

Entwicklung eines hochpräzisen Positioniersystems für ein LDA-Volumenstrommessnormal

High precision positioning system for LDA volume flow rate measurements

M. Juling, J. Steinbock, T. Lederer

AG Neue Verfahren der Wärmemengenmessung

Physikalisch-Technische Bundesanstalt - Institut Berlin, Abbestr. 2-12, 10587 Berlin

LDA, Positioniersystem, Messvolumen, Volumenstrom, Normal, Messunsicherheit

LDA, positioning system, measurement volume, volume flow rate, measurement uncertainty

Zusammenfassung

Für die Rückführung des Volumenstromes von Wasser bei hohen Temperaturen mit Hilfe der Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) wurde an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt ein Positioniersystem entwickelt mit dem das Messvolumen innerhalb der Messebene mit einer Unsicherheit von maximal 67 μm positioniert werden kann. Eine Unsicherheitsanalyse erläutert die Beiträge zu dieser Unsicherheit und mit Hilfe von Vergleichsmessungen an einem Koordinatenmessgerät wird das Unsicherheitsbudget validiert.

Einleitung

An der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Berlin wird ein Prüfstand zur Volumenstrommessung von Wasser für Temperaturen bis 230 °C und Volumenströme von bis zu 200 m^3/h aufgebaut. Die Rückführung des Volumenstromes wird durch ein LDA-Messsystem verwirklicht. Dazu wird das Geschwindigkeitsprofil innerhalb einer Rohrleitung punktuell mit Hilfe einer LDA-Sonde gemessen und anschließend integriert.

Ein für das Messsystem erstelltes Unsicherheitsbudget zeigt, dass die Unsicherheit der Volumenstrommessung zu großen Teilen von der Unsicherheit des Positioniersystems für die LDA-Sonde bestimmt wird. Besonders im wandnahen Bereich, in dem große Geschwindigkeitsgradienten auftreten, hat die Unsicherheit der Positionierung einen großen Einfluss auf den integrierten Volumenstrom. Da diese Unsicherheit bei der Anwendung der LDA bisher kaum Berücksichtigung findet, wird in diesem Beitrag ein Messunsicherheitsbudget für ein 3-achsiges serielles Positioniersystem präsentiert.

Das Unsicherheitsbudget zeigt, dass die Unsicherheit konventioneller Positioniersysteme für den Aufbau eines Normalmesssystems deutlich zu groß ist. Mithilfe des Unsicherheitsbud-



Abb. 1: Positioniersystem

gets werden daher die treibenden Unsicherheitsbeiträge identifiziert und es wird erläutert, wie diese verringert werden können. Auf dieser Basis wird ein präzises Positioniersystem (siehe Abb. 1) konstruiert und aufgebaut, das die einzelnen Unsicherheitsbeiträge minimiert.

Positioniersystem

Das konstruierte Positioniersystem besteht aus drei motorisierten Lineartischen in serieller Anordnung, die eine automatisierte Positionierung in 3 Dimensionen erlauben. Die Lineartische für die x- und die y-Achse werden direkt miteinander verschraubt. Der Lineartisch für die z-Richtung wird mit einem Winkel auf dem Lineartisch der y-Achse befestigt. Die Lineartische haben einen Stellweg von 200 mm für die y- und die z-Achse und einen Stellweg von 300 mm für die x-Achse.

Wie später noch gezeigt wird, stellen die Winkelfehler der Lineartische einen großen Unsicherheitsbeitrag dar. Um diesen Beitrag gering zu halten, werden Lineartische verwendet, die breite Schlitten und präzise gefertigte Führungsschienen besitzen. Es werden Lineartische der Serie LIMES 150 der OWIS GmbH verwendet, für die ein maximaler Winkelfehler von $0,005^\circ$ angegeben ist (OWIS GmbH, 2013).

Um den Positionierfehler in Verfahrriichtung zu reduzieren werden Linearmesssysteme verwendet. Das verwendete Linearmesssystem MSA 770.51-0 der Firma RSF Elektronik Ges.m.b.H. ist mit einem Fehler von $3\ \mu\text{m}/\text{m}$ angegeben. Durch die Verwendung eines Linearmesssystems wird außerdem der Positionierfehler unabhängig vom verwendeten Antrieb und es kann daher ein günstiger Schrittmotor als Antrieb verwendet werden.

