

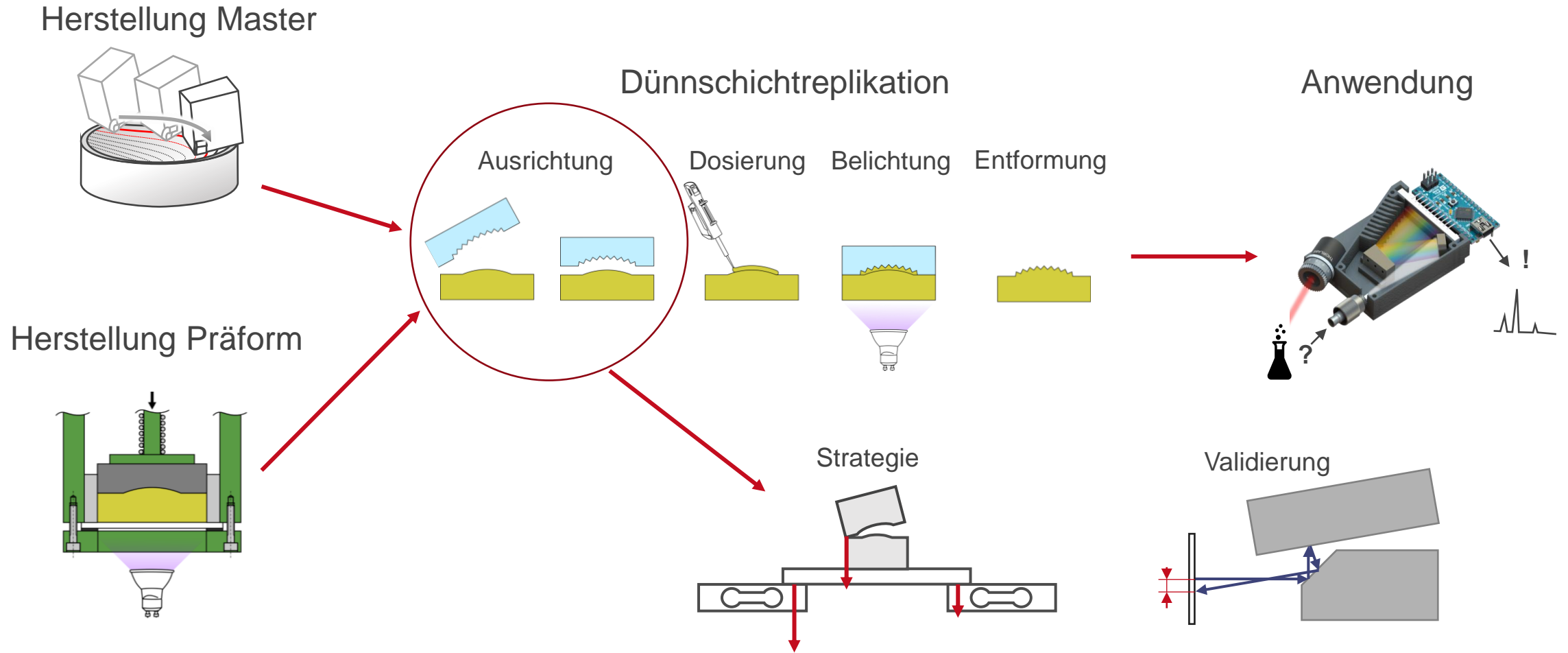
Strategien zur automatisierten Fein-
ausrichtung von Formhälften bei der
Replikation stark gekrümmter Beu-
gungsoptiken im Dünnschichtprozess

Paul Kastl

17. Tagung „Feinwerktechnische Konstruktion“ | 26.09.2024

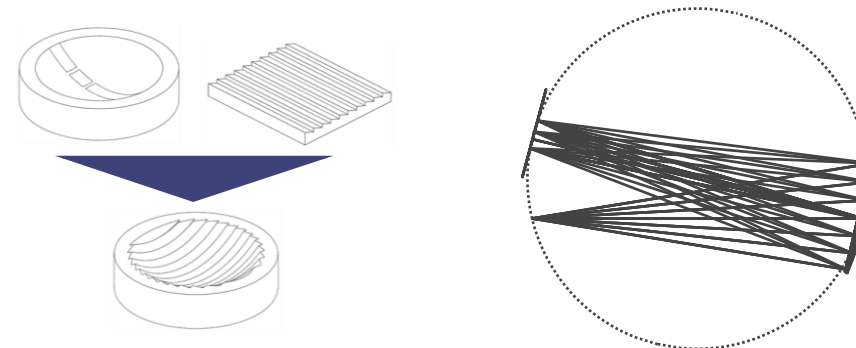
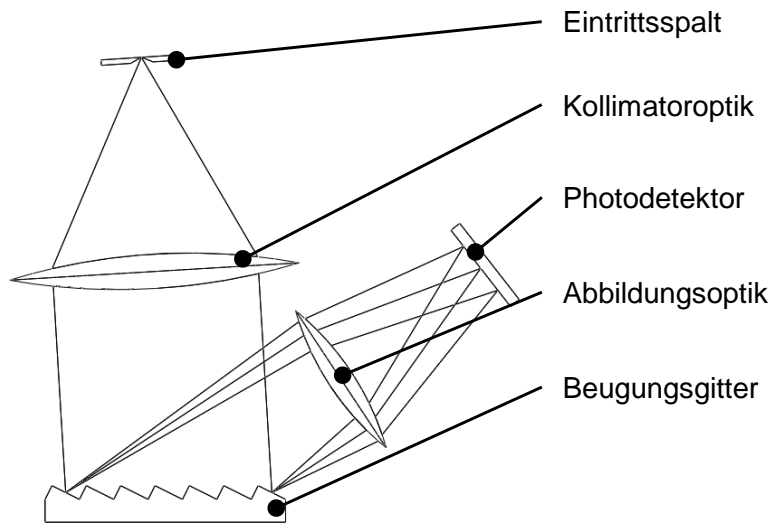
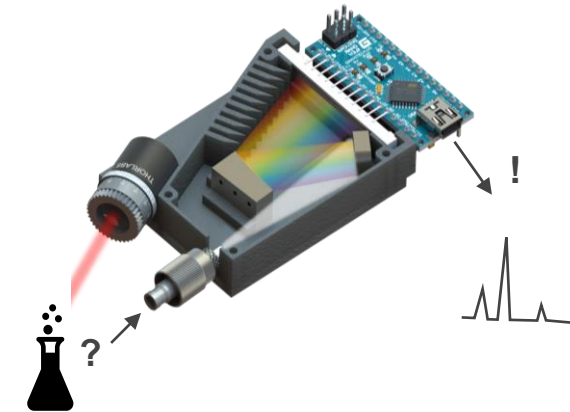


Replikationsprozess



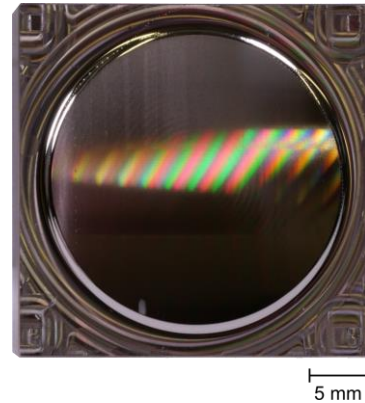
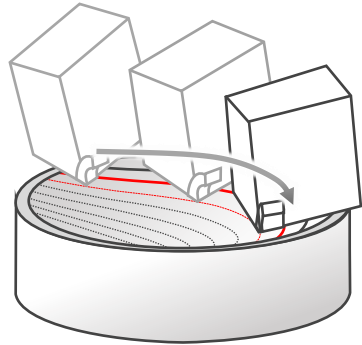
Stark gekrümmte Beugungsoptiken

- Beugungsoptiken werden für messtechnische Anwendungen genutzt
- Beugungseffekte werden durch Mikrostrukturen erzeugt und für messtechnische Anwendungen genutzt
- stark gekrümmte Beugungsoptik: vereint Gitter und Abbildungsoptik (Spiegel oder Linse)

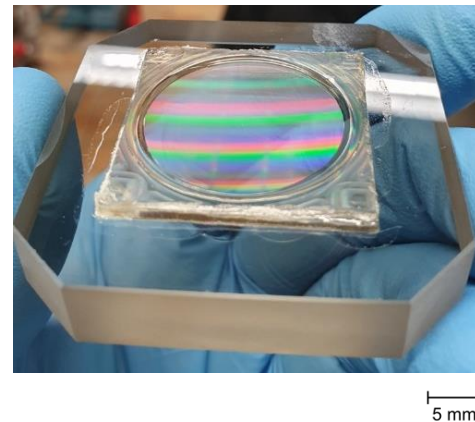
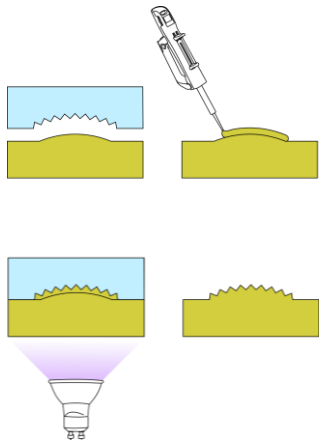


Replikation

Masterfertigung



Fertigung von Replikaten



- stark gekrümmte Beugungsoptiken bieten viele Vorteile gegenüber planen Beugungsoptiken
- Fertigung von Gittermastern durch Ultrapräzisionsbearbeitung
- teure Unikate von außergewöhnlicher Qualität
- anfertigen von Replikaten in einem mehrstufigen Dünnschichtverfahren
- dadurch Senkung der Kosten und Erhöhung der Verfügbarkeit der Optiken für Anwender

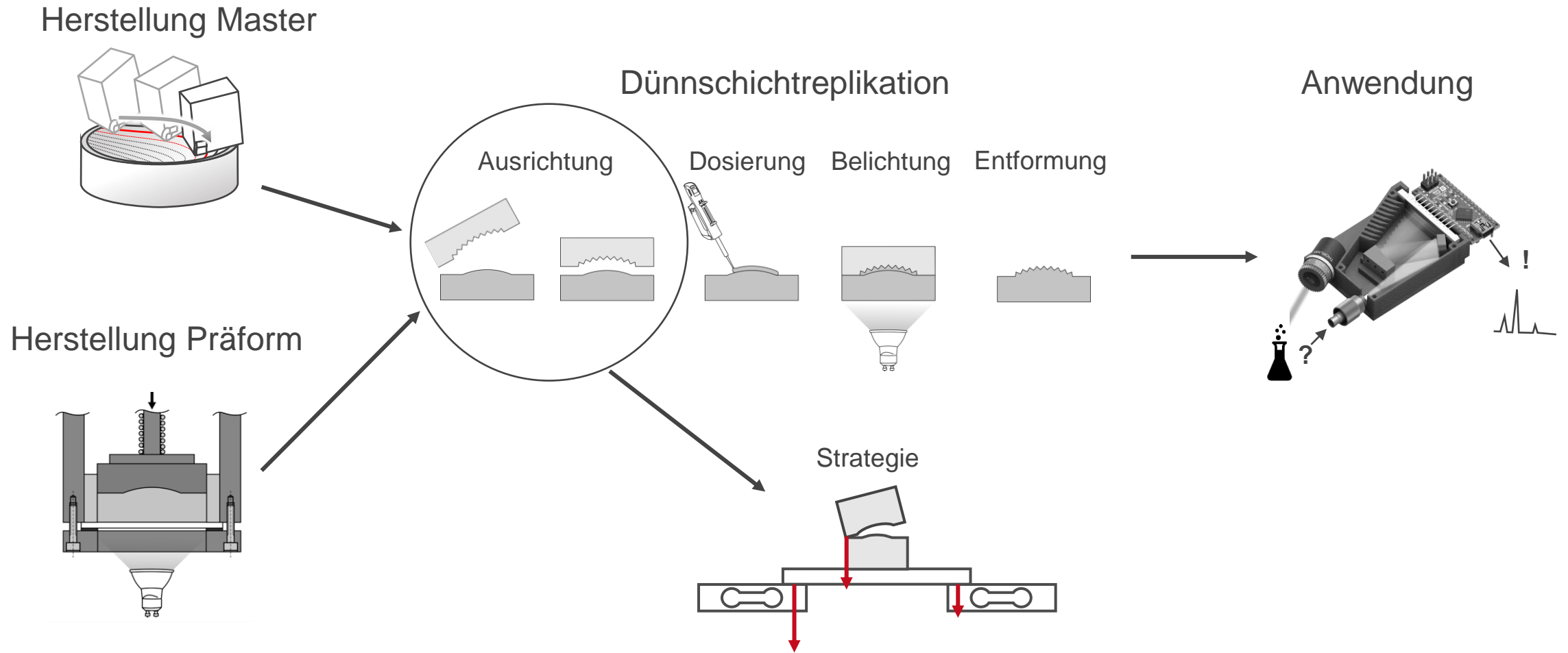
- Hybridpolymer¹ eignet hervorragend zur Abformung von Mikrostrukturen
- Schrumpfbehaftet (~7 vol.-%)
- Mikrostrukturen unproblematisch
- Makrostrukturen (z. B. Krümmungsradius) verändern sich durch den Schrumpf
 - Herstellung des Replikats in zwei Stufen²:
 - Präform: Großteil des Volumens des fertigen Replikats, schrumpfkompensierter Prozess
 - Dünnschicht: kleines Absolutvolumen, absoluter Schrumpf in vertretbaren Grenzen

→ sehr genaue Ausrichtung von Präform und Master notwendig für gleichmäßigen Spalt

¹ Schleunitz et. al.: Towards high precision manufacturing of 3D optical components using UV-curable hybrid polymers. Optical Interconnects XV, Band SPIE, 2015, S. 73–81.

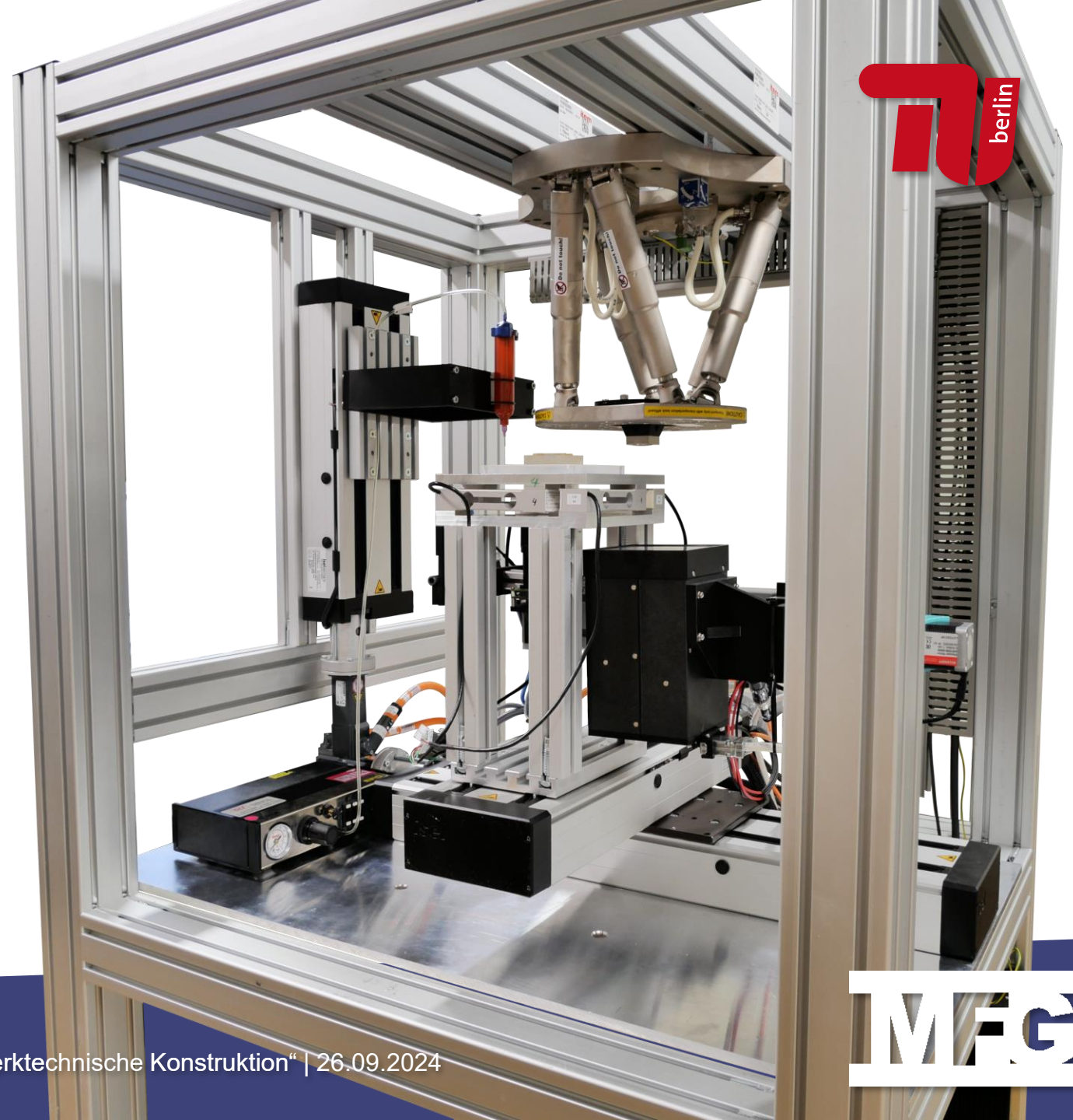
² Grützner et. al.: Two-step replicated Nano Optical Pattern on curved Surfaces for Spectrometer Components. MNE, Turin, Italien, 2021.

