

Projekt

Untersuchung eines Miniatur- Nullpunktspannsystems „ μ -PrisFix“

Abschlussbericht

Inhalt

1	Einführung.....	3
2	Projektpartner.....	3
3	Aufgabenbeschreibung	4
4	Messgerät und Messaufbau.....	5
5	Definition des Koordinatensystems und der Parameter.....	7
6	Untersuchungen zur Verfahrensgenauigkeit.....	8
7	Wiederholgenauigkeit.....	11
8	Wechselgenauigkeit.....	13
	Anhang 1, Wiederholgenauigkeit	14
	Anhang 2, Wechselgenauigkeit.....	20

1 Einführung

Die PTB und die Hirschmann GmbH vereinbarten im Februar 2011 eine Zusammenarbeit im Rahmen eines Projektes mit dem Ziel, ein von der Hirschmann GmbH entwickeltes und gefertigtes neuartiges Nullpunktspannsystem für den Einsatz bei der Mikro-Fertigung zu untersuchen.

2 Projektpartner

Die Projektpartner sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Projektpartner und Kontaktpersonen.

Teilnehmer	Kontaktperson	Tel., Fax, e-mail
Hirschmann GmbH	Ralf Unger Hirschmann GmbH Kirchentannenstr. 9 78737 Flourn-Winzeln	Tel: 07402 183 63 Fax: 07402 183 99 63 RalfUnger@hirschmanngmbh.com
PTB	Michael Neugebauer Physikalisch-Technische Bundesanstalt Postfach 3345 38023 Braunschweig	Tel: +49 531 592 5212 Fax: +49 531 592 69 5212 michael.neugebauer@ptb.de

Die Hirschmann GmbH entwickelt und produziert als Industrieunternehmen Systemkomponenten für den Bereich Mikro-Produktionstechnik und führt dazu in größerem Umfang Forschungsarbeiten durch. Die PTB ist das nationale Metrologie-Institut Deutschlands mit wissenschaftlich-technischen Dienstleistungsaufgaben. Sie führt im Rahmen ihrer satzungsgemäßen Aufgaben u. a. Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet dimensioneller 3D-Mikro-Messtechnik durch.

3 Aufgabenbeschreibung

Die PTB führt Untersuchungen an zwei Spannsystemen und drei Paletten durch. In Kombination der Spanner und der Paletten wird die Wiederholgenauigkeit und die Wechselgenauigkeit ermittelt (vgl. Kap. 5). Die Palette Nr. 1 wird dabei als Referenzpalette festgelegt.

Die Wechselgenauigkeit wird von der Hirschmann GmbH mit 1 μm spezifiziert.

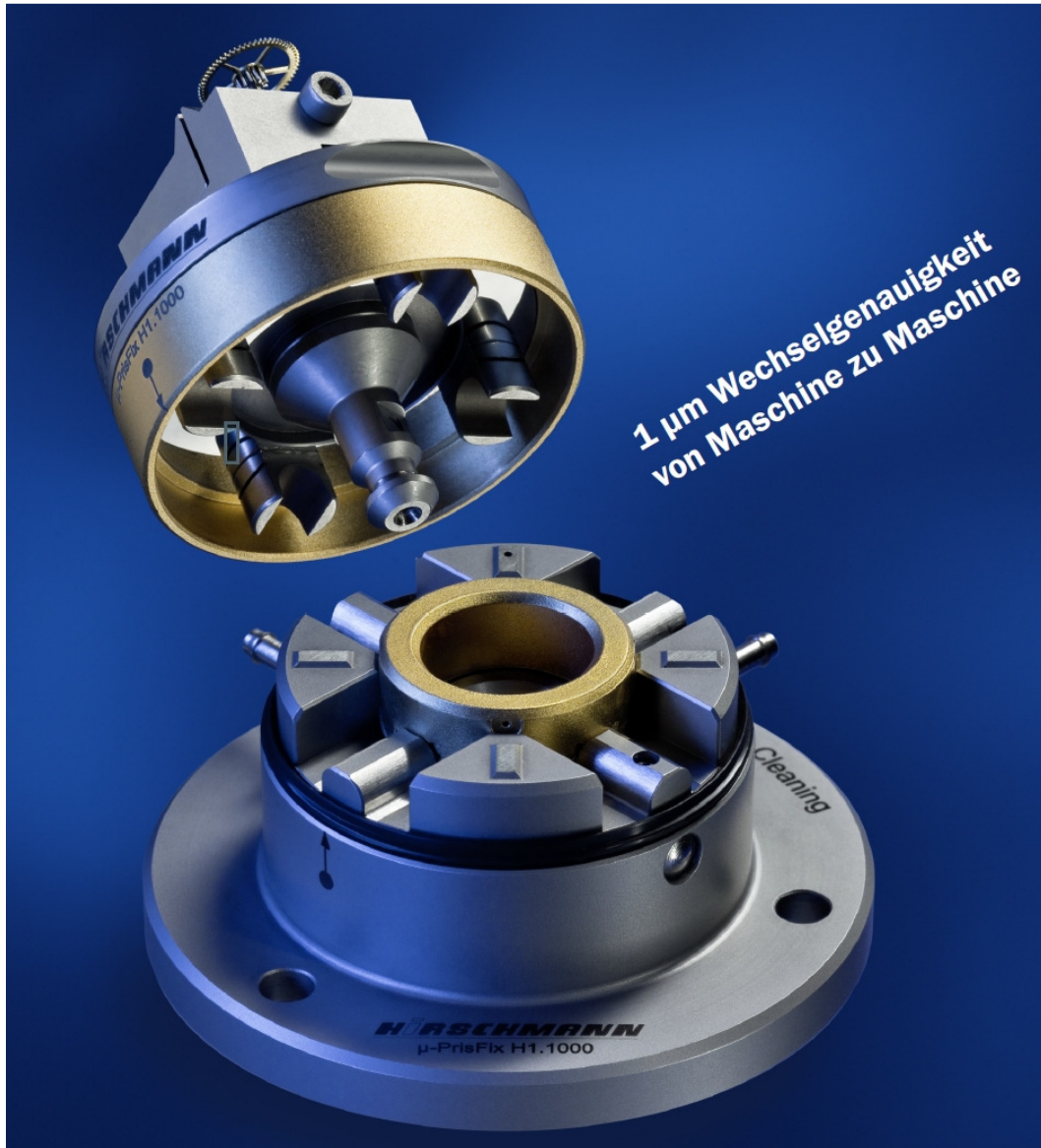


Bild 1: Miniatur-Nullpunktspannsystem „μ-PrisFix“, Prospektfoto Hirschmann, Spanner unten im Bild, Palette oben im Bild.

4 Messgerät und Messaufbau

Die Messungen wurden in der PTB mit einem Mikro-Koordinatenmessgerät F25 der Fa. Zeiss IMT ausgeführt (folgend F25). Die F25 hat ein Messvolumen von 130 mm x 130 mm x 100 mm (x,y,z), luftgelagerte Führungen und Linearantriebe. Die Längenmessungen erfolgen mit Maßstäben aus Zerodur® mit einer Auflösung von 0,25 nm. Die F25 verfügt über einen taktilen Mikrotaster und einen optischen Sensor zur Messung im Auflicht und Durchlicht. Der verwendete Mikrotaster hat eine Taststiftlänge von ca. 2 mm und eine Antastkugel aus Rubin mit einem Durchmesser von 300 µm. Die Antastkräfte liegen im Bereich von ca. 1 mN. Die F25 ist für taktile Messungen spezifiziert mit $E_{0, MPE} = 0,25 \mu\text{m} + L/666$ und $P_{F, MPE} = 0,3 \mu\text{m}$.