Einen weiteren großen Beitrag zur Positionierungsunsicherheit stellen die Winkelfehler bei der Ausrichtung der Lineartische zueinander dar. Um diesen Beitrag zu minimieren, erfolgt die Justierung der Lineartische des Positioniersystems mit Hilfe eines Koordinatenmessgerätes (KMG) (siehe Abb. 2). Als KMG wird das Gerät „Global Image 7105“ der Firma Hexagon Metrology verwendet, das innerhalb des zu untersuchenden Arbeitsvolumens einen maximalen Messfehler von $3\ \mu\text{m}$ aufweist. Mit Hilfe des KMG werden mehrere Positionen entlang der Bewegungsachsen vermessen und damit die Winkelabweichungen zwischen den Lineartischen bestimmt. Diese können mit einem maximalen Fehler von $0,0004^\circ$ gemessen werden. Die Lineartische werden anschließend neu ausgerichtet und wieder vermessen bis die Winkelabweichungen ausreichend klein sind. Somit konnten die in Tab. 1 aufgeführten Abweichungen zur orthogonalen Ausrichtung der Positionierachsen erreicht werden. Abschließend wird die Positionierung des justierten Positioniersystems mithilfe des Koordinatenmessgerätes überprüft und damit das Messunsicherheitsbudget validiert.

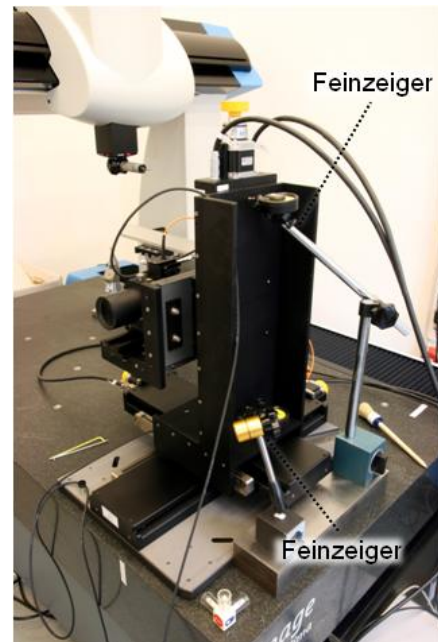


Abb. 2: Justage am KMG

Tab. 1: Winkelabweichung Lineartische

Winkel x-y / °	-0,0069
Winkel x-z / °	0,0053
Winkel y-z / °	0,0007

Unsicherheitsbetrachtung für ein serielles Positioniersystem

Die Unsicherheit des Positioniersystems wird von vielen Fehlerquellen bestimmt. Einen Überblick über mögliche Fehlerquellen gibt die Veröffentlichung von (Mekid, et al., 2010). Für das konstruierte Positioniersystem werden folgende Fehlerquellen betrachtet:

- Geradheitsfehler der Lineartische
- Winkelfehler der Lineartische
- Positionierfehler der Lineartische in Fahrerrichtung
- Winkelfehler bei der Ausrichtung der Lineartische.

Die Geradheits- und Winkelfehler der Lineartische resultieren aus Toleranzen bei der Fertigung der Führungsschienen. Zu den Geradheitsfehlern gehören der Höhengschlag Δ_{HS} und der Seitenschlag Δ_{SS} (siehe Abb. 3). Zu den Winkelfehlern zählen der Gierwinkelfehler θ_{Gier} , der Rollwinkelfehler θ_{Roll} und der Nickwinkelfehler θ_{Nick} (siehe Abb. 4) (Hermann, 2007).

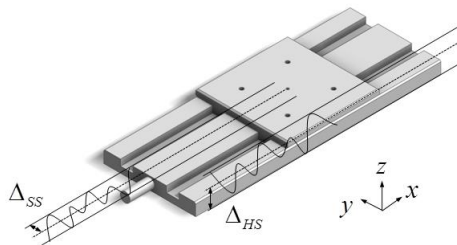


Abb. 3: Geradheitsfehler der Lineartische

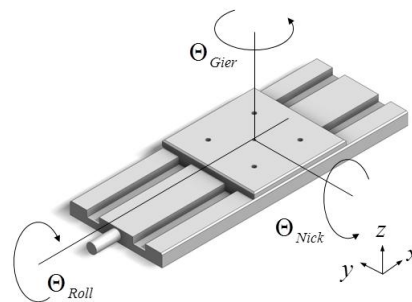


Abb. 4: Winkelfehler der Lineartische

Weitere mögliche Fehlerquellen werden bei der Konstruktion des Systems bereits berücksichtigt. Einem möglichen Temperatureinfluss auf das System wird durch eine Klimatisierung des gesamten Positioniersystems begegnet und einer möglichen lastabhängigen Verformung des Systems wird vorgebeugt, indem das System unter Last justiert und validiert wird.