Replikationsprozess



Maschine

- Dünnschichtreplikation auf einer Teilautomatisierten Replikationsmaschine
 - Beckhoff Steuerung
 - Grob- und Feinpositionierung
 - Dosiereinheit
 - UV-Belichtungseinheit
 - Transparentes Vakuumspannsystem
 - Sensorik
 - Kraft- und Wegmessung
 - ameratechnik
- Präformherstellung in einem UV-Gießverfahren mit kontrolliertem Anpressdruck und thermische Prozessführung minimieren Schrumpf



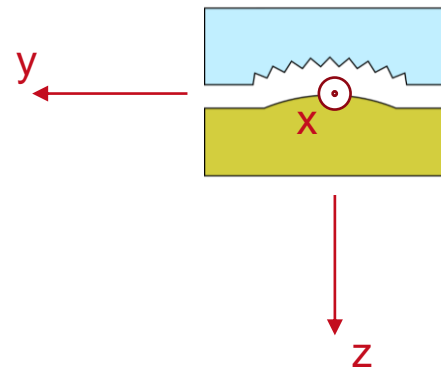
Ausrichtstrategien für Dünnschichtreplikation



- Feinausrichtung mit 6 Freiheitsgraden für gleichmäßigen Spalt
- Strategie für XYW: Erkennung von Messmarken
- Strategie für ZUV: Oberflächenantastung mit Wägezellen



Bezeichnungen des rechtshändigen Koordinatensystems wie beim Hexapod H-840.G2IHP der Fa. Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Karlsruhe:



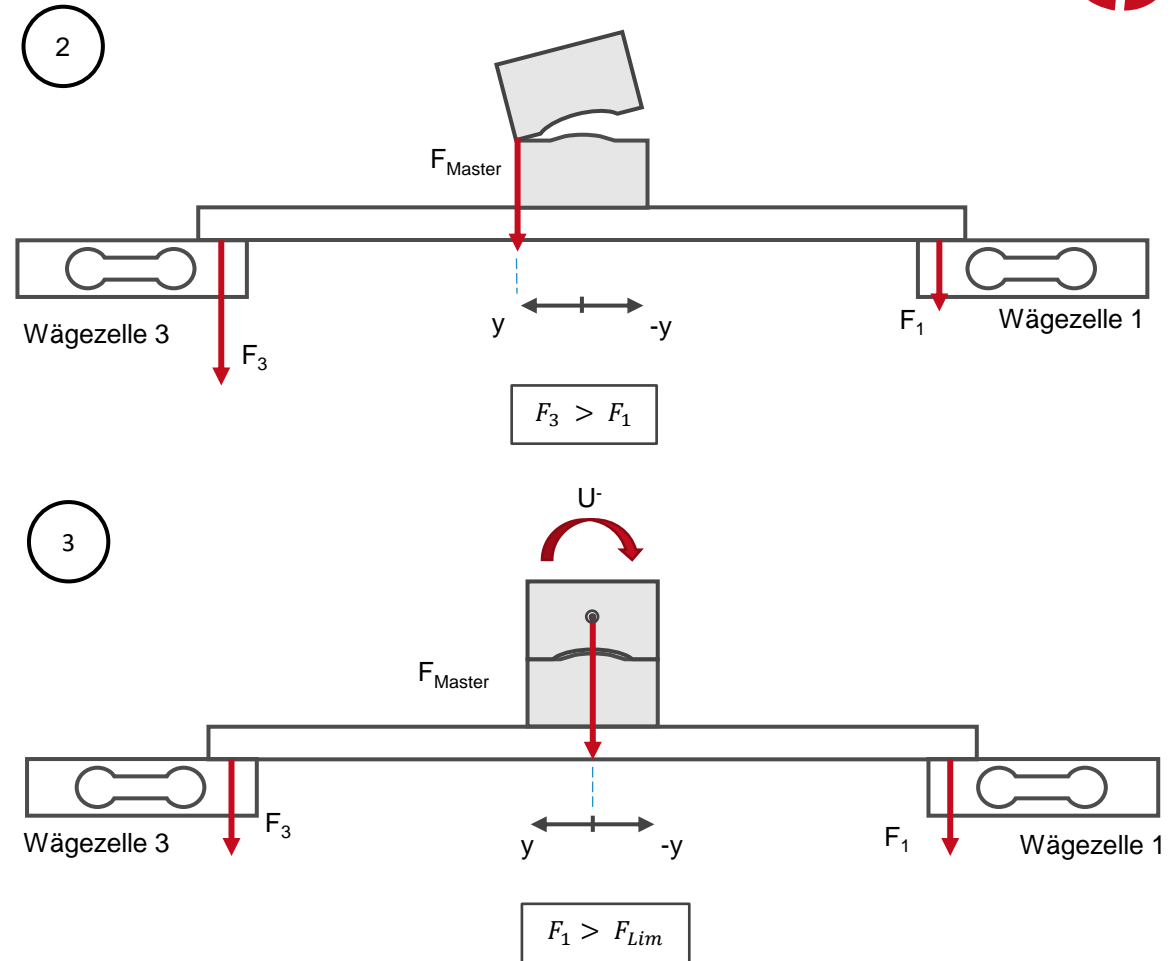
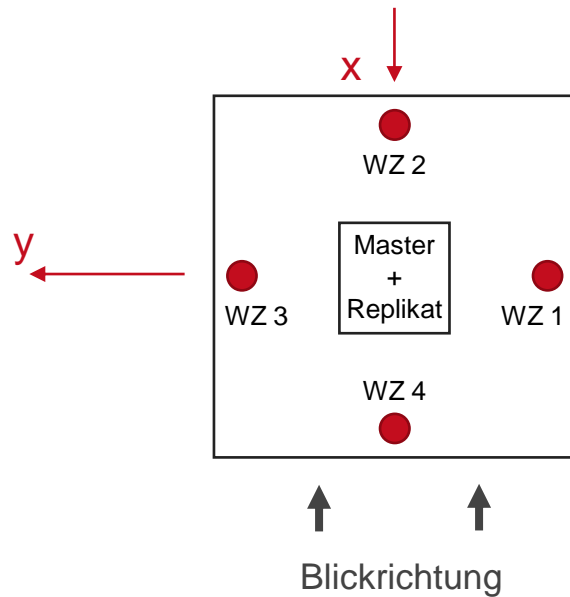
Drehung um x: **U**

Drehung um y: **V**

Drehung um z: **W**

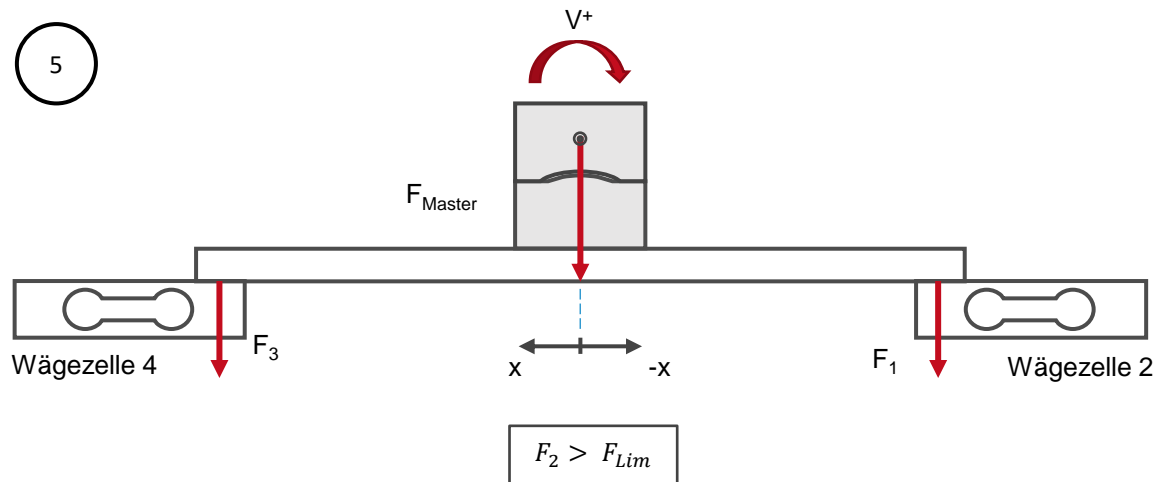
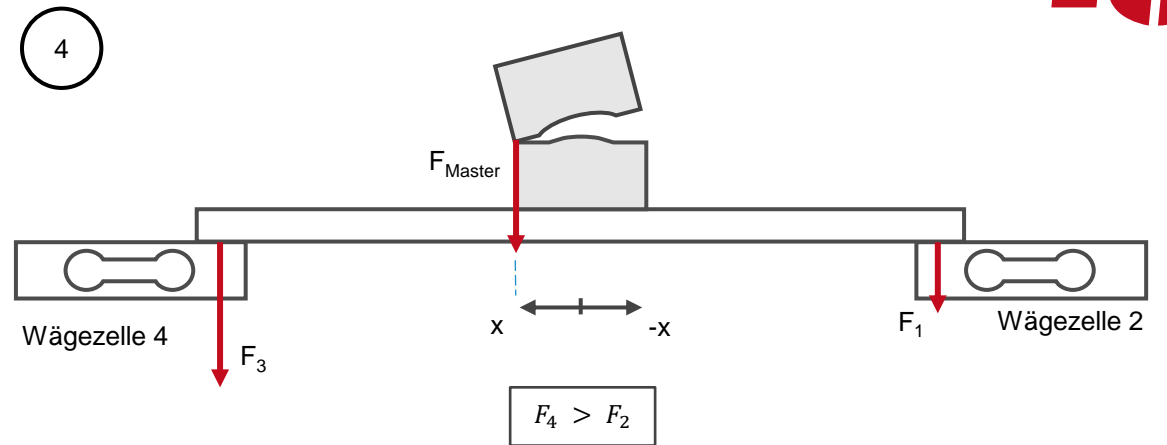
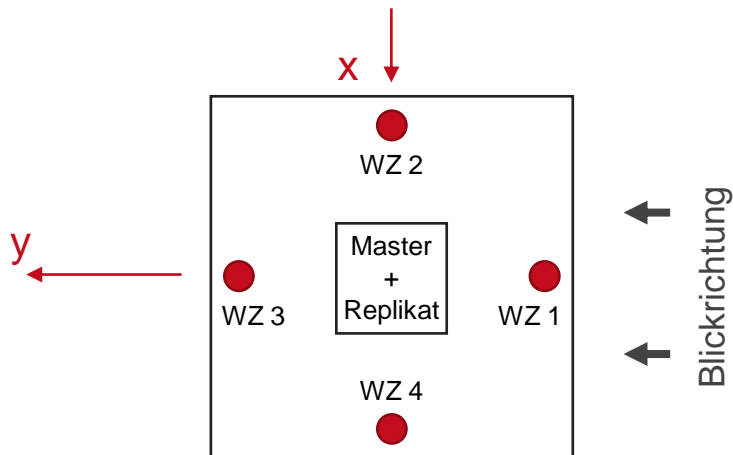
Algorithmus für automatische Parallelisierung der Formhälften

1. Fahre **Z+** bis $F_1 \vee F_2 \vee F_3 \vee F_4 > F_{Lim}$
2. Prüfe, welche Kraft am kleinsten ist (z. B. F_1)
3. Drehe in diese Richtung (**U-**) bis die Kraft (F_1) über dem Limit (F_{Lim}) liegt

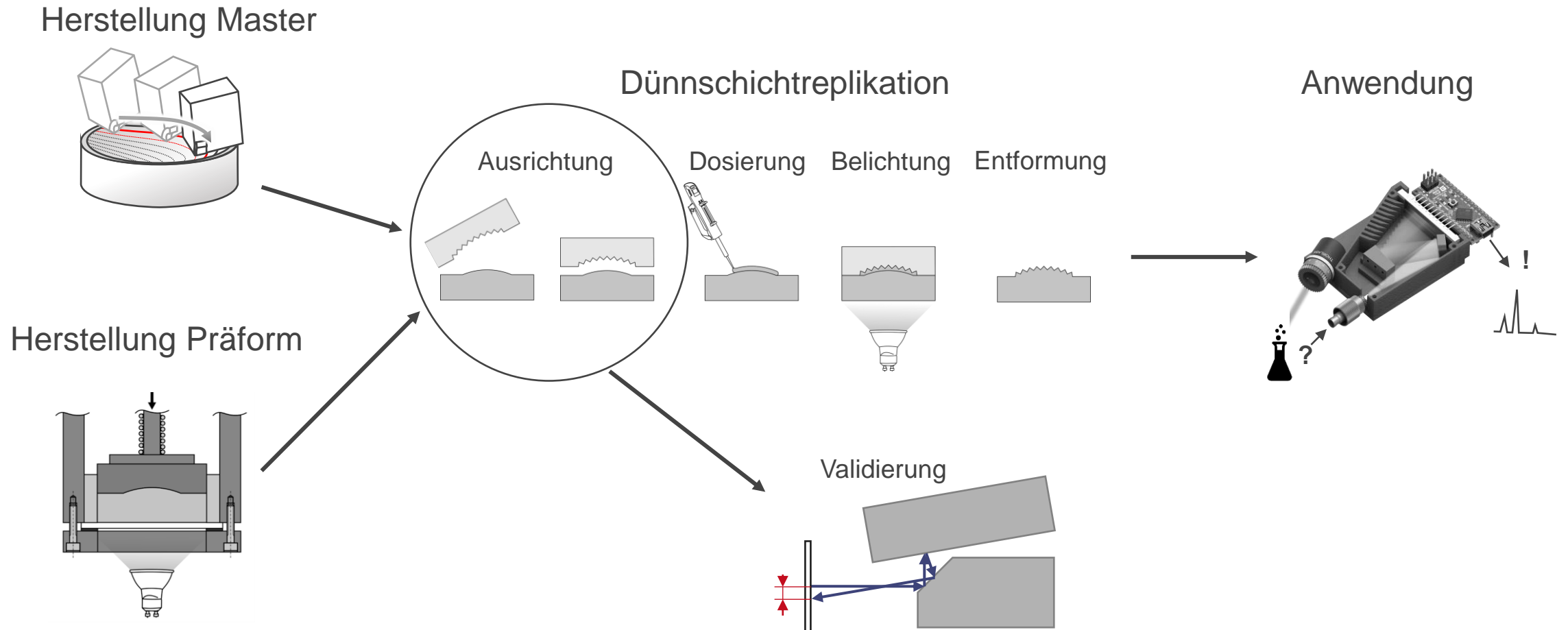


Algorithmus für automatische Parallelisierung der Formhälften

4. Vergleiche die beiden Kräfte (F_2 , F_4),
5. Drehe in die Richtung der kleineren Kraft ($V+$)
6. Wenn alle Kräfte über dem Limit liegen, ist die Parallelisierung abgeschlossen
7. stelle die Spalthöhe ein mit $Z-$

