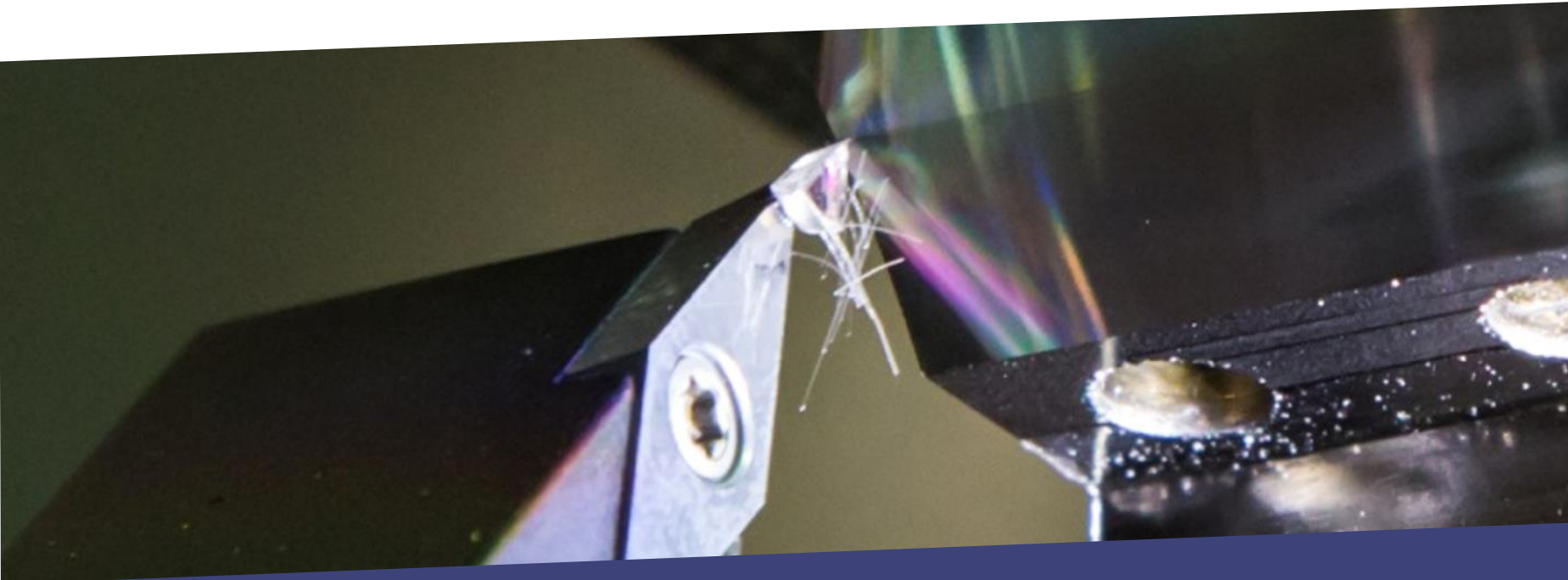




Teilautomatisierte Replikationsmaschine für die Herstellung von Replikaten stark gekrümmter Beugungsoptiken im Dünnschichtprozess

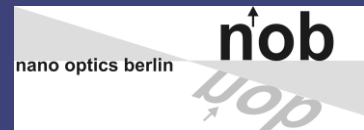
Paul Kastl | Mikro- und Feingeräte | 16. Tagung „Feinwerktechnische Konstruktion“ | 17.11.2023

Supported by:



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Climate Action

on the basis of a decision
by the German Bundestag

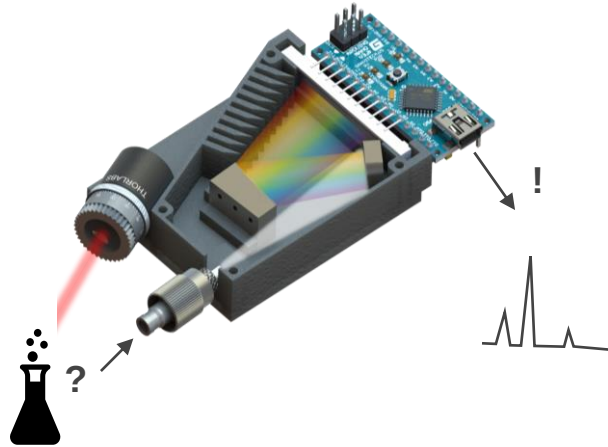


Agenda

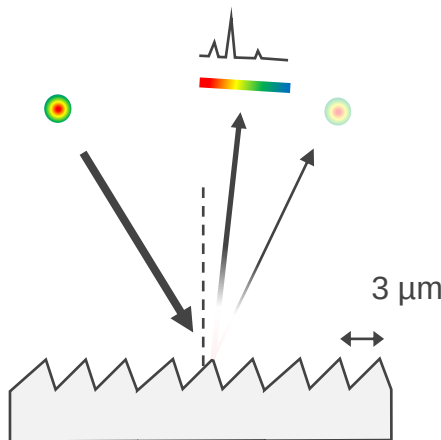


1. Stark gekrümmte Beugungsoptiken
2. Motivation
3. Herausforderungen
4. Lösungen
5. Forschung

Stark gekrümmte Beugungsoptiken



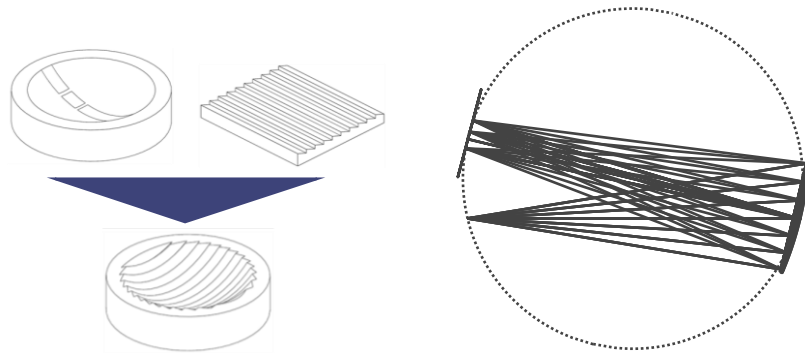
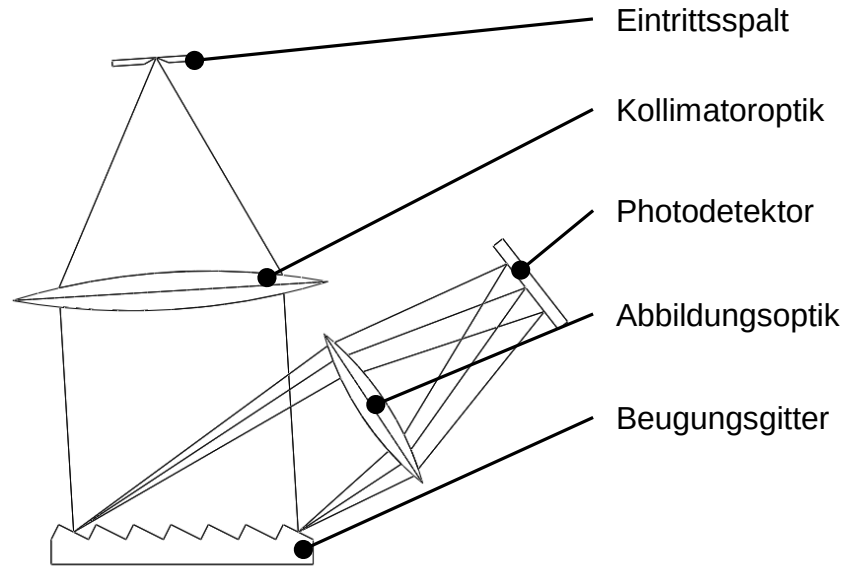
Spektrometer