Für die Berechnung der Unsicherheit wird ein Satz von Prozessgleichungen hergeleitet, der die Position des Messvolumens P_{MV} beschreibt (siehe Abb. 5). Für eine exakte Lösung müsste bei dieser Berechnung von einem schiefwinkligen Koordinatensystem ausgegangen werden. Da die Winkelfehler für das konstruierte Positioniersystem jedoch sehr gering sind, wird ein vereinfachtes Verfahren verwendet, bei dem zunächst von einem idealen kartesischen Koordinatensystem ausgegangen wird, um den Einfluss des Höhen- und Seitenschlages durch Translation zu berechnen. Anschließend wird der Einfluss der Winkelfehler durch mehrere Rotationen beschrieben.

Zunächst werden alle Translationen aufgestellt, die durch die einzelnen Lineartische hervorgerufen werden. Begonnen wird beim Basispunkt P_0 des Positioniersystems. Die Punkte P_1 , P_2 und P_3 stellen die Mittelpunkte der Schlitten der jeweiligen Lineartische dar.

Als erstes werden die Translationen durch den Lineartisch 1 betrachtet (siehe Abb. 6). In x-Richtung ist der Punkt P_1 gegenüber dem Punkt P_0 um den Fahrweg Δx_1 des Lineartisches verschoben. Die Unsicherheit dieses Wertes resultiert aus der Unsicherheit des Linearmesssystems. In y-Richtung erfolgt nur eine Verschiebung um den Wert des Seitenschlages $\Delta_{SS,1}$ des

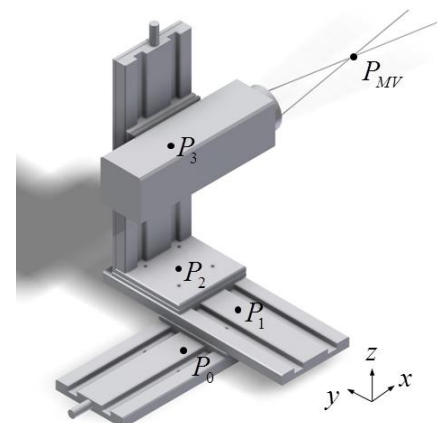


Abb. 5: Skizze Positioniersystem

Lineartisches 1. In z-Richtung erfolgt eine Verschiebung um die Höhe des Lineartisches h_1 und den Höhengschlag des Lineartisches $\Delta_{HS,1}$. Die Translationen für den Lineartisch 1 werden daher durch die Gleichungen 1-3 beschrieben. Die Translation durch den Lineartisch 2 erfolgt vom Punkt P_1 zum Punkt P_2 (siehe Abb. 7). Das Vorgehen für die Lineartische 2 und 3 entspricht dem Vorgehen für den Lineartisch 1.

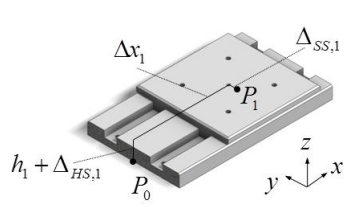


Abb. 6: Translation Lineartisch 1

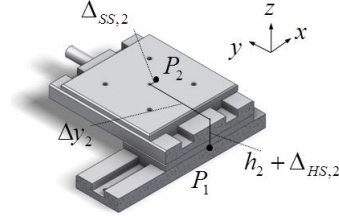


Abb. 7: Translation Lineartisch 2

$$\begin{aligned} x_1 &= x_0 + \Delta x_1 & \text{(Gl.1)} \\ y_1 &= y_0 + \Delta_{SS,1} & \text{(Gl.2)} \\ z_1 &= z_0 + h_1 + \Delta_{HS,1} & \text{(Gl.3)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_2 &= x_1 + \Delta_{SS,2} & \text{(Gl.4)} \\ y_2 &= y_1 + \Delta y_2 & \text{(Gl.5)} \\ z_2 &= z_1 + h_2 + \Delta_{HS,2} & \text{(Gl.6)} \end{aligned}$$

Damit werden die Koordinaten des Messvolumens $P_{MV,Trans}$ nach der Translation erhalten. Nach der Translation wird als nächstes die Rotation betrachtet, die durch die Winkelfehler der Lineartische und die Winkelfehler bei der Ausrichtung der Lineartische entsteht. Für die Rotation um die jeweilige Achse gelten die folgenden Rotationsmatrizen.

