer definierten Messkraft des Längenkomparators wird das Maß über die Messdrähte L in zwei Achsschnitten (A-B und C-D) und je nach Länge des Gewindes in mindestens zwei Ebenen entlang der Gewindeachse gemessen. Diese Messstrategie ist auch in der VDI 2618 Blatt 4.8 beschrieben [2]. Das Prüfmaß m , das als Abstand der Mittelpunkte der Tastelemente (hier Messdrähte) definiert ist, wird aus jeder der gemessenen Länge L abzüglich des mittleren Drahtdurchmessers der drei Drähte d_D berechnet.

Mittels Software wird der Flankendurchmesser nach dem Berndt'schen Algorithmus ermittelt [4][6]. Zu beachten ist weiterhin, welcher der drei in [10] und [11] definierten Flankendurchmesser berechnet werden soll. Je nach Eingabe der nominellen oder gemessenen Werte für Steigung und Flankenwinkel kann der einfache Flankendurchmesser d_{2s} , der Flankendurchmesser d_2 oder der Paarungsflankendurchmesser d_{2p} berechnet werden (siehe Kapitel 3).

Die Zweikugelmethode wird zur Messung an Innengewinden verwendet. In der Koordinatenmesstechnik wird sie aber auch zur Messung von Außengewinden eingesetzt. Zur Auswahl der geeigneten Tastkugeldurchmesser ist analog zur Dreidrahtmethode wieder Gleichung (1) anzuwenden. Die zur Messung benötigten Doppelkugeltaster (auch Hanteltaster oder Zweikugeltaster genannt) bestehen aus einem senkrechten Schaft, der auf der einen Stirnseite zur Befestigung am Messsystem dient, und an dessen anderer Stirnseite seitlich auskragend ein Stift befestigt ist.

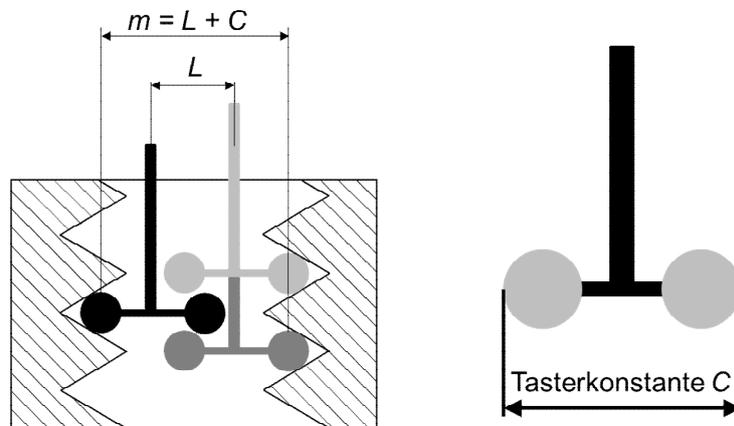


Abbildung 5: Messung des Prüfmaßes m an einem eingängigen Innengewinde nach Zweikugelmethode

An den Stiftenden ist beidseitig jeweils eine Kugel angebracht. Das Material der Kugeln ist in der Regel Rubin. Es können aber auch Stahl- oder diamantbeschichtete Kugeln verwendet werden. Der Abstand der beiden Kugeln bestimmt bei der Messung von Innengewinden die kleinste messbare Gewindegröße, wobei hier der Kerndurchmesser des Innengewindes berücksichtigt werden muss, um das Eintauchen des Doppelkugeltasters in den Gewindering zu ermöglichen. Der Abstand der beiden Kugeln wird Tasterkonstante C genannt und muss im Vorfeld der Messung am Gewinde über einen Einstellring oder ein Lückennormal eingemessen werden (siehe Kapitel 6). Des Weiteren müssen die Kugeln der Doppelkugeltaster in Durchmesser und Form kalibriert sein.

Wie auch bei den Außengewinden wird das Prüfmaß m gemessen und anschließend der Flankendurchmesser berechnet. Hierzu wird in einer Gewindelücke in der Zweiflankenanlage ein Messpunkt aufgenommen. Hier ist zu beachten, dass die antastende Kugel beide Gewindeflanken mit möglichst gleicher Messkraft berührt. Bei Übernahme des Messpunktes muss das System im Falle eines Längskomparators austariert und der Umkehrpunkt ermittelt worden sein. Diese Prozedur ist in der nächsten Gewindelücke desselben Gewindeganges auf derselben Seite und auf der gegenüberliegenden Seite zu wiederholen (siehe Abbildung 5). Das weitere Verfahren entspricht der Prozedur bei der Dreidrahtmethode.

4.2 Tastschnittverfahren

In der taktilen Oberflächenmesstechnik wird das Tastschnittverfahren zur Bestimmung von Rauheitskenngrößen sowie zur Messung von Konturen wie etwa Gewindeprofilen eingesetzt. Besagtes Verfahren erlaubt eine berührende 2D-Datenakquise mittels Tastarm und Tastspitze über zwei orthogonal zueinander ausgerichtete messende Achsen. Im Kontext der Gewindemesstechnik wird auch der Begriff „Gewindescanner“ verwendet.

In der Regel wird eine zu messende Kontur in Richtung der x -Achse des Messgerätes mit konstanter Geschwindigkeit abgetastet (siehe Abbildung 6). Aufgrund der sich ändernden z -Information des Profils führt der konstante x -Vorschub zu schwankenden Scanning-Geschwindigkeiten entlang des Profils. Bei gleichbleibender Samplingfrequenz resultiert dies zwar in gleichbleibenden Messpunktabständen in x -Richtung, jedoch nicht entlang des Profils. Für sehr steile Profilflanken sollte daher bei Bedarf die Samplingfrequenz erhöht, oder aber bei konstanter Samplingfrequenz der Vorschub in x -Richtung verringert werden, um eine ausreichende Messpunktdichte zu garantieren. Mittlerweile gibt es Konturenmessgeräte, die mit einer Entkopplung von x - und z -Achse ausgestattet sind, um gleichbleibende Messpunktabstände entlang des Profils zu gewährleisten.

Um Profilmessungen an Gewinden annähernd im Achsschnitt aufzunehmen, wird das zu charakterisierende Gewinde in einer Horizontal-Aufnahme fixiert. Wird z. B. ein Prismahalter eingesetzt, so wird die frontale Bezugsfläche des Halters gegen einen planaren Anschlag des Gewindescanners geschoben. Dieser Anschlag ist idealerweise wiederum planparallel zur yz-Ebene des Scanners ausgerichtet. Eine Achsparallelität von Gewindeachse und x-Achse des Scanners ist zwar wünschenswert jedoch hierdurch nicht zu garantieren (Verkipfung des Gewindes in Spannsystem, Formabweichung des Gewindes, ...).

Das eingespannte Gewinde wird nun im finalen Ausrichtungsschritt samt Spannsystem orthogonal zur Messebene des Scanners verfahren, bis die Gewindeachse und xz-Ebene des Scanners annähernd komplanar sind. Hierzu kann mithilfe einer zusätzlichen Achse (nicht-messend), die orthogonal auf der xz-Ebene des Scanners steht, der obere bzw. untere Umkehrpunkt des Gewindes ermittelt werden. Um auf Basis von 2D-Profilmessungen zudem Durchmessergrößen ableiten zu können, ist eine Messung von oben und unten mithilfe eines Tastarms mit zwei Tastspitzen erforderlich. Im Idealfall wird durch die beschriebene Ausrichtung nun bei Messung entlang der x-Achse auch entlang des Gewindezeits gemessen. In der Praxis kann dies durch eine Fehlausrichtung des Gewindes nie vollständig garantiert werden, sodass der ideale Gewinde-Achsschnitt nur angenähert werden kann.

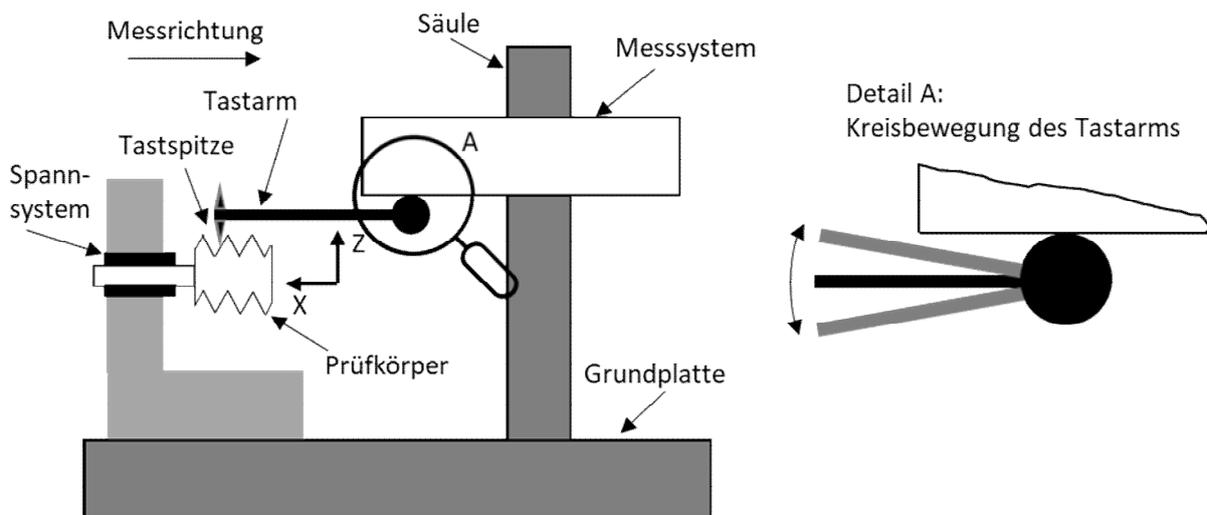


Abbildung 6: Messung eines eingängigen Außengewindes auf einem Tastschnittgerät

Die Messwertaufnahme erfolgt in der Regel über ein induktives Wegmesssystem, das das Profil des Messobjekts aufzeichnet. Bei vielen Tastschnittgeräten führt der Tastarm eine Kreisbewegung aus (siehe Abbildung 6). Sie ist von der Länge des Tastarms und von der Profilhöhe des Gewindes abhängig und muss in der Auswertesoftware des Messgerätes berücksichtigt werden. Aufgrund der Auf- und Abwärtsbewegung des Tasters spielt auch die Gleitreibung zwischen Tastspitze und Werkstück eine Rolle. Durch geeignete Wahl des Tastermaterials kann dieser Einfluss verringert werden. Die Tastspitzen werden beispielsweise aus Hartmetall, Diamant oder Keramik hergestellt und in verschiedenen Ausführungen angeboten. Je nach Anwendung werden Tastspitzen mit Radien zwischen $2\ \mu\text{m}$ für Rauheitsmessungen und bis zu $100\ \mu\text{m}$ für Konturmessungen gefertigt. Je nach Gewindeprofil kommen in der Gewindemesstechnik Kegelspitzen oder Tastspitzen mit einseitig abgeflachtem Kegel für kleine Flankenwinkel zum Einsatz. Die Tasterformabweichung und eine sich einstellende Tastarmbiegung durch Antastung werden auf Basis von Tastereinemessroutinen und geeigneten Radiuskorrekturfaktoren berücksichtigt. Durch Verschleiß der Tastspitze muss eine solche Einmessroutine regelmäßig durchgeführt werden.

4.3 3D-Messverfahren

In einer Projektarbeit mit Partnern aus Industrie und Kalibrierpraxis wurde in der PTB ein Mess- und Auswerteverfahren zur flächenhaften und ganzheitlichen Charakterisierung von wendelförmigen Geometrien, zu denen auch die Gewinde zählen, entwickelt. Dieses Verfahren ermöglicht die Beschreibung der Ist-Geometrie anhand eines parametrisierten Modells, aus denen die typischen Bestimmungsgrößen abgeleitet werden können. Zudem erhält man eine topografische Darstellung der Abweichungen entlang der gesamten Schraubenflächen. Das Ergebnis einer flächenhaften Messung mit fünf radial auf der Gewindeflanke verteilten Spuren ist in Abbildung 7 als 3D-Grafik und in Abbildung 8 als Abwicklung beispielhaft dargestellt.

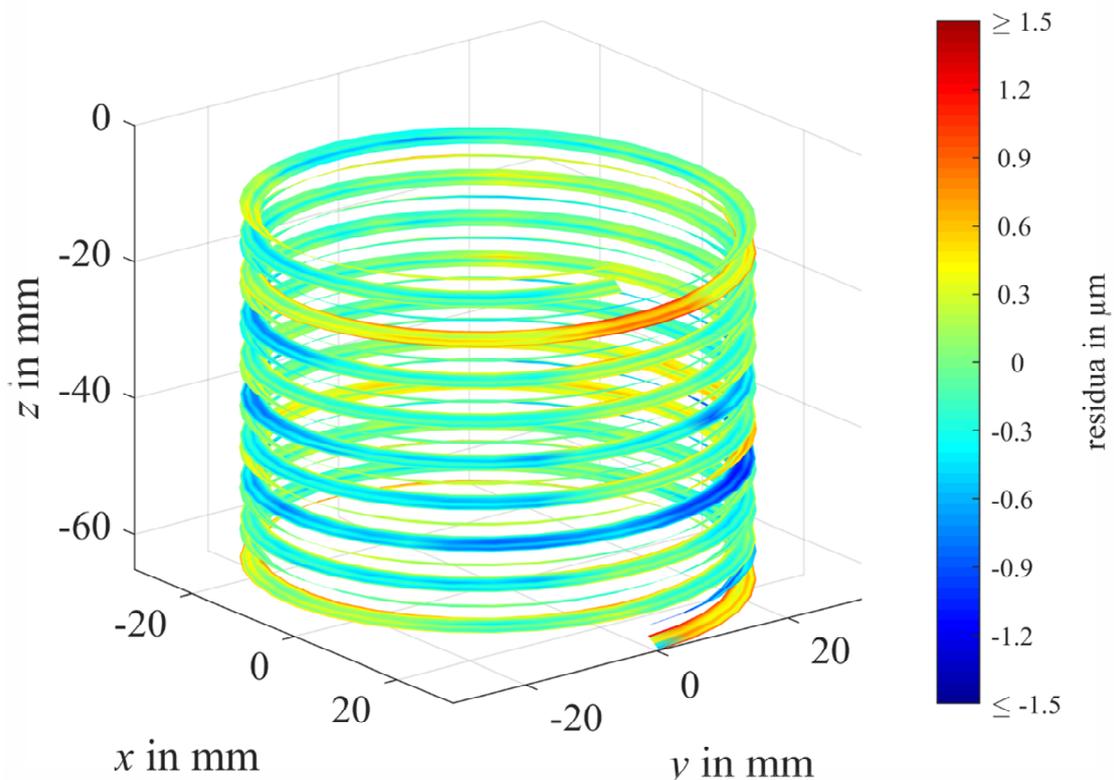


Abbildung 7: Darstellung des Ergebnisses einer flächenhaften Gewindemessung mit einem KMG

Die flächenhafte Erfassung der Gewindegeometrie benötigt allerdings eine erweiterte messtechnische Ausstattung. In Ergänzung zur ein- und zweidimensionalen Messung, bei denen Messgeräte mit lediglich einer bzw. zwei messenden Achsen eingesetzt werden, kommt bei der dreidimensionalen Messung eine dritte bzw. vierte messende Achse hinzu. Diese Achsen können translatorisch und oder rotatorisch (Drehtisch) sein.