Die Umgebungsbedingungen für die F25 im Messraum der PTB wurden soweit wie möglich optimiert. Die Maschine steht auf einem separaten Fundament, um Schwingungseinflüsse zu reduzieren (Bild 2). Die Temperatur im Messraum ist sehr stabil. Im Untersuchungszeitraum (ca. 2 Wochen) lag die an der Aufspannung gemessene Temperatur zwischen 19,9°C und 20,1°C. Die Temperaturdriften im normalen Messbetrieb liegen unter 0,02 K/h. Durch den Wechsel der Paletten entstanden Temperturdriften von bis zu 0,1 K/h (vgl. Kap. 6).

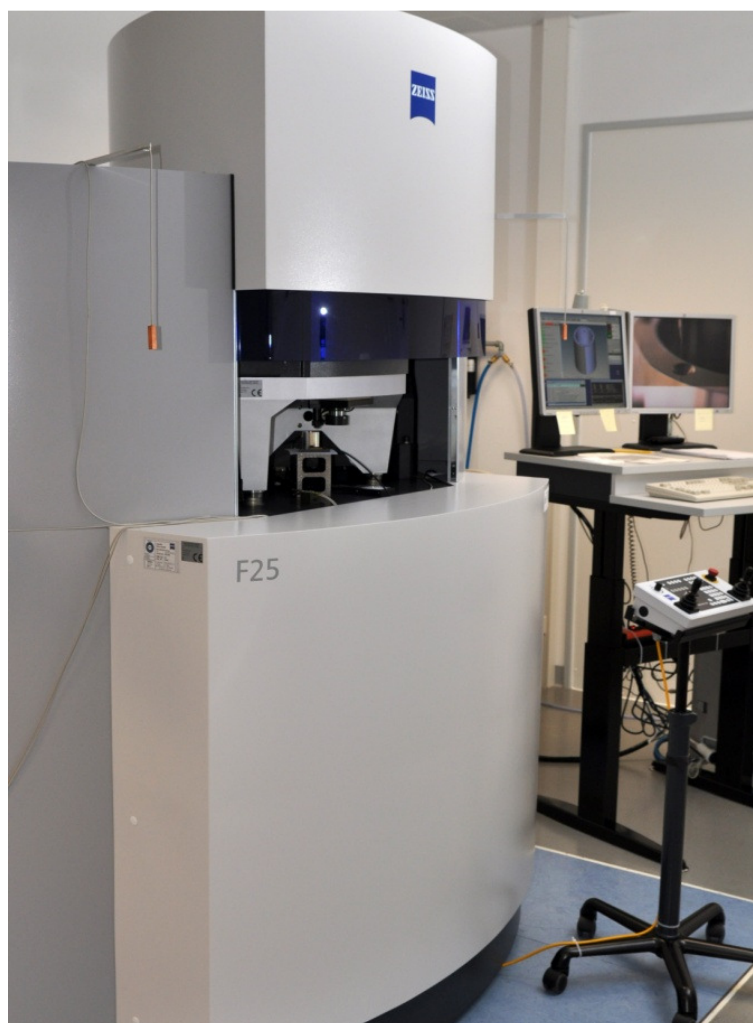


Bild 2: Mikro-Koordinatenmessgerät F25 im Messraum der PTB.

Bild 3 zeigt den Messaufbau. Der Spanner ist auf einer Adapterplatte befestigt. Auf dieser Adapterplatte sind drei Referenzkugeln R1-R3 (\varnothing 5 mm) fixiert. Auf der Oberseite der Paletten sind je 3 Kugeln K1-K3 angeordnet (ebenfalls \varnothing 5 mm). In einem Messablauf werden jeweils die drei Referenzkugeln und die drei Palettenkugeln gemessen. Verschiebungen bzw. Verdrehungen der gesamten Vorrichtung gegenüber den Achsen der F25, z.B. durch thermische Driften, werden somit weitgehend kompensiert. Der Materialtemperatursensor ist auf der Adapterplatte angebracht.

Auf der Vorderseite von Spanner und Palette ist je eine Markierung sichtbar. Diese Markierungen legen die Rotationslage von Palette zum Spanner beim Einsetzen fest. Die Markierung zeigt in x-Richtung des Koordinatensystems (vgl. Kap. 5).

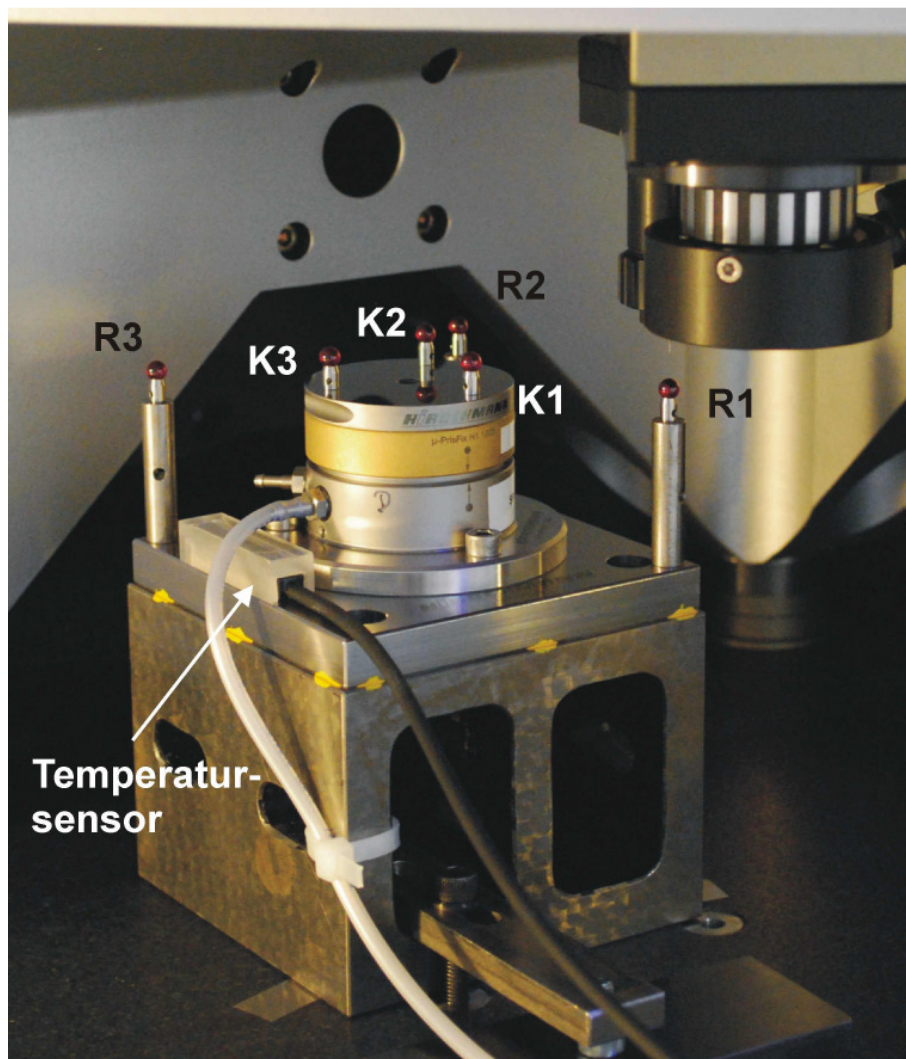


Bild 3: Messaufbau bestehend aus dem Spanner, der Palette mit den Palettenkugeln K1-K3 sowie den Referenzkugeln R1-R3. Der Taster steht über der Referenzkugel R1.

5 Definition des Koordinatensystems und der Parameter

Bild 4 zeigt das Werkstück-Koordinatensystem und das Punktraster für die Antastung. Das Koordinatensystem ist wie folgt definiert:

- z-Achse → Senkrechte auf die Ebene aus den Kugelmittelpunkten R1-R3,
- y-Achse → Gerade durch die Kugelmittelpunkte R3 und R2,
- xyz-Nullpunkt → Mittelpunkt der Kugel R3.