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad R_y = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad R_z = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{(Gl. 7)}$$

Für die Winkelfehler des Lineartisches 1 wird der Mittelpunkt des Schlittens P_1 als Drehpunkt definiert (siehe Abb. 8). Die Koordinaten des Drehpunktes werden von den Koordinaten des Messvolumens $P_{MV,Trans}$ subtrahiert. Anschließend werden die Rotationsoperationen sequenziell angewendet. Das Nicken des Lineartisches 1 stellt eine Rotation um die globale y-Achse dar (Gleichung 8 bis 10). Auf das Ergebnis wird eine Rotation um die z-Achse angewendet, was einem Gieren des Lineartisches 1 entspricht (Gleichung 11 bis 13). Anschließend wird das Rollen des Lineartisches 1 als eine Rotation um die x-Achse (Gleichung 14 bis 16) angewendet.

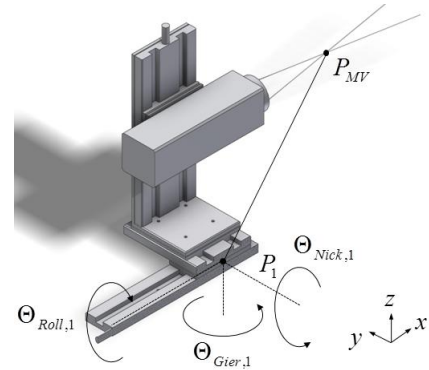


Abb. 8: Rotation Lineartisch 1

$$x_{MV,Nick1} = (x_{MV,Trans} - x_1) \cdot \cos(\theta_{Nick,1}) + (z_{MV,Trans} - z_1) \cdot \sin(\theta_{Nick,1}) \quad \text{(Gl. 8)}$$

$$y_{MV,Nick1} = y_{MV,Trans} - y_1 \quad \text{(Gl. 9)}$$

$$z_{MV,Nick1} = -(x_{MV,Trans} - x_1) \cdot \sin(\theta_{Nick,1}) + (z_{MV,Trans} - z_1) \cdot \cos(\theta_{Nick,1}) \quad \text{(Gl. 10)}$$

$$x_{MV,Gier1} = x_{MV,Nick1} \cdot \cos(\theta_{Gier,1}) - y_{MV,Nick1} \cdot \sin(\theta_{Gier,1}) \quad \text{(Gl. 11)}$$

$$y_{MV,Gier1} = x_{MV,Nick1} \cdot \sin(\theta_{Gier,1}) + y_{MV,Nick1} \cdot \cos(\theta_{Gier,1}) \quad \text{(Gl. 12)}$$

$$z_{MV,Gier1} = z_{MV,Nick1} \quad \text{(Gl. 13)}$$

$$x_{MV,Roll1} = x_{MV,Gier1} \quad \text{(Gl. 14)}$$

$$y_{MV,Roll1} = y_{MV,Gier1} \cdot \cos(\theta_{Roll,1}) - z_{MV,Gier1} \cdot \sin(\theta_{Roll,1}) \quad \text{(Gl. 15)}$$

$$z_{MV,Roll1} = y_{MV,Gier1} \cdot \sin(\theta_{Roll,1}) + z_{MV,Gier1} \cdot \cos(\theta_{Roll,1}) \quad \text{(Gl. 16)}$$

Abschließend wird der Drehpunkt wieder addiert und die Koordinaten des Messvolumens nach der Translation $P_{MV,Trans}$ subtrahiert. Das Ergebnis ist die Auslenkung des Messvolumens durch die Winkelfehler des Lineartisches 1.

$$\Delta x_{MV,Lin1} = x_{MV,Roll1} + x_1 - x_{MV,Trans} \quad (Gl. 17)$$

$$\Delta y_{MV,Lin1} = y_{MV,Roll1} + y_1 - y_{MV,Trans} \quad (Gl. 18)$$

$$\Delta z_{MV,Lin1} = z_{MV,Roll1} + z_1 - z_{MV,Trans} \quad (Gl. 19)$$

Das Vorgehen für die Lineartische 2 und 3 ist analog zum Vorgehen beim Lineartisch 1 (siehe Abb. 9 und 10)