Hierzu bieten sich universelle Koordinatenmessgeräte an, wobei bei diesen Koordinatenmessgeräten ein größerer Programmieraufwand erforderlich ist. Der Vorteil eines Drehtisches ist, dass die Schraubenfläche kontinuierlich abgescannt werden kann. Dadurch werden Informationen über den Verlauf der Steigung gewonnen, die beispielsweise periodische Steigungsfehler aufzeigen, die bei Messungen im Axialschnitt nicht zu erkennen sind. Werden die Messungen auf verschiedenen Radien durchgeführt, werden auch ausreichend Daten zur Bewertung der Gewindeflanke gewonnen. Hier gilt: Je mehr Messungen in radialer Richtung

durchgeführt werden, desto sicherer wird das Messergebnis der Geradheit der Gewindeflanke und auch des Flankenwinkels. Die Auswertung der Messdaten erfolgt über einen Algorithmus, der die parametrisierte Gewindegeometrie bestmöglich in die erfasste Messpunktewolke einpasst [13], [14]. Die Geometrieparameter dieses Bestfit-Elementes lassen sich dann in die Bestimmungsgrößen am Gewinde umrechnen [15].

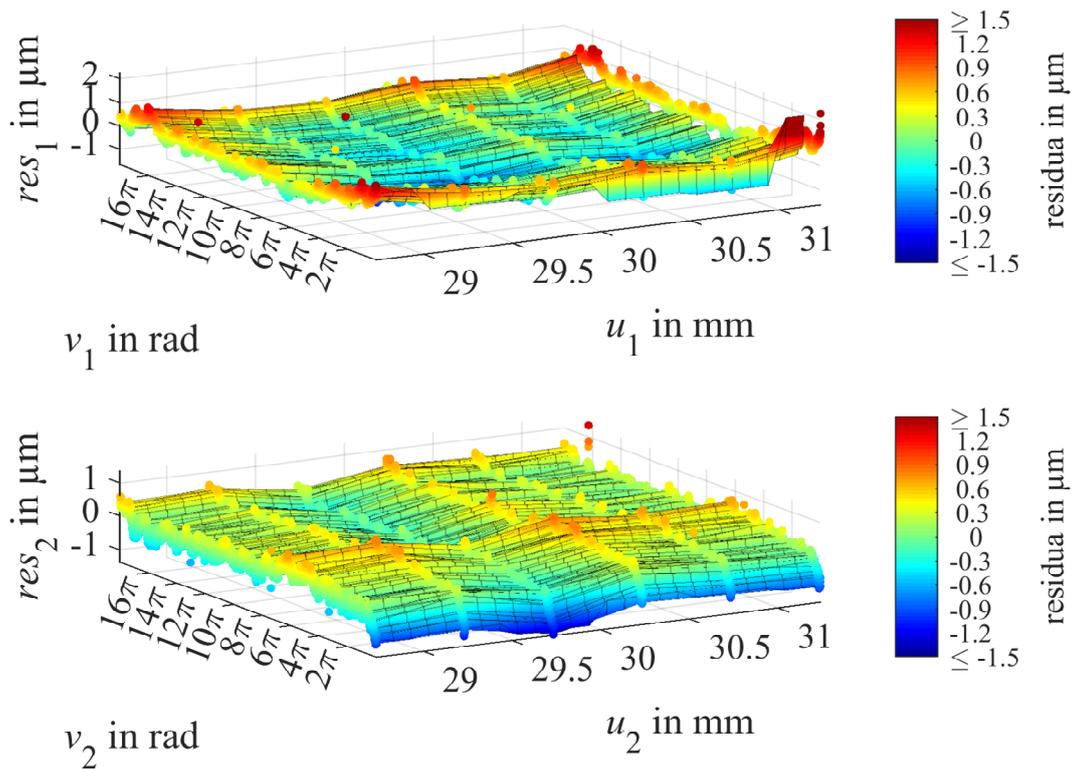


Abbildung 8: Darstellung des Messergebnisses einer flächenhaften Messung in der Abwicklung beider Gewindeflanken

4.4 Optische Messverfahren

Optische Messtechnik findet in der Gewindemesstechnik bis heute nur selten Anwendung. Vereinzelt kommen Durchlichtmikroskope zum Einsatz, die für die Kalibrierung von Außengewinden eingesetzt werden können. Die Schwierigkeiten dieser Messmethode sind beispielsweise Schattenwürfe oder spiegelnde Oberflächen, die das Messergebnis verfälschen und zu höheren Messunsicherheiten führen [16]. Für Innengewinde muss zunächst ein Abdruck eines Segments des Innengewindes erstellt werden, das anschließend analog dem Außengewinde im Durchlichtverfahren gemessen werden kann. Allerdings können bei diesem Verfahren nur Flankenwinkel und Steigung bestimmt werden.

Bildgebende Verfahren wie beispielsweise das Fokusvariationsverfahren haben den Vorteil einer schnellen Messung mit hoher Auflösung und einer berührungslosen Messung [17]. Zukünftig bieten sich auf Grund der flächenhaften Erfassung der Schraubenfläche gute Möglichkeiten zur Kalibrierung von Gewindelehren. Allerdings sind die Entwicklungen zum heutigen Zeitpunkt noch nicht so weit, dass die Messverfahren in die Praxis umsetzbar sind.

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|
|  | Rückführung von Gewindemessgrößen https://doi.org/10.7795/550.20220914 | DKD-E 4-1 | |
| | | Ausgabe: | 09/2022 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 17 / 42 |

4.5 Empfehlungen zum Kalibrierumfang

Die beschriebenen Messverfahren lassen sich in unterschiedlicher Art und Weise miteinander kombinieren, um die gewünschten Gewindeparameter zu messen. Dieses Kapitel soll eine Empfehlung geben, wie diese Verfahren unter Berücksichtigung der bestehenden Richtlinien [2], [3] und [6] anzuwenden sind und welche Gewindeparameter gemessen werden müssen. Die EURAMET cg-10 und die genannten VDI-Richtlinien sind die derzeit gebräuchlichsten Anleitungen zur Gewindekalibrierung. Diese Richtlinien gelten in der Regel als einheitlich bzw. werden hinsichtlich ihres Inhalts in einem Atemzug genannt. Bei konkreter Betrachtung unterscheiden sich die beiden Dokumente jedoch in mehreren Punkten.

Die EURAMET cg-10 beschreibt die Bestimmung der verschiedenen Flankendurchmesserkonzepte sowie der zugeordneten Messunsicherheit in Kategorien und listet die jeweils zu messenden Gewindeparameter auf. Des Weiteren sind auch die Parameter, die in die Messunsicherheit einzubeziehen sind, genannt. Beispiele zur Berechnung des Flankendurchmessers in den einzelnen Kategorien geben praktische Hinweise zur Erstellung der Messunsicherheitsbilanzen.

Die VDI-Richtlinien gehen mehr auf die praktische Anwendung zur Vorbereitung und Durchführung für die Gewindemessung ein, ohne jedoch genau zu beschreiben, wie der Flankendurchmesser gemessen oder berechnet wird. Die dort angegebenen Optionen ermöglichen den Kunden der Kalibrierlaboratorien allerdings die Möglichkeit „Pakete“ von Messparametern auszuwählen, um so eine unkomplizierte und eindeutige Beauftragung zu gewährleisten. Auch die nicht direkt zur Bestimmung des Flankendurchmessers gehörenden Messgrößen wie Kern- und Außendurchmesser finden Berücksichtigung. Diese Messgrößen sind in den Gewindenormen toleriert und haben auch Einfluss auf die Paarungsfähigkeit des Gewindes.

Aus den genannten Gründen sind diese beiden Richtlinien nicht ohne Weiteres miteinander vergleichbar. Zusammen ergeben sie jedoch bei korrekter Anwendung eine gute Grundlage, um die komplexe Geometrie des Gewindes richtig zu erfassen und zu bewerten.

Im Folgenden werden die drei wesentlichen Kategorien zur Gewindekalibrierung näher beschrieben. Diese sind nach Messaufwand geordnet und entsprechen im weitesten Sinne auch den in den Richtlinien angegebenen Kalibriermöglichkeiten.

Prüfung auf Verschleiß

Für Wiederholungskalibrierungen, in denen bereits früher gemessene Gewindelehren auf Verschleiß geprüft werden sollen, ist eine Messung mit deutlich reduziertem Aufwand möglich. Zu bestimmen ist lediglich der einfache Flankendurchmesser aus der Messung des Prüfmaßes unter Verwendung des aus einer früheren Kalibrierung bekannten Wertes für den Gewindeprofilwinkel, wie es etwa auf einem Längenkomparator nach Dreidraht- bzw. Zweikugelmethode möglich ist.

Vollständige Messung der Geometrie

Für eine vollständige Geometriemessung sind die folgenden Bestimmungsgrößen zu ermitteln:

- Steigung
- Teilung (bei mehrgängigen Gewinden)
- Beide Gewindeflankenwinkel
- Außen- und Kerndurchmesser
- Einfacher Flankendurchmesser
- Flankendurchmesser

Dieser Umfang erfordert typischerweise eine Messung auf einem Konturen- oder

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|
|  | Rückführung von Gewindemessgrößen https://doi.org/10.7795/550.20220914 | DKD-E 4-1 | |
| | | Ausgabe: | 09/2022 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 18 / 42 |

Koordinatenmessgerät.

Wie in Kapitel 3 bereits beschrieben, ist eine zuverlässige Bestimmung des Paarungsflankendurchmessers gemäß DIN 2244 bzw. ISO 5408 mit den typischerweise in der Gewindemesstechnik verwendeten Verfahren und Geräten nicht möglich. Vielmehr benötigt man flächenhafte Messdaten entlang der gesamten Schraubenflächen sowie eine mathematisch aufwändige Berechnung des zugehörigen Hüll- bzw. Pferchgewindes. Die in der EURAMET cg-10 beschriebenen Korrekturbeträge liefern allenfalls eine Näherungslösung und sind dort auch nur für symmetrische Gewinde beschrieben. Ihre Anwendung kann hier daher nicht empfohlen werden. Siehe dazu auch die Ausführungen in [1].

5 Messunsicherheit

Die Messunsicherheit ist ein Maß für die Unvollkommenheit eines Messprozesses. Im *International vocabulary of metrology* (VIM) [18] bzw. in seiner deutschen Übersetzung [19] wird die Messunsicherheit definiert als „nichtnegativer Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die der Messgröße auf der Grundlage der benutzten Information beigeordnet ist“. Das Ergebnis einer Messung besteht im Allgemeinen aus einem Messwert und der zugeordneten Messunsicherheit:

$$\text{Messergebnis} = \text{Messwert} \pm \text{Messunsicherheit}$$

Um die Messunsicherheit zu bestimmen, sind unabhängig von der betrachteten Messgröße die folgenden Schritte erforderlich:

1. Beschreibung der Messung: Messmethode, Hilfsmittel, ...
2. Identifikation der Eingangsgrößen
3. Mathematisches Modell der Messung: Ausgangsgröße = Funktion der Eingangsgrößen
4. Ermittlung der Standardunsicherheit aller Eingangsgrößen aus Messwerten, Kalibrierscheinen, Literatur, älteren Messungen, ...
5. Berechnung des Ergebnisses und der zugehörigen Standardmessunsicherheit: Ausgangsgröße mit kombinierter Standardmessunsicherheit
6. Berechnung der erweiterten Messunsicherheit
7. Angabe der Ergebnisse: Messwert mit Messunsicherheit

5.1 Einflussgrößen

Für eine zuverlässige Bestimmung der Messunsicherheit müssen alle Einflussgrößen des Messprozesses bekannt sein. Diese lassen sich, wie in Abbildung 9 vereinfacht dargestellt, in verschiedene Kategorien einteilen. Die Messstrategie und das verwendete Messgerät inklusive Tastelement spielen eine wichtige Rolle. Außerdem müssen die Beschaffenheit des zu messenden Gewindes und die Umgebungsbedingungen berücksichtigt werden. Schließlich hat auch der Bediener einen Einfluss auf das Messergebnis. Grundsätzlich ist zu unterscheiden, ob die Messunsicherheitseinflüsse zu systematischen (VIM 2.17) oder zufälligen (VIM 2.19) Abweichungen führen. Die systematischen Abweichungen sind der Teil der Messabweichung, der innerhalb einer Messreihe gleichbleibt oder sich in absehbarer Weise verändert. Sind die systematischen Abweichungen bekannt, so müssen sie korrigiert werden.