Blaze-Gitter

- Beugungsoptiken werden für messtechnische Anwendungen genutzt
- Beugungseffekte werden durch Manipulation des einfallenden Lichtes erzeugt (Phase, Amplitude)
- dies erfolgt z. B. durch Mikrostrukturen, deren Größe im Bereich der Wellenlänge des eingestrahlt Lichts liegt
- sind diese Mikrostrukturen periodisch angeordnet spricht man von optischen Gittern
- Blaze-Gitter maximieren den Strahlfluss in eine Beugungsordnung

Stark gekrümmte Beugungsoptiken

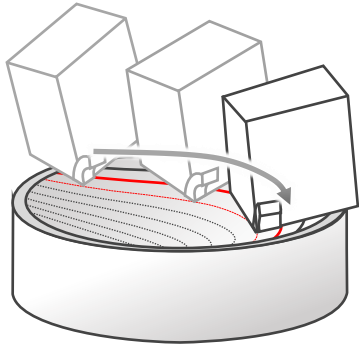


- klassischer Aufbau: planes Gitter + Abbildungsoptik (Spiegel oder Linse)
- stark gekrümmte Beugungsoptik: vereint die beiden Elemente:
- Vorteile:
 - höhere Lichtausbeute durch geringere Anzahl von Grenzflächen
 - geringerer Justageaufwand
 - weniger Bauraum benötigt
- Nachteil:
 - teure Ultrapräzisionsbearbeitung

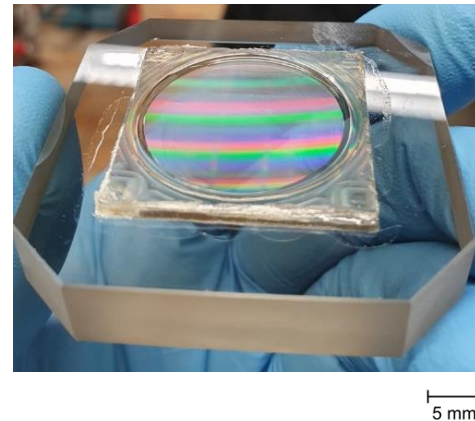
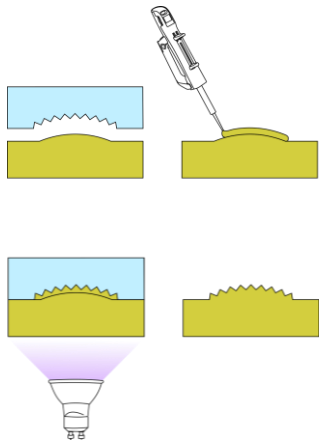
Motivation



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

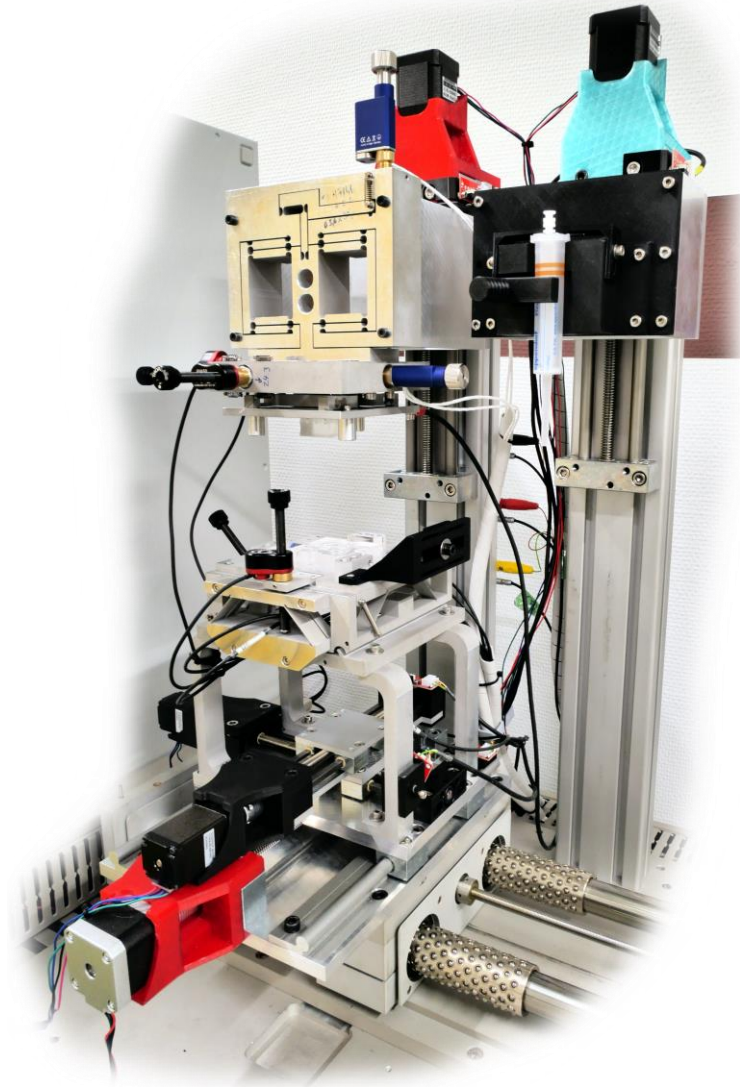
- Werkstoff der Mikrostrukturen abformen kann
 - Hybridpolymer¹
 - Schrumpfbehaftet (~7 vol.-%)
- Erhalt der Makrogeometrie bei gleichzeitig sehr guter Übertragung der Mikrostrukturen
 - Herstellung des Replikats in zwei Stufen²:
 - Präform → Großteil des Volumens des fertigen Replikats, schrumpfkompensierter Prozess
 - Dünnschicht → kleines Absolutvolumen, absoluter Schrumpfung in vertretbaren Grenzen
- sehr genaue Ausrichtung von Präform und Master notwendig für gleichmäßigen Spalt
- zerstörungsfreie Abformung des Replikats vom Master

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.