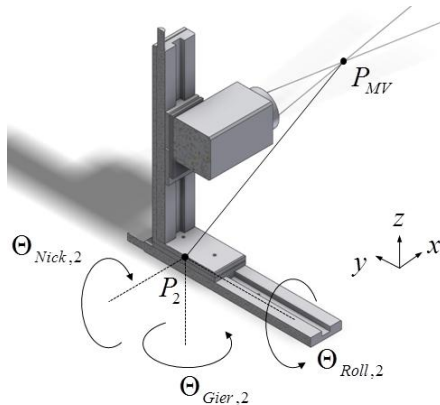


Abb. 9: Rotation durch den Lineartisch 2

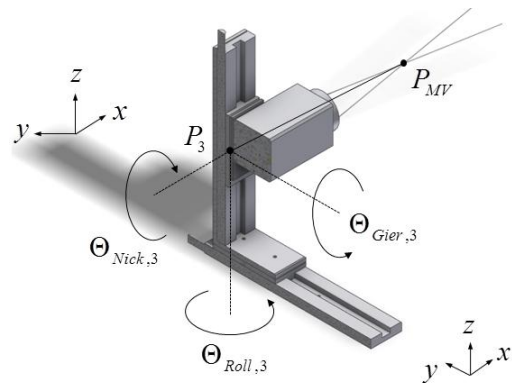


Abb. 10: Rotation durch den Lineartisch 3

Winkelfehler, die bei der Justierung der Lineartische auftreten, werden als Gier-, Roll- und Nickfehler der entsprechenden Lineartische aufgefasst. Die Winkelfehler setzen sich dann aus einem Beitrag des Lineartisches und einem Beitrag der Ausrichtung zusammen (siehe Gl. 20 bis 22).

$$\theta_{Gier,1} = \theta_{Gier,1,Lin} + \theta_{Gier,1,Ausri} \quad (Gl. 20)$$

$$\theta_{Roll,2} = \theta_{Roll,2,Lin} + \theta_{Roll,2,Ausri} \quad (Gl. 21)$$

$$\theta_{Nick,2} = \theta_{Nick,2,Lin} + \theta_{Nick,2,Ausri} \quad (Gl. 22)$$

Die endgültige Position des Messvolumens ist dann die Summe der Translationen und der Rotationen und berechnet sich wie folgt:

$$x_{MV} = x_{MV,Trans} + \Delta x_{MV,Lin1} + \Delta x_{MV,Lin2} + \Delta x_{MV,Lin3} \quad (Gl. 23)$$

$$y_{MV} = y_{MV,Trans} + \Delta y_{MV,Lin1} + \Delta y_{MV,Lin2} + \Delta y_{MV,Lin3} \quad (Gl. 24)$$

$$z_{MV} = z_{MV,Trans} + \Delta z_{MV,Lin1} + \Delta z_{MV,Lin2} + \Delta z_{MV,Lin3} \quad (Gl. 25)$$

Die Berechnung der Unsicherheit der Positionierung erfolgt nach dem Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) (BIPM, 2008) mit der Software GUM Workbench der Metrodata GmbH. Für die Berechnung werden die Modellgleichungen (Gleichung 23 bis 25) zunächst nach allen Einflussgrößen partiell abgeleitet. Als Ergebnis werden die Sensitivitätskoeffizienten erhalten. Diese multipliziert mit den Unsicherheiten der Eingangsgrößen ergeben die Unsicherheitsbeiträge. Die geometrische Summe der Unsicherheitsbeiträge stellt die Unsicherheit des Positioniersystems dar.

Die Unsicherheit für die Eingangsgrößen der Lineartische und der Linearmesssysteme wird aus den Herstellerangaben gemäß dem GUM abgeleitet. Die Unsicherheit bei der Justierung der Lineartische zueinander wird aus den Messdaten vom KMG abgeleitet (siehe Tab. 1).

Das so berechnete Unsicherheitsbudget für die Positionierung mit dem vorgestellten Positioniersystem ist in Tabelle 2 aufgeführt. Für jede Eingangsgröße und Achse sind der absolute und der relative Unsicherheitsbeitrag angegeben. Alle Einflussgrößen mit Unsicherheitsbei-

trägen, die mehr als 2 % zur Gesamtunsicherheit beitragen, sind grau hinterlegt und die drei größten Unsicherheitsbeiträge einer Achse sind jeweils fett gedruckt.