Das Koordinatensystem wurde so gewählt, dass die Positionen der Kugelmittelpunkte K1-K3 positiv sind. Die Kugeln wurden mit je 10 Punkten angetastet, vier auf dem Äquator, vier unter 45°, ein Punkt auf dem Zenit und ein Punkt dicht neben dem Zenit.

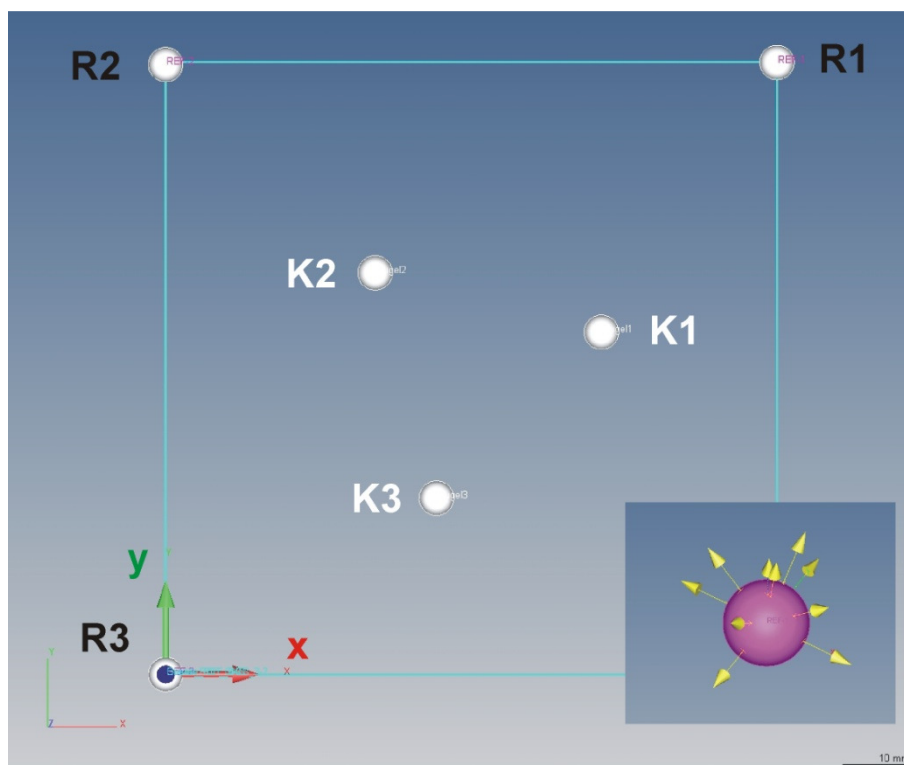


Bild 4: Koordinatensystem und Punktraster.

Die Messgrößen sind:

- die Positionen xyz des Mittelpunktes der Kugel K1,
- der Winkel der Geraden zwischen den Mittelpunkten der Kugeln K3-K2 um die z-Achse,
- die Winkel der Ebene aus den Mittelpunkten der drei Kugeln K1-K3 um die x- und um die y-Achse.

Aus den Messgrößen werden folgende Parameter abgeleitet:

- Verschiebung der Palette in xyz,
- Verdrehung der Palette um die z-Achse (senkrechte Achse der Palette),
- Verkippung der Palette um die x- und die y-Achse.

Das Nullpunktspannsystem wird mit folgenden Kennwerten beurteilt:

- A) Wiederholgenauigkeit**
- B) Wechselgenauigkeit**

Die **Wiederholgenauigkeit** ist die Reproduzierbarkeit der Position einer Palette bei wiederholtem Wechsel in einem Spanner. Zur Ermittlung der Wiederholgenauigkeit werden die drei Paletten in beide Spanner wiederholt eingesetzt und die Position der Kugeln K1–K3 im Koordinatensystem, d.h. relativ zu den Referenzkugeln gemessen. Die **Wiederholgenauigkeit** ist die dabei maximal aufgetretene Abweichung der Parameter Verschiebung, Verdrehung bzw. Verkipfung.

Die Messergebnisse zur Wiederholgenauigkeit sind in Kap. 7 zusammengefasst und in Anlage 1 vollständig aufgeführt.

Die **Wechselgenauigkeit** ist die Differenz der Position einer Palette beim Wechsel der Palette zwischen zwei Spannern. Sie wird wie folgt definiert: In beiden Spannern werden für jede Palette die Positionen der Palettenkugeln K1-K3 im Koordinatensystem sowie die entsprechenden Winkel bestimmt (Messungen zur Ermittlung der Wiederholgenauigkeit, vgl. Kap.7). Für jede Palette wird dann die Differenz dieser Positionen bzw. Winkel zwischen Spanner 10 und Spanner 11 ermittelt. Aus allen Differenzen wird für die entsprechenden Parameter der gemeinsame Mittelwert bestimmt. Für jede Palette werden dann die jeweiligen Abweichungen von dem entsprechenden Mittelwert bestimmt. Die **Wechselgenauigkeit** ist dabei die maximal aufgetretene Abweichung der Parameter Verschiebung, Verdrehung bzw. Verkipfung.

Die Messergebnisse zur Wechselgenauigkeit sind in Kap. 8 zusammengefasst und in Anlage 2 vollständig aufgeführt.

6 Untersuchungen zur Verfahrensgenauigkeit

Die zu ermittelnden Kennwerte werden durch das angewandte Verfahren beeinflusst. Die wesentlichen Einflüsse sind dabei die Reproduzierbarkeit der Messungen mit der F25 sowie die Stabilität des Messaufbaus bzw. des Messgerätes. Absolute Längenmessabweichungen beeinflussen die Kennwerte nicht, da diese nur aus relativen Messungen, d.h. Differenzen zwischen Längenmessungen ermittelt werden.

Um den Einfluss des Verfahrens zu bestimmen, wurden Wiederholmessungen der Paletten- und Referenzkugeln, wie in Kap. 5 beschrieben, durchgeführt, ohne jedoch die Paletten zu wechseln. Die Messungen erfolgten sowohl unter optimalen Bedingungen, d.h. mit temperiertem Messaufbau und ohne Einfluss des Bedieners, als auch mit einer Simulation des Bedienerinflusses durch Anwesenheit und Einbringen von Handwärme in die Nähe des Messaufbaus. Diese Simulation führte allerdings nicht zu den Temperaturdriften wie bei den Messungen mit Wechsel der Paletten.

Die Ergebnisse für zwei Messreihen am Spanner 11 und Palette 1 sind in den Tabellen 2 und 3 aufgeführt. Die Messgrößen sind dabei, wie in Kap. 5 beschrieben, die Positionen xyz der Kugel K1, der Winkel der Geraden zwischen den Kugeln K3 und K2 um die z-Achse und die Winkel der Ebene der Kugeln K1-K3 um die x- sowie um die y-Achse. Die Abweichungen der Positionen liegen im Bereich von $\pm 0,03 \mu\text{m}$ bzw. der Winkel im Bereich von $\pm 0,12''$ (bzw. $\pm 6 \text{ nm}/10 \text{ mm}$ Bezugslänge).