Demonstrator

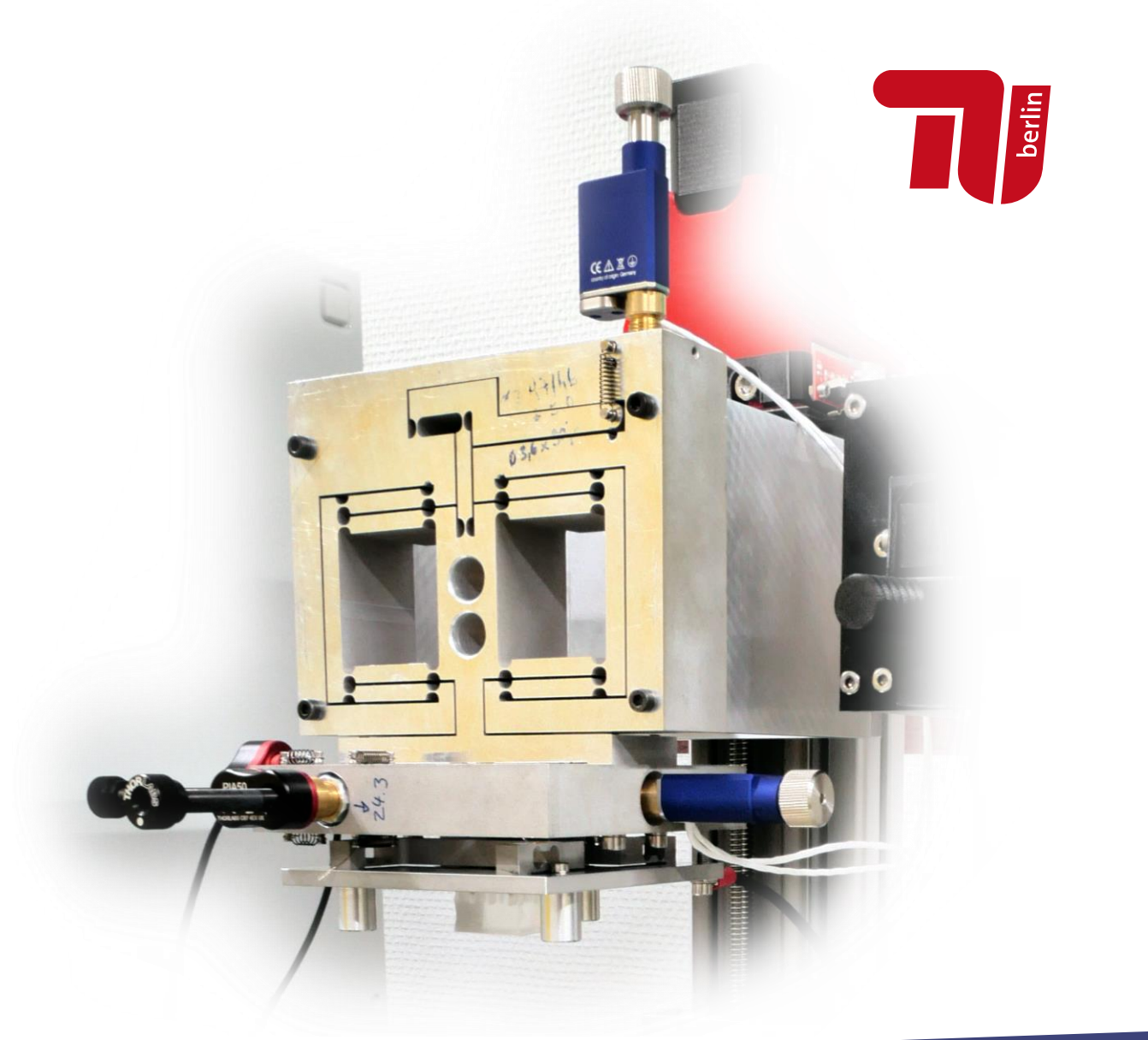
- Feinpositionierung
- kapazitive Sensoren
- Grobpositionierung mit Nema 17 Schrittmotoren
- Ansteuerung mit Labview und Arduino CNC-Shield
- Dosiereinheit 1500XL der Nordson Corporation, Westlake, USA
- Vakuumchuck aus UV-durchlässigem Polymethylmethacrylat (PMMA)



Demonstrator

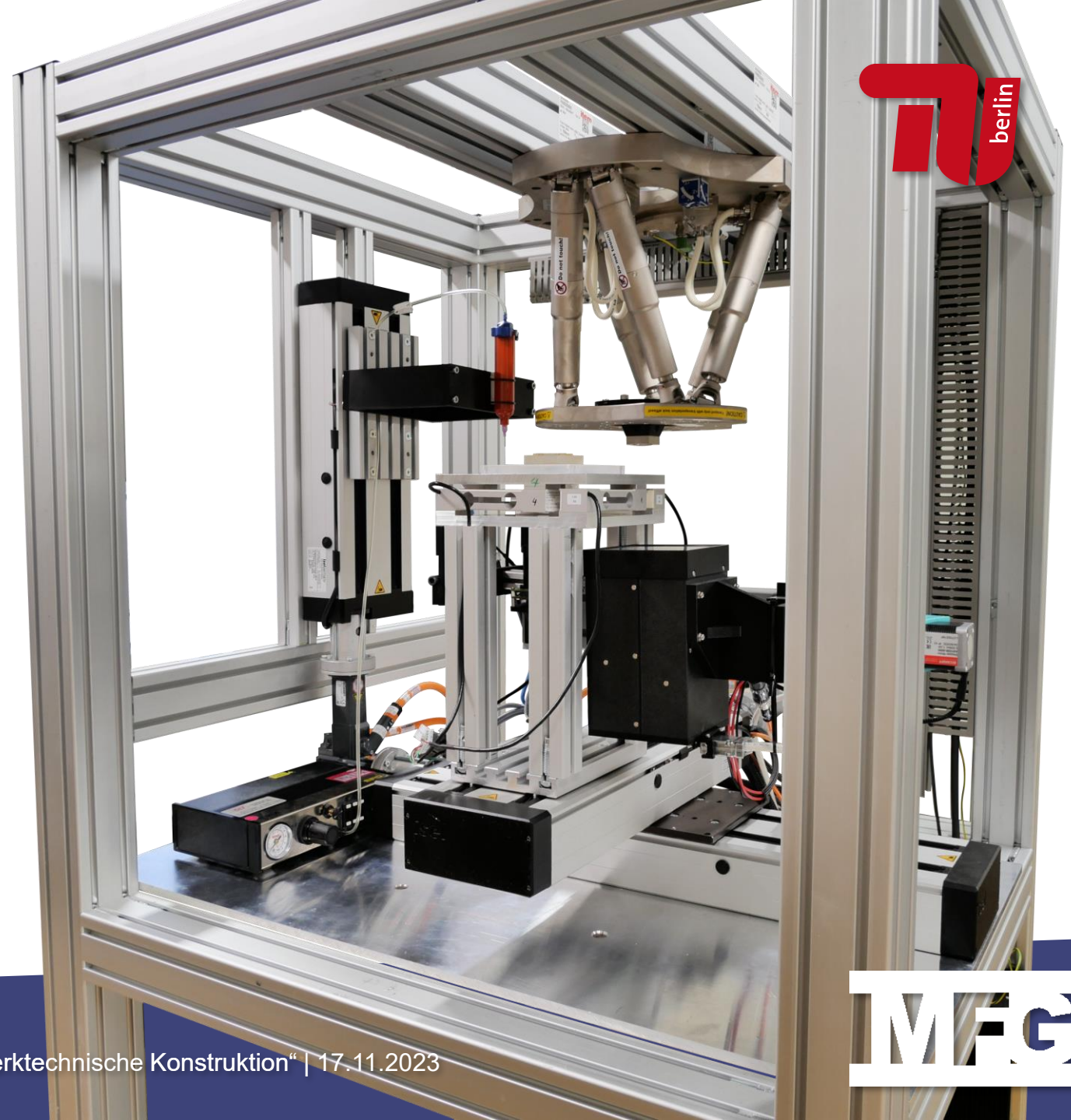


- Feinpositionierung mit drei piezoaktuierten Festkörpergelenken
 - 4× PIA50 (Thorlabs Inc., Newton, USA)
 - 2× N-472 (Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG, Karlsruhe)
 - kleine Stellwege
 - Parasitärbewegungen
- Ausrichtung mit kapazitiven Sensoren PI-SECA D-510.021
 - Messbereich von 20 μm
 - dyn. Auflösung 0,4 μm