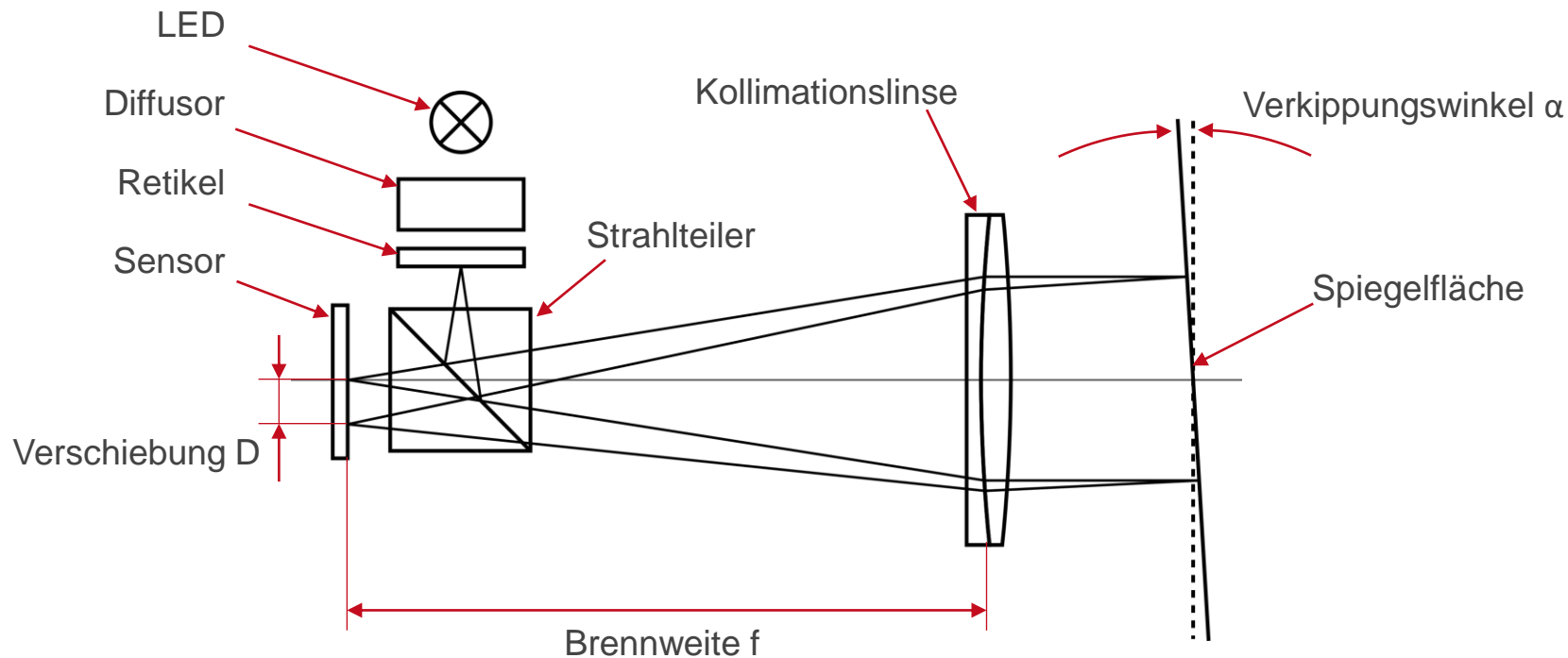


Replikationsprozess



Validierung

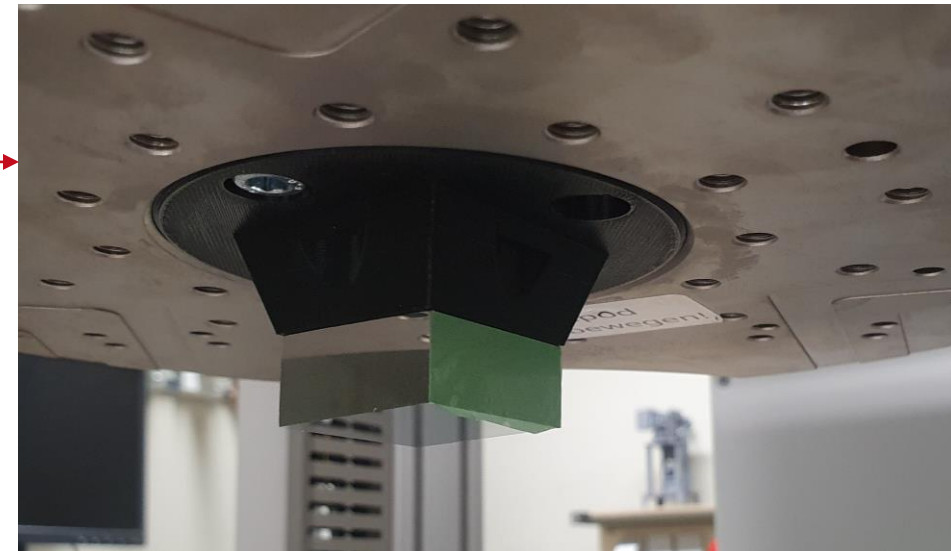
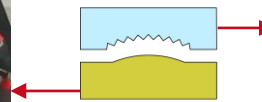
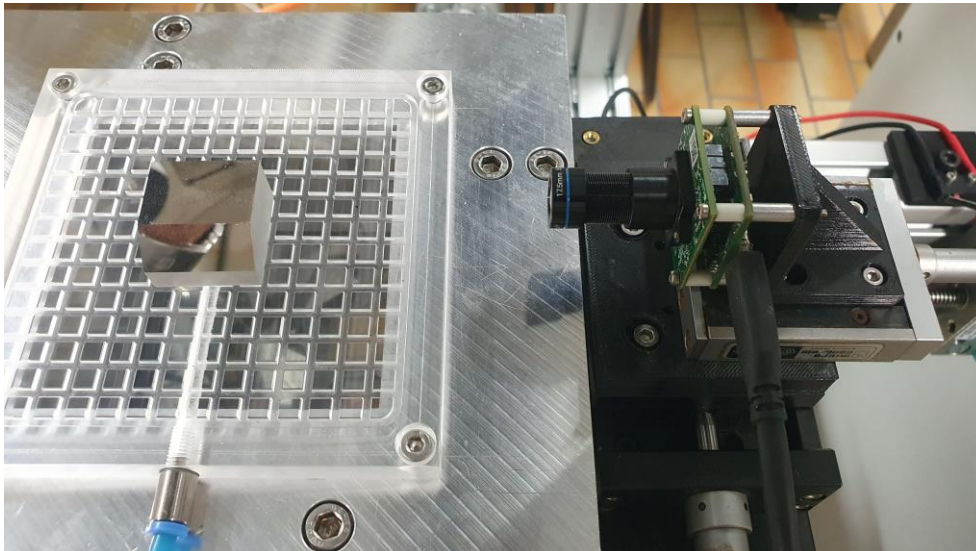
- Kraftdaten der Wägezellen erlauben keine Quantifizierung der erreichten Parallelität
- Achsdaten aus der NC: kein Bezug zu tatsächlicher Parallelität möglich
- typisches Messgerät für absolute Winkelmessung: Autokollimationsfernrohr (AKF)



$$\alpha = \frac{D}{2f}$$

Validierung

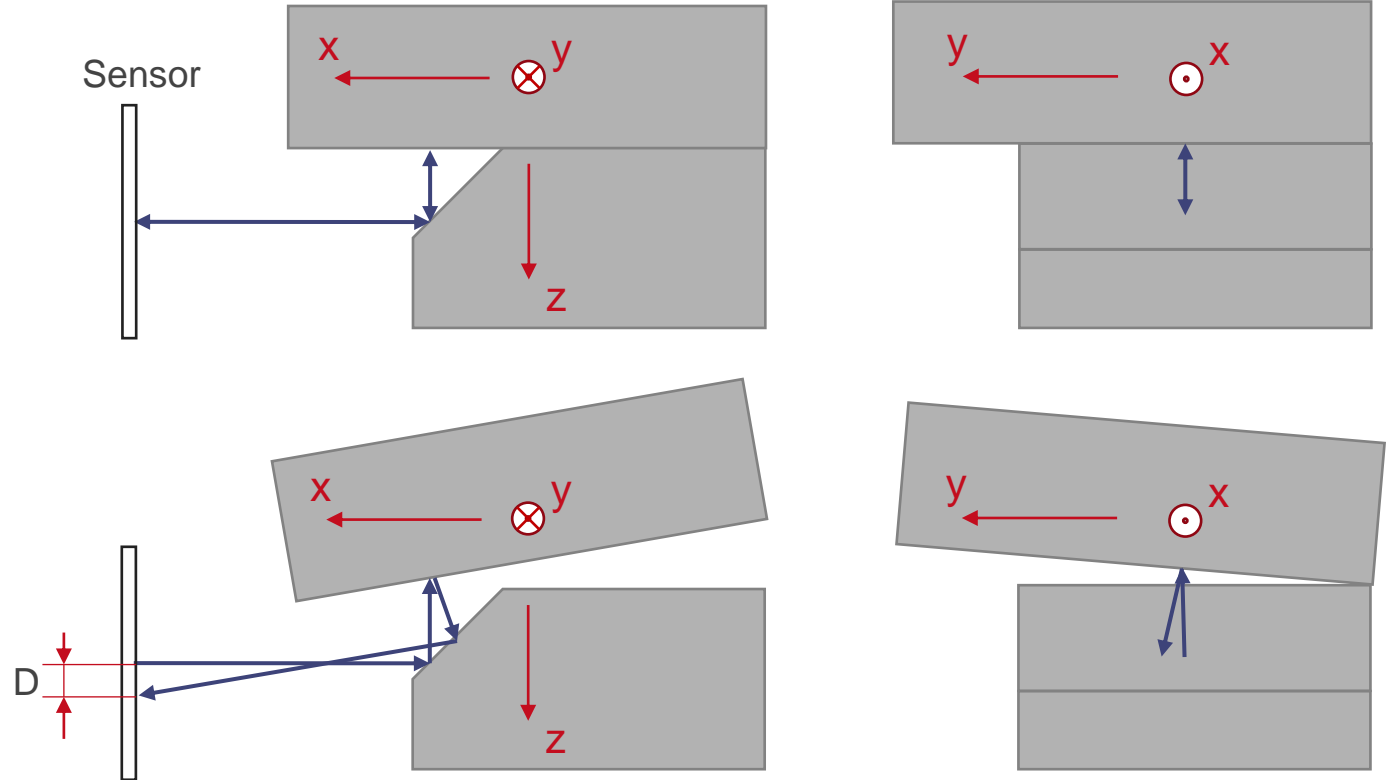
- Durchführen von Ausrichtversuchen
- Ausrichtung erfolgt **NUR** durch die Auswertung der Wägezellensignale im Algorithmus
- Quantifizierung der erfolgten Ausrichtung mittels AKF
- benötigt: geometrisch bestimmte Formhälften mit Spiegelflächen



Messstrategie

- Abweichungen von der parallelen Idealposition zeigen sich als Verschiebungen des Fadenkreuzes auf dem Sensor

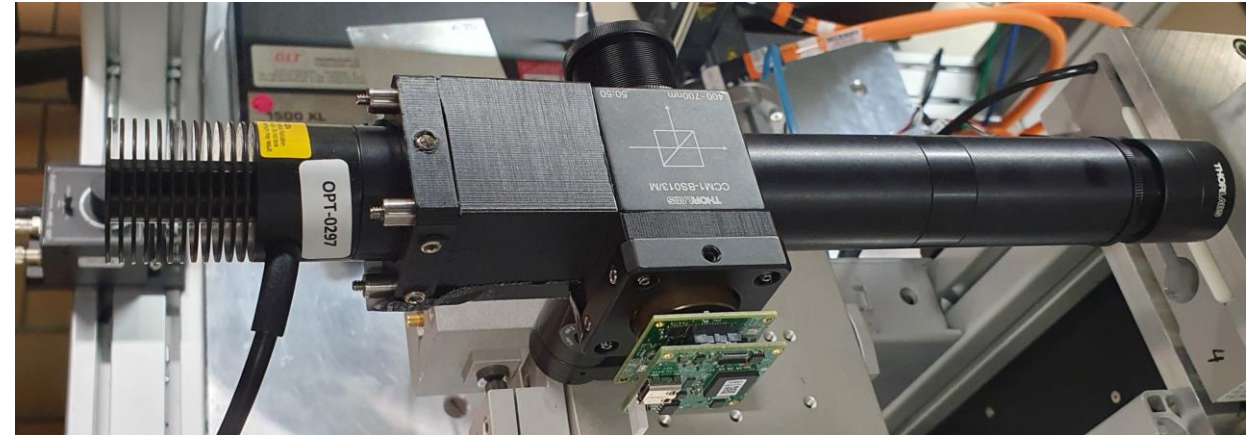
ideal:



verkippt:



- Konstruktion eines Autokollimationsfernrohrs ($f = 200$ mm) aus Optikkomponenten der Fa. Thorlabs GmbH, Bergkirchen
- Abschätzung der Messgenauigkeit durch Aufstellung eines Messunsicherheitsbudgets und Ermittlung der kombinierten Messunsicherheit
- Autokollimationsfernrohr misst Winkel auf $8''$ ($\pm 4''$, $k = 1$) genau, in einem Messbereich von $\pm 0,3^\circ$ ($\pm 1080''$)
- für $k = 2$: $16''$