Tabelle 2: Abweichungen der Positionen und Winkel der Palettenkugeln K1-K3 im Koordinatensystem vom jeweils gemeinsamen Mittelwert, Messungen ohne Bedienerinfluss.

ohne Bedienerinfluss				Position			Winkel		
SP11_PL-1-37		Temperatur		Kugel 1			Gerade	Ebene	Ebene
#	Zeit	Spanner	F25	x	y	z	xy	xz	yz
	24.03.	°C	°C	µm	µm	µm	''	''	''
Standardabweichung				0,01	0,01	0,01	0,06	0,05	0,06
1	15:05	20,03	19,94	0,00	-0,01	0,01	0,05	-0,03	-0,04
2	15:11	20,02	19,94	-0,01	0,01	0,01	0,06	0,06	0,06
3	15:17	20,02	19,94	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	-0,06
4	15:23	20,02	19,94	0,00	-0,01	-0,01	-0,09	0,04	0,06
5	15:29	20,03	19,94	-0,01	0,01	0,00	0,02	0,03	0,00
6	15:35	20,03	19,94	-0,01	0,02	0,01	-0,03	-0,02	0,09
7	15:42	20,03	19,94	-0,01	0,01	0,00	-0,05	-0,12	0,02
8	15:48	20,03	19,94	0,01	0,00	0,01	-0,07	0,01	-0,03
9	15:54	20,03	19,94	0,01	-0,01	-0,01	-0,05	0,01	-0,06
10	16:00	20,03	19,94	0,02	-0,03	-0,01	0,02	0,01	0,03
11	16:06	20,03	19,94	0,00	0,00	0,00	0,07	0,02	-0,07

Tabelle 3: Abweichungen der Positionen und Winkel der Palettenkugeln K1-K3 im Koordinatensystem vom jeweils gemeinsamen Mittelwert, Messungen mit Bedienerinfluss.

mit Bedienerinfluss				Position			Winkel		
SP11_PL-1-40		Temperatur		Kugel 1			Gerade	Ebene	Ebene
#	Zeit	Spanner	F25	x	y	z	xy	xz	yz
	25.03.	°C	°C	µm	µm	µm	''	''	''
Standardabweichung				0,01	0,01	0,01	0,08	0,05	0,05
1	12:58	20,04	19,95	0,00	0,01	0,00	-0,07	0,00	0,09
2	13:03	20,04	19,95	-0,01	0,03	0,00	-0,03	-0,07	0,02
3	13:08	20,04	19,95	0,00	-0,01	0,01	0,02	0,00	0,04
4	13:13	20,03	19,95	0,01	-0,01	0,00	-0,02	0,01	-0,02
5	13:17	20,03	19,95	0,00	0,00	0,01	0,09	0,04	0,01
6	13:22	20,03	19,95	0,02	-0,01	0,00	-0,10	0,01	-0,05
7	13:27	20,03	19,94	0,01	0,00	0,01	-0,02	-0,01	-0,04
8	13:32	20,04	19,94	0,00	-0,01	0,00	0,04	-0,07	0,05
9	13:37	20,04	19,94	-0,01	0,01	0,00	0,10	-0,03	-0,10
10	13:42	20,04	19,94	-0,02	0,00	-0,01	0,10	0,10	0,02
11	13:47	20,05	19,94	-0,01	0,00	-0,02	-0,11	0,00	-0,01

Bild 5 zeigt die Änderung der Position der Kugel K1 bei einer Messreihe mit Wechsel der Palette zusammen mit der Drift der Temperatursensoren (Temperatursensor SP am Spanner, Temperatursensor F25). Während der Messreihe wurden zwei Pausen gemacht. Es ist erkennbar, dass die Abweichungen der Positionen nach der Pause wieder geringer sind und im Verlauf der Messreihe wieder ansteigen. Die Temperatur am Spanner sinkt aber nur in der zweiten Pause.

Vergleicht man zusätzlich die Messergebnisse an Spanner 1 und Palette 1 (Anhang 1, Tabellen 9 und 10), erstens mit sehr geringen Temperaturänderungen aber größeren Positionsänderungen (Tabelle 9) und zweitens mit größeren Temperaturänderungen aber kleineren Positionsänderungen (Tabelle 10), kann geschlossen werden, dass die am Spanner gemessene Temperatur nur bedingt eine Aussage über eine mögliche Positionsänderung der Kugeln erlaubt. Einerseits, da durch den Wechsel zuerst die Palette erwärmt wird und, andererseits, da die Temperaturänderungen nur mit einer entsprechenden Verzögerung gemessen werden.

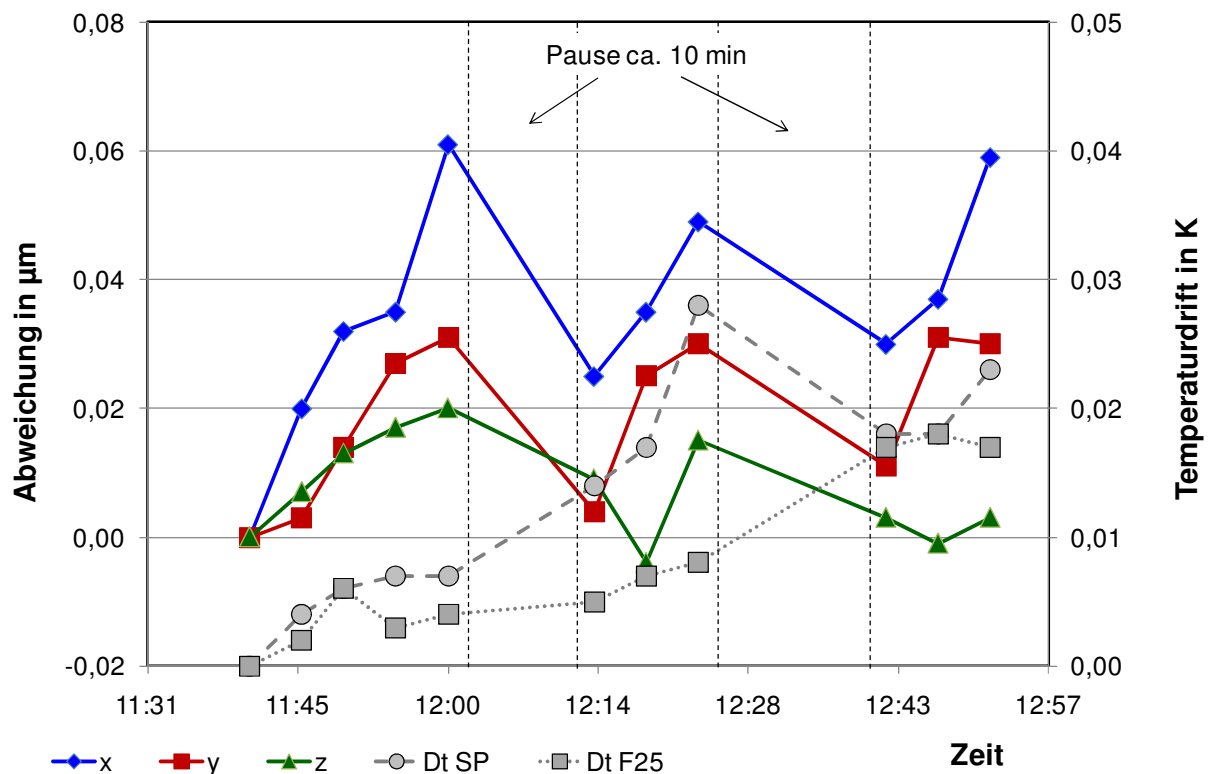


Bild 5: Abweichungen der xyz-Positionen der Kugel K1 im Koordinatensystem während Wiederholmessungen, Pause nach den Messungen 5 und 8.

Es wurden an weiteren Tagen wiederholt entsprechende Messungen durchgeführt, die diese Ergebnisse bestätigen. Für die Ermittlung der Wiederholgenauigkeit bzw. der Wechselgenauigkeit wird der Einfluss des Verfahrens auf kleiner als $\pm 0,05 \mu\text{m}$ bzw. $\pm 0,15''$ abgeschätzt.