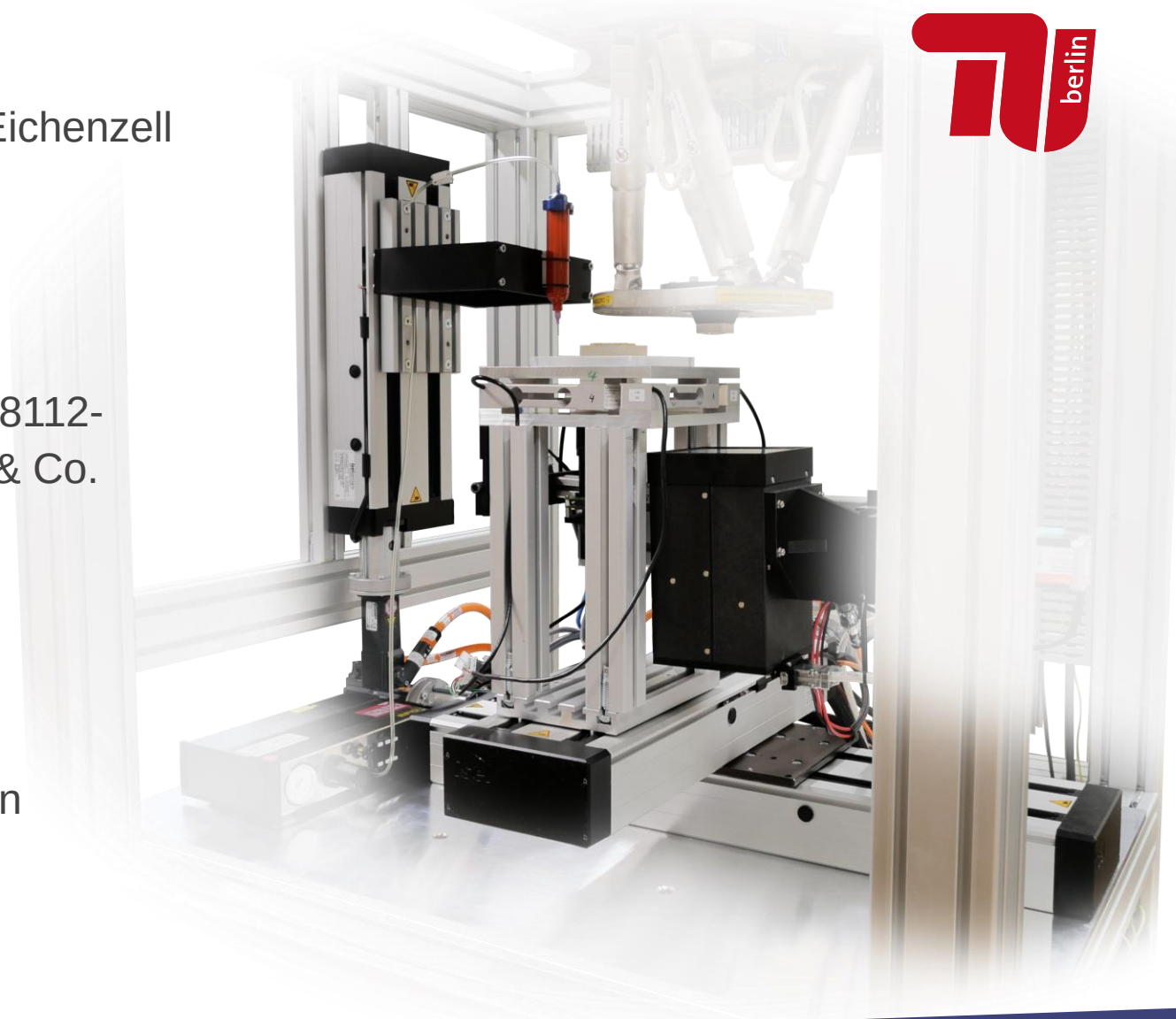
Replikationsmaschine

- Dünnschichtreplikation auf einer Teilautomatisierten Replikationsmaschine
 - Beckhoff Steuerung NC PTP
 - 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



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
 - Stillstandsrehmoment $M_o = 0,38\text{Nm}$
 - 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

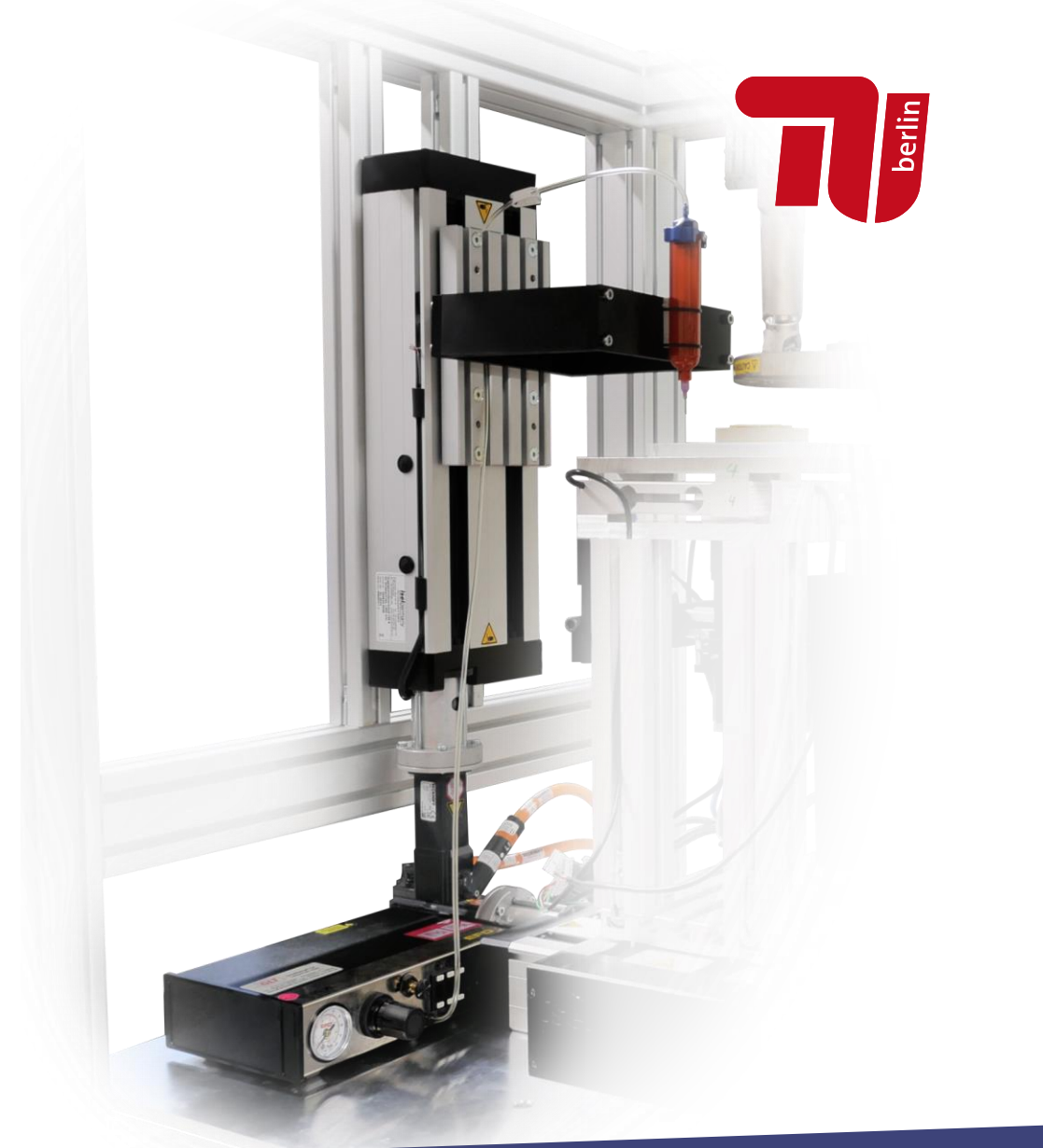
	X	Y	Z	A	B	C
Arbeitsbereich	± 50 mm	± 50 mm	± 25 mm	± 15°	± 15°	± 30°
Wiederholgenauigkeit	± 0,3 µm	± 0,3 µm	± 0,1 µm	± 1,4e-4°	± 1,4e-4°	± 1,7e-4°