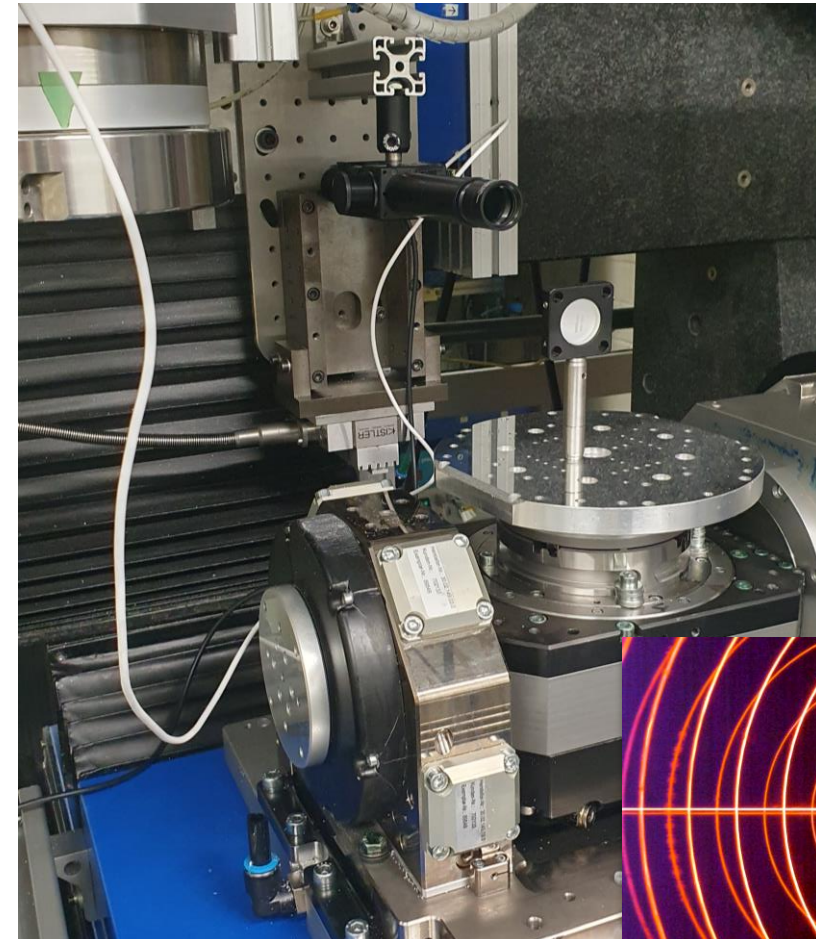
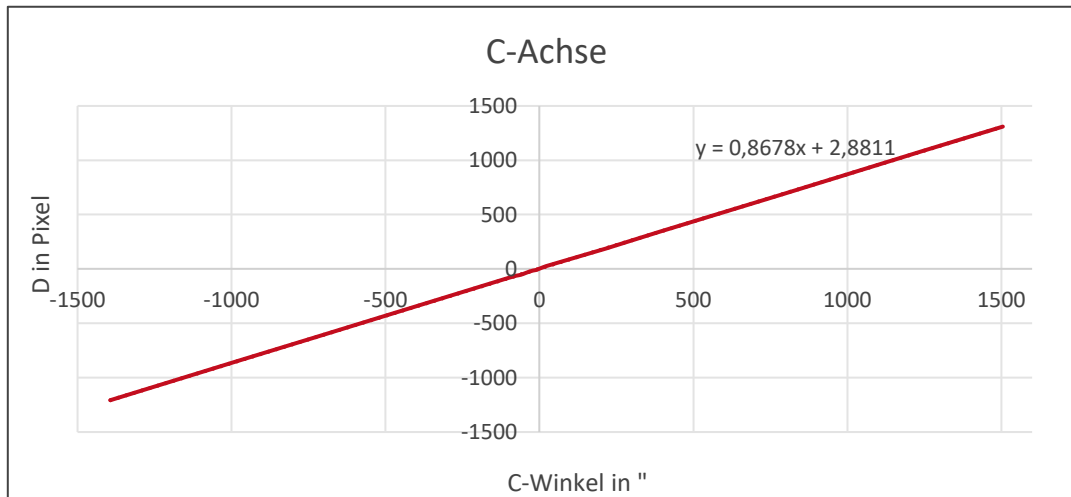
Unsicherheitsbudget

Unsicherheitsquelle	Schätzwert ["]	Typ	Distribution	Divisor	Std. Abweichung ["]
Genauigkeit Kipp- und Drehmodul	3	B	Rechteckig	$\sqrt{3}$	1,732
Auflösung des Sensors (2,2 μ m Pixelgröße)	1,13446	A	Rechteckig	$2\sqrt{3}$	0,327
Ablesegenauigkeit (2 Pixel)	2,26891	A	Normal	1	2,269
Wiederholgenauigkeit	2	A	Normal	1	2,000
kombinierte Unsicherheit (Summe)				in "	3,501
$k = 1$				rund	4,000
				in $^\circ$	0,001

Kalibrierkurve AKF



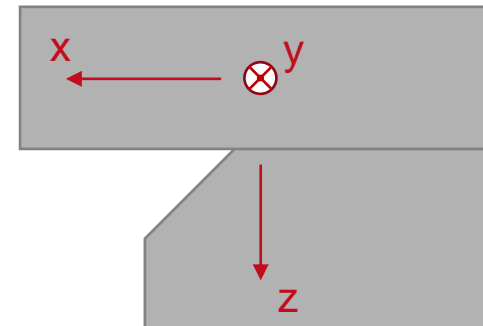
- „Kalibrierung“ mit dem Kipp- und Drehmodul des modifizierten Ultrapräzisions-Bearbeitungszentrum MMC1100 der LT-Ultra Technology GmbH, Aftholderberg
- lineare Regression, Genauigkeit der Drehachsen angegeben mit 3“



Versuche zur Parallelisierung

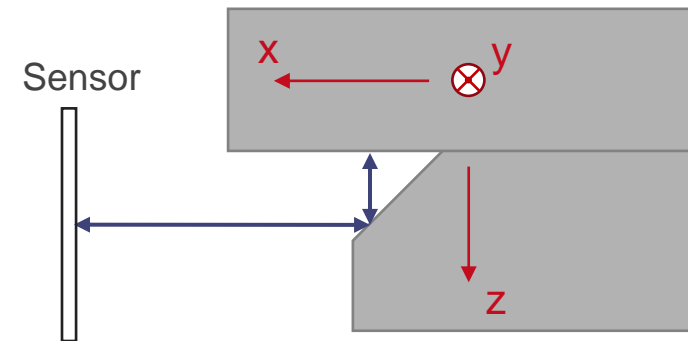
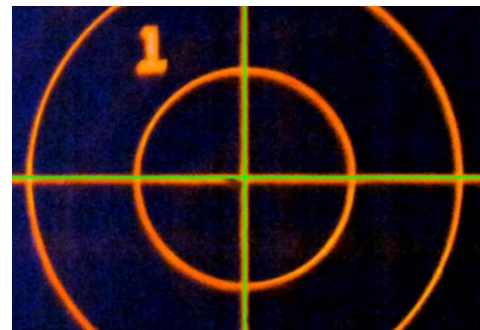


1. Aufsprengen der oberen Formhälfte auf die untere



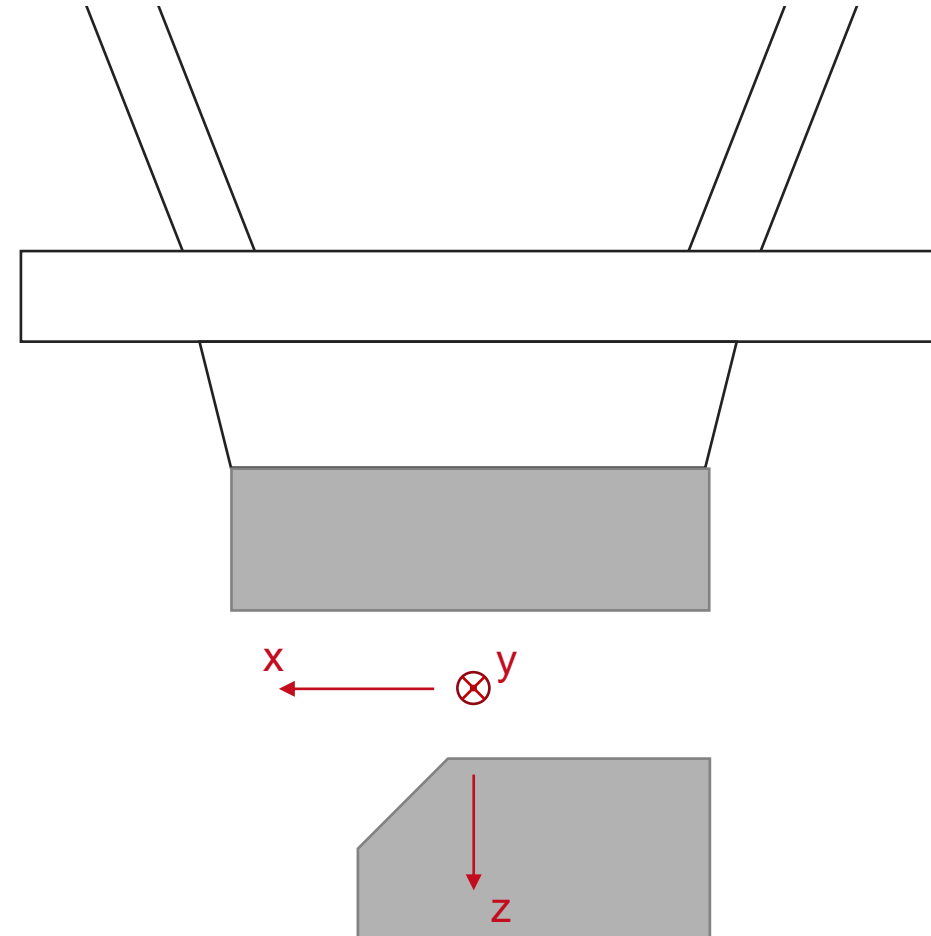
Versuche zur Parallelisierung

1. Aufsprengen der oberen Formhälfte auf die untere
2. Erfassen der Nullposition des Fadenkreuzes



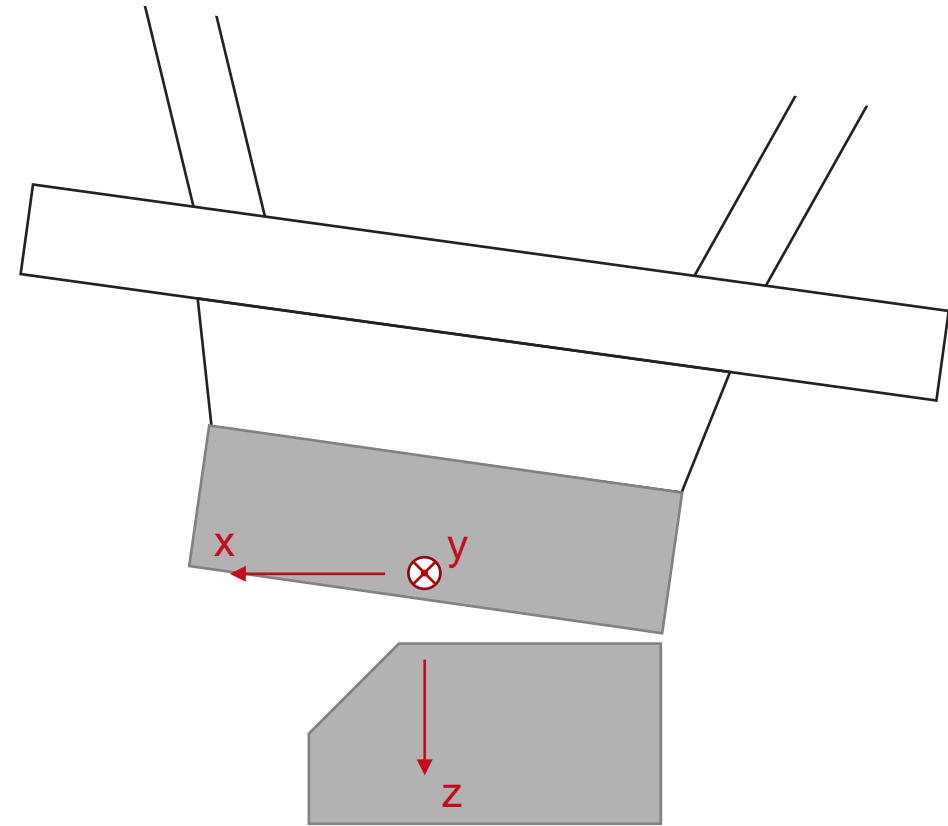
Versuche zur Parallelisierung

1. Aufsprengen der oberen Formhälfte auf die untere
2. Erfassen der Nullposition des Fadenkreuzes
3. Montieren der oberen Formhälfte im Hexapod



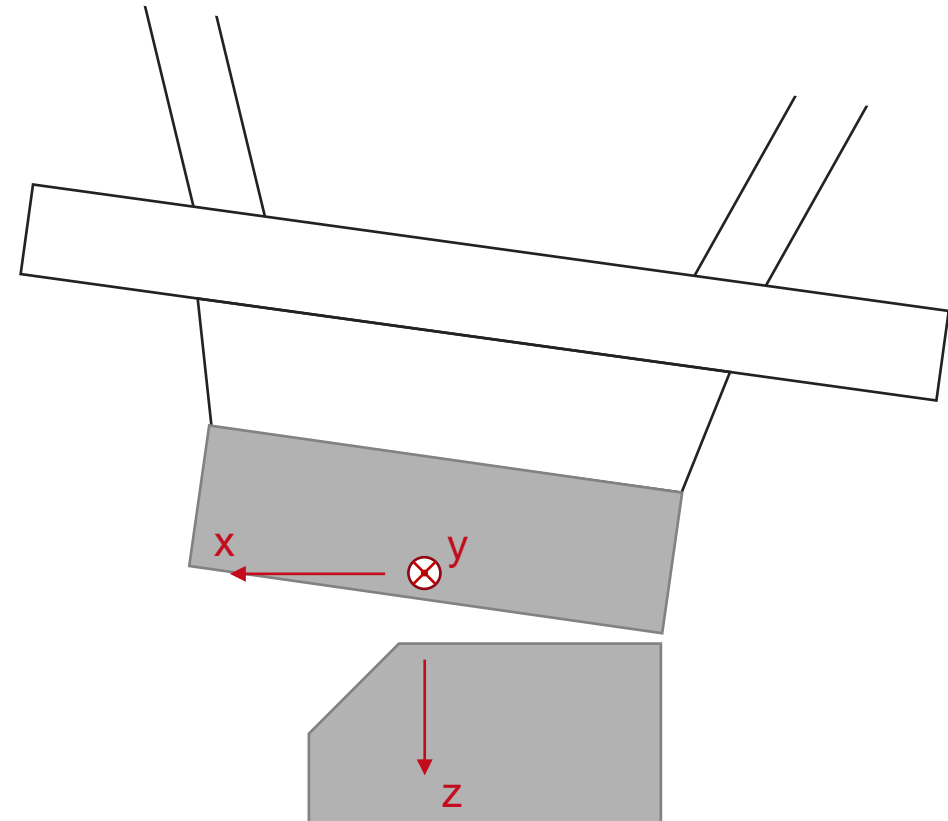
Versuche zur Parallelisierung

1. Aufsprengen der oberen Formhälfte auf die untere
2. Erfassen der Nullposition des Fadenkreuzes
3. Montieren der oberen Formhälfte im Hexapod
4. Grobausrichtung mit Hilfe der Kamera auf Startposition



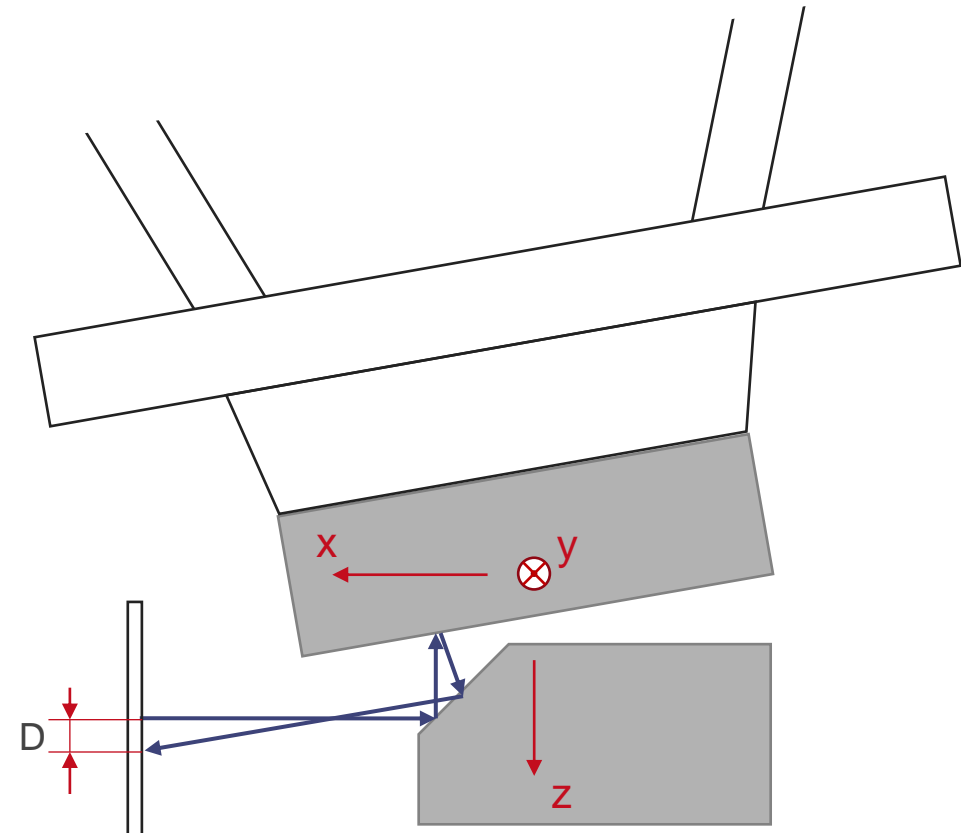
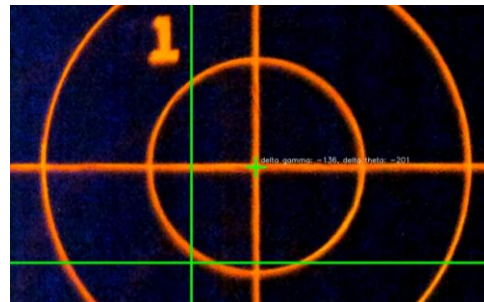
Versuche zur Parallelisierung