Einflussgrößen

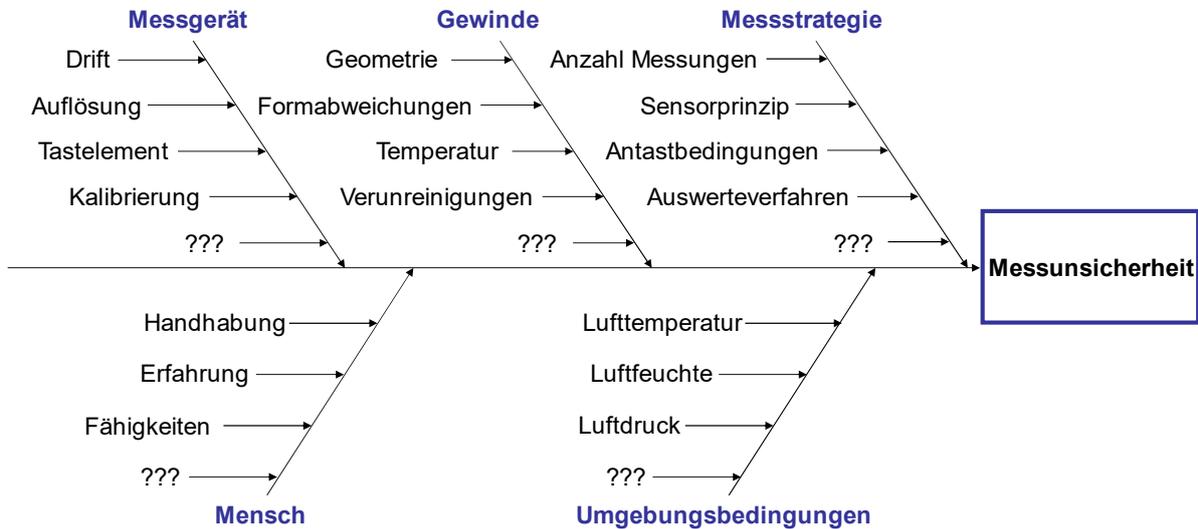


Abbildung 9: Ishikawa-Diagramm zur Darstellung der auf den Messprozess wirkenden Einflussgrößen

Weiterhin ist die Wahl des Messverfahrens und damit auch die Wahl des Messgerätes von entscheidender Bedeutung für die Messunsicherheit. Je nach Verfahren ergeben sich unterschiedliche Einflussgrößen. Es werden z. B. verschiedene Hilfsmittel mit spezifischen Messunsicherheiten verwendet. Auch die Rückführung des Messgerätes hat direkten Einfluss auf die Unsicherheit der Kalibrierung. Diese kann unter Umständen durch eine Korrektur durch eine Substitutionsmessung verringert werden. Aus den in Kapitel 4 beschriebenen Messverfahren lassen sich verschiedene Einflussgrößen ableiten, die in den folgenden Abschnitten aufgeführt sind. Diese Abschnitte enthalten die jeweils wichtigsten Beiträge zur Messunsicherheit, die unbedingt berücksichtigt werden sollten. Darüber hinaus mag es in jedem Laboratorium spezifische Einflüsse geben, die zusätzlich und individuell herausgearbeitet werden müssen. So kann z. B. eine spezielle Art der Einmessung oder eine individuelle Befestigung von Tastelementen unterschiedliche Einflüsse verursachen.

5.1.1 Einflüsse am Längenmessgerät: Dreidraht- und Zweikugelmethode (1D)

Bei der Dreidraht- bzw. Zweikugelmethode finden Messungen in Zweiflankenanlage statt (siehe Abbildung 10). Die Einflüsse auf die Unsicherheit der Messung der verschiedenen Flankendurchmesserkonzepte werden in der EURAMET cg-10 beschrieben [6]. Ausführlichere Darstellungen und Hintergründe finden sich in den Originalarbeiten von Berndt [4] sowie in der Übersicht von Kochsiek und Lerch [5], in der verschiedene Verfahren miteinander verglichen werden. Wir gehen hier dennoch kurz auf die wichtigsten Beiträge ein.

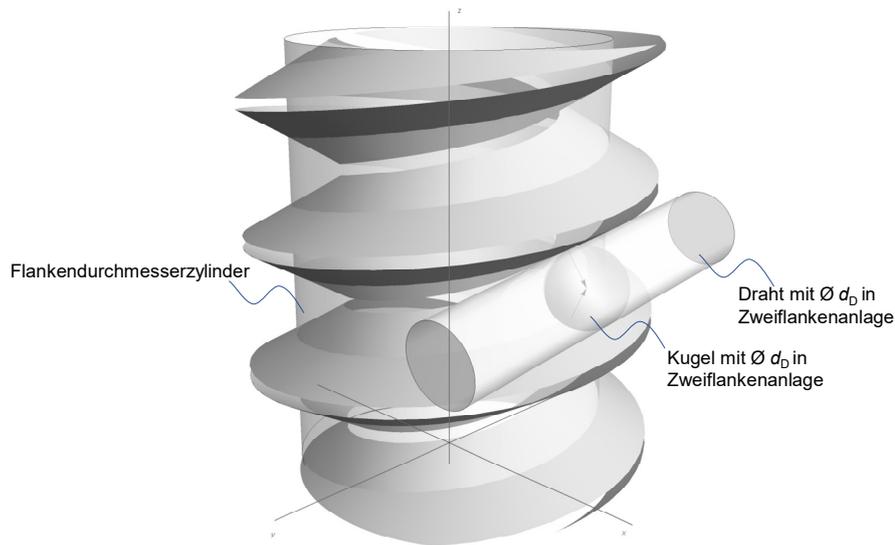


Abbildung 10: Messdraht und -kugel in Zweiflankenanlage am Flankendurchmesser an einem symmetrischen Außengewinde. Die Anlagepunkte bei Draht und Kugel sind identisch und liegen in einem Normalschnitt des Gewindes.

Messungen nach der Dreidraht- bzw. Zweikugelmethode beruhen wesentlich auf der genauen Kenntnis des Tastelementdurchmessers. Abweichungen im Durchmesser der Tastkugel bzw. des Drahtes wirken sich auf die Bestimmung des Flankendurchmessers aus. Um diesen Einfluss zu quantifizieren, muss man die Anlagesituation am Gewinde untersuchen. Typischerweise wird diese Situation im Achsschnitt des Gewindes betrachtet. Es ist aber wichtig zu verstehen, dass die Anlagepunkte einer Kugel oder eines Drahtes bei Zweiflankenkontakt niemals im selben Achsschnitt liegen. Stattdessen liegen beide Anlagepunkte im selben Normalschnitt des Gewindes, also in einer Ebene senkrecht zu den Gewindeflanken. Normalschnitt und Achsschnitt fallen nur zusammen, wenn $Ph = 0$ gilt, was bei einem Gewinde natürlich nie der Fall ist (siehe Abbildung 11).

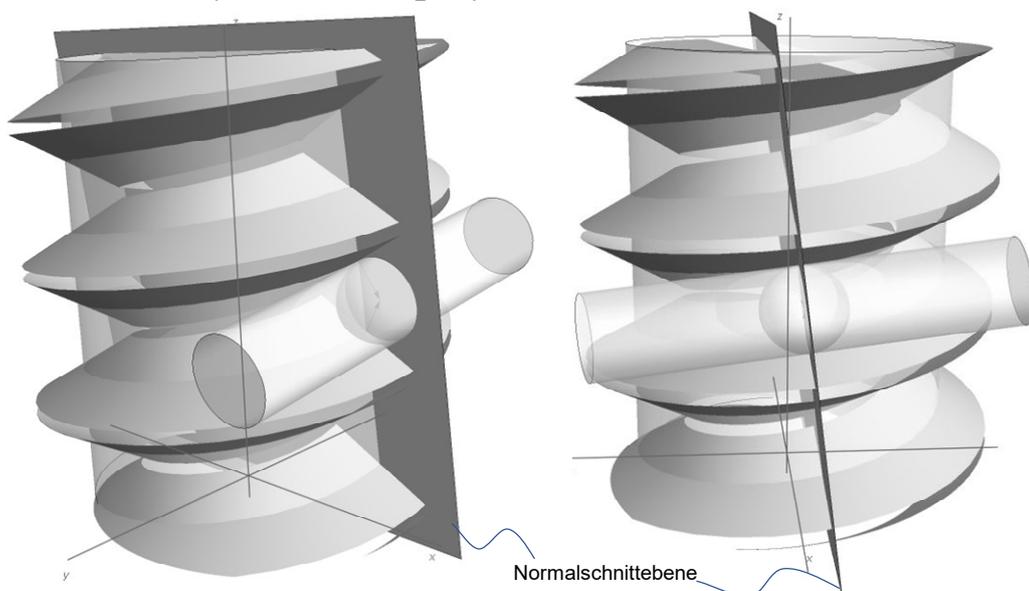


Abbildung 11: Dargestellt sind zwei Ansichten der gleichen Figur wie in Abbildung 10, die um die zu den hier gezeigten Anlagenpunkten gehörige Normalschnittebene ergänzt ist. In der rechten Ansicht sieht man deutlich, dass die Anlagepunkte von Kugel und Draht in dieser Normalschnittebene liegen und dass diese Ebene gegenüber einem Achsschnitt durch den Kugelmittelpunkt, der die z-Achse enthält, geneigt ist.

In der EURAMET cg-10 wird zur Berechnung des Flankendurchmessers aus dem messtechnisch ermittelten Prüfmaß m (siehe Abbildung 4 und Abbildung 5) gemäß der Theorie von Berndt zunächst von einer unendlich dünnen Kreisscheibe mit Durchmesser d'_D ausgegangen, die beide Flanken im selben Achsschnitt berührt (siehe Abbildung 12).

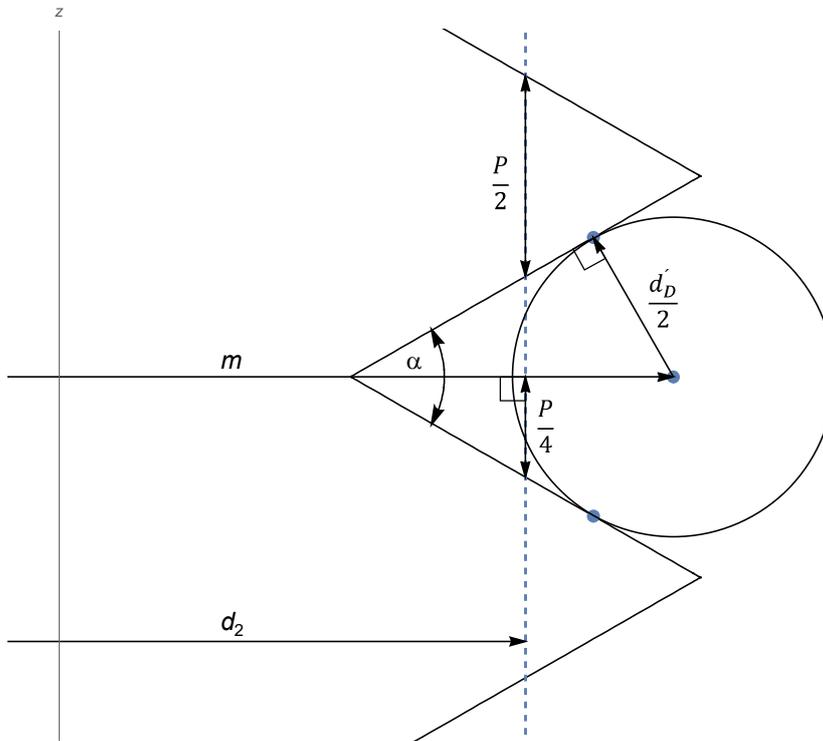


Abbildung 12: Eine unendlich dünne Kreisscheibe mit Durchmesser d'_D berührt beide Flanken des Gewindes im selben Achsschnitt. Hier ergibt sich der Flankendurchmesser d_2 aus dem Prüfmaß m durch einfache trigonometrische Berechnungen in den beiden eingezeichneten rechtwinkligen Dreiecken.

In diesem Fall ergibt sich aus Abbildung 12 direkt

$$d_2, D_2 = m \mp d'_D \frac{1}{\sin \alpha/2} \pm \frac{P}{2} \cot \alpha/2, \quad (2)$$

wobei das obere Vorzeichen für Außengewinde (Dorne, d_2) und das untere für Innengewinde (Ringe, D_2) gilt.

Geht man nun von der unendlich dünnen Kreisscheibe zu einer Kugel bzw. einem Draht mit Durchmesser d_b über (die Anlagepunkte sind bei Kugel und Draht gleichen Durchmessers identisch, siehe Abbildung 10), so muss in Gleichung (2) ein zusätzlicher Term addiert werden, der die Verschiebung der Anlagepunkte aus der Achsschnittebene in den Normalschnitt berücksichtigt. Ein exakter mathematischer Ausdruck für diese Anlagekorrektur kann nicht in geschlossener Form angegeben werden, da sich der Zusammenhang zwischen Tastelementdurchmesser und Berührungskreis in Form von transzendenten Gleichungen ergibt. Die Bestimmung erfordert stattdessen eine Lösung durch einen iterativen Algorithmus, wie er ursprünglich von Prof. Berndt entwickelt wurde und in der EURAMET cg-10 skizziert ist [4][6]. Alternativ kann die Herleitung über ein 3D-Modell etwa nach [15] unter Verwendung der Normalenvektoren analog zur Vorgehensweise in [20] erfolgen. Für Anwender in Kalibrierlaboratorien und ähnlichen Einrichtungen sei aber darauf verwiesen, dass die PTB eine einfache Implementierung der Algorithmen nach Berndt zur Verfügung stellt, die die exakte

Berechnung des Flankendurchmessers für zylindrische Gewinde (Ringe, Dorne, symmetrisch oder unsymmetrisch, ein- oder mehrgängig) nach Eingabe der erforderlichen Geometriemerkmale durchführt. Dieses Java-Programm kann kostenfrei unter <https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt5/fb-53/ag-533/ptb-gewinde-software.html> heruntergeladen werden (siehe Abbildung 13).