- 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

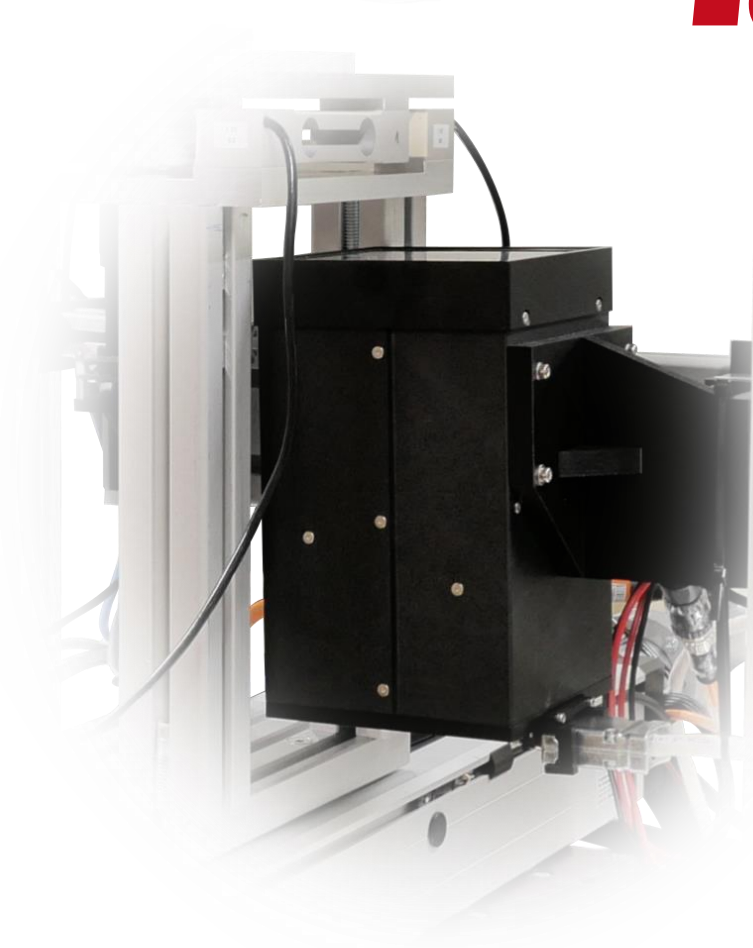
- Dosiereinheit 1500XL der Nordson Corporation, Westlake, USA
- Dosierdruck 5,5 bar
- Dosiernadeldurchmesser 0,16 mm Durchmesser
- dyn. Viskosität von OrmoComp® der Fa. micro resist technology GmbH, Berlin (mrt): $2,0 \pm 0,5$ Pas
- Dünnschichtvolumina aktuell zwischen 10 µl und 100 µl
- Das System erlaubt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



UV-Belichtungseinheit



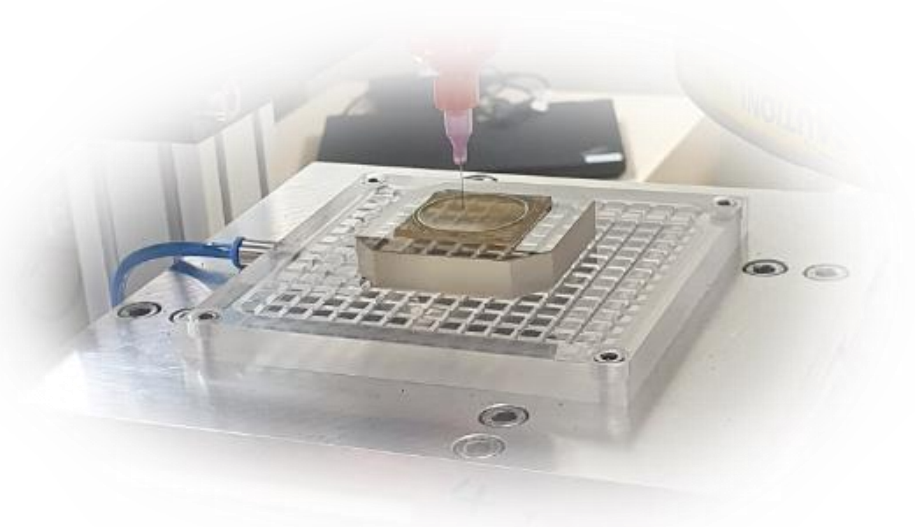
- UV-LED Einheit FJ800 der Fa. Phoseon Technology, Hillsboro, USA
- luftgekühlt, sehr gleichmäßige Ausleuchtung auf einer Belichtungsfläche von 100 mm × 100 mm
- Intensität
 - bei 365 nm, gemessen mit dem Power Meter PM16-401 der Fa. Thorlabs Inc., Newton, USA
 - 100% Leistung direkt auf der Lampenoberfläche $(0,530 \pm 0,004) \text{ W/cm}^2$
 - 100% durch das Vakuumspannsystem aus PMMA $(0,166 \pm 0,003) \text{ W/cm}^2$
 - 100% Spannsystem + 3 mm Quarzglas $(0,159 \pm 0,002) \text{ W/cm}^2$