1. Aufsprengen der oberen Formhälfte auf die untere
2. Erfassen der Nullposition des Fadenkreuzes
3. Montieren der oberen Formhälfte im Hexapod
4. Grobausrichtung mit Hilfe der Kamera auf Startposition
5. Algorithmus starten



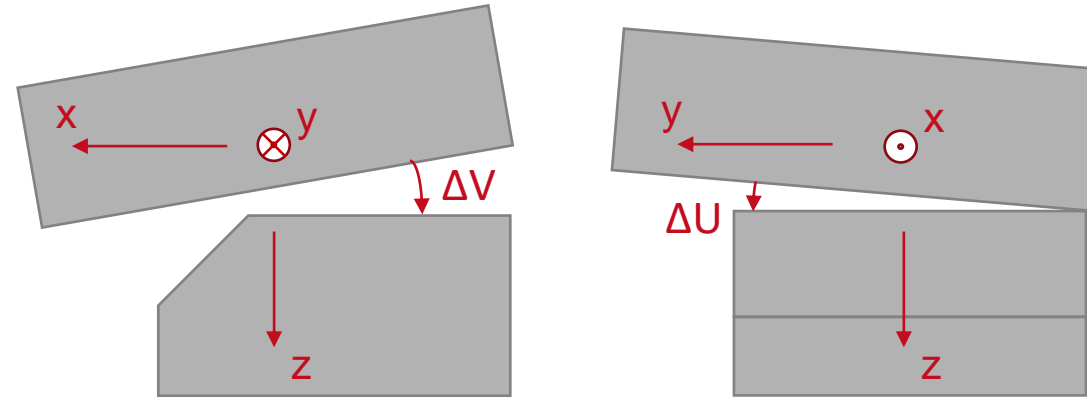
Versuche zur Parallelisierung

1. Aufsprengen der oberen Formhälfte auf die untere
2. Erfassen der Nullposition des Fadenkreuzes
3. Montieren der oberen Formhälfte im Hexapod
4. Grobausrichtung mit Hilfe der Kamera auf Startposition
5. Algorithmus starten
6. Endposition des Fadenkreuzes erfassen
7. Achsdaten erfassen



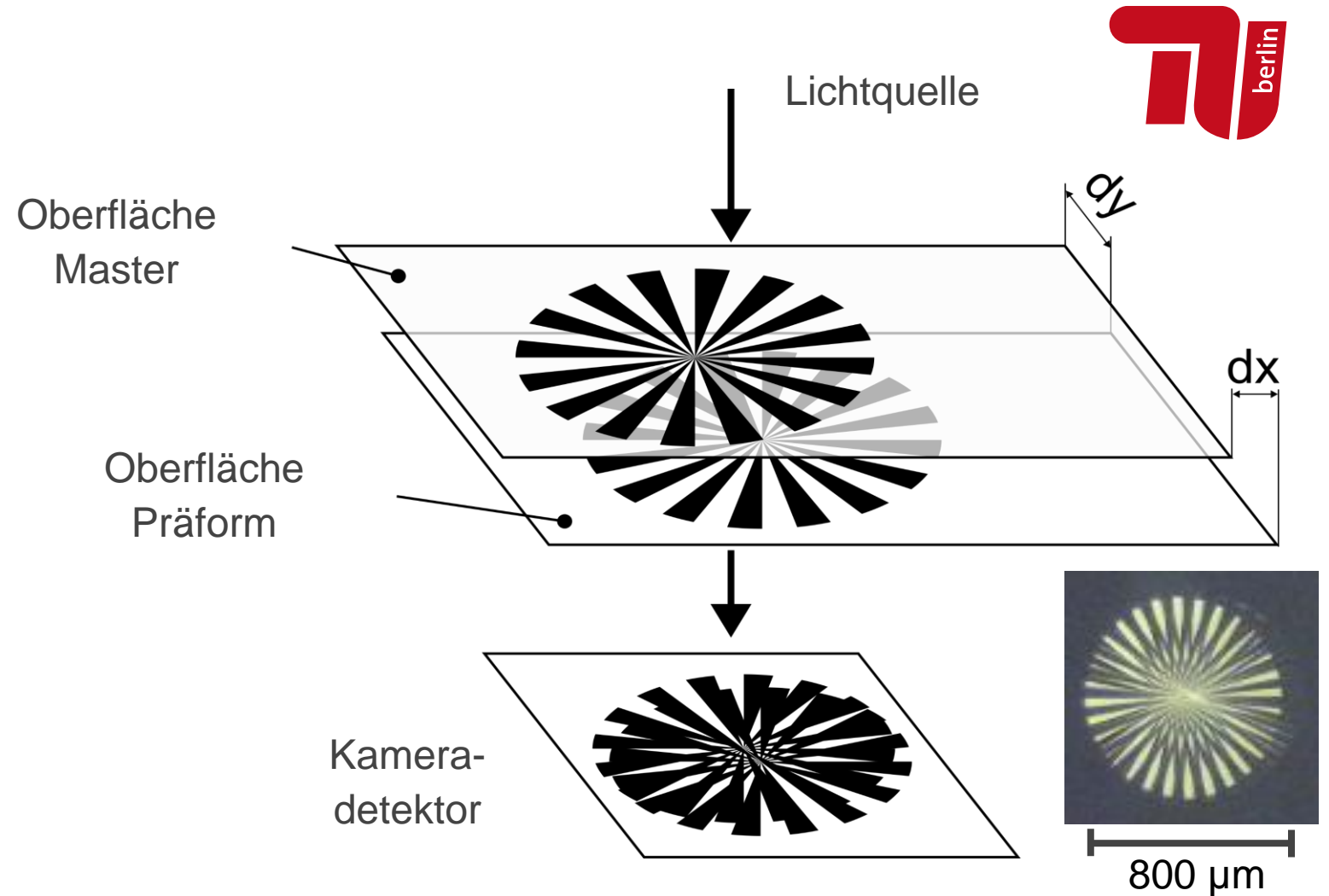
Auswertung

- 21 Versuche von Startposition
- $\Delta V = -75'' \pm 12'' \approx -0,021^\circ \pm 0,004^\circ$
- $\Delta U = -109'' \pm 2'' \approx -0,030^\circ \pm 0,001^\circ$
- Diskussion:
 - systematische Abweichungen sind noch „relativ“ groß
 - Standardabweichungen sind sehr klein, kleiner als Messunsicherheit des AKF ($\pm 16''$, $k = 2$)
 - spricht für die Genauigkeit des Algorithmus
 - systematische Abweichungen lassen sich durch Einstellungen von Grenzwerten im Algorithmus wahrscheinlich kompensieren
 - D. h.: nach einer gewissen Einstellphase sollte der Replikationsprozess sicher automatisiert ablaufen und gute Ergebnisse liefern



Ausrichtung in X, Y und W

- lateralen Ausrichtung durch Auswertung von Moiré-Mustern
- Moiré-Muster werden durch Überlagerung von zwei periodischen Mustern erzeugt
- Verschiebung der Messmarken gegeneinander wird mit dem detektierten Muster in Verbindung gebracht
- Periode des Moiré-Musters ist größer als die Periode des Messmarkenmusters → wirkt wie eine Lupe



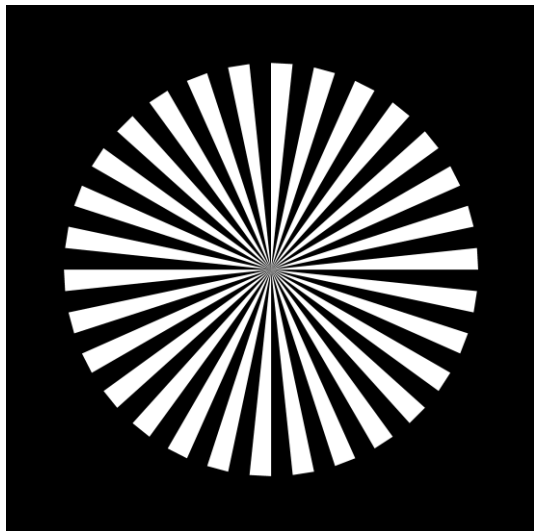
Datengenerese

- Systematische Erfassung von Moiré-Mustern durch Variation der Ausrichtung
- Künstlich generierte Bilder mit der Pillow Library in Python
- Manuelle Annotation der erfassten Moiré-Muster
- Kennzeichnung der korrekten Ausrichtung als Ground Truth

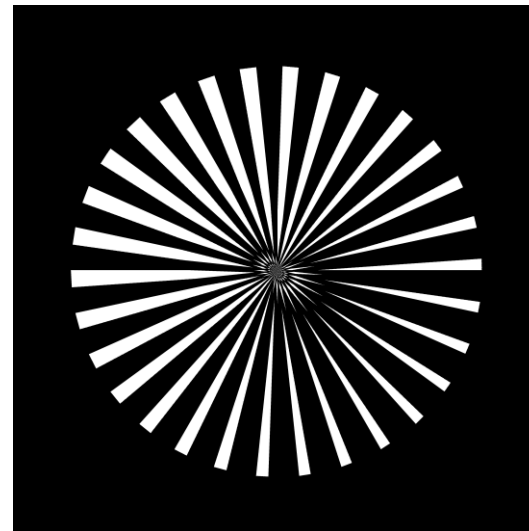


Phase 1

- Datengeneration



$X = 0, Y = 0, W = 0$

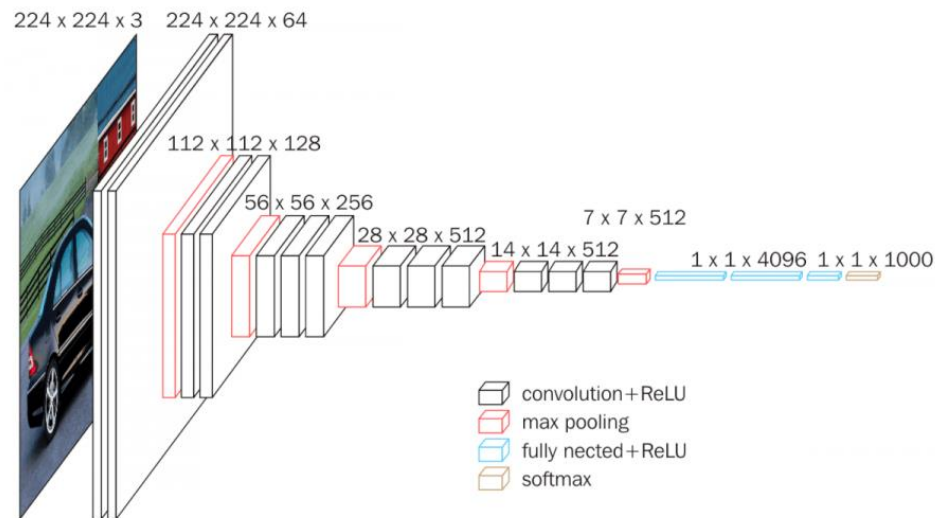


$X = 4, Y = -6, W = -2$

Modellentwicklung: Nutzung eines CNN



- Nutzung eines Convolutional Neural Network (CNN) genutzt, um die Merkmale direkt aus den Moiré-Mustern zu lernen
- Modell ist in der Lage, die Ausrichtung der Formhälften basierend auf den visuell erkannten Mustern vorherzusagen



VGG16 - Structural Details													
#	Input Image			output			Layer	Stride	Kernel	in	out	Param	
1	224	224	3	224	224	64	conv3-64	1	3	3	3	64	1792
2	224	224	64	224	224	64	conv3064	1	3	3	64	64	36928
	224	224	64	112	112	64	maxpool	2	2	2	64	64	0
3	112	112	64	112	112	128	conv3-128	1	3	3	64	128	73856
4	112	112	128	112	112	128	conv3-128	1	3	3	128	128	147584
	112	112	128	56	56	128	maxpool	2	2	2	128	128	65664
5	56	56	128	56	56	256	conv3-256	1	3	3	128	256	295168
6	56	56	256	56	56	256	conv3-256	1	3	3	256	256	590080
7	56	56	256	56	56	256	conv3-256	1	3	3	256	256	590080
	56	56	256	28	28	256	maxpool	2	2	2	256	256	0
8	28	28	256	28	28	512	conv3-512	1	3	3	256	512	1180160
9	28	28	512	28	28	512	conv3-512	1	3	3	512	512	2359808
10	28	28	512	28	28	512	conv3-512	1	3	3	512	512	2359808
	28	28	512	14	14	512	maxpool	2	2	2	512	512	0
11	14	14	512	14	14	512	conv3-512	1	3	3	512	512	2359808
12	14	14	512	14	14	512	conv3-512	1	3	3	512	512	2359808
13	14	14	512	14	14	512	conv3-512	1	3	3	512	512	2359808
	14	14	512	7	7	512	maxpool	2	2	2	512	512	0
14	1	1	25088	1	1	4096	fc		1	1	25088	4096	102764544
15	1	1	4096	1	1	4096	fc		1	1	4096	4096	16781312
16	1	1	4096	1	1	1000	fc		1	1	4096	1000	4097000
Total												138,423,208	

Phase 2

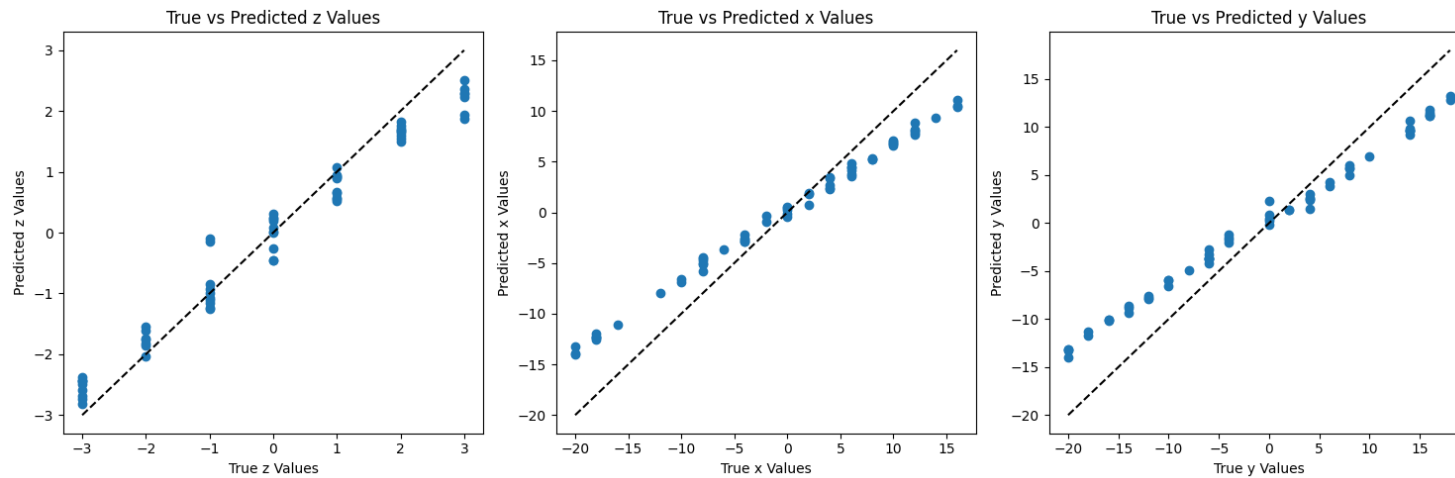
- Solution Design



Ergebnisse



- Modell erreicht eine hohe Genauigkeit bei der Vorhersage der optimalen Ausrichtung
- Geringe Abweichung zwischen vorhergesagten und tatsächlichen Ausrichtungen



Phase 3

- Testing

Förderung



- Das Projekt „Copysphär“ wurde kofinanziert durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE). Förderkennzeichen: 10169179
- „AutoRepli“: Dieses Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.
Förderkennzeichen: KK5051521SY3

Vielen Dank!