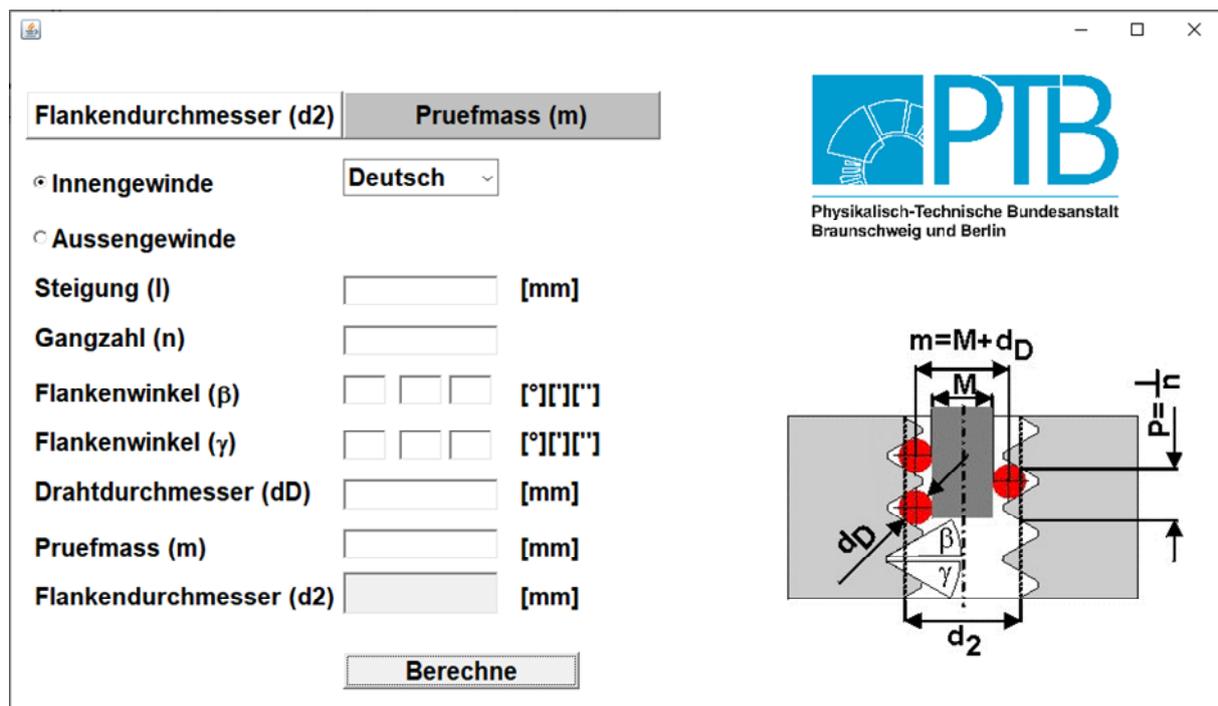


Abbildung 13: Screenshot des kostenfrei verfügbaren PTB-Programms zur exakten Berechnung des Flankendurchmessers nach Berndt ohne Berücksichtigung der durch die Antastkraft verursachten Abplattung.

Für eine Näherungslösung ist in der EURAMET cg-10 jedoch eine Approximation der Anlagekorrektur angegeben, die in einigen Fällen (symmetrisches Profil, Steigung nicht zu groß, Flankenwinkel nicht zu klein) brauchbare Lösungen liefert. Gleichung (2) wird also zu

$$d_2, D_2 = m \mp d_D \frac{1}{\sin \alpha/2} \pm \frac{P}{2} \cot \alpha/2 \mp A_1 \quad (3)$$

mit der approximativen Anlagekorrektur

$$A_1 = \frac{d_D}{2} (\tan \psi)^2 \cos \frac{\alpha}{2} \cot \frac{\alpha}{2}, \quad (4)$$

wobei ψ hier den Steigungswinkel mit

$$\tan \psi = \frac{P}{\pi d_2} \quad \text{bzw.} \quad \tan \psi = \frac{P}{\pi D_2} \quad (5)$$

bezeichnet. Die Grenzen dieser Näherungslösung sind im Anhang der EURAMET cg-10 anhand einiger Zahlenbeispiele aufgezeigt.

Gleichung (3) kann nun zusammen mit (4) und (5) verwendet werden, um den Einfluss des Tastelementdurchmessers auf die Bestimmung des Flankendurchmessers zu quantifizieren.

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|
|  | Rückführung von Gewindemessgrößen https://doi.org/10.7795/550.20220914 | DKD-E 4-1 | |
| | | Ausgabe: | 09/2022 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 23 / 42 |

Berücksichtigt man exemplarisch für Außengewinde zusätzlich den Zusammenhang $m = L - d_D$ aus Abbildung 4, da am Längenkomparator ja zunächst das Maß L bestimmt wird, ergibt sich

$$\frac{\partial d_2}{\partial d_D} = -1 - \frac{1}{\sin \alpha/2} - \frac{1}{2} (\tan \psi)^2 \cos \frac{\alpha}{2} \cot \frac{\alpha}{2} \quad (6)$$

Dieser Ausdruck gibt an, wie sensitiv der Flankendurchmesser eines Außengewindes auf Abweichungen im Tastelementdurchmesser reagiert (Sensitivitätskoeffizient, siehe GUM [22]). Für einen typischen Gewindeprofilwinkel von $\alpha = \pi/3 \triangleq 60^\circ$ ergibt sich $|\partial d_2 / \partial d_D| \approx 3$. Eine Abweichung vom Kalibrierwert des Tastelementdurchmessers wirkt sich hier also etwa mit dem Faktor 3 auf die Bestimmung des Flankendurchmessers aus!

Das Tastelement sollte daher grundsätzlich in Durchmesser und Form mit ausreichend hoher Messpunktanzahl und in einem zur Messaufgabe passenden Winkelbereich kalibriert sein. Dies wird in den Abschnitten 6.2.1 und 6.2.2 detailliert beschrieben.

Entsprechend ergeben sich aus Gleichung (3) die Sensitivitätskoeffizienten für die Steigung P und den Flankenwinkel $\alpha/2$ (für symmetrische Gewinde) zu

$$\frac{\partial d_2}{\partial P} = \frac{1}{2} \cot \frac{\alpha}{2} \quad (7)$$

und

$$\frac{\partial d_2}{\partial(\alpha/2)} = \frac{\cos \alpha/2}{(\sin \alpha/2)^2} (d_D - d_o), \quad (8)$$

wobei der Term aus der Anlagekorrektur jeweils vernachlässigt wurde. In Gleichung (8) ist d_o der in Gleichung (1) angegebene optimale Tastkugeldurchmesser, der sich durch diese Beziehung erst ergibt, da offenbar der Sensitivitätskoeffizient $\partial d_2 / \partial(\alpha/2)$ für $d_D = d_o$ verschwindet. Für das oben verwendete Beispiel von $\alpha = \pi/3 \triangleq 60^\circ$ ergeben sich die Zahlenwerte $|\partial d_2 / \partial P| = \sqrt{3}/2 \approx 0,866$ und $\partial d_2 / \partial(\alpha/2) = 2\sqrt{3}(d_D - d_o) \approx 3,464(d_D - d_o)$, wobei hier immer α in rad angegeben werden muss.

Diese Berechnungen und Zahlenbeispiele machen deutlich, wie wichtig die genaue Kenntnis der Gewindegeometrie (Steigung und Winkel) für eine zuverlässige Bestimmung des Flankendurchmessers ist. Vor diesem Hintergrund wird auch klar, warum Gewindelehren nach Möglichkeit immer gemäß Option 2b oder 3 nach EURAMET cg-10 (bzw. den Optionen 4 und 5 in [2] bzw. [3]) kalibriert werden sollen. Die anderen Optionen lassen wichtige Einflussgrößen unberücksichtigt!

Bei jedem Antastvorgang bewirkt die Messkraft eine elastische Verformung des Tastelementes. Wie groß diese Verformung ist, hängt von den beteiligten Materialien, der Antastkraft und der Geometrie von Tastelement und Gewinde ab. Für die verwendeten Materialien wird der Elastizitätsmodul mit einbezogen. Je nach Messverfahren ist es möglich, dass sich die auftretende Verformung bei der Einmessung oder Kalibrierung mit der Verformung bei der Gewindemessung aufhebt. In der EURAMET cg-10 ist beschrieben, wie die Korrektur der Verformung näherungsweise nach Hertz berechnet werden kann [6].

Zusätzlich entsteht durch das Entlanggleiten des Tastelementes an der Gewindeflanke bis zur Zweiflankenanlage Reibung. Diese verursacht eine Abplattung der Tastkugeloberfläche, die wiederum dazu führt, dass der Taster tiefer in die V-Nut eindringt und eine Abweichung des Messpunktes herbeiführt. Dies hat besonders bei Messungen in der Zweiflankenanlage großen Einfluss, da die Reibung immer wieder an den gleichen zwei Stellen des Tastelements auftritt. Abbildung 14 zeigt die Situation bei einer Antastung in Zweiflankenanlage mit einem Kugeltaster in einer Lücke. Der Messpunkt wird idealerweise aufgenommen, wenn die Kräfte in den Berührungspunkten gleich groß sind, also

$$F_{N1} = F_{N2} = \frac{F}{2 \cdot \sin(\alpha/2)} \quad (9)$$

Bei einem Gewindeprofilwinkel von 60° ergibt sich ein Kräftegleichgewicht $F = F_{N1} = F_{N2}$. Folglich ist das Verhältnis

$$w_{v0}(F_N) = \frac{w_0(F_N)}{\sin(\alpha/2)} \quad (10)$$

Daraus ergibt sich bei einem Gewindeprofilwinkel von 60° , dass der zurückgelegte Weg der Kugel in Messrichtung $w_{v0}(F_N)$ doppelt so groß ist wie der Weg $w_0(F_N)$ in Krafrichtung durch die Abplattung. Bei kleineren Winkeln sind die Einflüsse sogar noch größer [21].

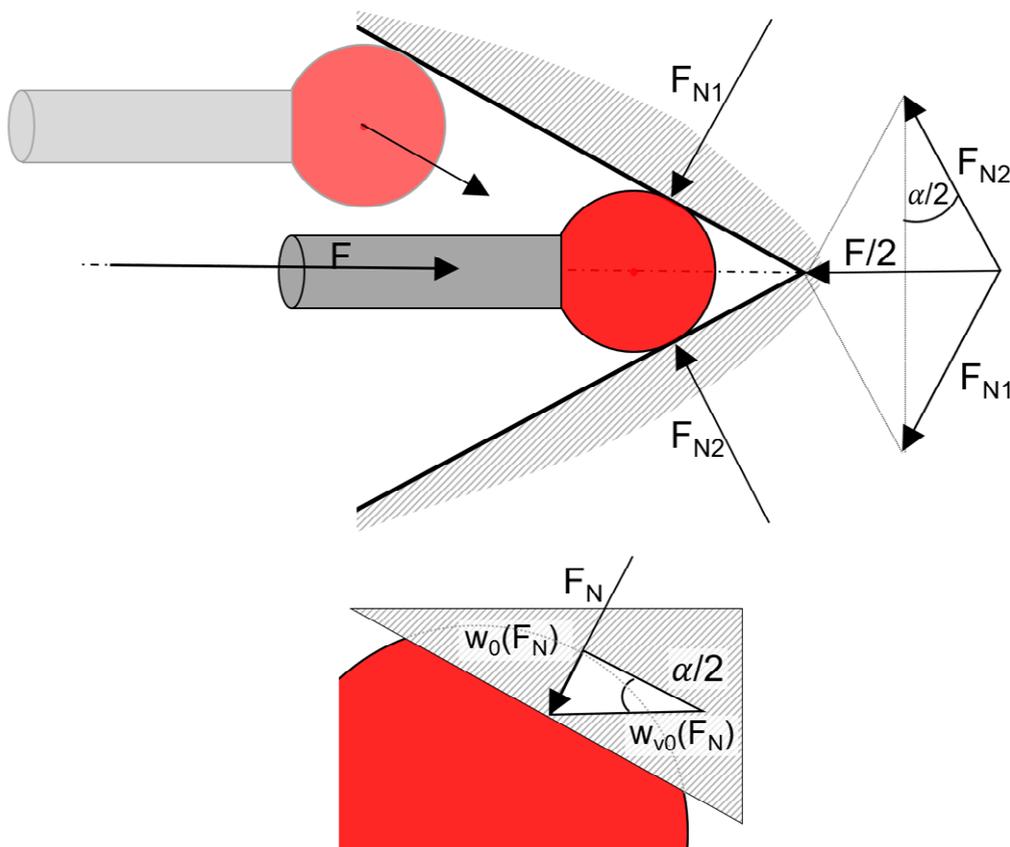


Abbildung 14: Abplattung durch Verschleiß bei der Zweiflankenanlage

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|
|  | Rückführung von Gewindemessgrößen https://doi.org/10.7795/550.20220914 | DKD-E 4-1 | |
| | | Ausgabe: | 09/2022 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 25 / 42 |

Um auch diesem Messunsicherheitseinfluss zu begegnen, sollten die Tastelemente regelmäßig auf Beschädigungen und Verunreinigungen geprüft werden. Dies kann beispielsweise unter einem Mikroskop erfolgen. Die Tastelemente werden bei den Messungen stark beansprucht, daraus entsteht eine häufig wiederkehrende Fehlerquelle, die verhältnismäßig einfach reduziert werden kann.

Im Folgenden werden die wichtigsten Einflussgrößen bei der Messung von Gewindelehren am Längenmessgerät zusammenfassend aufgelistet.

(einfacher) Flankendurchmesser

- Messwert, gemessene Verschiebung des Tastelements
- Bei Doppelkugeltastern wird die Tasterkonstante durch eine Messung z. B. an einem Leerring bestimmt. Das Ergebnis beinhaltet dann die Standardunsicherheit des Bezugsnormals sowie Einflüsse aus dem Messvorgang.
- Tastelementdurchmesser aus Kalibrierschein
- Einflüsse aus Steigung und Gewindeflankenwinkel des Gewindes
- Anlagekorrektur
- Elastische Verformung durch Messkraft
- Formabweichungen aus Unvollkommenheit der Gewindelehre

Für den **Paarungsflankendurchmesser** im Sinne der EURAMET cg-10 (siehe auch Abschnitt 3 in diesem Bericht) ist noch zu ergänzen:

- Teilungskorrektur
- Korrektur des Gewindeflankenwinkels

Außendurchmesser am Außengewinde bzw. Kerndurchmesser am Innengewinde

Hier sind grundsätzlich dieselben Einflüsse zu berücksichtigen wie bei der Flankendurchmesser-Messung. Der Unterschied liegt in der Anlage der Tastelemente am Gewinde. Während beim Flankendurchmesser in Zweiflankenanlage gemessen wird, gibt es hier nur einen Berührungspunkt. Dies ist bei der Berechnung der Eingangsgröße zu berücksichtigen.

Die **Steigung** und die **Winkel** werden in der Regel nicht am Längenmessgerät gemessen. Dies gilt auch für den **Außendurchmesser am Innengewinde** und den **Kerndurchmesser am Außengewinde**.