7 Wiederholgenauigkeit

Die Messungen wurden von zwei Bedienern ausgeführt. Es stellte sich dabei heraus, dass systematische Unterschiede der Wiederholgenauigkeit sowohl bei beiden Bedienern als auch bei beiden Spannern auftraten. Grund dafür ist wahrscheinlich das Klemmen der Paletten und der notwendige Kraftaufwand beim Entnehmen. Um diesen subjektiven Einfluss beim Wechseln der Paletten aufzeigen zu können, werden in den Tabellen 4 bis 7 die Ergebnisse der Wiederholgenauigkeit separat je Spanner und Bediener angegeben. Die mittlere Abweichung ist dabei der Mittelwert der Beträge der Abweichungen aller Messungen an den Paletten vom gemeinsamen Mittelwert der Messwerte. Die vollständigen Ergebnisse sind im Anhang 1 aufgeführt.

Die Abweichungen bei Bediener 2 sind geringer als bei Bediener 1. Allerdings sind die Unterschiede bei Spanner 11 relativ gering, bei Spanner 10 aber sehr deutlich. Weiterhin sind die Abweichungen bei Bediener 1 und Spanner 10 an der Palette 4 deutlich geringer als an den Paletten 1 und 2. In Verbindung mit einem unterschiedlichen Klemmverhalten der Paletten in den beiden Spannern muss daher von einem signifikanten subjektiven Einfluss beim Wechseln der Paletten ausgegangen werden.

Die Wiederholgenauigkeit liegt bei Bediener 2 im Bereich von $\pm 0,1 \mu\text{m}$ für die Verschiebung, $\pm 0,2''$ für die Verkippung bzw. $\pm 0,5''$ für die Verdrehung. Bezogen auf eine Werkstückgröße von 10 mm liegen die Einflüsse durch Verkippung bzw. Verdrehung deutlich unter $\pm 0,05 \mu\text{m}$.

Tabelle 4: Wiederholgenauigkeit, Messungen Bediener 1 an Spanner 11.

Parameter	Verschiebung			Verkippung		Verdrehung	
	x	y	z	''	$\mu\text{m}/10 \text{ mm}$	''	$\mu\text{m}/10 \text{ mm}$
Bediener 1, SP 11	μm	μm	μm	''	$\mu\text{m}/10 \text{ mm}$	''	$\mu\text{m}/10 \text{ mm}$
mittlere Abweichung	0,03	0,06	0,02	0,12	0,01	0,24	0,01
Standardabweichung	0,04	0,08	0,02	0,18	0,01	0,30	0,01
maximale positive Abw.	0,09	0,12	0,05	0,44	0,02	0,55	0,03
maximale negative Abw.	-0,09	-0,18	-0,04	-0,39	-0,02	-0,68	-0,03

Tabelle 5: Wiederholgenauigkeit, Messungen Bediener 2 an Spanner 11.

Parameter	Verschiebung			Verkippung		Verdrehung	
	x	y	z	''	$\mu\text{m}/10 \text{ mm}$	''	$\mu\text{m}/10 \text{ mm}$
Bediener 2, SP 11	μm	μm	μm	''	$\mu\text{m}/10 \text{ mm}$	''	$\mu\text{m}/10 \text{ mm}$
mittlere Abweichung	0,02	0,03	0,02	0,05	0,00	0,11	0,01
Standardabweichung	0,02	0,03	0,03	0,06	0,00	0,15	0,01
maximale positive Abw.	0,05	0,11	0,05	0,12	0,01	0,29	0,01
maximale negative Abw.	-0,05	-0,06	-0,07	-0,12	-0,01	-0,47	-0,02

Tabelle 6: Wiederholgenauigkeit, Messungen Bediener 1 an Spanner 10.

Parameter	Verschiebung			Verkipfung		Verdrehung	
	x	y	z	"		"	
Bediener 1, SP 10	μm	μm	μm	$\mu\text{m}/10\text{ mm}$		$\mu\text{m}/10\text{ mm}$	
mittlere Abweichung	0,22	0,30	0,09	0,76	0,04	0,75	0,04
Standardabweichung	0,36	0,49	0,14	1,60	0,08	1,31	0,06
maximale positive Abw.	0,45	1,52	0,35	6,23	0,30	5,64	0,27
maximale negative Abw.	-1,48	-0,97	-0,34	-5,32	-0,26	-2,15	-0,10

Tabelle 7: Wiederholgenauigkeit, Messungen Bediener 2 an Spanner 10.

Parameter	Verschiebung			Verkipfung		Verdrehung	
	x	y	z	"		"	
Bediener 2, SP 10	μm	μm	μm	$\mu\text{m}/10\text{ mm}$		$\mu\text{m}/10\text{ mm}$	
mittlere Abweichung	0,02	0,02	0,01	0,05	0,00	0,06	0,00
Standardabweichung	0,03	0,02	0,01	0,06	0,00	0,08	0,00
maximale positive Abw.	0,06	0,05	0,03	0,13	0,01	0,18	0,01
maximale negative Abw.	-0,12	-0,06	-0,03	-0,12	-0,01	-0,12	-0,01

8 Wechselgenauigkeit

Die Wechselgenauigkeit wurde aus den Messungen zur Wiederholgenauigkeit bestimmt (vgl. Kap. 5). Dabei wurden die Mittelwerte der in Anhang 1 aufgeführten Messreihen verwendet, d.h. die Ergebnisse sowohl von Bediener 1 und 2. Die Ergebnisse für die Wechselgenauigkeit sind, getrennt für Verschiebung und Verkippung bzw. Verdrehung, in der Tabelle 8 angegeben. Die mittlere Abweichung ist dabei der Mittelwert der Beträge der Abweichungen aller Messungen an den Paletten vom gemeinsamen Mittelwert der Messwerte. Die vollständigen Ergebnisse sind im Anhang 2 aufgeführt.

Tabelle 8: Wechselgenauigkeit, ermittelt mit zwei Spannern und drei Paletten.

Parameter	Verschiebung	Verkippung		Verdrehung	
	μm	''	$\mu\text{m}/10\text{ mm}$	''	$\mu\text{m}/10\text{ mm}$
mittlere Abweichung	0,5	0,1	0,01	0,6	0,03
Standardabweichung	0,7	0,3	0,02	0,8	0,04
maximale positive Abw.	1,6	0,5	0,02	1,1	0,05
maximale negative Abw.	-1,5	-0,3	-0,01	-0,9	-0,04

Die Wechselgenauigkeit liegt im Bereich von $\pm 1,6\ \mu\text{m}$ für die Verschiebung, $\pm 0,5''$ für die Verkippung und $\pm 1''$ für die Verdrehung. Bezogen auf eine Werkstückgröße von 10 mm liegen die Einflüsse durch Verkippung bzw. Verdrehung unter $\pm 0,05\ \mu\text{m}$.

Die Verschiebung ist am größten in y-Richtung ($\pm 1,6\ \mu\text{m}$), vgl. Anhang 2. Für die x-Richtung liegt die Verschiebung innerhalb von $\pm 0,5\ \mu\text{m}$ und für die z-Richtung innerhalb von $\pm 0,35\ \mu\text{m}$. Der relativ große Unterschied zwischen der Verschiebung in x- und in y-Richtung könnte mit dem Verfahren zum Wechseln der Paletten zusammenhängen. Die Paletten wurden jeweils mit der rechten Hand gewechselt. Dazu musste die Palette mehr oder weniger frei geruckelt werden. Dies erfolgte in y-Richtung, vgl. Bild 3. Eine detailliertere Analyse dieser Unterschiede konnte im Rahmen der Untersuchungen allerdings nicht erfolgen, ebenso wenig wie weitere Messungen, z.B. auch durch andere Bediener.

Anhang 1, Wiederholgenauigkeit

Im Anhang 1 sind die Messergebnisse für die Messreihen an beiden Spannern und drei Paletten aufgeführt. Die angegebenen Positionen und die Winkel sind dabei die Abweichungen vom gemeinsamen Mittelwert der jeweils 11 Messwerte einer Messreihe.

Tabelle 9: Wiederholgenauigkeit, Spanner 11, Palette 1, Bediener 1, sehr geringe Temperaturdrift (< 0,03 K am Spanner), Messung #39.