Kontakt:

Paul Kastl

Technische Universität Berlin
Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb
Fachgebiet Mikro- und Feingeräte
Pascalstr. 8-9, 10587 Berlin
Tel.: +49 30 314-75311
Mail: kastl@mfg.tu-berlin.de



Supported by:



on the basis of a decision
by the German Bundestag



ANHANG - Grobpositionierung

- Linearachsen LES 6 der Fa. isel Germany AG, Eichenzell
 - spielfrei vorgespannter Kugelgewindetrieb
 - 10 mm Steigung
 - 16 mm Nenndurchmesser
- Direkt angetrieben von je einem Servomotor AM8112-0F20-0000 der Fa. Beckhoff Automation GmbH & Co. KG, Verl
 - 48 V DC
 - Stillstands Drehmoment $M_o = 0,38\text{Nm}$
 - Stillstandsstrom $I_o = 4,7\text{A}$
 - Nenndrehzahl $N_n = 4500\text{ 1/min}$
 - 18 Bit absolut encodiert (OCT)



Feinpositionierung



- Hexapod H-840.G2IHP der Fa. Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Karlsruhe

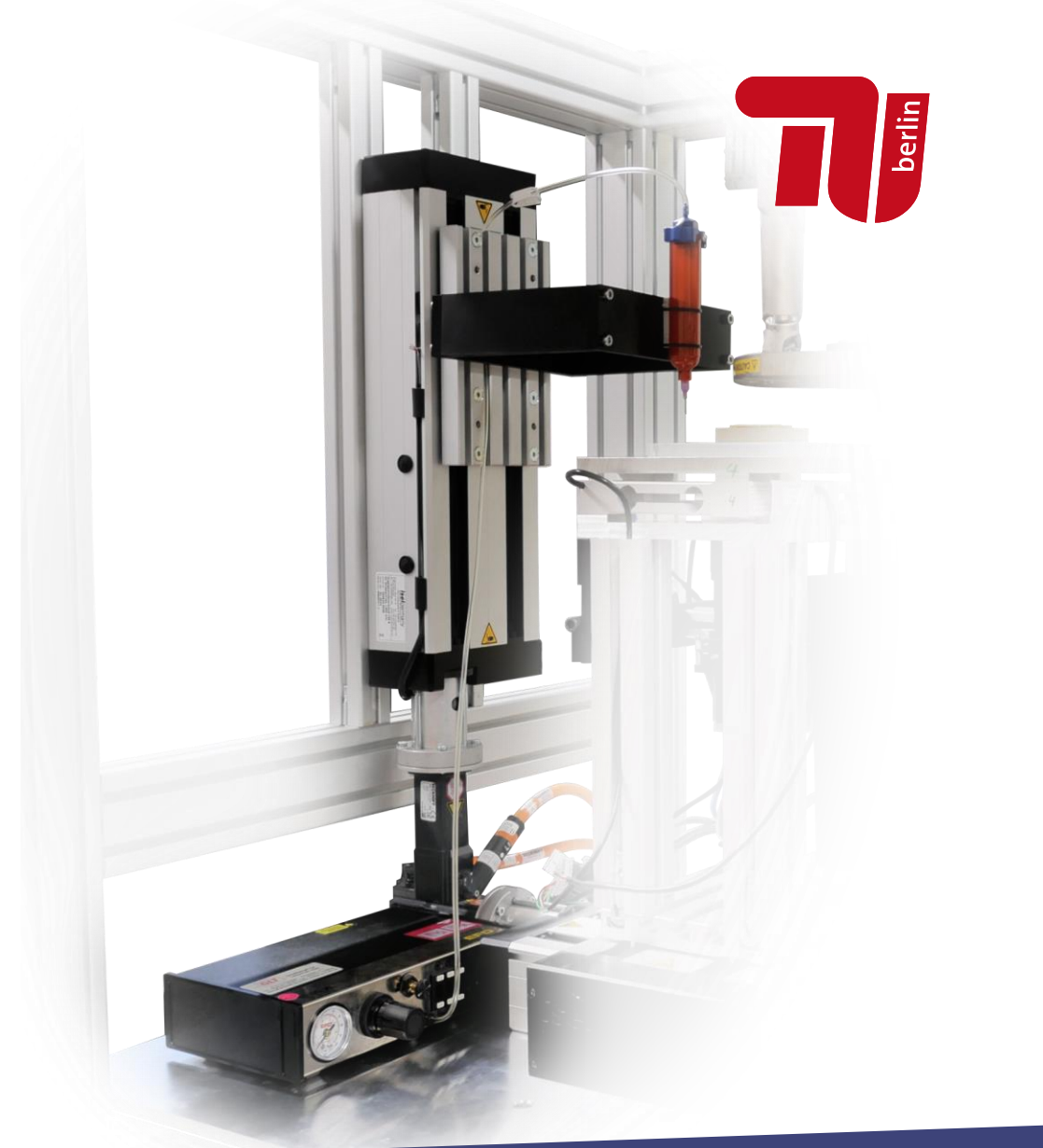
	X	Y	Z	U	V	W
Arbeitsbereich	± 50 mm	± 50 mm	± 25 mm	± 15°	± 15°	± 30°
Wiederholgenauigkeit	± 0,3 µm	± 0,3 µm	± 0,1 µm	± 1,4e-4°	± 1,4e-4°	± 1,7e-4°

- Parallelkinematik
 - sehr hohe Wiederholgenauigkeit im Vergleich zu serieller Kinematik vergleichbarer Baugröße und Arbeitsbereich
 - außerdem kleinere Masse, damit geringere Schwingungsanfälligkeit bei Überkopfmontage
- Pivot point lässt sich frei in den Arbeitsraum legen, dadurch Translationsfreie Spaltbewegung bei der Entformung
- Belastbar bis 150 N in beliebige Richtungen
- inkrementaler Rotationsencoder



Dosiereinheit

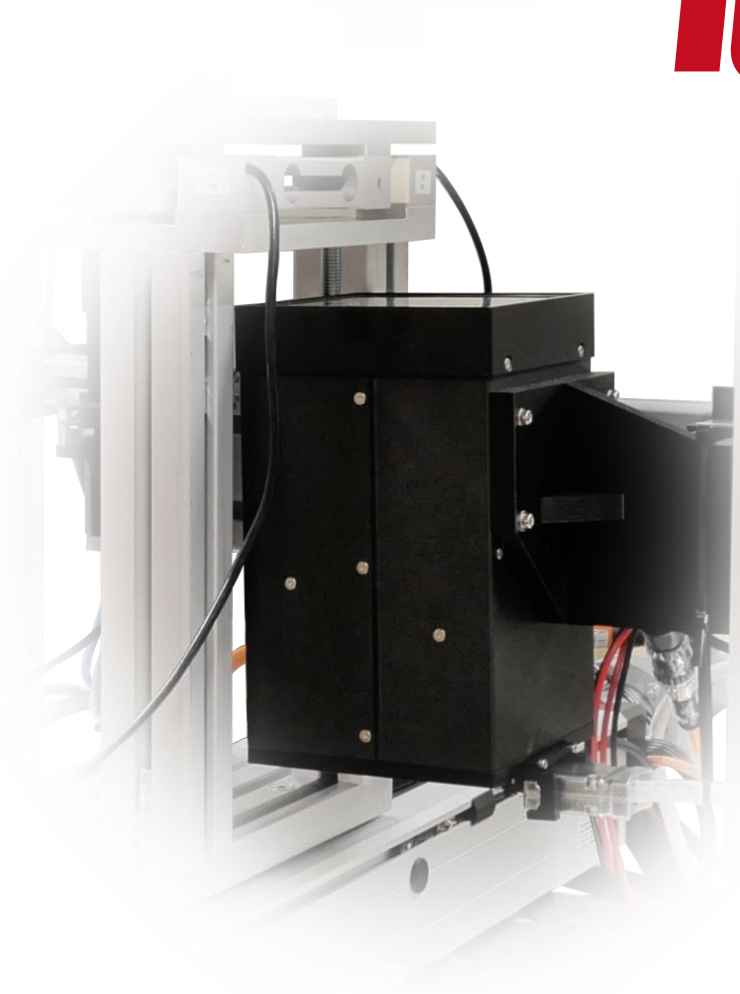
- Dosiereinheit 1500XL der Nordson Corporation, Westlake, USA
- Dosierdruck 5,5 bar
- Dosiernadeldurchmesser 0,16 mm Durchmesser
- dyn. Viskosität von OrmoComp[®] der Fa. micro resist technology GmbH, Berlin (mrt): $2,0 \pm 0,5$ Pas
- Dünnschichtvolumina aktuell zwischen 10 μ l und 100 μ l
- Das System erlaubt Einzelschussvolumen von rund 0,5 μ l



UV-Belichtungseinheit



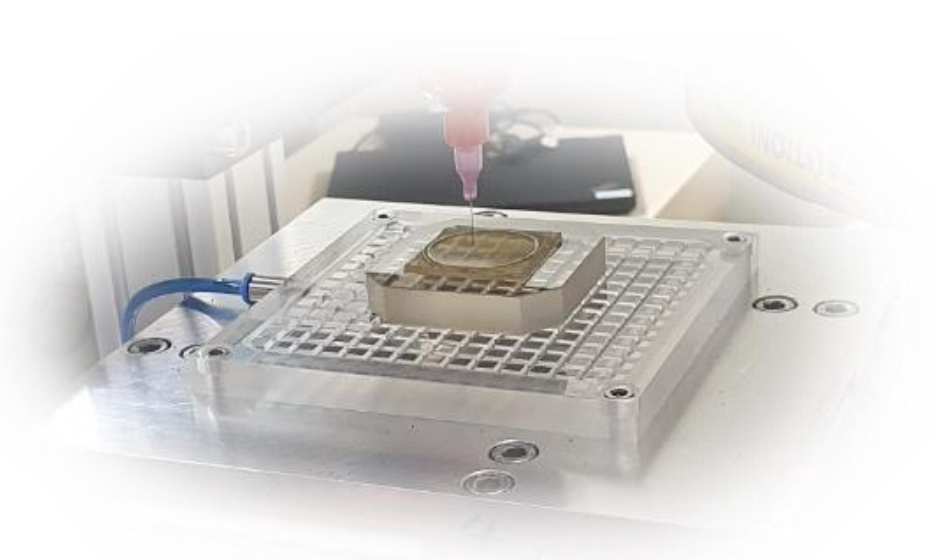
- UV-LED Einheit FJ800 der Fa. Phoseon Technology, Hillsboro, USA
- luftgekühlt, sehr gleichmäßige Ausleuchtung auf einer Belichtungsfläche von 100 mm × 100 mm
- Intensität
 - bei 365 nm, gemessen mit dem Power Meter PM16-401 der Fa. Thorlabs Inc., Newton, USA
 - 100% Leistung direkt auf der Lampenoberfläche (0,530 ± 0,004) W/cm²
 - 100% durch das Vakuumspannsystem aus PMMA (0,166 ± 0,003) W/cm²
 - 100% Spannsystem + 3 mm Quarzglas (0,159 ± 0,002) W/cm²



Vakuumspannsystem



- Aufbau als klassisches Vakuumspannsystem
- aber aus UV-durchlässigem Polymethylmethacrylat (PMMA)
- 80 W Membran-Vakuumpumpe N 022 der Fa. KNF DAC GmbH, Hamburg, angesteuert durch Relais
- keine seitlichen Spannkkräfte → Verformung der optischen Oberfläche minimal
- adaptierbar für verschiedene Bauteilgrößen
- Messung des Vakuumdrucks durch die Steuerung, um Spannung sicherzustellen
- typ. Unterdrücke von -700 mbar gemessen (Klemme EM3712, Beckhoff)
- damit Spannkraft bei einer Fläche von 40 mm × 40 mm: 112 N



Kraftmessung



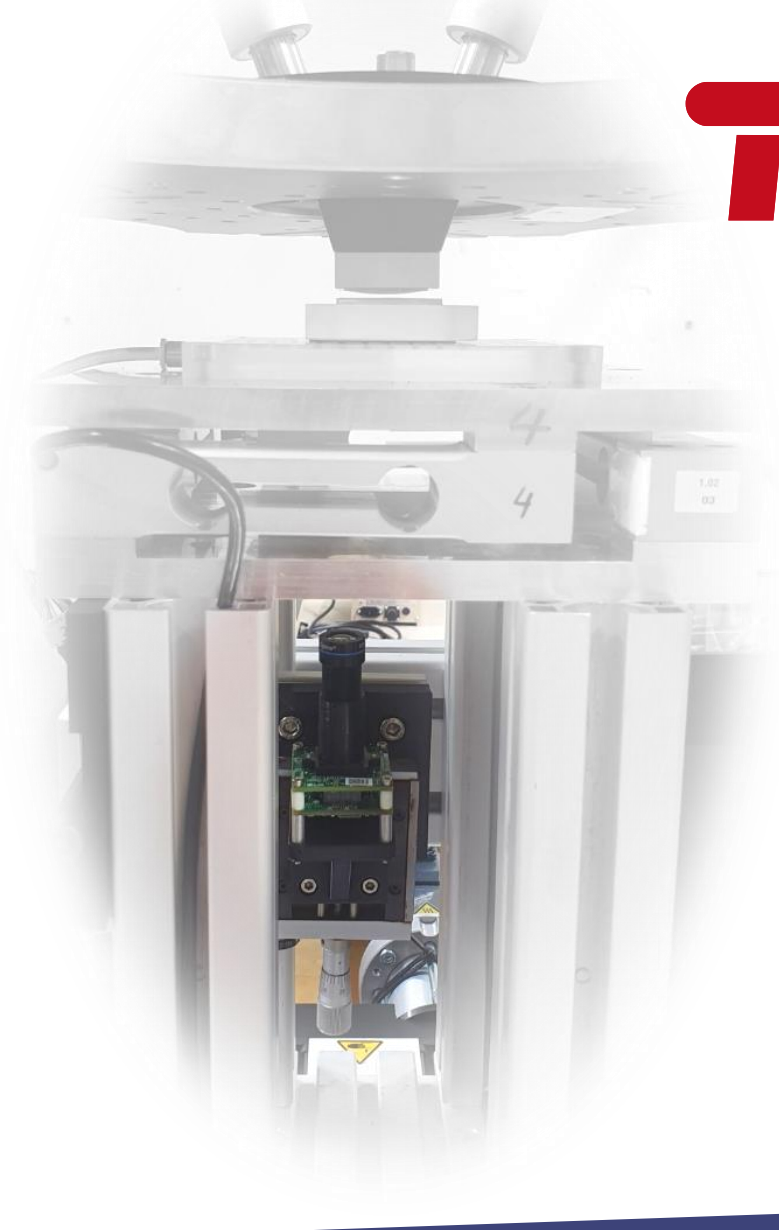
- 4 kalibrierte Wägezellen CP 5-3P1 der Fa. KERN & SOHN GmbH (ehemals Sauter), Balingen-Frommern
- Messbereich bis 5 kg
- Genauigkeit etwa ± 1 g
- verschiedene Ansätze um die Parallelisierung des Masters und des Replikats zu erreichen
- aktiver Ansatz verfolgt!
 - bessere Nachvollziehbarkeit des Prozesses
 - keine Parasitärebewegungen wie bei passiven Konstruktionen