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



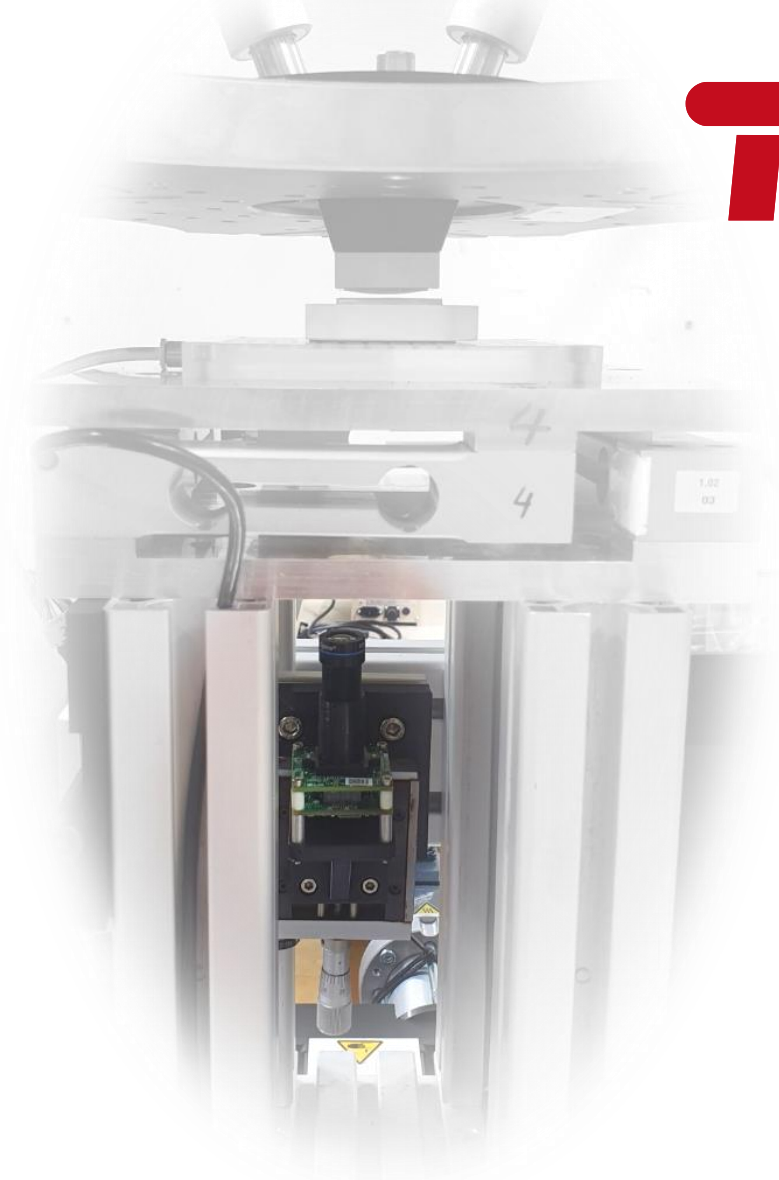
- 4 kalibrierte Wägezellen CP 5-3P1 der Fa. KERN & SOHN GmbH (ehemals Sauter), Balingen-Frommern
- Messbereich bis 5 kg
- Genauigkeit etwa ± 1 g
- verschiedene Ansätze um die Parallelisierung des Masters und des Replikats zu erreichen
- aktiver Ansatz verfolgt!
 - bessere Nachvollziehbarkeit des Prozesses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



Kameratechnik

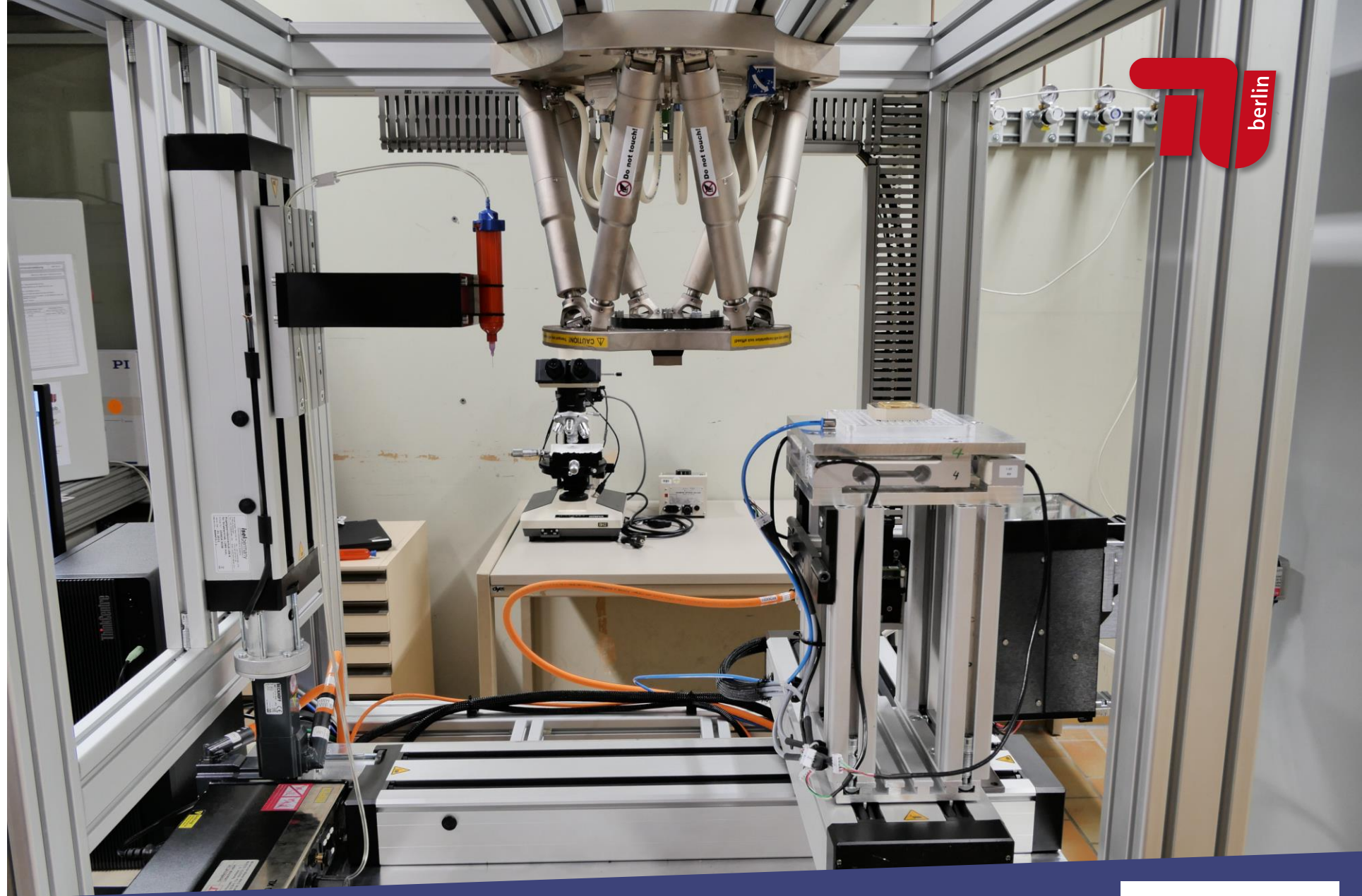


- USB-Kamera See3Cam CU55 der Fa. e-con Systems™, Inc., Riverside, USA
 - Sensor AR0521 der Fa. ON Semiconductor Corporation (onsemi®), Scottsdale, USA
 - Auflösung: 5 MP
 - Pixel Größe: $2,2 \mu\text{m} \times 2,2 \mu\text{m}$
 - aktive Sensorfläche: $2592 \text{ px} \times 1944 \text{ px}$
- TECHSPEC®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