Bediener 1		Temperatur		Position			Winkel		
SP11_PL-1_39				Kugel 1			Gerade	Ebene	Ebene
#	Zeit	Spanner	F25	x	y	z	xy	xz	yz
25.03.		°C	°C	µm	µm	µm	''	''	''
Standardabweichung				0,04	0,05	0,02	0,22	0,05	0,06
1	10:35	20,088	19,945	0,00	0,02	-0,01	0,21	0,05	0,14
2	10:40	20,083	19,945	-0,03	-0,03	-0,02	-0,04	0,09	0,04
3	10:45	20,077	19,946	0,09	0,12	-0,02	0,55	0,01	0,01
4	10:50	20,070	19,945	0,03	0,06	-0,01	0,10	0,02	-0,03
5	10:55	20,070	19,947	-0,03	-0,05	-0,02	-0,16	0,00	-0,02
6	11:00	20,073	19,946	0,01	0,02	-0,01	-0,05	0,01	-0,02
7	11:05	20,076	19,945	-0,02	-0,02	0,01	-0,19	-0,06	-0,03
8	11:10	20,079	19,947	0,01	0,00	0,02	-0,02	-0,06	-0,02
9	11:15	20,087	19,949	-0,01	-0,02	0,03	-0,03	0,00	-0,06
10	11:20	20,090	19,954	-0,02	-0,02	0,02	-0,11	-0,05	0,03
11	11:25	20,087	19,953	-0,03	-0,07	0,01	-0,27	-0,01	-0,05

Tabelle 10: Wiederholgenauigkeit, Spanner 11, Palette 1, Bediener 2, relativ große Temperaturdrift (> 0,1 K am Spanner) , Messung #38.

Bediener 2		Temperatur		Position			Winkel		
SP11_PL-1_38				Kugel 1			Gerade	Ebene	Ebene
#	Zeit	Spanner	F25	x	y	z	xy	xz	yz
25.03.		°C	°C	µm	µm	µm	''	''	''
Standardabweichung				0,02	0,02	0,04	0,15	0,06	0,07
1	8:54	20,032	19,894	0,02	0,02	-0,03	0,07	-0,07	0,08
2	9:00	20,055	19,899	-0,01	-0,01	-0,06	0,14	0,01	0,05
3	9:06	20,076	19,902	-0,01	-0,02	-0,07	-0,08	0,11	0,02
4	9:11	20,081	19,904	-0,01	0,02	-0,02	-0,16	0,06	0,02
5	9:16	20,083	19,906	-0,03	-0,04	0,01	-0,21	0,04	0,06
6	9:21	20,100	19,909	-0,03	0,03	0,03	0,29	-0,03	-0,09
7	9:26	20,115	19,911	-0,01	0,01	0,01	-0,06	-0,08	0,05
8	9:32	20,134	19,915	0,01	0,02	0,03	0,10	-0,02	-0,10
9	9:37	20,135	19,919	0,00	-0,04	0,04	-0,09	-0,08	-0,02
10	9:42	20,137	19,921	0,00	-0,01	0,04	-0,10	0,03	0,04
11	9:47	20,144	19,921	0,05	0,02	0,03	0,09	0,03	-0,11

Tabelle 11: Wiederholgenauigkeit, Spanner 11, Palette 2, Bediener 1, Messung #4.

Bediener 1		Temperatur		Position			Winkel		
SP11_PL-2_4		Spanner	F25	Kugel 1			Gerade	Ebene	Ebene
#	Zeit			x	y	z			
	25.03.	°C	°C	µm	µm	µm	''	''	''
Standardabweichung				0,04	0,09	0,03	0,37	0,07	0,08
1	11:22	20,053	19,974	0,04	0,11	0,01	0,46	-0,04	0,13
2	11:28	20,057	19,975	0,00	0,07	-0,04	0,34	0,03	0,04
3	11:33	20,064	19,975	0,05	0,11	-0,02	0,33	-0,03	0,02
4	11:38	20,073	19,976	0,00	0,02	-0,04	0,13	0,06	0,10
5	11:43	20,075	19,975	0,03	0,01	-0,01	0,27	0,05	0,00
6	11:48	20,077	19,976	-0,02	0,00	-0,03	0,02	0,13	-0,05
7	11:53	20,079	19,975	0,00	-0,10	0,00	-0,29	-0,03	0,01
8	11:58	20,084	19,975	-0,09	-0,18	0,04	-0,68	0,00	0,06
9	12:03	20,091	19,975	0,02	0,02	0,05	-0,10	-0,08	-0,08
10	12:08	20,108	19,975	0,02	0,06	0,02	0,06	0,01	-0,08
11	12:12	20,116	19,977	-0,07	-0,10	0,02	-0,54	-0,10	-0,14

Tabelle 12: Wiederholgenauigkeit, Spanner 11, Palette 2, Bediener 2, Messung #3.

Bediener 2		Temperatur		Position			Winkel		
SP11_PL-2_3		Spanner	F25	Kugel 1			Gerade	Ebene	Ebene
#	Zeit			x	y	z			
	28.03.	°C	°C	µm	µm	µm	''	''	''
Standardabweichung				0,02	0,03	0,01	0,12	0,05	0,05
1	9:27	20,061	19,953	-0,05	-0,02	0,02	0,00	0,01	0,02
2	9:32	20,061	19,954	-0,02	-0,03	0,00	-0,21	0,04	-0,02
3	9:37	20,063	19,957	0,01	0,03	0,00	0,03	0,04	0,04
4	9:42	20,071	19,961	0,03	0,04	-0,02	0,24	0,06	0,01
5	9:47	20,075	19,958	-0,01	0,01	-0,02	-0,02	-0,05	-0,03
6	9:52	20,079	19,961	0,00	-0,02	-0,01	-0,17	0,02	-0,06
7	9:57	20,089	19,963	0,02	0,04	0,00	0,03	-0,07	-0,05
8	10:02	20,095	19,965	0,02	0,03	0,01	0,05	-0,08	0,07
9	10:07	20,091	19,965	-0,01	-0,03	-0,01	0,00	0,07	0,05
10	10:12	20,092	19,968	0,01	-0,03	0,02	0,01	-0,02	0,01
11	10:17	20,089	19,968	0,00	-0,03	0,02	0,04	-0,03	-0,06

Tabelle 13: Wiederholgenauigkeit, Spanner 11, Palette 4, Bediener 1, Messung #1.

Bediener 1		Temperatur		Position			Winkel		
SP11_PL-4_1		Spanner	F25	Kugel 1			Gerade	Ebene	Ebene
#	Zeit			x	y	z	xy	xz	yz
	29.03.	°C	°C	µm	µm	µm	''	''	''
Standardabweichung				0,05	0,09	0,02	0,32	0,30	0,31
1	9:03	20,019	19,926	-0,07	0,11	0,00	0,42	-0,38	0,40
2	9:08	20,015	19,927	0,03	0,07	-0,02	0,34	-0,34	0,44
3	9:13	20,018	19,926	0,00	0,02	0,00	0,05	-0,35	0,40
4	9:18	20,027	19,927	0,09	0,12	0,01	0,53	-0,39	0,26
5	9:23	20,038	19,927	0,06	0,09	0,00	0,15	0,33	-0,07
6	9:28	20,047	19,930	-0,03	-0,09	-0,01	-0,28	0,34	-0,12
7	9:32	20,057	19,931	0,00	-0,06	-0,04	-0,21	0,23	-0,26
8	9:37	20,066	19,932	-0,05	-0,11	0,01	-0,38	0,11	-0,32
9	9:42	20,073	19,934	-0,04	-0,09	0,01	-0,34	0,15	-0,22
10	9:47	20,076	19,935	-0,01	-0,06	0,01	-0,12	0,23	-0,25
11	9:51	20,077	19,936	0,02	-0,01	0,03	-0,16	0,07	-0,25

Tabelle 14: Wiederholgenauigkeit, Spanner 11, Palette 4, Bediener 2, Messung #3.