Es ist festzustellen, dass die Gesamtunsicherheit des Positioniersystems fast ausschließlich durch die Winkelfehler bestimmt und limitiert ist. Bei den Winkelfehlern überwiegen zudem die Fehler bei der Justierung. Beispielsweise hat der Winkelfehler zwischen der x- und der y-Achse $\theta_{Gier,1,Ausri}$ einen Beitrag von 78,5 % auf die Gesamtunsicherheit der y-Position des Messvolumens und einen Beitrag von 53,1 % auf die Gesamtunsicherheit der x-Position. Die Unsicherheitsbeiträge durch den Seitenschlag, den Höenschlag und das Linearmesssystem sind jeweils kleiner als 2 % und beeinflussen damit die gesamte Unsicherheit nur wenig. Daraus folgt, dass die erreichbare Unsicherheit hauptsächlich durch die Justierung der Achsen zueinander und nicht durch die verwendeten Lineartische limitiert ist.

Tab. 2: Unsicherheitsbudget für eine 3-D Positionierung

Eingangsgröße		Unsicherheitsbeitrag					
		x		y		z	
		[μm]	[%]	[μm]	[%]	[μm]	[%]
Linearmesssystem 1	Δx_1	1,7	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Linearmesssystem 2	Δy_2	0,0	0,0	1,7	0,0	0,0	0,0
Linearmesssystem 3	Δz_3	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	0,2
Seitenschlag 1	$\Delta_{SS,1}$	0,0	0,0	1,7	0,0	0,0	0,0
Höenschlag 1	$\Delta_{HS,1}$	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	0,2
Seitenschlag 2	$\Delta_{SS,2}$	1,7	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Höenschlag 2	$\Delta_{HS,2}$	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7	0,2
Seitenschlag 3	$\Delta_{SS,3}$	1,7	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Höenschlag 3	$\Delta_{HS,3}$	0,0	0,0	1,7	0,0	0,0	0,0
Winkel x/y-Achse	$\theta_{Gier,1,Ausri}$	33,0	53,1	74,0	78,5	0,0	0,0
Gierwinkelfehler 1	$\theta_{Gier,1,Lin}$	6,7	2,2	15,0	3,2	0,0	0,0
Rollwinkelfehler 1	$\theta_{Roll,1}$	0,0	0,0	19,0	5,0	9,0	5,0
Nickwinkelfehler 1	$\theta_{Nick,1}$	19,0	16,6	0,0	0,0	20,0	24,5
Gierwinkelfehler 2	$\theta_{Gier,2}$	3,4	0,6	15,0	3,2	0,0	0,0
Winkel x/z-Achse	$\theta_{Roll,2,Ausri}$	17,0	14,2	0,0	0,0	22,0	28,9
Rollwinkelfehler 2	$\theta_{Roll,2,Lin}$	16,0	12,0	0,0	0,0	20,0	24,5
Winkel y/z-Achse	$\theta_{Nick,2,Ausri}$	0,0	0,0	6,9	0,7	2,0	0,2
Nickwinkelfehler 2	$\theta_{Nick,2,Lin}$	0,0	0,0	16,0	3,6	4,6	1,3
Gierwinkelfehler 3	$\theta_{Gier,3}$	0,4	0,0	0,0	0,0	15,0	13,8
Rollwinkelfehler 3	$\theta_{Roll,3}$	4,6	1,0	20,0	5,7	0,0	0,0
Nickwinkelfehler 3	$\theta_{Nick,3}$	0,0	0,0	0,5	0,0	4,6	1,3
erw. Unsicherheit ($k = 2$)		91		170		80	

Durch Variation der Eingangsgrößen können weitere Anwendungsfälle mit Hilfe des Unsicherheitsbudgets berechnet werden (siehe Tab. 3). Wird mit dem Positioniersystem nur entlang eines Messpfades durch die Rohrleitung positioniert reduziert sich die Unsicherheit auf maximal 42 μm . Bei einer Positionierung in einer Messebene durch die Rohrleitung beträgt die Unsicherheit maximal 67 μm .

Tab. 3: Unsicherheit der Positionierung für verschiedene Anwendungsfälle

Anwendungsfall	erw. Unsicherheit ($k = 2$) / μm		
	x	y	z
Messpfad (x-Achse), konstruiertes Positioniersystem (LIMES 150)	30	42	41
Messebene (x-z-Ebene), konstruiertes Positioniersystem (LIMES 150)	40	58	67
ges. Arbeitsvolumen, konstruiertes Positioniersystem (LIMES 150)	91	170	80
ges. Arbeitsvolumen, konv. Positioniersystem (LTM 80), mit Justage	200	340	260
ges. Arbeitsvolumen, konv. Positioniersystem (LTM 80), ohne Justage	4000	5500	4500