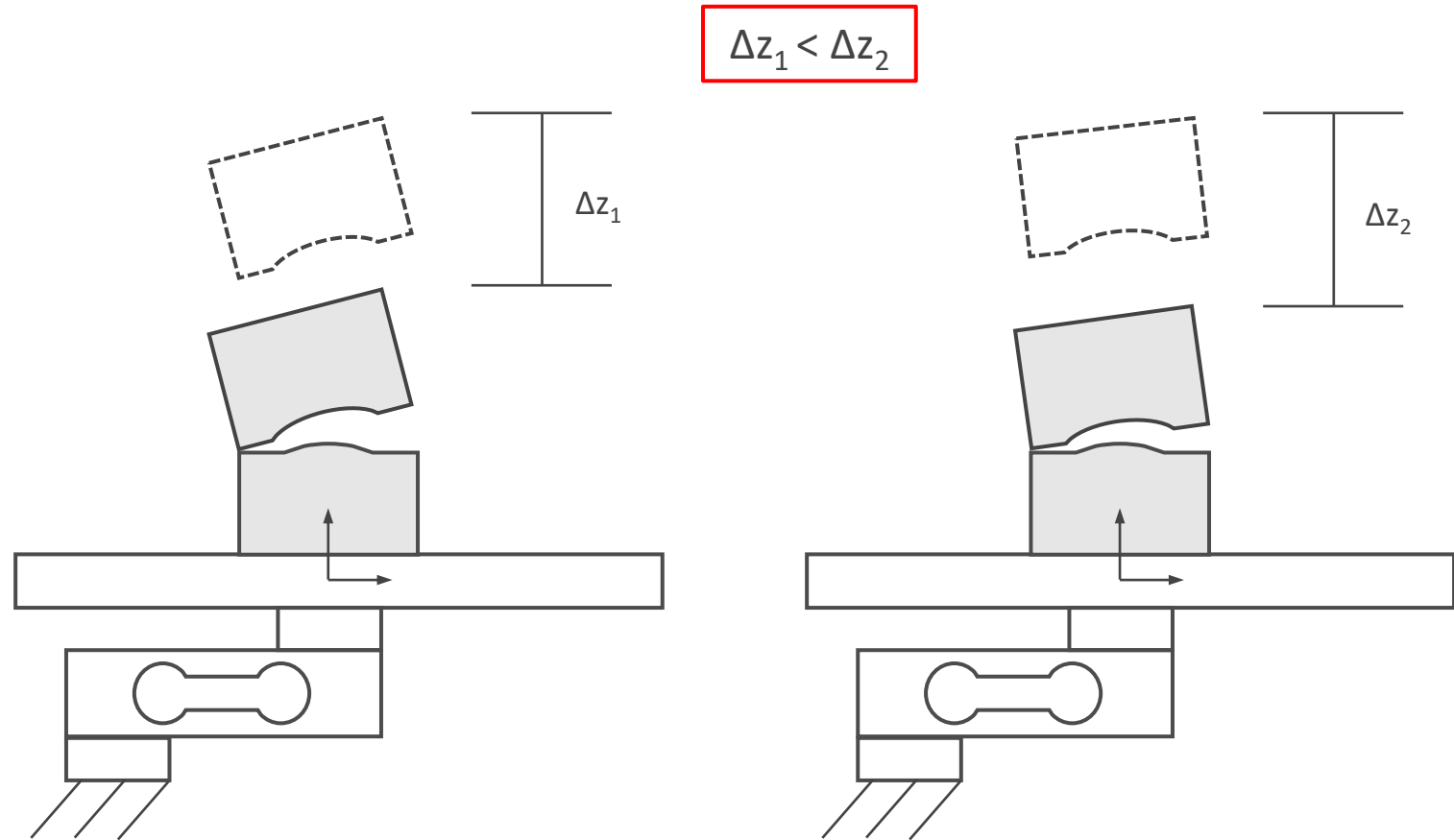
Kameratechnik



- USB-Kamera See3Cam CU55 der Fa. e-con Systems™, Inc., Riverside, USA
 - Sensor AR0521 der Fa. ON Semiconductor Corporation (onsemi®), Scottsdale, USA
 - Auflösung: 5 MP
 - Pixel Größe: 2,2 µm × 2,2 µm
 - aktive Sensorfläche: 2592 px × 1944 px
- TECHSPEC® M12-Objektiv (blaue Serie) der Fa. Edmund Optics Inc., Barrington, USA
 - laterale Auflösung tubusabhängig, aktuell ~4 µm
 - Brennweite BW 17,5 mm
 - Numerische Apertur NA 0,0214
 - Blende f/2,5

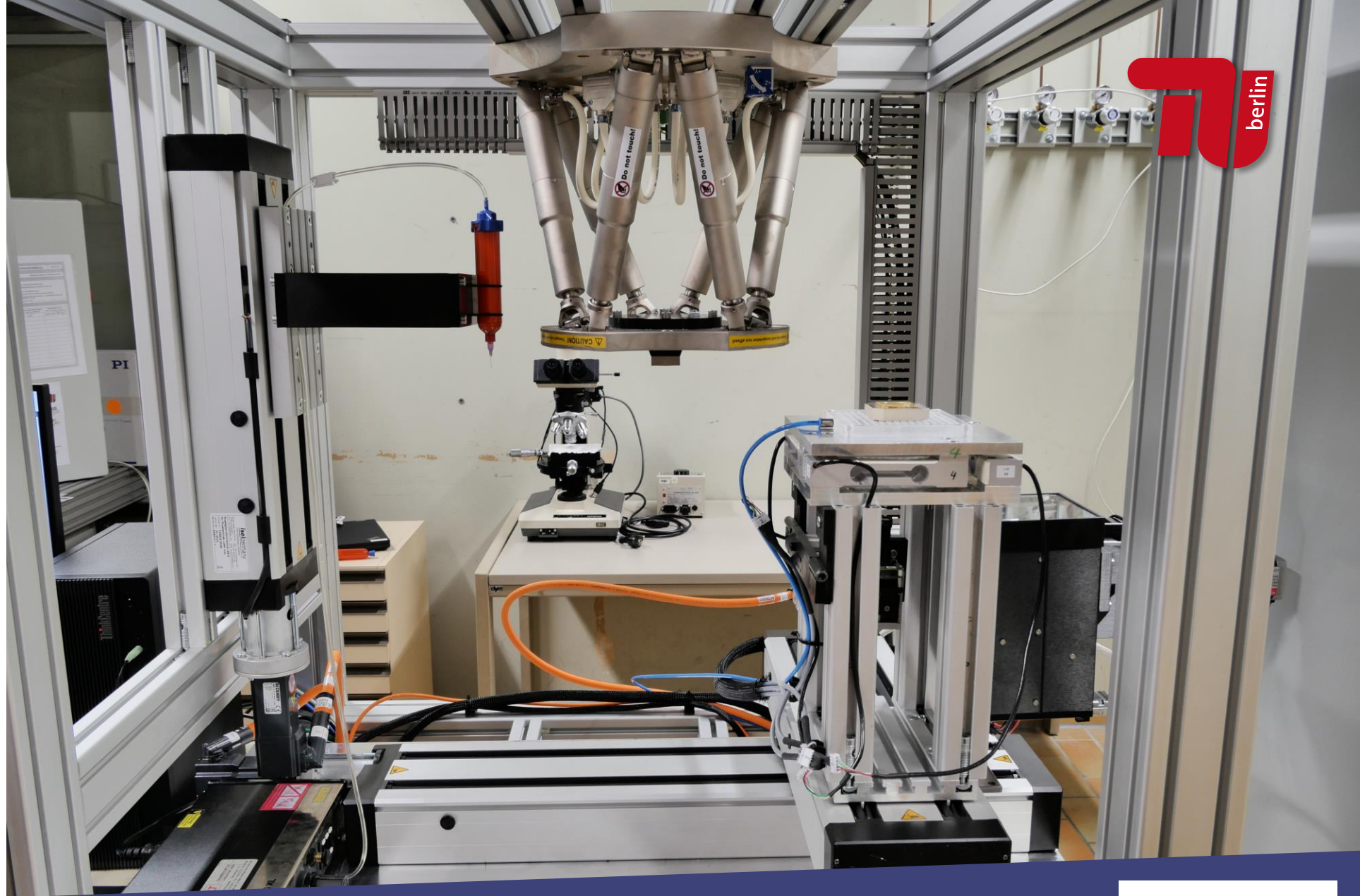


- theoretisch wird durch Verkippung von Master und Präform an einer Wägezelle ein größeres Signal gemessen
- Verkippung regeln, so dass:
 - Signale gleich groß sind
 - Kontaktpunkt in der Mitte liegt
 - Stellweg maximal wird
- erste Versuche vielversprechend, aber noch Probleme