Bediener 2		Temperatur		Position			Winkel		
SP11_PL-4_3		Spanner	F25	Kugel 1			Gerade	Ebene	Ebene
#	Zeit			x	y	z	xy	xz	yz
	30.03.	°C	°C	µm	µm	µm	''	''	''
Standardabweichung				0,02	0,04	0,03	0,19	0,07	0,06
1	8:40	20,017	19,931	-0,01	-0,01	0,00	0,22	0,09	-0,10
2	8:46	20,029	19,932	0,00	0,01	0,04	0,13	0,04	-0,06
3	8:51	20,045	19,932	-0,02	-0,06	0,05	-0,47	-0,10	0,01
4	8:56	20,052	19,935	0,02	0,00	0,02	0,00	-0,01	0,01
5	9:00	20,056	19,935	0,01	-0,01	0,00	-0,04	0,04	0,04
6	9:09	20,052	19,934	0,00	0,01	-0,02	0,00	0,00	-0,01
7	9:15	20,054	19,936	-0,02	-0,03	-0,02	-0,08	0,06	-0,05
8	9:22	20,057	19,936	0,01	0,01	-0,02	0,03	-0,05	0,03
9	9:27	20,062	19,936	0,04	0,11	-0,03	0,24	0,01	-0,01
10	9:52	20,046	19,942	-0,03	-0,02	0,00	-0,09	-0,12	0,02
11	9:57	20,049	19,943	0,00	-0,01	-0,01	0,07	0,04	0,12

Tabelle 15: Wiederholgenauigkeit, Spanner 10, Palette 1, Bediener 1, Messung #2.

Bediener 1		Temperatur		Position			Winkel		
SP10_PL-1_2		Spanner	F25	Kugel 1			Gerade	Ebene	Ebene
#	Zeit			x	y	z			
31.03.		°C	°C	µm	µm	µm	''	''	''
Standardabweichung				0,24	0,17	0,04	0,59	0,08	0,17
1	13:22	20,100	19,960	-0,51	0,29	0,00	1,12	-0,02	-0,16
2	13:27	20,100	19,960	-0,24	0,21	0,03	0,66	-0,10	-0,27
3	13:32	20,120	19,960	-0,16	0,16	0,05	0,44	-0,06	-0,14
4	13:37	20,130	19,960	-0,11	0,13	0,02	0,36	0,05	-0,08
5	13:41	20,140	19,960	-0,04	0,06	0,03	0,26	0,03	-0,14
6	14:03	20,100	19,960	0,11	-0,07	-0,09	-0,46	0,20	0,24
7	14:08	20,110	19,960	0,14	-0,13	-0,03	-0,50	0,00	0,15
8	14:12	20,110	19,960	0,18	-0,14	-0,03	-0,41	-0,01	0,19
9	14:17	20,120	19,960	0,16	-0,15	0,00	-0,37	-0,02	0,10
10	14:22	20,130	19,960	0,22	-0,18	0,01	-0,50	-0,06	0,04
11	14:27	20,150	19,960	0,26	-0,18	0,02	-0,61	-0,01	0,07

Tabelle 16: Wiederholgenauigkeit, Spanner 10, Palette 1, Bediener 2, Messung #3.

Bediener 2		Temperatur		Position			Winkel		
SP10_PL-1_3		Spanner	F25	Kugel 1			Gerade	Ebene	Ebene
#	Zeit			x	y	z			
31.03.		°C	°C	µm	µm	µm	''	''	''
Standardabweichung				0,06	0,04	0,02	0,10	0,06	0,05
1	15:33	20,100	19,980	-0,12	0,02	-0,03	0,05	-0,12	-0,08
2	15:38	20,110	19,980	-0,07	0,04	0,01	0,18	-0,08	0,03
3	15:43	20,110	19,980	-0,03	0,05	0,02	0,13	-0,04	-0,03
4	15:48	20,120	19,980	-0,01	0,04	0,01	0,08	0,02	-0,03
5	15:53	20,120	19,980	0,01	0,02	-0,01	0,00	0,10	0,05
6	16:16	20,100	19,980	0,01	-0,02	-0,02	-0,06	-0,01	0,04
7	16:21	20,100	19,980	0,03	-0,02	-0,01	-0,07	0,00	0,03
8	16:29	20,110	19,980	0,03	-0,02	0,00	-0,09	0,01	0,01
9	16:36	20,110	19,980	0,05	-0,02	0,00	0,00	0,05	-0,04
10	16:41	20,100	19,980	0,05	-0,04	0,01	-0,12	0,06	0,07
11	16:48	20,100	19,980	0,06	-0,06	0,02	-0,09	0,01	-0,05

Tabelle 17: Wiederholgenauigkeit, Spanner 10, Palette 2, Bediener 1, Messung #1.

Bediener 1		Temperatur		Position			Winkel		
SP10_PL-2_1		Spanner	F25	Kugel 1			Gerade	Ebene	Ebene
#	Zeit			x	y	z			
	31.03.	°C	°C	µm	µm	µm	''	''	''
Standardabweichung				0,60	0,85	0,24	2,26	3,06	2,67
1	9:47	20,100	19,940	0,03	-0,44	-0,25	-0,89	0,46	1,95
2	9:52	20,110	19,940	0,42	-0,97	0,19	-2,15	-0,41	1,04
3	9:57	20,110	19,940	0,01	1,16	-0,05	-0,82	-4,19	2,92
4	10:50	20,050	19,950	0,40	0,63	-0,34	-1,65	0,37	-1,65
5	10:55	20,050	19,950	-0,65	0,59	0,35	1,99	-3,40	-1,21
6	11:00	20,050	19,950	0,45	-0,75	0,13	-1,45	-0,77	1,16
7	11:04	20,060	19,950	0,24	-0,39	-0,20	0,29	4,37	-3,76
8	11:09	20,070	19,950	0,42	-0,70	0,12	-1,41	-0,48	1,38
9	11:14	20,070	19,950	-0,21	0,10	0,10	1,26	0,06	0,75
10	11:18	20,080	19,950	0,37	-0,75	-0,31	-0,81	6,23	-5,32
11	11:23	20,080	19,960	-1,48	1,52	0,25	5,64	-2,26	2,75

Tabelle 18: Wiederholgenauigkeit, Spanner 10, Palette 2, Bediener 2, Messung #2.

Bediener 2		Temperatur		Position			Winkel		
SP10_PL-2_2		Spanner	F25	Kugel 1			Gerade	Ebene	Ebene
#	Zeit			x	y	z			
	04.04.	°C	°C	µm	µm	µm	''	''	''
Standardabweichung				0,01	0,02	0,02	0,07	0,08	0,04
1	9:02	20,000	19,920	0,03	-0,03	-0,03	-0,09	0,09	-0,01
2	9:07	20,010	19,920	-0,02	-0,02	0,00	0,08	-0,11	-0,03
3	9:12	20,020	19,920	-0,01	-0,01	-0,01	-0,05	0,00	-0,08
4	9:16	20,030	19,920	-0,01	0,01	-0,02	-0,07	0,06	0,02
5	9:21	20,020	19,920	0,00	0,00	-0,01	-0,05	-0,02	0,00
6	9:26	20,030	19,930	0,00	-0,01	-0,01	-0,03	0,08	0,06
7	9:31	20,030	19,930	0,00	0,01	-0,01	0,07	0,11	0,06
8	9:37	20,030	19,930	0,01	-0,01	0,01	0,12	-0,03	0,00
9	9:42	20,040	19,930	0,01	0,02	0,03	0,00	-0,04	0,03
10	9:47	20,050	19,930	0,00	0,02	0,03	-0,05	-0,09	-0,03
11	9:52	20,060	19,940	-0,01	0,02	0,02	0,09	-0,05	-0,01

Tabelle 19: Wiederholgenauigkeit, Spanner 10, Palette 4, Bediener 1, Messung #1.