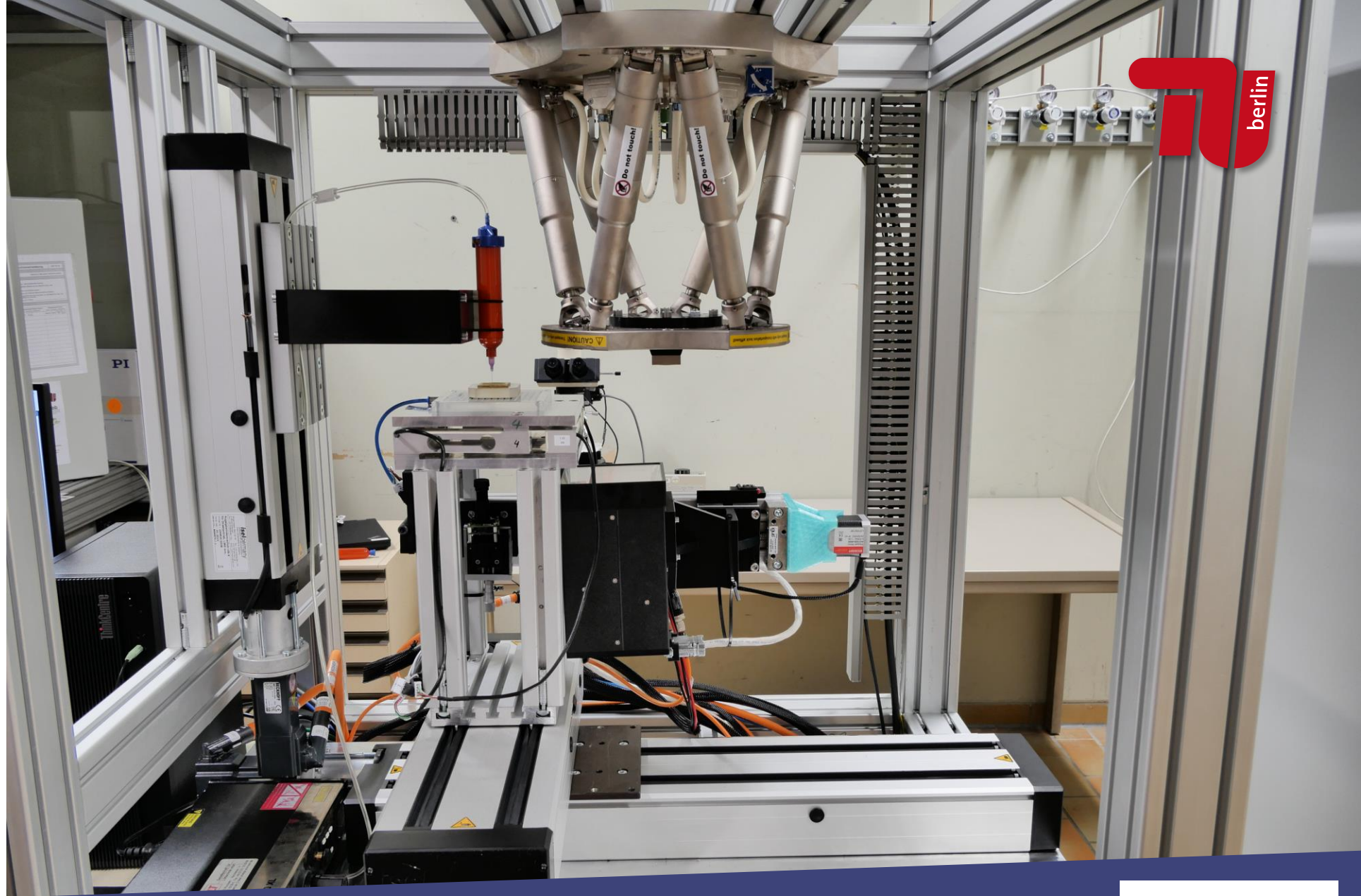
Prozess

Einlegen der Präform



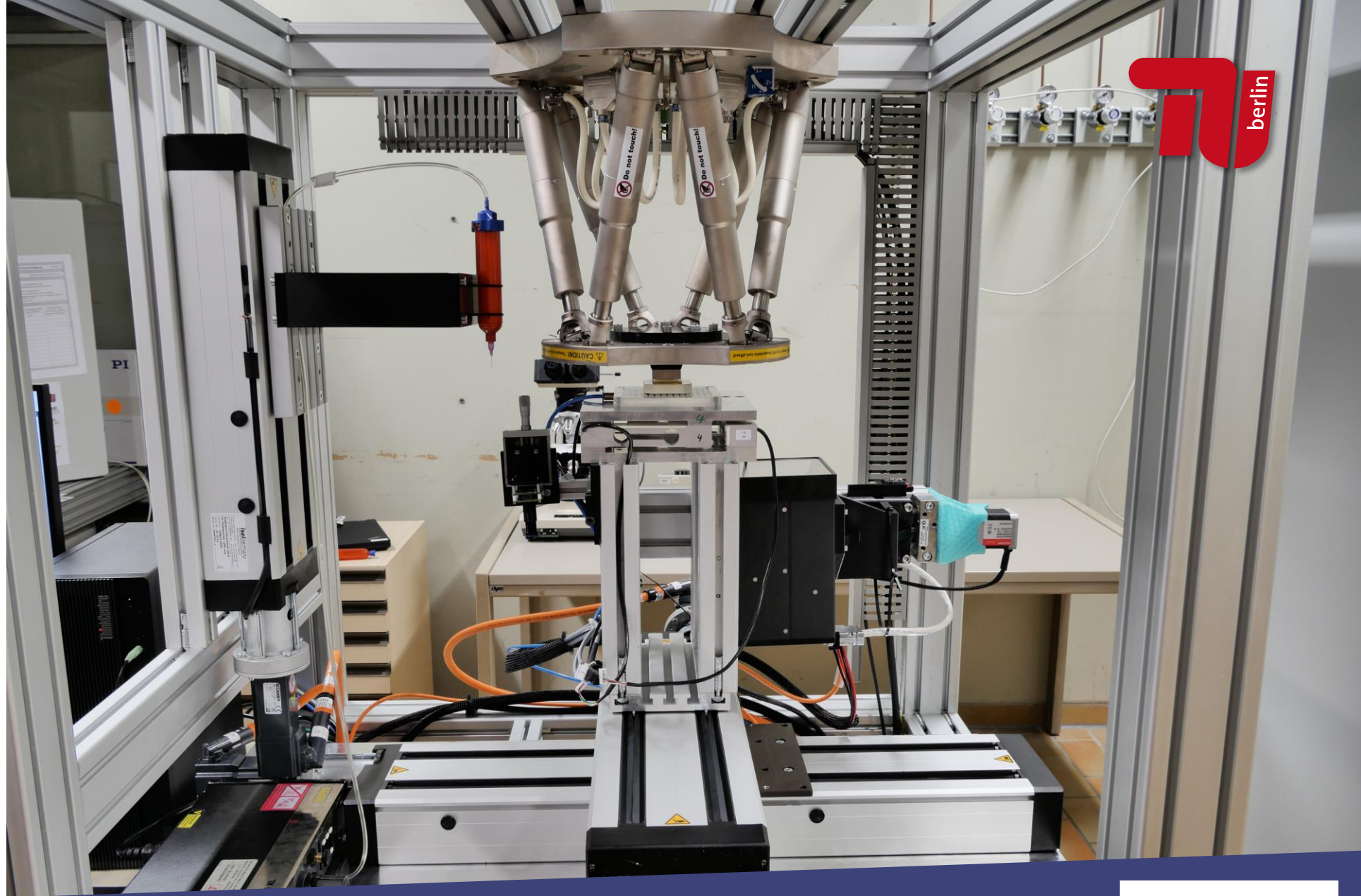
Prozess

Dosieren