5.1.2 Einflüsse am Konturenmessgerät: Tastschnittverfahren (2D)

Flankendurchmesser, Außendurchmesser und Kerndurchmesser

- Korrektur nach Zwischenkalibrierung im angenäherten Durchmesserbereich mit einem Einstellring (Substitutionsmessung)
- Formabweichungen der Gewindelehre
- Temperatur und Längenausdehnungskoeffizient Gewindelehre
- Temperatur und Längenausdehnungskoeffizient Glasmaßstäbe
- Radius- und Vorschubabweichung durch Bewegung des Tastarms
- Ausrichtung des Gewindes in Spannsystem → Messebene des Scanners möglicherweise nicht komplanar zu Gewindeachse
- Gewindeumkehrpunktsuche durch Bediener → Messebene des Scanners möglicherweise nicht komplanar zu Gewindeachse
- Verschleiß der Tastspitze

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|
|  | Rückführung von Gewindemessgrößen https://doi.org/10.7795/550.20220914 | DKD-E 4-1 | |
| | | Ausgabe: | 09/2022 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 26 / 42 |

- Einmessung der Tastspitze durch Bediener, insbesondere auch bei Verwendung von Tastarmen mit zwei Tastspitzen zur Messung von unten und oben (Lagebeziehung der Tastspitzen in x- und z-Richtung), Formabweichung des Einmessnormals
- Einstellung der Messkraft
- Schmutz (auf Prüfling, Tastspitze, Glasmaßstäben, ...)
- Festlegung der Prüfebene durch Bediener bzw. Ausrichtung der Gewinde gemäß Prüfebene-Markierung, bei konischen Gewinden: Formabweichung an Gewindestirnfläche
- Auswertalgorithmus: Schwellenwert für Filterung von Gewindegrund und Gewindespitze
- interne Rundungsfehler aus Software und Messwertausgabe

Für **Steigung und Gewindegewinkel** sind noch zu ergänzen:

- Axiale Radiusabweichung
- Abweichung der x-Achse des Messgerätes zur Gewindeachse

5.1.3 Einflüsse am Koordinatenmessgerät: Zweikugelmethode (1D) kombiniert mit Profilschan (2D)

Bei der Kalibrierung mit einem Koordinatenmessgerät sind verschiedene Verfahren möglich. Für die Kalibrierung einer Gewindelehre nach VDI/VDE/DGQ 2618 Blatt 4.8 und 4.9 kann ein Doppelkugeltaster verwendet werden, um die Flankendurchmesser, den Außendurchmesser am Außengewinde bzw. den Kerndurchmesser am Innengewinde und die Steigung zu messen. Mit einem Spitzentaster ist es möglich den Außendurchmesser am Innengewinde bzw. den Kerndurchmesser am Außengewinde zu messen. Die Winkel werden durch Scanmessungen an den Flanken in den Achsschnitten gemessen. Bei diesem Verfahren bietet sich eine Substitutionsmessung mit Bezugsnormalen wie Parallelendmaßen, glatten Ringen, oder Dornen an, mit der die Messunsicherheit verringert und ein Korrekturwert ermittelt werden kann. Besser eignet sich eine kalibrierte Gewindelehre, mit der nicht nur das Maß korrigiert, sondern auch die Antastbedingungen am Prüfling möglichst ähnlich nachgebildet werden.

Für die Bestimmung des **Flankendurchmessers** sind mindestens die folgenden Einflüsse zu berücksichtigen:

- Messwert
- Tastkugeldurchmesser aus Kalibrierschein
- für Steigung und Profilwinkel werden je nach Kalibrieroption die Nennwerte, Messwerte oder die Werte aus dem Kalibrierschein verwendet
- die Anlagekorrektur und die Abplattung müssen entsprechend des verwendeten Tastelementes berücksichtigt werden
- Unvollkommenheit des Messprozesses: Dieser Beitrag beinhaltet die Formabweichungen der Gewindelehre und andere geräte- oder verfahrensabhängige Einflüsse, die bisher noch nicht beachtet wurden und beruht auf Erfahrungen durch Beobachtungen des Messprozesses.
- Temperaturdifferenz zwischen Substitutionsnormal und Prüfkörper

Außendurchmesser am Außengewinde bzw. Kerndurchmesser am Innengewinde

Diese Durchmesser werden mit Kugeltastern gemessen. Die Einflussgrößen sind die gleichen wie beim Flankendurchmesser. Auch hier ist zu beachten, wie die Antastung im Detail durchgeführt wird.

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|
|  | Rückführung von Gewindemessgrößen https://doi.org/10.7795/550.20220914 | DKD-E 4-1 | |
| | | Ausgabe: | 09/2022 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 27 / 42 |

Die **Steigung** wird aus den oben gemessenen Punkten ermittelt. Somit sind die Einflussgrößen dieselben.

Außendurchmesser am Innengewinde bzw. Kerndurchmesser am Außengewinde

Diese Durchmesser werden mit Spitzentastern am Gewindegrund gemessen.

- angezeigter Wert ohne Korrektur
- Bezugsnorm aus Kalibrierschein und Messwert
- Unvollkommenheit des Messprozesses: Dieser Beitrag beinhaltet die Formabweichungen der Gewindelehre und andere geräte- oder verfahrensabhängige Einflüsse, die bisher noch nicht beachtet wurden und beruht auf Erfahrungen durch Beobachtungen des Messprozesses.

Gewindewinkel

Die Winkel werden ebenfalls mit dem Spitzentaster gemessen.

- Messwert Flankenwinkel
- Beitrag aus Werkstücklage, Taumel
- Beitrag aus Formmessung
- Beitrag aus Tastereinmessung
- Beitrag Messgerät lineares Glied

5.1.4 Einflüsse am Koordinatenmessgerät: 3D-Messverfahren mit Drehtisch

Ein neuartiges Verfahren erlaubt eine ganzheitliche Erfassung der Gewindelehre (siehe Abschnitt 4.3, [14]). Die 3D-Messung am Koordinatenmessgerät wird mit einem Drehtisch durchgeführt, wobei die Antastung in Einflankenanlage erfolgt.

Flankendurchmesser

- Flankendurchmesser aus Software
- Tastkugeldurchmesser aus Kalibrierschein
- Tastkugeldurchmesser aus Tastereinmessung
- Winkel und Steigung wie oben beschrieben
- Längenabhängiger Beitrag KMG
- Beitrag aus der Substitutionsmessung
- Beitrag Drehtisch
- Längenausdehnungskoeffizient des Prüfkörpers
- Temperatur des Prüfkörpers
- Thermischer Ausdehnungskoeffizient des Substitutionsnormals
- Temperatur des Substitutionsnormals

Steigung

- Messwert
- Beitrag aus Formmessung
- Beitrag aus Tastereinmessung
- Messunsicherheit Koordinatenmessgerät
- Beitrag Messgerät konstantes Glied
- Beitrag Messgerät lineares Glied
- Beitrag der Temperaturänderung während der Messung
- Thermischer Ausdehnungskoeffizient des Prüfkörpers

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|
|  | Rückführung von Gewindemessgrößen https://doi.org/10.7795/550.20220914 | DKD-E 4-1 | |
| | | Ausgabe: | 09/2022 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 28 / 42 |

Gewindewinkel

- Messwert
- Beitrag aus Werkstücklage, Taumel
- Standardabweichung Flankenform
- Beitrag der Drehtischabweichungen
- Beitrag aus Tastereinmessung (Lageabweichung)

5.2 Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit

Zur Ermittlung der Messunsicherheit existieren sehr unterschiedliche Herangehensweisen. Der internationale Leitfaden ISO/IEC Guide 98-3:2008-09 „Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)“ ist identisch mit dem vom Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM) herausgegebenen und frei verfügbaren Leitfaden JCGM 100:2008 “Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement” [22]. Dem JCGM gehören die wichtigsten internationalen Organisationen für Normung und Messwesen an. Es wird vom Direktor des Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), der obersten Instanz der internationalen Metrologie, geleitet. Der GUM besitzt dadurch höchste internationale metrologische Anerkennung und Bedeutung. Die beschriebene Methodik ist durch die allgemeine Darstellung auf das gesamte Messwesen anwendbar und sorgt für Einheitlichkeit und Vergleichbarkeit von Messunsicherheiten. Der GUM wurde erstmals 1995 veröffentlicht, hat sich seither weltweit etabliert und wird in allen Nationalen Metrologieinstituten verwendet. Darüber hinaus bildet er auch die Forderungen der DAkkS bzgl. der Messunsicherheit an die Akkreditierung von Kalibrierlaboratorien ab und findet in vielen Normen und Kalibrierrichtlinien Erwähnung.

Das grundlegende Konzept des GUM basiert auf der frequentistischen Statistik. Dabei ist der wahre Wert einer *indirekten Messgröße* Y prinzipiell unbekannt. Die Eingangsgrößen bzw. *direkten Messgrößen* X_1, \dots, X_n werden als Zufallsgrößen aufgefasst. Die Messung wird als funktionaler Zusammenhang

$$Y = f(X_1, \dots, X_n)$$

modelliert. Die Aufstellung dieses Modells ist der erste und zugleich womöglich wichtigste, oft der schwierigste Schritt in der Messunsicherheitsbestimmung. Das klassische GUM-Verfahren beschreibt dann ein Kalkül, mit dem sich die Unsicherheit der indirekten Messgröße Y aus den Unsicherheiten der Eingangsgrößen X_1, \dots, X_n berechnen lässt. Dieses Kalkül beruht auf dem bereits von C. F. Gauß beschriebenen Verfahren zur Fehlerfortpflanzung, das um die Berücksichtigung der unbekannt systematischen Messabweichungen erweitert wurde. Diese werden vom GUM auf der gleichen Grundlage wie die zufälligen Messabweichungen behandelt.

Der GUM beschreibt weiterhin zwei Methoden zur Ermittlung von Unsicherheiten

- Typ A: Statistische Analyse von Reihen von Beobachtungen, die unter möglichst gleichen Messbedingungen durchgeführt worden sind
- Typ B: Bestimmung der Unsicherheit mit anderen Mitteln als der statistischen Analyse von Wiederholungsmessungen (etwa aus Kalibrierscheinen, Handbüchern, Sensordaten, Umgebungsbedingungen, ...)

Dabei ist der Zweck dieser Unterscheidung lediglich die Klassifizierung der Unsicherheitskomponenten nach ihrer Ermittlungsmethode. Beide Methoden beruhen auf Wahrschein-

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|
|  | Rückführung von Gewindemessgrößen https://doi.org/10.7795/550.20220914 | DKD-E 4-1 | |
| | | Ausgabe: | 09/2022 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 29 / 42 |

lichkeitsverteilungen. Die mit ihnen ermittelten Unsicherheitskomponenten werden durch Berechnung der Standardabweichung bestimmt.

Die Vorteile des klassischen GUM-Verfahrens sind das vergleichsweise einfach zu implementierende Kalkül, das für eine große Klasse an Mess-Situationen annähernd korrekte Ergebnisse liefert, sowie die Möglichkeit, das einmal erarbeitete Resultat leicht anzupassen bzw. durch neue Messergebnisse zu aktualisieren.

Allerdings kommt dieses Verfahren auch schnell an seine Grenzen. So handelt es sich grundsätzlich um ein Näherungsverfahren, das auf einer Linearisierung der Modellfunktion f beruht. Wenn das Modell also nicht von vornherein linear ist, kann diese Approximation bereits zu ungültigen Resultaten führen. Weitere Probleme ergeben sich, wenn die Eingangsgrößen keine symmetrische Verteilung aufweisen bzw. wenn einzelne dieser Größen gegenüber anderen dominieren. Das klassische GUM-Verfahren beruht auf der Fortpflanzung von Standardunsicherheiten. Die zusätzlichen Informationen aus den Verteilungen der Eingangsgrößen gehen dabei verloren.

Nicht zuletzt, um diesen Unzulänglichkeiten zu begegnen, hat das JCGM 2008 mit dem *Supplement 1* eine Ergänzung des GUM veröffentlicht (GUM-S1, [23]), die die Berechnung von Unsicherheiten auf der Basis der Monte-Carlo-Methode (MCM) beschreibt. Die MCM beruht in Abgrenzung zum klassischen GUM-Verfahren auf der Fortpflanzung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Die Information aus den Verteilungen der Eingangsgrößen werden also vollständig berücksichtigt. An die Anwendung der MCM sind außerdem weit weniger Bedingungen gestellt als es beim klassischen GUM-Verfahren der Fall ist. Die Unterscheidung zwischen Typ-A- und Typ-B-Ermittlungsmethoden der Unsicherheiten entfällt bei der MCM. Alle Eingangsgrößen werden auf der Basis der ihnen zugrundeliegenden Verteilungen in gleicher Weise behandelt.

Das vom JCGM 2009 veröffentlichte Übersichtsdocument *An introduction to the "GUM" and related documents* [24] erläutert die Unterschiede und Gemeinsamkeiten der beiden Methoden sehr eindrucksvoll. Es nennt als drittes Verfahren zur Bestimmung der Unsicherheiten noch die analytische Methode, bei der die Verteilung der Messgröße Y mit einer mathematischen Analyse direkt bestimmt wird. Dies ist allerdings nur in sehr einfachen Fällen möglich. Zum Vergleich dieser drei Methoden im Hinblick auf ihre Genauigkeit wird in [24] insbesondere erklärt, dass das klassische GUM-Verfahren grundsätzlich nur eine Näherungslösung liefert, die analytische Methode immer exakt ist (aber eben nur selten anwendbar) und die MCM eine Lösung mit einer einstellbaren numerischen Genauigkeit bereitstellt.

Alle drei Verfahren sind geeignet, in Ergänzung zum eigentlichen Ergebnis, also der Unsicherheit der indirekten Messgröße Y , zusätzlich eine Unsicherheitsbilanz aufzustellen. Diese Bilanz ermöglicht die Analyse der einzelnen Unsicherheitsbeiträge entsprechend ihres jeweiligen Einflusses auf das Gesamtergebnis und ist somit ein wichtiges Hilfsmittel, wenn der Messprozess auf Verbesserungen hin untersucht werden soll.

Der Vollständigkeit halber sei hier noch erwähnt, dass es zur Berechnung von Unsicherheiten noch ein weiteres Konzept gibt, das im GUM und seinen Ergänzungen bisher nicht berücksichtigt wird. Es beruht auf dem Satz von Bayes [25] und verfolgt damit ein fundamental anderes Prinzip als das der frequentistischen Statistik, das dem GUM bisher zugrunde liegt. Die Überarbeitung des GUM im Hinblick auf die Einbindung bayesischer Statistik ist Gegenstand aktueller Forschung [26].