Bediener 1		Temperatur		Position			Winkel		
SP10_PL-4_1		Spanner	F25	Kugel 1			Gerade	Ebene	Ebene
#	Zeit			x	y	z			
	01.04.	°C	°C	µm	µm	µm	''	''	''
Standardabweichung				0,04	0,02	0,04	0,10	0,10	0,05
1	9:25	20,070	19,940	-0,04	0,00	-0,06	-0,01	0,19	0,10
2	9:30	20,070	19,940	-0,04	0,01	-0,03	0,01	0,09	0,05
3	9:34	20,080	19,940	-0,03	0,02	-0,01	0,08	0,08	0,02
4	9:39	20,090	19,940	-0,05	-0,01	0,01	0,20	0,05	-0,01
5	11:59	20,030	19,940	-0,01	-0,05	-0,04	-0,14	-0,09	0,06
6	12:04	20,050	19,940	0,02	-0,02	-0,01	-0,12	-0,07	-0,01
7	12:08	20,060	19,940	0,00	0,02	-0,01	0,01	-0,06	-0,06
8	12:13	20,070	19,940	0,03	0,03	0,02	0,02	-0,08	-0,04
9	12:18	20,080	19,940	0,04	-0,01	0,01	0,03	0,05	-0,03
10	12:22	20,090	19,940	0,04	0,00	0,05	0,04	-0,05	-0,04
11	12:27	20,100	19,940	0,05	0,01	0,07	-0,11	-0,11	-0,05

Tabelle 20: Wiederholgenauigkeit, Spanner 10, Palette 4, Bediener 2, Messung #2.

Bediener 2		Temperatur		Position			Winkel		
SP10_PL-4_2		Spanner	F25	Kugel 1			Gerade	Ebene	Ebene
#	Zeit			x	y	z			
	05.04.	°C	°C	µm	µm	µm	''	''	''
Standardabweichung				0,02	0,01	0,01	0,06	0,06	0,07
1	11:41	20,045	19,943	-0,03	-0,02	-0,01	0,01	-0,03	0,09
2	11:46	20,049	19,945	-0,01	-0,02	0,00	-0,04	-0,08	0,13
3	11:50	20,051	19,949	0,00	0,00	0,01	0,06	-0,05	-0,02
4	11:55	20,052	19,946	0,00	0,01	0,01	0,10	0,08	0,00
5	12:00	20,052	19,947	0,03	0,01	0,01	0,07	-0,03	0,02
6	12:14	20,059	19,948	-0,01	-0,01	0,00	0,00	-0,03	0,07
7	12:19	20,062	19,950	0,00	0,01	-0,01	-0,02	0,03	-0,08
8	12:24	20,073	19,951	0,01	0,01	0,01	-0,10	-0,03	-0,03
9	12:42	20,063	19,960	0,00	-0,01	0,00	-0,07	0,00	-0,07
10	12:47	20,063	19,961	0,00	0,01	-0,01	-0,01	0,10	-0,04
11	12:52	20,068	19,960	0,02	0,01	0,00	0,01	0,06	-0,08

Anhang 2, Wechselgenauigkeit

In den Tabellen 21 und 23 sind die Nummern der Messungen angegeben (#). Die Ergebnisse zur Wechselgenauigkeit in den Tabellen 22 und 24 wurden aus den entsprechenden Messungen ermittelt (Diff). Es sind also für die beiden Ergebnisse an Palette 1 je eine vollständige Messung von Bediener 1 und Bediener 2 verwendet worden, für Palette 2 nur von Bediener 2 und für Palette 4 von beiden Bedienern. Die Messungen durch Bediener 1 an Spanner 10, Palette 2 mit den relativ großen Abweichungen (Tabelle 17) wurden nicht für die Ermittlung der Wechselgenauigkeit verwendet.

Tabelle 21: Positionen der Palettenkugel K1 in Spanner 10 und 11.

Spanner	Palette	Datum	#	Bediener	Positionen		
					Kugel 1 x mm	y mm	z mm
11	1	25.03.	38	2	62,745810	49,401059	6,993878
10	1	31.03.	3	2	62,823250	49,381422	6,997651
11	1	25.03.	39	1	62,745769	49,401013	6,993786
10	1	31.03.	2	1	62,822769	49,381792	6,997712
11	2	28.03.	3	2	62,787714	49,419740	7,013143
10	2	04.04.	2	2	62,865372	49,398897	7,017551
11	4	30.03.	3	2	62,843856	49,461165	6,990540
10	4	01.04.	1	1	62,921911	49,443403	6,994913

Tabelle 22: Differenzen der Positionen der Kugel 1 und Abweichungen vom Mittelwert.

Palette	Diff	Differenzen Positionen			Abweichungen vom Mittelwert		
		Kugel 1 x mm	y mm	z mm	Kugel 1 x µm	y µm	z µm
1	3-38	0,077440	-0,019637	0,003773	-0,10	-0,27	-0,35
1	2-39	0,077000	-0,019221	0,003927	-0,54	0,15	-0,19
2	2-3	0,077657	-0,020843	0,004408	0,12	-1,48	0,29
4	1-3	0,078055	-0,017763	0,004373	0,52	1,60	0,25

Tabelle 23: Winkel der Gerade und der Ebene.

Spanner	Palette	Datum	#	Bediener	Gerade W2 XY °	Winkel	
						Ebene W1 XZ °	W2 YZ °
11	1	25.03.	38	2	105,21380	0,02594	-0,02102
10	1	31.03.	3	2	105,31686	0,02821	-0,02299
11	1	25.03.	39	1	105,21378	0,02596	-0,02100
10	1	31.03.	2	1	105,31720	0,02818	-0,02312
11	2	28.03.	3	2	105,13494	-0,07423	0,05965
10	2	04.04.	2	2	105,23740	-0,07215	0,05766
11	4	30.03.	3	2	105,28588	-0,03135	0,04563
10	4	01.04.	1	1	105,39036	-0,02917	0,04426

Tabelle 24: Differenzen der Winkel und Abweichungen vom jeweiligen Mittelwert.

Palette	Diff	Differenzen Winkel			Abweichungen vom Mittelwert		
		Gerade W2 XY °	Ebene W1 XZ °	W2 YZ °	Gerade W2 XY "	Ebene W1 XZ "	W2 YZ "
1	3-38	0,10306	0,00227	-0,00196	-0,30	0,08	-0,10
1	2-39	0,10342	0,00221	-0,00212	0,06	0,03	-0,26
2	2-3	0,10247	0,00208	-0,00199	-0,89	-0,10	-0,13
4	1-3	0,10448	0,00218	-0,00137	1,12	0,00	0,49

Tabelle 25: Differenzen der Winkel und Abweichungen vom jeweiligen Mittelwert, Angabe in $\mu\text{m}/10\text{ mm}$.

Palette	Diff	Differenzen Winkel			Abweichungen vom Mittelwert		
		Gerade W2 XY °	Ebene W1 XZ °	W2 YZ °	Gerade W2 XY $\mu\text{m}/10\text{ mm}$	Ebene W1 XZ $\mu\text{m}/10\text{ mm}$	W2 YZ $\mu\text{m}/10\text{ mm}$
1	3-38	0,10306	0,00227	-0,00196	-0,014	0,004	-0,005
1	2-39	0,10342	0,00221	-0,00212	0,003	0,001	-0,013
2	2-3	0,10247	0,00208	-0,00199	-0,043	-0,005	-0,006
4	1-3	0,10448	0,00218	-0,00137	0,054	0,000	0,024