Weiterhin wird ein Positioniersystem betrachtet, bei dem die Lineartische durch eine andere Baureihe ersetzt werden, die breitere Fehlergrenzen aufweist (siehe Tab. 3). Die Lineartische der Baureihe LIMES 150 werden durch die Baureihe LTM 80 ohne Linearmesssystem ersetzt. Die Unsicherheit in Bewegungsrichtung der Lineartische ist aufgrund des fehlenden Linearmesssystems mit $25\ \mu\text{m}$ 8-mal größer als bei der zuvor verwendeten LIMES Baureihe mit Linearmesssystem. Der Höhen- und Seitenschlag der LTM Baureihe ist 2,5-fach bis 4-fach größer als bei der LIMES Baureihe und die Winkelfehler sind etwa 4-mal größer. Die Fehler bei der Ausrichtung der Lineartische bleiben unverändert zum Positioniersystem, das auf der LIMES Baureihe basiert. Der Vergleich mit dem Positioniersystem, das auf der LIMES Baureihe basiert, zeigt eine 2- bis 3-fach größere Unsicherheit. Der Einfluss der Justierung der Lineartische zueinander bezogen auf die Gesamtunsicherheit ist in diesem Fall vergleichsweise gering und beträgt maximal 18,3 %. Dementsprechend ist das auf der LTM Baureihe basierende Positioniersystem in der minimal erreichbaren Unsicherheit durch die Winkelfehler der Lineartische begrenzt und nicht durch die erreichbare Abweichung bei der Justierung der Lineartische zueinander.

Jedoch ist eine Justierung der Lineartische auf jeden Fall erforderlich, wie eine Beispielrechnung für ein nicht mit Hilfe von Messverfahren justiertes Positioniersystem zeigt (siehe Tab. 3). Üblicherweise erfolgt die Montage der Lineartische mit Hilfe von Zylinderstiften in den dafür vorgesehenen Bohrungen in den Lineartischen und den Schlitten. Die damit verbundenen Toleranzen ergeben eine Unsicherheit bei der Ausrichtung der Lineartische. Die Bohrungen haben bei den Lineartischen der Baureihe LTM-80 einen Abstand von 30 mm. Wird für die Fertigung die Toleranzklasse f (fein) nach DIN ISO 2768-1 angenommen, ist von einer Winkelabweichung von maximal $0,5^\circ$ auszugehen. In diesem Fall betragen die Unsicherheiten bei der Positionierung mehr als 4 mm. Der Einfluss der Winkelfehler durch die Ausrichtung ist dominierend. Die Fehlerquellen der Lineartische haben keinen nennenswerten Einfluss auf die Gesamtunsicherheit des Positioniersystems. Ein solches System wäre für die meisten LDA Anwendungen ungeeignet. Es sollte daher immer eine Justierung der Achsen vorgenommen werden, um die Unsicherheit zu verringern.

Validierung

Die Validierung des Messunsicherheitsbudgets für das Positioniersystems erfolgt durch einen Vergleich mit dem KMG an 56 Positionen innerhalb des Arbeitsvolumens (siehe Abb. 2). Die Positionen sind in Anlehnung an