Die Normenreihe ISO 15530 [27], [28], [29] beschreibt die wichtigsten Verfahren zur Messunsicherheitsermittlung in der Koordinatenmesstechnik. Die dort behandelten Methoden

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|
|  | Rückführung von Gewindemessgrößen https://doi.org/10.7795/550.20220914 | DKD-E 4-1 | |
| | | Ausgabe: | 09/2022 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 30 / 42 |

orientieren sich an den im GUM dargestellten Herangehensweisen (siehe 3.1.1), gehen aber teilweise auch darüber hinaus. So wird etwa das sich in Arbeit befindliche Blatt 2 der Reihe ein Verfahren auf der Grundlage von Mehrlagenmessungen beschreiben. Die Arbeiten dazu wurden in einem europäischen Forschungsprojekt koordiniert [30].

Eine aufgabenspezifische Messunsicherheitsbestimmung für Messungen auf Koordinatenmessgeräten kann auf herkömmliche Art im Allgemeinen nur unter großem Aufwand durchgeführt werden. Das klassische GUM-Verfahren ist aufgrund der Vielzahl und Komplexität der Unsicherheitseinflüsse im industriellen Umfeld meist nicht mehr wirtschaftlich durchzuführen und erfordert zudem ein hohes Maß an Expertenwissen. Zudem ist seine Anwendung im Zusammenhang mit den oben beschriebenen Nachteilen in vielen Fällen für die Koordinatenmesstechnik nicht genau genug.

Eine bewährte Strategie insbesondere für anspruchsvolle Geometrien ist die in ISO 15530-3 beschriebene experimentelle Messunsicherheitsermittlung unter Zuhilfenahme von Substitutionsnormalen. Dies setzt für jede Messaufgabe ein Substitutionsnormal mit vergleichbarer Größe und Geometrie zu der des Messobjekts voraus. Außerdem müssen Substitutionsnormal und Messobjekt mit dem gleichen Verfahren und unter vergleichbaren Umgebungsbedingungen gemessen werden. Die Ähnlichkeit zwischen Substitutionsnormal und Messobjekt gilt als gewährleistet, wenn sich die beiden Objekte in ihren Dimensionen um höchstens 10 % und in den Winkeln um höchstens 5° unterscheiden [28].

Das Verfahren zur Messunsicherheitsermittlung besteht dann aus einer Reihe von Messungen sowohl am Substitutionsnormal als auch am Messobjekt. Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen an beiden Teilen fließen in die Berechnung der Messunsicherheit ein. Das verwendete Substitutionsnormal sollte mit einer möglichst geringen Standardmessunsicherheit u_{cal} kalibriert sein, da dieser Wert typischerweise einen wesentlichen Anteil der nach diesem Verfahren ermittelten Gesamtmessunsicherheit darstellt. **Außerdem muss die Kalibrierung des Substitutionsnormals außerhalb des eigenen Laboratoriums erfolgt sein, um systematische Einflüsse aus dem verwendeten Messprozess eliminieren und Korrelationen ausschließen zu können.**

Die einzelnen Beiträge zur Messunsicherheit nach diesem Verfahren ergeben sich wie folgt:

| | |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| u_{cal} | Standardmessunsicherheit aus dem Kalibrierschein des Substitutionsnormals |
| u_p | Standardmessunsicherheit des Messprozesses |
| u_b | Standardmessunsicherheit aus der systematischen Abweichung zwischen den Ergebnissen am Messobjekt und dem Substitutionsnormal |
| u_w | Standardmessunsicherheit, die den Abweichungen der Materialeigenschaften zwischen Messobjekt und Substitutionsnormal zugeordnet wird |

Die erweiterte Messunsicherheit U ($k = 2$) berechnet sich aus diesen Beiträgen dann gemäß

$$U(k = 2) = 2 \sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_b^2 + u_w^2}.$$

Die folgende Tabelle zeigt eine (möglicherweise unvollständige) Übersicht der Einflussgrößen zu den einzelnen Messunsicherheitskomponenten.

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|
|  | Rückführung von Gewindemessgrößen https://doi.org/10.7795/550.20220914 | DKD-E 4-1 | |
| | | Ausgabe: | 09/2022 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 31 / 42 |

| Einflussgröße | Ermittlungsmethode (GUM) | Bezeichnung |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------|
| Geometrieabweichungen des Messgerätes | Typ A | u_p |
| Temperatur des Messgerätes | | |
| Drift des Messgerätes | | |
| Temperatur des Messobjektes | | |
| Antastabweichungen (systematisch) | | |
| Antastabweichungen (zufällig) | | |
| Wiederholbarkeit des Messgerätes | | |
| Skalenauflösung des Messgerätes | | |
| Temperaturgradienten im Messgerät | | |
| Abweichungen aus Tasterwechsel | | |
| Abweichungen durch Aufspannung, Handhabung | | |
| Abweichungen durch Verschmutzung | | |
| Abweichungen aus der Messstrategie | | |
| Kalibrierunsicherheit des Substitutionsnormals | Typ B | u_{cal} |
| Alle Einflüsse aus u_p und der Messumgebung bei der Messung des Substitutionsnormals | Typ B | u_b |
| Unterschiede zwischen Substitutionsnormal und Messobjekt in <ul style="list-style-type: none"> • Form • Rauheit • Wärmeausdehnungskoeffizient • Elastizität | Typ A oder B | u_w |

6 Rückführung und Normale

6.1 Allgemeines

Die Rückführung ist insbesondere im akkreditierten Bereich als Teil der nationalen Qualitätsinfrastruktur ein wichtiges Konzept. Hierzu muss eine lückenlose und nachvollziehbare Kette von Messungen den Anschluss an nationale Normale gewährleisten, die ihrerseits durch primäre Messverfahren an das internationale Einheitensystem (SI) angeschlossen sind. Die DAkkS hat diesbezüglich das *Merkblatt zur metrologischen Rückführung im Rahmen von Akkreditierungsverfahren* [31] veröffentlicht. Danach müssen die Messgeräte und Hilfsmittel, die zur Kalibrierung der Prüfkörper bzw. zur Einmessung des Messgerätes verwendet werden, einen Kalibrierschein eines Nationalen Metrologieinstituts oder eines Kalibrierlaboratoriums mit Akkreditierungssymbol aufweisen. Durch das Akkreditierungssymbol wird die Kompetenz des Kalibrierlaboratoriums nachgewiesen. Anerkennung finden auch Kalibrierscheine ausländischer Kalibrierstellen, sofern sie Unterzeichner des Multilateralen Übereinkommens der EA (European co-operation for Accreditation) oder der ILAC (International Laboratory Accreditation Cooperation) für Kalibrierungen sind. Dabei muss beachtet werden, dass bei jeder Weitergabe der Einheit ein Verlust an Genauigkeit entsteht, der durch eine ansteigende Messunsicherheit vom Nationalen Metrologieinstitut über das Gebrauchsnormale in der Industrie bis hin zum Produkt gekennzeichnet ist (siehe auch Kalibrierpyramide in Abbildung 1).

Eine Empfehlung zu Rekalibrierfristen der in den folgenden Abschnitten beschriebenen Normale und Messgeräte ist in Kapitel 6.5 zu finden.

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|
|  | Rückführung von Gewindemessgrößen https://doi.org/10.7795/550.20220914 | DKD-E 4-1 | |
| | | Ausgabe: | 09/2022 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 32 / 42 |

6.2 Hilfsmittel zur Kalibrierung

Zu den Hilfsmitteln bei der Kalibrierung von Gewinden zählen beispielsweise Messdrähte und Doppelkugeltaster sowie die Lehren, die zur Justage der Längenmessgeräte dienen. Für die Kalibrierung von Längenmessgeräten sind hauptsächlich Parallelendmaße als hochgenaue Längenverkörperungen sowie Einstellorne und -ringe aber auch Prüfstifte zu nennen. Bei Messungen in Zweiflankenanlage, wie sie in der Gewindemetrologie typischerweise vorkommen, sind diese Normale jedoch unzureichend. Stattdessen sind spezielle Lückennormale oder kalibrierte Gewindelehren zu bevorzugen.

6.2.1 Rückführung Gewindemessdrähte

Zur Rückführung der Gewindemessdrähte ist die Richtlinie VDI/VDE/DGQ 2618 Blatt 4.2 anzuwenden [32]. Diese Richtlinie beschreibt in drei Optionen die Messgrößen Durchmesser, Rundheit und Parallelität. Empfohlen wird für Messdrähte mit einem Durchmesser bis 1 mm die Kalibrierung des Durchmessers und der Rundheit nach Option 2 der Richtlinie. Bei diesen geringen Durchmessern ist die Kalibrierung der Parallelität nur schwer zu realisieren und wird daher nicht empfohlen. Ferner wurde dieser Durchmesserbereich auch noch nicht akkreditiert. Die Formabweichungen wirken sich mit dem Faktor 3 (siehe auch Kapitel 5) direkt auf den Flankendurchmesser aus und sind deshalb auch in der Messunsicherheitsbilanz zu berücksichtigen. Die zusätzliche Kalibrierung der Parallelität (Option 3) wird ab einem Durchmesser von 1 mm empfohlen. Hierzu stehen akkreditierte Stellen zur Verfügung, die diese Kalibrierungen durchführen können. Diese Option stellt eine sinnvolle Ergänzung zur Durchmesser- und Formkalibrierung dar.

6.2.2 Rückführung Doppelkugeltaster

Die Rückführung der Doppelkugeltaster ist nicht eindeutig über eine separate Richtlinie definiert. Daher wird im folgenden Absatz die Kalibrierung und Einmessung der Doppelkugeltaster, die überwiegend zur Messung in Zweiflankenanlage von Innengewinden eingesetzt werden, etwas ausführlicher beschrieben.

Für die Gewindemessung ist eine anwendungsnahe Kugelkalibrierung in den interessierenden Ebenen und Bereichen der Anlagepunkte in der Gewindelücke sinnvoll. Dabei hängt die genaue Lage der Antastpunkte auf den Tastkugeln vom Gewindeprofilwinkel der zu kalibrierenden Lehren und der Ausrichtung des Doppelkugeltasters ab. Da es eine Vielzahl von Regelgewinden mit unterschiedlichen Profilwinkeln gibt, empfiehlt es sich, einen möglichst großen Winkelbereich bei der Kalibrierung abzudecken. Die Ausrichtung wird durch die Anordnung der Kugeln bzw. oftmals auch durch die verwendete Halterung vorgegeben. Des Weiteren ist die Lage der Gewindelehre (horizontal oder vertikal) zu berücksichtigen. Die Anlagepunkte sind dann in einem Winkel von 90° versetzt zur Ausrichtung der Tastkugeln des Doppelkugeltasters. Die an den Tastkugeln aufzunehmenden Messpunkte müssen mindestens den Bereich umfassen, der sich aus dem Gewindeprofilwinkel der vorgesehenen Messobjekte ergibt. Da die Profilwinkel der Gewindelehren und somit auch die interessierenden Bereiche auf den Kugeln variieren, kann auch die komplette Halbkugel kalibriert werden. Eine konkrete Empfehlung ist in [21] beschrieben. In Abbildung 15 ist beispielhaft das Punktemuster einer Kugelkalibrierung zur Messung metrischer Gewinde zu sehen. In einem Winkelbereich von $\pm 10^\circ$ um den Profilwinkel, der die Anlagepunkte der Tastkugeln vorgibt, werden zusätzlich jeweils 2 Kreise oberhalb und unterhalb des Profilwinkels gemessen. Die Kalibrierung der Tastkugeln wird oftmals mit universellen 3D-Koordinatenmessgeräten durchgeführt. Bei diesen Messgeräten ist eine individuelle und somit den Anforderungen entsprechende Programmierung möglich. Zur Rückführung stehen

inzwischen mehrere akkreditierte Kalibrierlaboratorien zur Verfügung, die u. a. speziell für Doppelkugeltaster als Kalibriergegenstand akkreditiert sind.

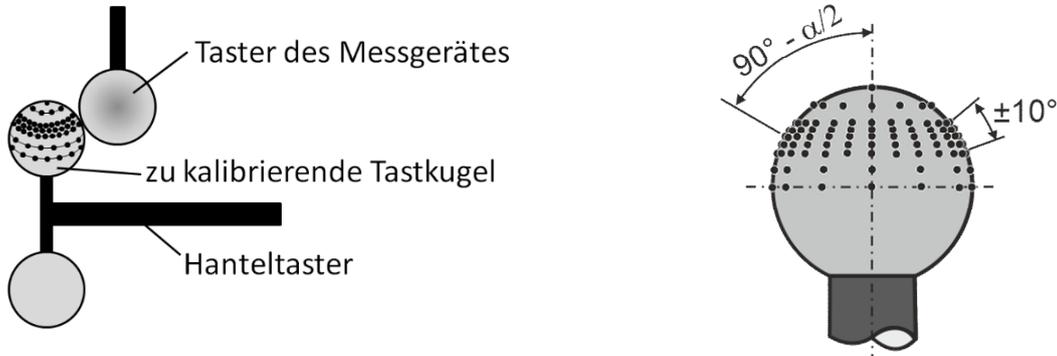


Abbildung 15: Punktemuster zur Kalibrierung von Gewindetastkugeln

Des Weiteren können zur Bestimmung der Hanteltasterkonstanten von Doppelkugeltastern sogenannte Lückennormale zur Anwendung kommen. Der Vorteil dieser Messmethode liegt darin, dass die Bedingungen an oder zumindest nahe den tatsächlichen Anlagepunkten der Gewindeflanken berücksichtigt werden. Außerdem sind die Tasterbiegung und die Antastkraft im Ergebnis der Messung enthalten und bilden die selbstzentrierende Antastung in einer Gewindelücke sehr gut ab.

Das Lückennormal besteht aus mindestens zwei nebeneinanderliegenden kalibrierten Präzisionskugeln, die auf einer thermisch invarianten Grundplatte derart angeordnet sind, dass sie eine oder zwei Lücken abbilden. Eine mögliche Ausführungsform ist in Abbildung 16 skizziert.