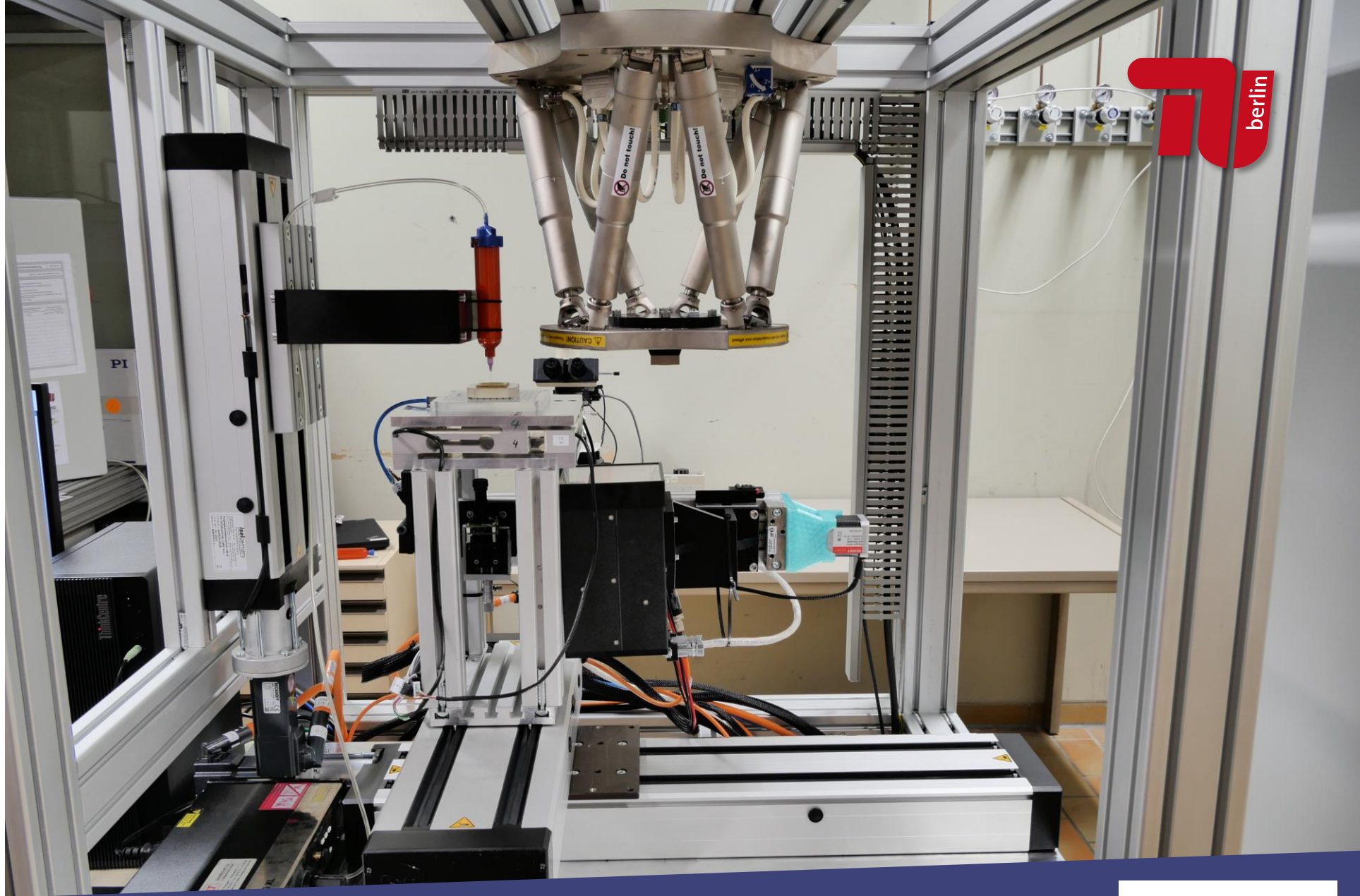
Prozess

Einlegen der Präform



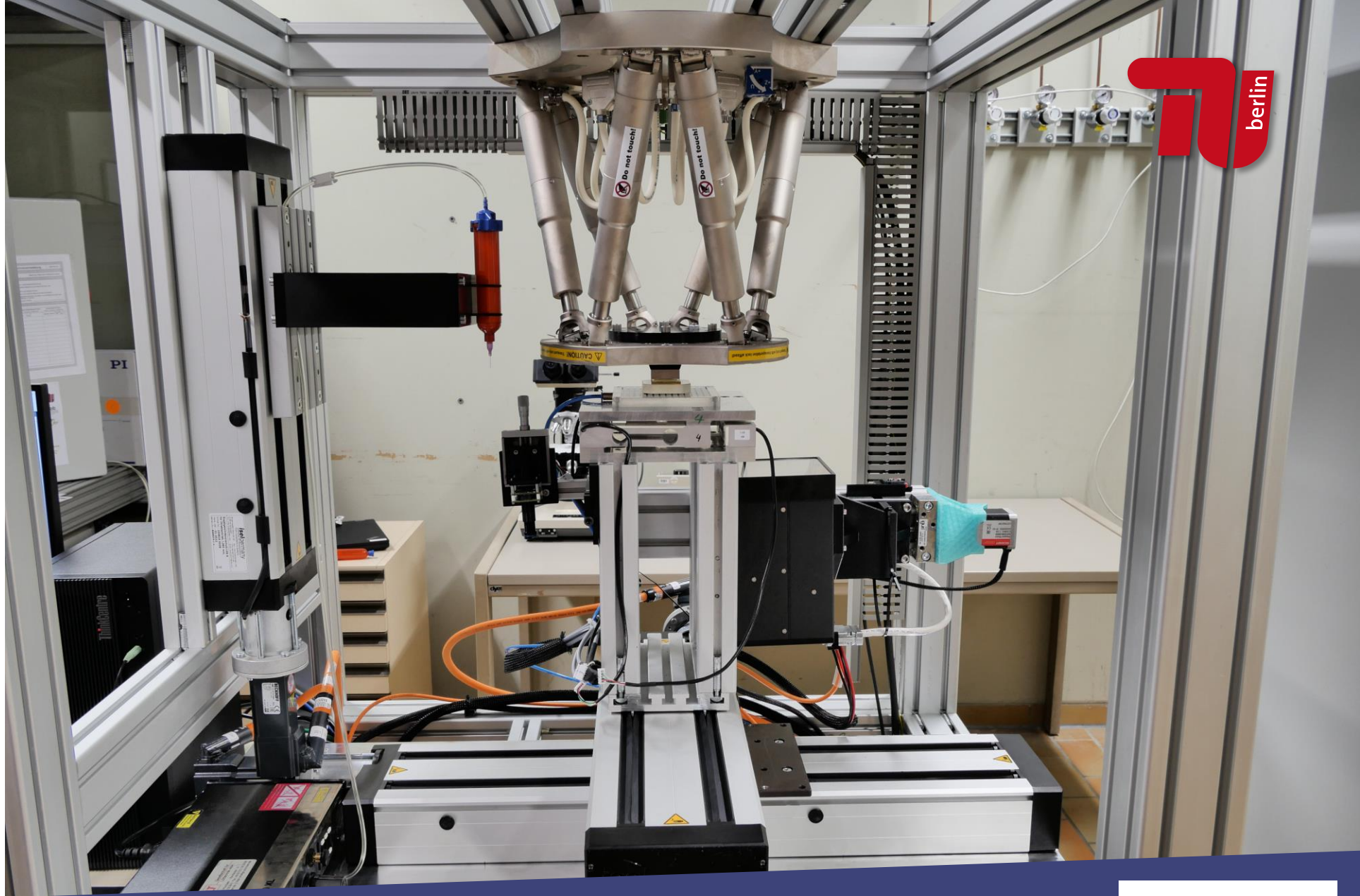
Prozess

Dosieren



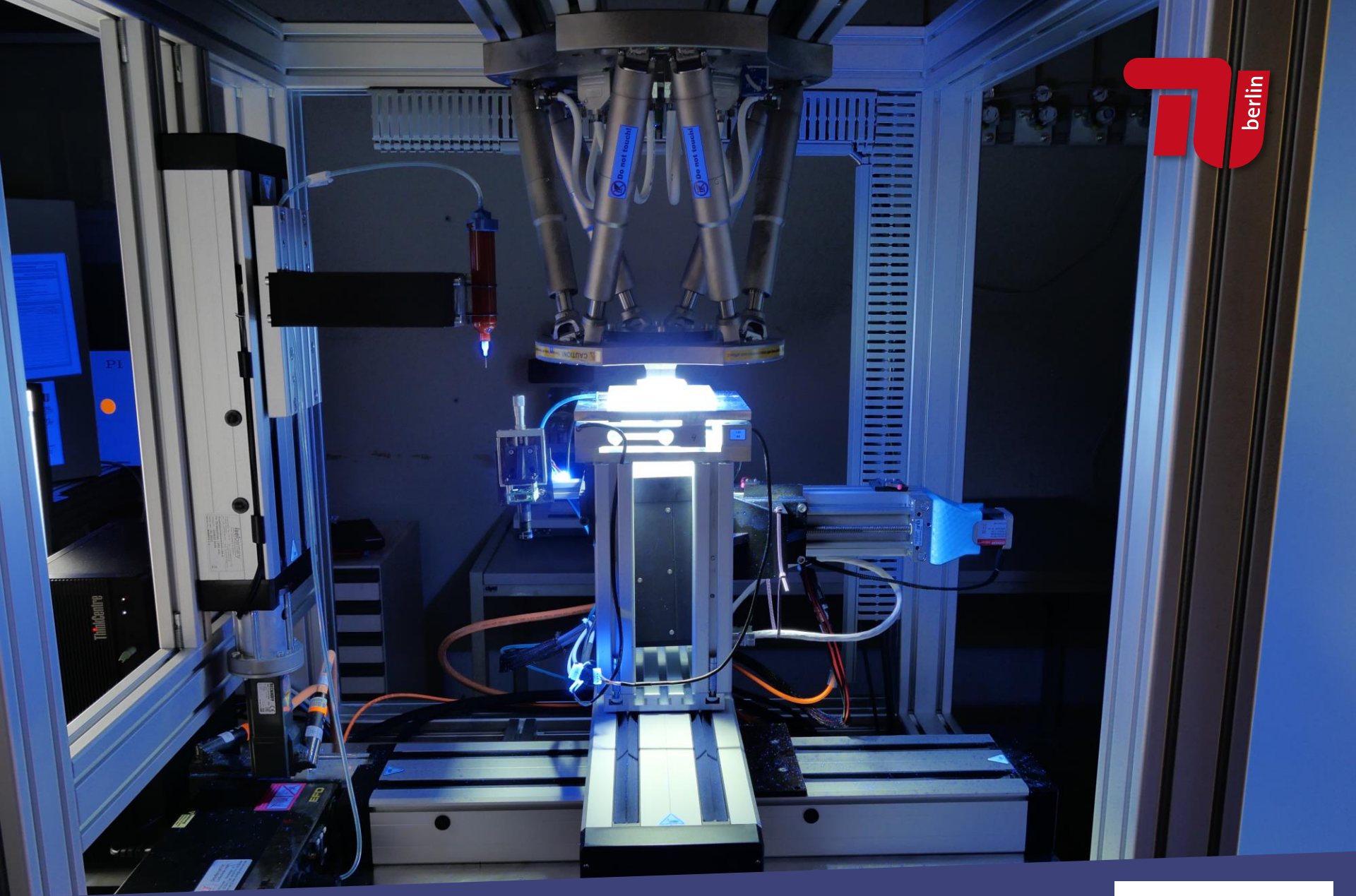
Prozess

Ausrichten



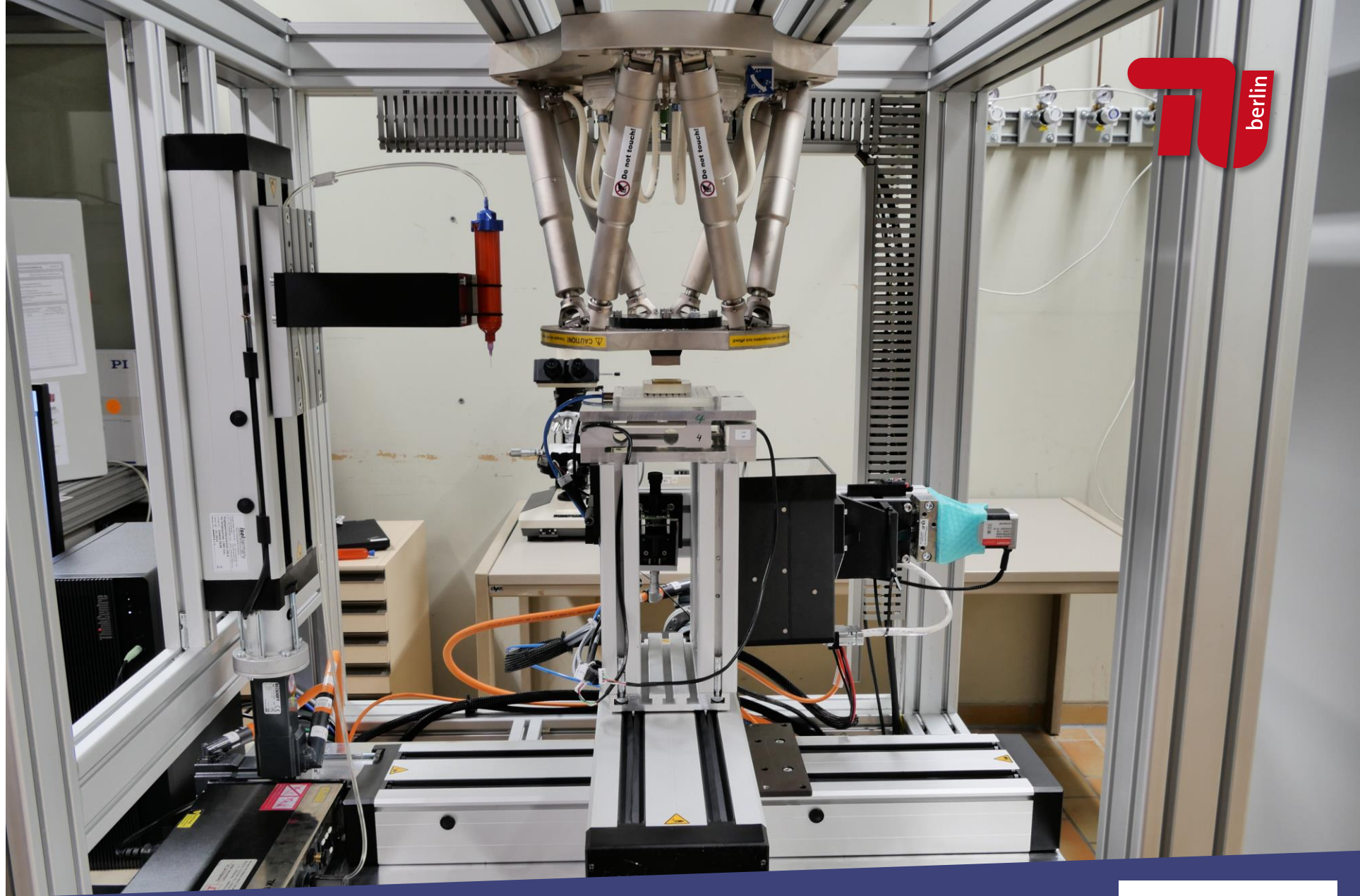
Prozess

Belichten



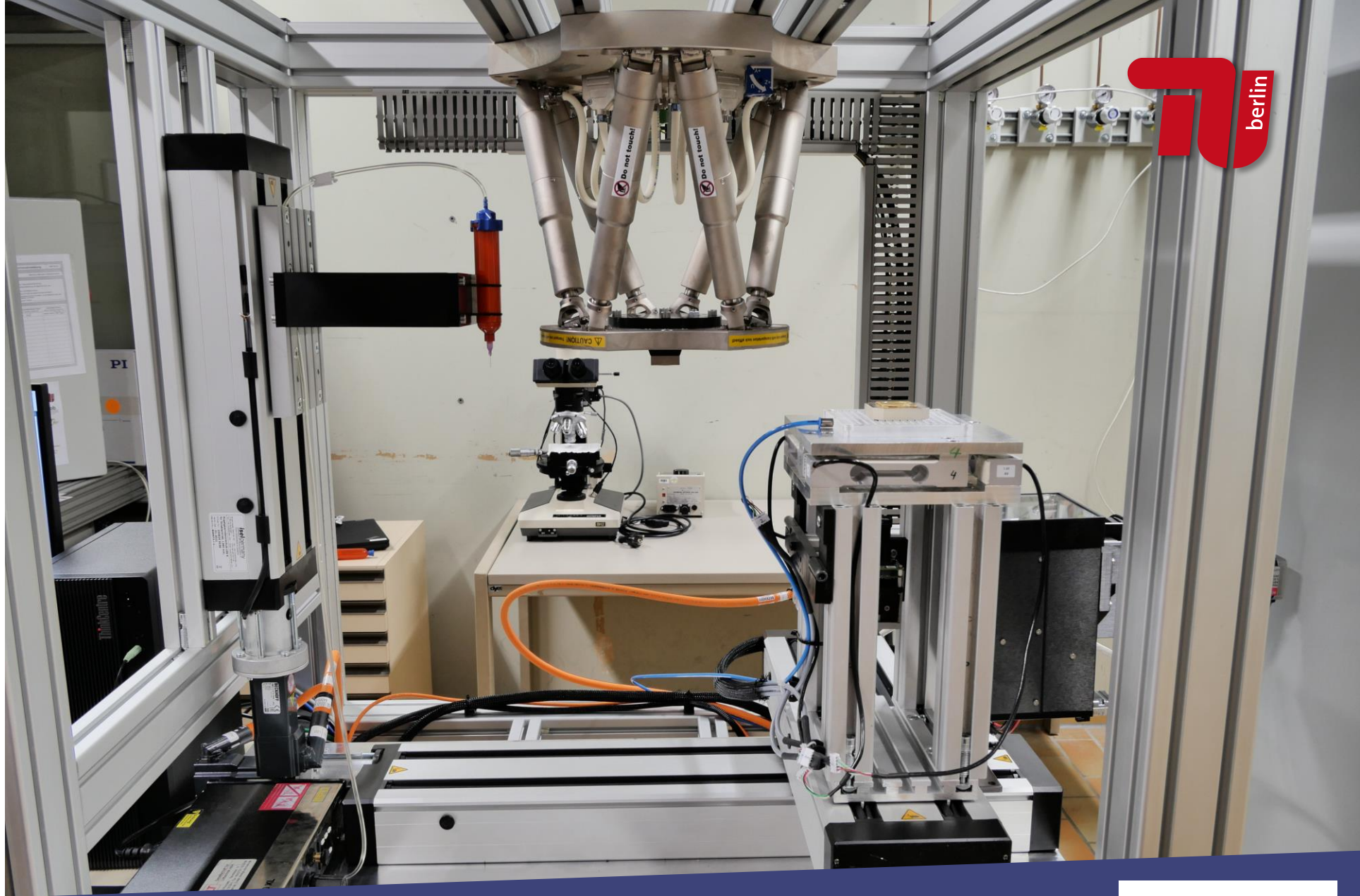
Prozess

Entformen



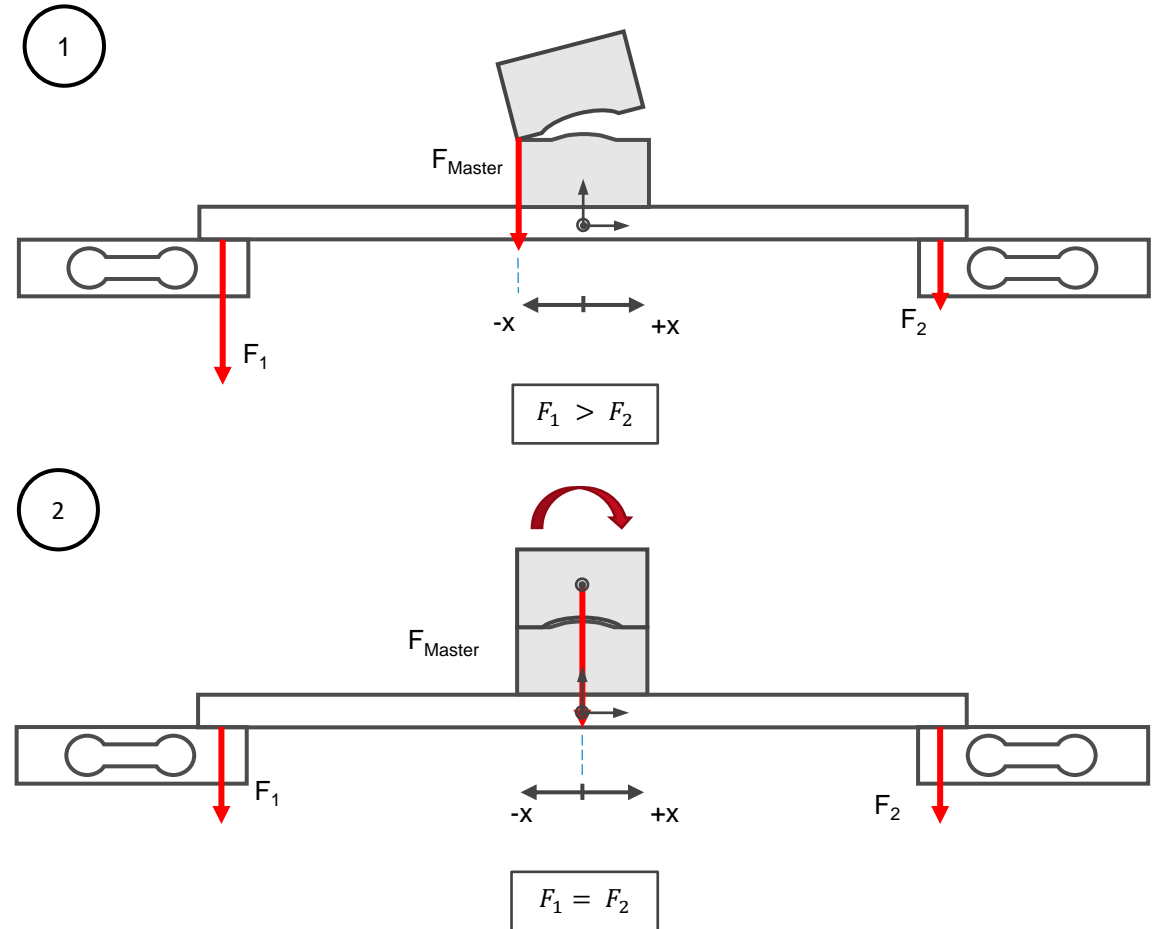
Prozess

Replikat entnehmen



Forschung – Ausrichtung in Z, U und V

- theoretisch wird durch Verkippung von Master und Präform an einer Wägezelle ein größeres Signal gemessen
- Verkippung regeln, so dass:
 - Signale gleich groß sind
 - Kontaktpunkt in der Mitte liegt
 - Stellweg maximal wird
- erste Versuche vielversprechend, aber noch Probleme



Forschung – Bewertung der Replikate

- Prüfen der optischen oder geometrischen Qualität
- AFM Messung
- optisch klassisch Michelson, aber nicht adaptierbar auf gekrümmte Gitter
- Single Order Surface Line Scan (SOLS) um die Effizienzen einer Beugungsordnung bei zwei Gittern über den Äquator miteinander zu vergleichen