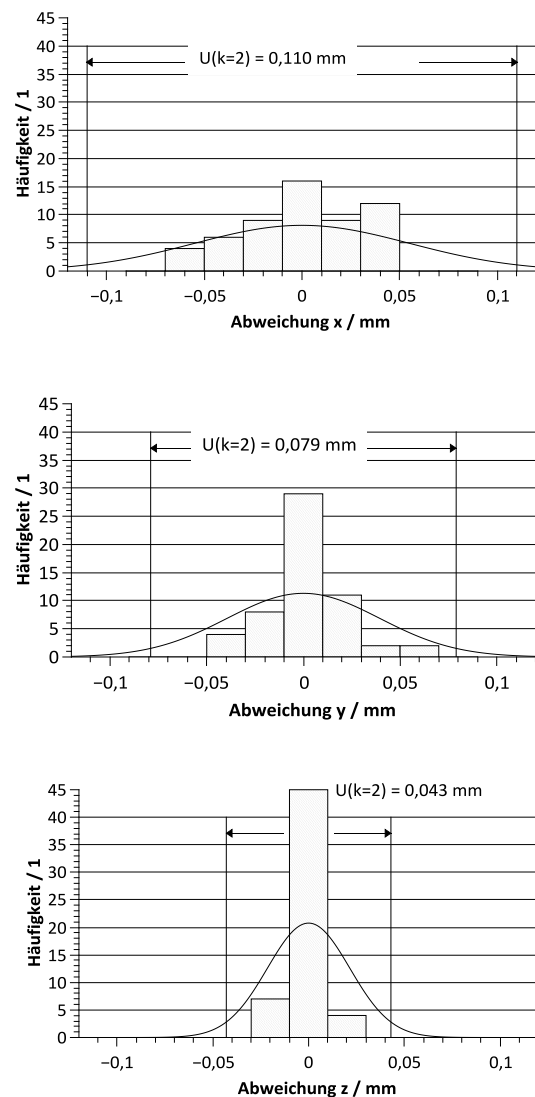


Abb. 11: Histogramm der Abweichung zwischen der Sollposition und der am KMG gemessenen Position für das gesamte Arbeitsvolumen

die DIN EN ISO 10360 entlang der Kanten und Diagonalen des Arbeitsquaders sowie entlang der Ursprungsgeraden angeordnet. Die Abweichungen zwischen der Position des Positioniersystems und der Messung mit dem KMG sind als Histogramm in Abbildung Abb. 11 dargestellt. In den Histogrammen ist außerdem die gemäß der Unsicherheitsbetrachtung zu erwartende Normalverteilung der Abweichung eingezeichnet. Das Intervall, indem gemäß der Unsicherheitsbetrachtung 95,45 % der Messwerte zu erwarten sind ($k = 2$), ist ebenfalls eingezeichnet. Da alle Abweichungen innerhalb der berechneten Messunsicherheit liegen, ist von einem validen Messunsicherheitsbudget auszugehen.

Ergebnisse

Es wurde ein Messunsicherheitsbudget aufgestellt, mit dem serielle Positioniersysteme mit geringen Winkelabweichungen beschrieben werden können. Mit Hilfe des Messunsicherheitsbudgets konnte bestimmt werden, welche Anforderung die Lineartische erfüllen müssen, damit die notwendige Unsicherheit erreicht werden kann. Es wurde festgestellt, dass die Ausrichtung der Lineartische den größten Einfluss auf die Unsicherheit der Positionierung besitzt. Dementsprechend wurde die Montage des Positioniersystems mit Hilfe eines Koordinatenmessgerätes vorgenommen. Damit konnten die Winkelfehler bei der Ausrichtung der Lineartische reduziert werden und die erforderliche Unsicherheit erreicht werden.

Durch einen Vergleich des Positioniersystems mit einem Koordinatenmessgerät konnte das Messunsicherheitsbudget experimentell bestätigt werden. Es ist daher davon auszugehen, dass mit dem Positioniersystem eine Unsicherheit von $170 \mu\text{m}$ ($k=2$) für eine 3D-Positionierung ($300 \times 200 \times 200 \text{ mm}^3$) erreicht werden kann. Im Vergleich dazu wird mit einem konventionellen Positioniersystem ohne spezielle Ausrichtung der Lineartische nur eine Unsicherheit von $5500 \mu\text{m}$ ($k=2$) erreicht. Bei einer Positionierung innerhalb eines Messfensters mit nur zwei motorisierten Achsen ($80 \times 80 \text{ mm}^2$) wird die Unsicherheit des Positioniersystems auf $67 \mu\text{m}$ ($k=2$) reduziert.

Danksagung

Wir möchten uns für die finanzielle Unterstützung der hier präsentierten Arbeiten durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im Rahmen des MNPQ-Transfer-Projektes HT-LDV („Hochtemperatur-Laser Doppler Volumenstrommesstechnik“) bedanken. Weiterhin möchten wir Herrn A. Kuhn und Herrn M. Cordova Murillo für die Hilfe bei der Konstruktion des Positioniersystems danken. Bei Frau B. Schipke und Herrn C. Geitmann bedanken wir uns für die Hilfe bei der Vermessung am KMG.

Literatur

BIPM, Bureau International des Poids et Mesures. 2008. GUM: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. 2008.

Hermann, Gyula. 2007. Geometric error correction in coordinate measurement. Acta Polytechnica Hungarica. 2007, Bd. 4, 1, S. 47-62.

Mekid, Samir und Ogedengbe, Tunde. 2010. A review of machine tool accuracy enhancement through error compensation in serial and parallel kinematic machines. International Journal of Precision Technology. 02 2010, Bd. 1, 3-1, S. 251-286.

OWIS GmbH. 2013. Datenblatt Motorisierte Positioniersysteme. Staufen, 2013.