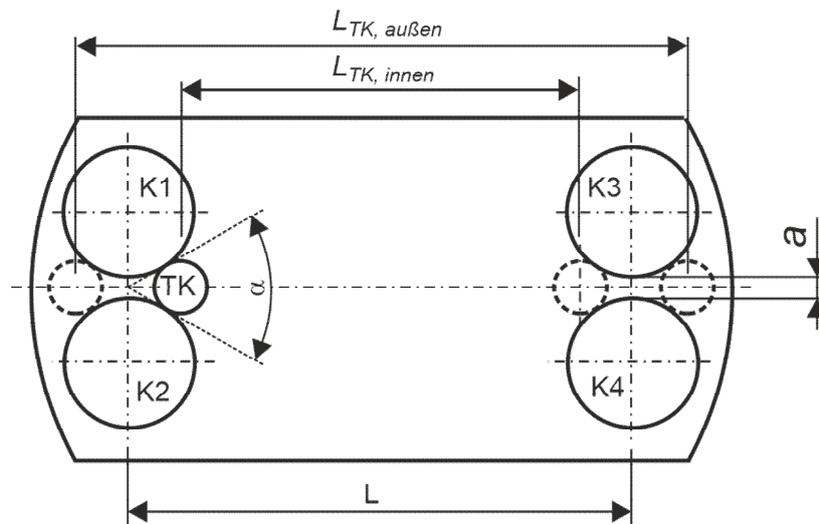


Abbildung 16: Prinzipskizze des Lückennormals

Hierbei bilden die Kugeln K1 und K2 sowie die Kugeln K3 und K4 jeweils zwei Lücken. Die zu messende Länge $L_{TK, innen}$ bzw. $L_{TK, außen}$ ergibt sich aus dem Tastkugeldurchmesser d_{TK} , den Kugeldurchmessern D und den Kugelabständen a und L (Abbildung 16). Der Tastkugeldurchmesser d_{TK} und der Kugelabstand a müssen so aufeinander abgestimmt sein, dass eine

Antastung annähernd unter dem Winkel α erfolgt, der auch für den jeweiligen Anwendungsfall vorliegt. Für metrische Gewinde entspricht dies dem Gewindeprofilwinkel $\alpha = 60^\circ$. Die Auslegung des Lückennormals erfolgt nach Gleichung (9) und Abbildung 16.

$$a = (D + d_{TK}) \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) - D \quad (9)$$

Zur Bestimmung der zu messenden Längen $L_{TK, \text{innen}}$ bzw. $L_{TK, \text{außen}}$ werden die Kugelmittelpunktabstände der Präzisionskugeln K1 bis K4 kalibriert. Hierzu bieten sich beispielsweise Koordinatenmessgeräte an. Zur Genauigkeitssteigerung können Koordinatenmessgeräte mit laserbasierten Messsystemen eingesetzt werden. Aus den Kugelmittelpunkten werden sechs Längenmaße mittels Trilateration ermittelt. Ein Ausführungsbeispiel für ein Lückennormal ist in Abbildung 17 zu sehen. Es wurde ausgelegt für die in der Gewindemesstechnik gebräuchlichsten Gewindeteilungen P von 1 mm bis 6 mm.



Abbildung 17: Exemplarische Darstellung eines Lückennormals

In Tabelle 2 ist die Auslegung eines Lückennormals für metrische Gewinde ($\alpha = 60^\circ$) für einige Gewindeteilungen nach DIN 13-1 exemplarisch dargestellt. Dafür wird zunächst mit Gleichung (1) der optimale Tastkugeldurchmesser d_o ermittelt, der dann in Formel (9) als Tastkugeldurchmesser d_{TK} verwendet wird.

Tabelle 2: Auslegungsbeispiele für verschiedene Gewindegrößen

| Gewindeteilung P in mm (nach DIN 13-1) | Tastkugel- durchmesser d_{TK} in mm | Kugel- durchmesser D in mm | Abstand a in mm | Antastwinkel α in ° |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------|----------------------|-------------------------------|
| 0,35 – 0,6 | 0,23 – 0,35 | 1 | 0,1 | 53 - 70 |
| 0,7 – 1,0 | 0,40 – 0,58 | 2 | 0,1 | 58 - 71 |
| 1,25 – 2,0 | 0,72 – 1,15 | 3 | 0,3 | 55 – 75 |
| 2,5 – 4,0 | 1,44 – 2,31 | 5 | 0,9 | 47 – 72 |
| 4,5 – 6,0 | 2,60 – 3,46 | 5 | 1,9 | 50 - 71 |

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|
|  | Rückführung von Gewindemessgrößen https://doi.org/10.7795/550.20220914 | DKD-E 4-1 | |
| | | Ausgabe: | 09/2022 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 35 / 42 |

Um das Normal für die Substitution einsetzen zu können, muss das Ähnlichkeitskriterium erfüllt sein, siehe hierzu auch Kap. 7. Dies betrifft neben dem Antastwinkel α auch die zu messende Länge $L_{TK, \text{innen}}$ bzw. $L_{TK, \text{außen}}$ (Abbildung 16). Diese Möglichkeit der Rückführung wird in Kapitel 7 noch ausführlicher beschrieben.

6.3 Rückführung der Messgeräte zur Gewindekalibrierung

6.3.1 Längenmessgeräte

Zur Kalibrierung des einfachen Flankendurchmessers werden häufig 1D-Längenmessgeräte eingesetzt, die oftmals durch externe, akkreditierte Anbieter rückgeführt werden (siehe auch Kapitel 4.1). Hierzu stehen dezidierte Normen und Richtlinien wie beispielsweise ISO 10360-2 und -5 sowie VDI 2618 Blatt 17.1 (Prüfanweisung für horizontale Längenmessgeräte) zur Verfügung [33][34][35]. Daher wird in diesem Artikel auf eine ausführliche Beschreibung der Rückführung der Längenmessgeräte verzichtet. Dennoch muss in der Regel vor der Gewindemessung eine Einmessung bzw. ein Nullsetzen des Messsystems erfolgen. Hierzu können sowohl zylindrische Lehren wie Prüfstifte, Einstelldorne und -ringe, als auch Parallelendmaße, die im Allgemeinen eine geringere Messunsicherheit aufweisen, eingesetzt werden. Bei Einstelldornen und -ringen ist darauf zu achten, dass sie entweder vollständig, das heißt in Durchmesser, Form und Parallelität kalibriert sind oder eine Kennzeichnung der kalibrierten Achsen aufweisen. Ist Letzteres der Fall, dann ist eine Kalibrierung des Durchmessers ausreichend, da die Reproduzierbarkeit der Durchmesserkalibrierung über die Markierungen auf den Lehren gegeben ist.

Eine weitere Möglichkeit für eine rückgeführte Gewindekalibrierung ist der Einsatz des Messgerätes als Komparator durch eine Substitutionsmessung mit einer rückgeführten Gewindelehre. Hierzu muss auf die Einhaltung des Ähnlichkeitsprinzips geachtet werden (siehe Kapitel 7).

6.3.2 Konturenmessgeräte

Für das in Kapitel 4.2 beschriebene Verfahren kommen Konturenmessgeräte zum Einsatz. Konturenmessgeräte sind scannende 2D-Messgeräte, deren Messprinzip (auch Tastschnittverfahren genannt) darauf beruht, die Oberfläche des Messobjekts linienhaft in axialer und radialer Richtung des Messobjekts zu erfassen (siehe auch VDI/VDE 2629 Blatt 1 [36]). Bei dieser Messtechnik spielen aufgrund des axialen Vorschubs in Verbindung mit der radialen Abtastung der Kontur die Messkräfte, die Gleitreibung und die daraus resultierenden Kräfte auf den Taster und auf das Messsystem eine große Rolle. Der dabei entstehende Biegeeffekt muss kompensiert werden. Daher wird die Rückführung über geometrisch ähnliche Normale realisiert, siehe auch VDI/VDE 2629 Blatt 2 [37]. Im Wesentlichen werden dazu Planglasplatten, Konturnormale und Präzisionskugeln sowie spezielle Normale zur Einmessung des Tastsystems eingesetzt. In [37] ist allerdings nicht beschrieben, wie die Rückführung auf den Durchmesser realisiert werden muss. Hier bieten sich glatte Lehren wie Einstelldorne und -ringe an. Zur Beurteilung der Geradheitsabweichungen kommen Planglasplatten zum Einsatz. Konturnormale bilden zweidimensionale Regelgeometrien wie beispielsweise Geraden und Kreise ab und lassen eine Beurteilung der Form, des Winkels und der Länge zu. Einstelldorne und Einstellringe sind in nahezu allen Abmessungen verfügbar und sind daher zur Substitution auf die Messgrößen des Durchmessers einsetzbar. Damit das Prinzip der Substitution eingehalten wird, sollte der Durchmesser des Substitutionsnormals max. 10 % vom Durchmesser des Prüflings abweichen. Näheres ist in der ISO 15530-3 beschrieben [28]. Die Tastsysteme bestehen aus einer „Nadel“ mit jeweils einer Tastspitze an den Enden, deren Spitzen je nach Anwendungsfall bis hinunter zu einem Radius von 2 μm zur Rauheitsmessung verwendet werden. Die Spitzen der Taster sind je nach

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|
|  | Rückführung von Gewindemessgrößen https://doi.org/10.7795/550.20220914 | DKD-E 4-1 | |
| | | Ausgabe: | 09/2022 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 36 / 42 |

Anwendungsfall rund oder auch abgeflacht. Die Einmessung erfolgt gerätespezifisch über spezielle Einmessnormale oder auch Präzisionskugeln.

6.3.3 Dreidimensionale Koordinatenmessgeräte

In der Gewindemesstechnik werden dreidimensionale Koordinatenmessgeräte derzeit noch sehr selten eingesetzt (siehe Kapitel 4.3). Sie sind in der Regel teuer in der Anschaffung und in der Unterhaltung. Dennoch bieten diese Messgeräte aufgrund ihrer vielfältigen Einsatzmöglichkeiten besten Voraussetzungen, um die Gewindegeometrie ganzheitlich zu erfassen. Letztendlich sollte die flächenhafte Erfassung und Auswertung der Schraubenfläche das Ziel einer Gewindekalibrierung sein, weil sich dadurch die Paarungsfähigkeit am besten beurteilen lässt. Zur Gewindemessung sollte das KMG mit einem Drehtisch ausgestattet sein. Auch die Rückführung der Koordinatenmessgeräte ist relativ aufwändig. Um die Kinematik eines KMGs mit drei kartesischen Achsen vollständig zu berücksichtigen, müssen insgesamt 21 Komponenten der Geometrieabweichungen auf Basis eines Starrkörpermodells festgestellt und rechnerisch korrigiert werden [38]. Hinzu kommen noch die Abweichungen des Drehtisches. Die Geometrieabweichungen werden über Stufenendmaße, Zerodurlochplatten, Kugelplatten, Kugelnormale oder interferometrische Messsysteme (z. B. Lasertracer) gemessen. Anschließend wird aus den Messergebnissen ein Korrekturfeld errechnet, das dem KMG in jedem Punkt innerhalb des Messvolumens über die Software einen Korrekturwert zuordnet. Trotz dieser aufwändigen Prozedur bleiben Restabweichungen, die dann in der Messunsicherheit bzw. in der Spezifikation der Maschine angegeben werden. Zur Einmessung des Tastsystems werden kalibrierte Referenzkugeln (Präzisionskugeln) eingesetzt. Dadurch wird die Position der Tastelemente im Messvolumen bestimmt. Um diese Position möglichst genau bestimmen zu können, werden die Referenzkugel und zusätzlich ein Referenztaster benötigt, die beide möglichst geringe Formabweichungen aufweisen sollten. Die Referenzkugel muss zusätzlich im Durchmesser kalibriert sein. Mit dem Referenztaster wird nach einer in der Software hinterlegten Routine die Referenzkugel eingemessen, um ihre Mittelpunktkoordinaten zu bestimmen. Anschließend wird das Tastsystem eingemessen. Bei dieser Prozedur werden sämtliche Tastkugeln des Tastsystems in einer zumeist vorgegebenen Routine eingemessen und somit die Position im Messvolumen und auch der Durchmesser der Tastelemente bestimmt. Je nach Durchmesser der Tastelemente kann es notwendig sein, mehrere Referenzkugeln mit unterschiedlichen Durchmessern zu verwenden. Bei Verwendung eines Drehtisches muss die Drehtischachse mit einem geeigneten Verfahren bestimmt werden. Dazu wird in der Regel das Ein- oder Zweikugelfahren angewendet. Durch Messung der Kugel bzw. der beiden Kugeln in ausgewählten Positionen wird die Lage und Orientierung der Achse bestimmt. Die Vorgehensweisen zur Überprüfung der Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten sind ausführlich in der ISO-Normenreihe 10360 sowie der VDI-Richtlinienreihe 2617 beschrieben.

6.4 Aufgabenspezifische Rückführung mittels Substitutionsnormalen

Die Schraubenfläche eines Gewindes ist eine messtechnisch anspruchsvolle Geometrie. Die Antastpunkte bei Zweiflankenanlage liegen nicht im selben Achsschnitt des Gewindes und der Berührungspunkt der Tastkugeln an der Gewindeflanke wird beim Einmessen des Tasters kaum berücksichtigt. Im Gegensatz zu Regelgeometrien, wie sie beispielsweise bei Einstellornen und -ringen oder Parallelendmaßen vorliegen, befinden sich die Antastpunkte im Allgemeinen nicht am Pol oder am Äquator der Tastkugel. Weitere zu berücksichtigende Einflussfaktoren sind die Antastbedingungen speziell bei der Messung mit Doppelkugeltastern im selbstzentrierenden Modus zur Bestimmung der Steigung bzw. der Teilung und des Prüfmaßes für den Flankendurchmesser. Idealerweise wird die Antastkraft auf beide Flankenflächen gleichmäßig verteilt, was in der Praxis nur schwer umsetzbar ist.

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|
|  | Rückführung von Gewindemessgrößen https://doi.org/10.7795/550.20220914 | DKD-E 4-1 | |
| | | Ausgabe: | 09/2022 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 37 / 42 |

Um eine möglichst anwendungsnahe Rückführung zu gewährleisten und auf die genannten Besonderheiten bei Gewinden einzugehen, werden werkstückähnliche Normale eingesetzt. Bei dieser Rückführungsmethode werden die beschriebenen Einflüsse berücksichtigt, sowie die komplette Messkette von der Einmessung des Tasters bis zur Berechnung des Messergebnisses geprüft.

Das Prinzip einer Substitution beruht auf der Verwendung von Normalen (hier Gewindelehren), die idealerweise die gleichen Geometrieparameter abbilden wie der Prüfkörper. Des Weiteren ist es von Vorteil, wenn die Idealgeometrie möglichst gut abgebildet wird und die Abweichungen in Maß und Form klein sind. In diesem Fall sind etwa die Einflüsse aus Differenzen des verwendeten Kugel- oder Drahtdurchmessers vom idealen Wert vernachlässigbar. Das Normal muss sehr gut bekannt sein, d.h. es muss in allen Parametern mit den Anwendungen entsprechend kleinen Messunsicherheiten kalibriert sein. Wenn die Geometrieparameter des Normals bis max. 10 % von den Geometrieparametern des Prüflings abweichen, kann von einem Substitutionsnormal gesprochen werden. Sind die Abweichungen größer, so müssen sie in der Messunsicherheit berücksichtigt werden. Die Berechnung der Messunsicherheit für Substitutionsmessungen ist am Ende von Abschnitt 5.2 dieses Berichtes beschrieben.

6.5 Empfehlungen für Rekalibrierfristen von Bezugsnormalen und Hilfsmitteln

| Bezugsnormal / Hilfsmittel | Empfohlene Rekalibrierfrist | Bemerkung |
|----------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Messdrähte | 1 bis 3 Jahre | je nach Gebrauch; Möglichkeit der Zwischenprüfung |
| Doppelkugeltaster | 1 bis 3 Jahre | je nach Gebrauch; Möglichkeit der Zwischenprüfung |
| Parallelendmaße | max. 3 Jahre | wenn eine Historie vorliegt |
| Einstellringe und -dorne | max. 3 Jahre | wenn eine Historie vorliegt |
| Prüfstifte | 1 bis 3 Jahre | je nach Gebrauch; Möglichkeit der Zwischenprüfung |
| Planglasplatten | keine | Kontrolle auf Beschädigungen der Oberfläche |
| Längenkomparator | 1 Jahr | je nach Häufigkeit der Verwendung ist eine Zwischenprüfung erforderlich |
| Konturenmessgerät | 1 Jahr | je nach Häufigkeit der Verwendung ist eine Zwischenprüfung erforderlich |
| 3D-Koordinatenmessgerät | 2 Jahre | mit Zwischenprüfungen |
| Substitutionsnormale (Gewindelehrdorne und -ringe) | 1 bis 3 Jahre | wenn eine Historie vorliegt |
| Lückennormale | 1 bis 3 Jahre | |

7 Maßnahmenkatalog für Kalibrierlaboratorien

Im Folgenden sind die wichtigsten regelmäßig durchzuführenden Maßnahmen für eine erfolgreiche Kalibrierung von Gewindelehren zusammengefasst.

Die Messergebnisse aus den Messungen dieser Tabelle sind stets zu analysieren. Das bedeutet, sie sind aufzuzeichnen und statistisch auszuwerten, um Veränderungen zu erkennen. Ggf. sind unverzüglich Maßnahmen abzuleiten.

| Zeitintervall | Maßnahme | Bemerkung |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3 bis 5 Jahre | Eignungsprüfung / Vergleichsmessung von Gewindelehren mit anderen akkreditierten Kalibrierlaboratorien | Organisation über DKD-FA <i>Länge</i> , über externe Dienstleister oder eigene Organisation |
| 3 Jahre | externe Kalibrierung der Gebrauchsnormale durch akkreditiertes Kalibrierlaboratorium oder PTB (bzw. ein anderes NMI): <ul style="list-style-type: none"> • Parallelendmaße sowie glatte Ringe und Dorne zur Rückführung der Messgeräte • Gewindelehren zur Verwendung als Substitutionsnormale gemäß ISO 15530-3 bei Gewindekalibrierungen | siehe Kap. 6.3 und 6.4 |
| jährlich | Kalibrierung der verwendeten Messgeräte nach aktuell gültigen Normen und Richtlinien | siehe Kap. 6.3 |
| | Zwischenprüfung der Messeinrichtung , um die korrekte Funktion der Messeinrichtung sicherzustellen | Forderungen der DIN EN ISO/IEC 17025:2018 in Normenpunkten 6.4.1 und 7.7 |
| | Kalibrierung von Messdrähten nach VDI/VDE/DGQ 2618 Bl. 4.2 Option 3 | siehe Kap. 6.2 |
| | Kalibrierung von Doppelkugeltastern (keine Norm oder Richtlinie vorhanden) inkl. Durchmesser und Formmessung, optische Prüfung der Kugeloberfläche | siehe Kap. 6.2 |
| | Kalibrierung der Temperaturmesssysteme in den Messräumen und an den Kalibrierplätzen bzw. Messgeräten mit mind. drei Messpunkten in einem Temperaturbereich von 18 °C bis 22 °C | siehe Kap. 6.2 |
| | Wiederholungskalibrierung laboratoriumseigener Lehren <ul style="list-style-type: none"> • mit unterschiedlichen Verfahren bzw. Messgeräten und Hilfsmitteln • mit unterschiedlichen Mitarbeitern unter gleichen Bedingungen (Messverfahren und Messgeräten) | Forderungen der DIN EN ISO/IEC 17025:2018 im Normenpunkt 7.7 jährlich, bzw. nach Bedarf – kann auch mehrmals jährlich erforderlich sein |

| | | |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| <p>jährlich, bzw. nach Analyse der Messergebnisse</p> | <p>Ableiten von Maßnahmen aus den Messergebnissen (Schulungen, erneute Vergleichsmessungen, Reparaturen, Softwareupdates, Ergänzung / Änderung der Arbeitsanweisungen), inkl. Erfolgskontrolle der Maßnahmen</p> | <p>Forderungen der DIN EN ISO/IEC 17025:2018 im Normenpunkt 7.7</p> |
| <p>bei jeder Kalibrierung von Gewinden</p> | <p>Verwendung von rückgeführten Gebrauchsnormen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gewindelehren zur Kalibrierung nach dem Substitutionsverfahren gemäß ISO 15530-3 [28], die das Ähnlichkeitsprinzip erfüllen. Das heißt, die Geometrieparameter des Prüflings weichen max. 10 % von denen des Substitutionsnormals ab. • Zur Substitution von Kern- (bei Gewindingen) bzw. Außendurchmessern (bei Gewindedornen) kann auf kalibrierte Endmaße, glatte Ringe oder Dorne zurückgegriffen werden. | <p>siehe Kap. 6</p> |
| <p>dauerhaft</p> | <p>kalibrierte Gewindelehren vorhalten (aus vollständiger Geometriemessung entsprechend Abschnitt 4.5) für Innen- und Außengewinde mit guter Lehrenqualität (geringe Maß- und Formabweichungen), in unterschiedlichen Abmessungen zur Verfügung stehen. Sie sollten dem Akkreditierungsumfang angepasst sein und ein möglichst breites Bauteilspektrum abdecken.</p> | <p>Forderungen der DIN EN ISO/IEC 17025:2018 im Normenpunkt 7.7</p> |

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|
|  | Rückführung von Gewindemessgrößen https://doi.org/10.7795/550.20220914 | DKD-E 4-1 | |
| | | Ausgabe: | 09/2022 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 40 / 42 |

8 Literaturverzeichnis

- [1] Torsten Meß: Der Paarungsflankendurchmesser – Untersuchung des begrifflichen Umfeldes, der Einflussgrößen und der Bedeutung für die Funktion, Spezifikation, Fertigung und Prüfung von Gewinden, Dissertation Technische Universität Ilmenau, 2017
- [2] VDI/VDE/DGQ 2618 Blatt 4.8: 2006-04 Prüfmittelüberwachung – Prüfanweisung für zylindrische Gewinde-Einstelldorne, Gewinde-Lehrdorne und Gewinde-Prüfdorne
- [3] VDI/VDE/DGQ 2618 Blatt 4.9: 2006-04 Prüfmittelüberwachung – Prüfanweisung für zylindrische Gewinde-Einstellringe und Gewinde-Lehrringe
- [4] G. Berndt: Die Anlagekorrekturen bei der Bestimmung des Flankendurchmessers von symmetrischen und unsymmetrischen Außen- und Innengewinden nach der Dreidrahtmethode oder mittels zweier Kugeln, Zeitschrift für Instrumentenkunde 60 (1940), 141ff, 177ff, 209ff, 237ff, 272ff.
- [5] M. Kochsiek, J. Lerch: Zur Ermittlung von Bestimmungsgrößen an Gewinden, PTB-Bericht PTB-Me-4, 1974
- [6] EURAMET cg-10 Version 2.1 Determination of Pitch Diameter of Parallel Thread Gauges by Mechanical Probing, December 2012. <https://www.euramet.org/publications-media-centre/calibration-guidelines/>
- [7] DIN EN ISO/IEC 17025: 2018-03 Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025: 2017)
- [8] Marlen Krause, Nationaler DKD-Ringvergleich für Gewindemessgrößen, Vergleichsbericht DKD-V 4.3, <https://dx.doi.org/10.7795/550.20180302>
- [9] DIN EN ISO/IEC 17043:2010-05 Konformitätsbewertung – Allgemeine Anforderungen an Eignungsprüfungen
- [10] DIN 2244:2002-05 Gewinde – Begriffe und Bestimmungsgrößen für zylindrische Gewinde
- [11] ISO 5408:2009-06 Screw threads – Vocabulary
- [12] EURAMET.L-S21 Final Report, 2015, 76 pages Metrologia, 2015, 52, Tech. Suppl., 04003 <https://www.bipm.org/documents/20126/45452755/EURAMET.L-S21.pdf/4a223b8c-4a01-82c0-b6b1-508c3e52c2fb>
- [13] S. Schädel, A. Wedmann, M. Stein: Advanced screw thread metrology using an areal measuring strategy and a holistic evaluation method, Meas. Sci. Technol. 2019, 30, 075009, <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab1501>
- [14] A. Przyklenk, S. Schädel, M. Stein: Verification of a calibration method for 3D Screw Thread Metrology, Meas. Sci. Technol. 2021, 32, 094005, <https://doi.org/10.1088/1361-6501/abead2>
- [15] M. Stein, F. Keller, A. Przyklenk: A Unified Theory for 3D Gear and Thread Metrology, Appl. Sci. 2021, 11, 7611, <https://doi.org/10.3390/app11167611>
- [16] M. Chen: Compensation of thread profile distortion in image measuring screw thread, Measurement. 129 (2018) 582–588, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.041>
- [17] V. Ullmann, T. Meß, K. Wenzel, T. Machleidt, E. Manske: A new approach for holistic thread profile determination supported by optical focus variation measurements. In: Engineering for a Changing World: Proceedings; 59th IWK, Ilmenau Scientific Colloquium, Technische Universität Ilmenau, September 11-15, 2017. Bd. 59, 2017. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2017iwk-040:7>
- [18] JCGM 200: 2012 International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM), 3rd edition.
- [19] Burghart Brinkmann: Internationales Wörterbuch der Metrologie – Grundlegende und allgemeine Begriffe und zugeordnete Benennungen (VIM), Beuth-Verlag, Berlin, 2012

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------|
|  | Rückführung von Gewindemessgrößen https://doi.org/10.7795/550.20220914 | DKD-E 4-1 | |
| | | Ausgabe: | 09/2022 |
| | | Revision: | 0 |
| | | Seite: | 41 / 42 |

- [20] M. Stein, F. Härtig: 3D Involute gear evaluation – Supplement: Measurements in double-flank contact, *Measurement* 176 (2021), 109079, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109079>
- [21] Achim Wedmann, Karin Kniel, Thomas Krah, Frank Härtig: Genauigkeitssteigerung bei Messungen in Zweiflankenanlage, *tm – Technisches Messen* 2014; 81(7–8): 381–386, <https://doi.org/10.1515/teme-2014-1034>
- [22] JCGM 100:2008: Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement
- [23] 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
- [24] JCGM 104:2009: Evaluation of measurement data – An introduction to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” and related documents
- [25] Weise K., Wöger W., *A Bayesian theory of measurement uncertainty*, *Meas. Sci. Technol.* 3, 1992, S. 1–11,
- [26] Bich W. et al., *Revision of the ‘Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement’*, *Metrologia* 49(6), 2012, S. 702-705. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/6/702>
- [27] ISO/TS 15530-1: 2013-09, Geometrical product specifications (GPS) – Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement – Part 1: Overview and metrological characteristics
- [28] ISO 15530-3: 2011-10, Geometrical product specifications (GPS) – Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement - Part 3: Use of calibrated workpieces or measurement standards
- [29] ISO/TS 15530-4: 2008-06, Geometrical Product Specifications (GPS) – Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement – Part 4: Evaluating task-specific measurement uncertainty using simulation
- [30] EURAMET, Standards for the evaluation of the uncertainty of coordinate measurements in industry (17NRM03 EUCoM), <https://eucom-empir.eu/>
- [31] DAkkS: Merkblatt zur metrologischen Rückführung im Rahmen von Akkreditierungsverfahren, 71 SD 0 005, Revision: 1.4, Februar 2016
- [32] VDI/VDE/DGQ 2618 Blatt 4.2:2007-07 Prüfmittelüberwachung – Prüfanweisung für Prüfstifte/Gewindeprüfstifte
- [33] DIN EN ISO 10360-2: 2010-06 Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) – Teil 2: KMG angewendet für Längenmessungen (ISO 10360-2:2009)
- [34] DIN EN ISO 10360-5: 2020-11 Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmesssysteme (KMS) – Teil 5: Koordinatenmessgeräte (KMG) mit berührendem Messkopfsystem im Einzelpunkt- und/oder Scanningmodus (ISO 10360-5:2020)
- [35] VDI/VDE/DGQ 2618 Blatt 17.1: 2014-12 Prüfmittelüberwachung – Prüfanweisung für horizontale Längenmessgeräte
- [36] VDI/VDE 2629 Blatt 1:2008-08 Genauigkeit von Konturenmessgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung – Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Konturenmessgeräte nach dem taktilen Tastschnittverfahren
- [37] VDI/VDE 2629 Blatt 2: 2019-08 Genauigkeit von Konturenmessgeräten – Kenngrößen und deren Prüfung – Ermittlung der Unsicherheit von spezifischen Konturenmessungen mit Normalen/kalibrierten Werkstücken
- [38] Robert J. Hocken, Paulo H. Pereira (Hrsg.): *Coordinate Measuring Machines and Systems*, second edition, CRC Press, New York, 2011. <https://doi.org/10.1201/b11022>



Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Deutscher Kalibrierdienst
Bundesallee 100
38116 Braunschweig

www.dkd.eu
www.ptb.de