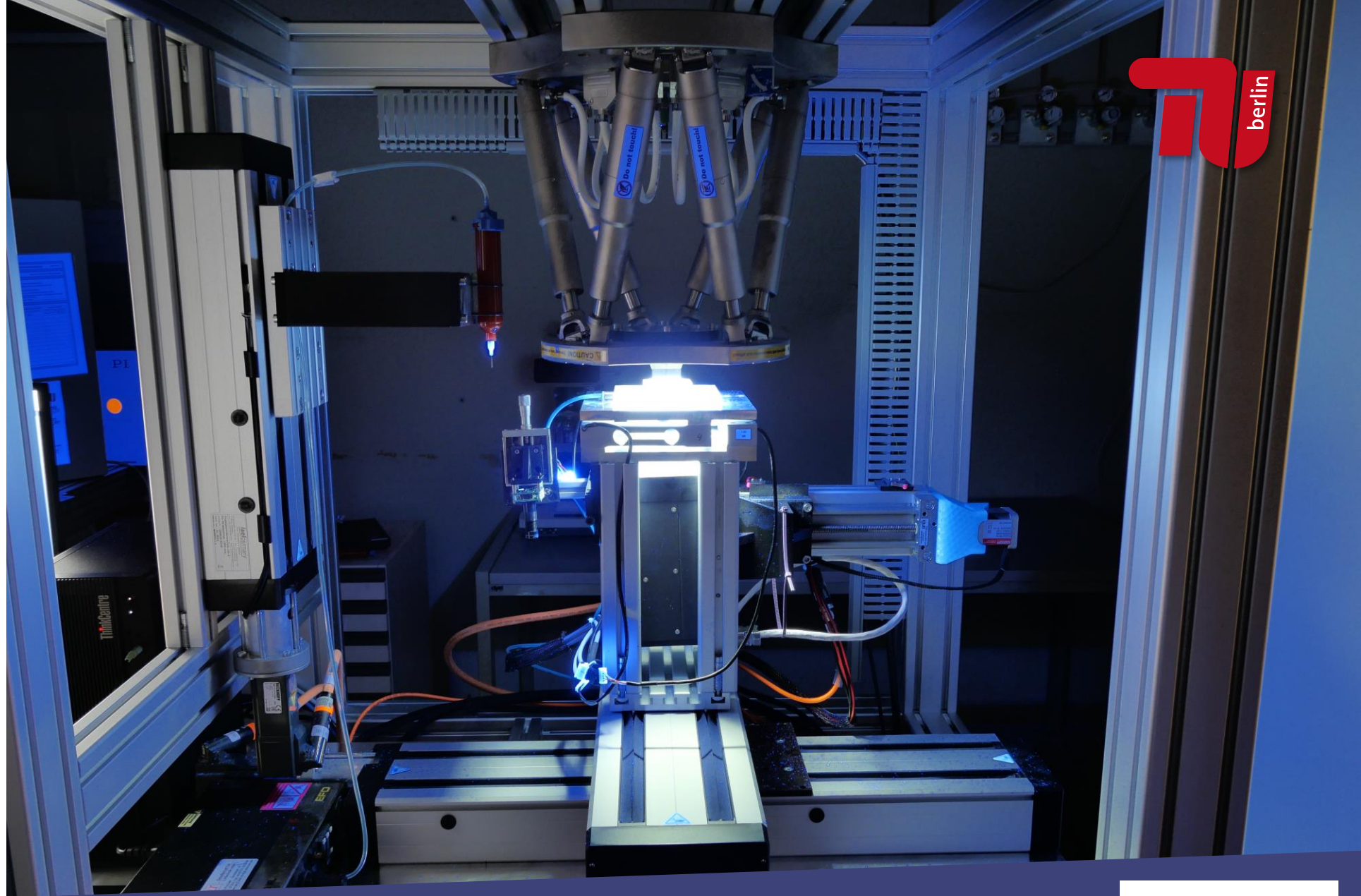
Prozess

Ausrichten



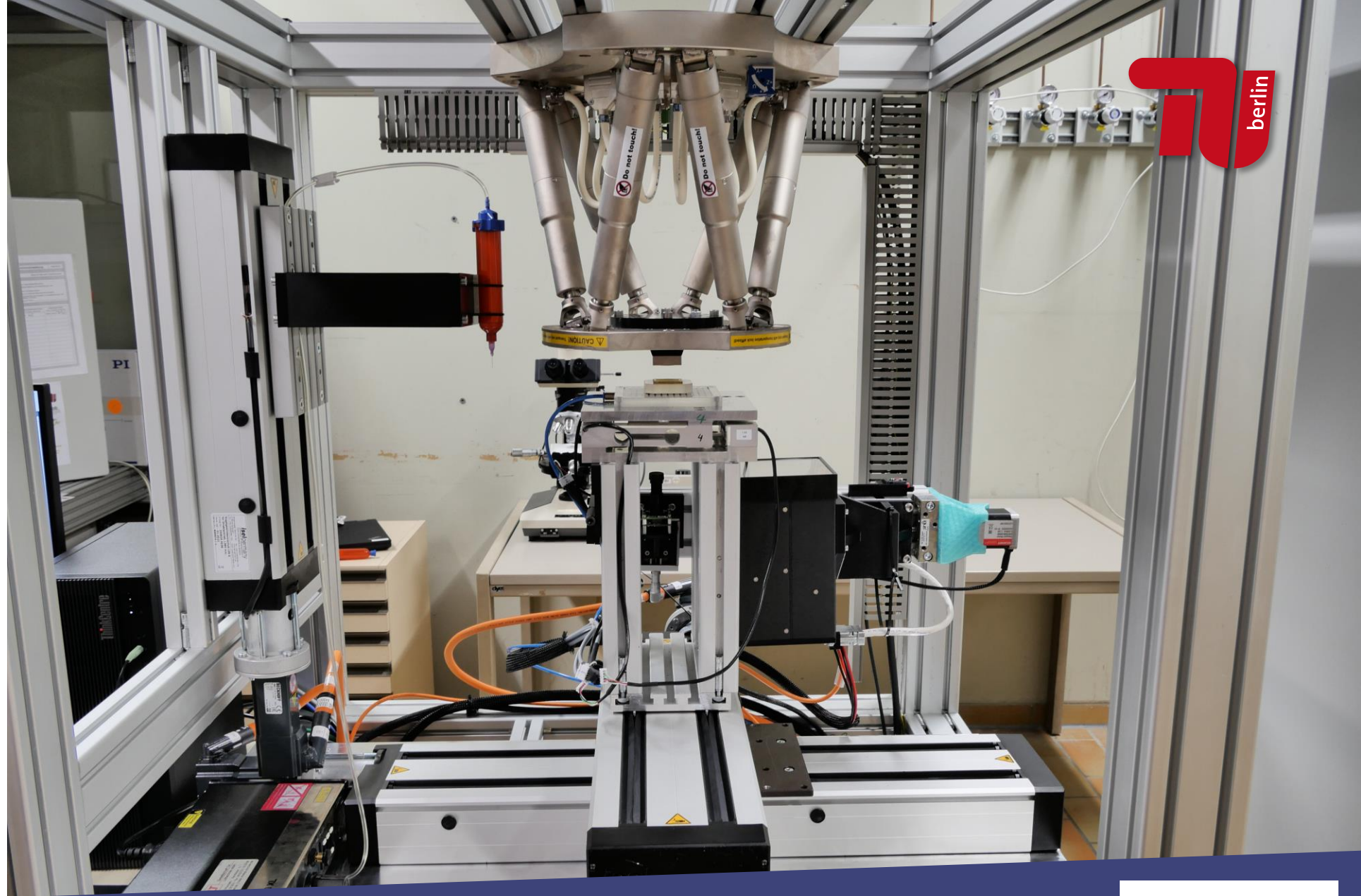
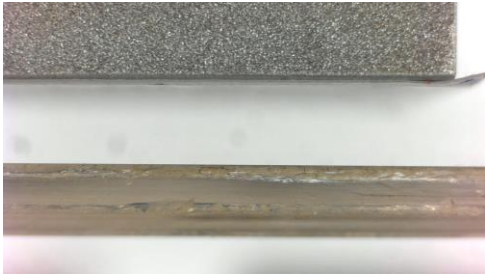
Prozess

Belichten



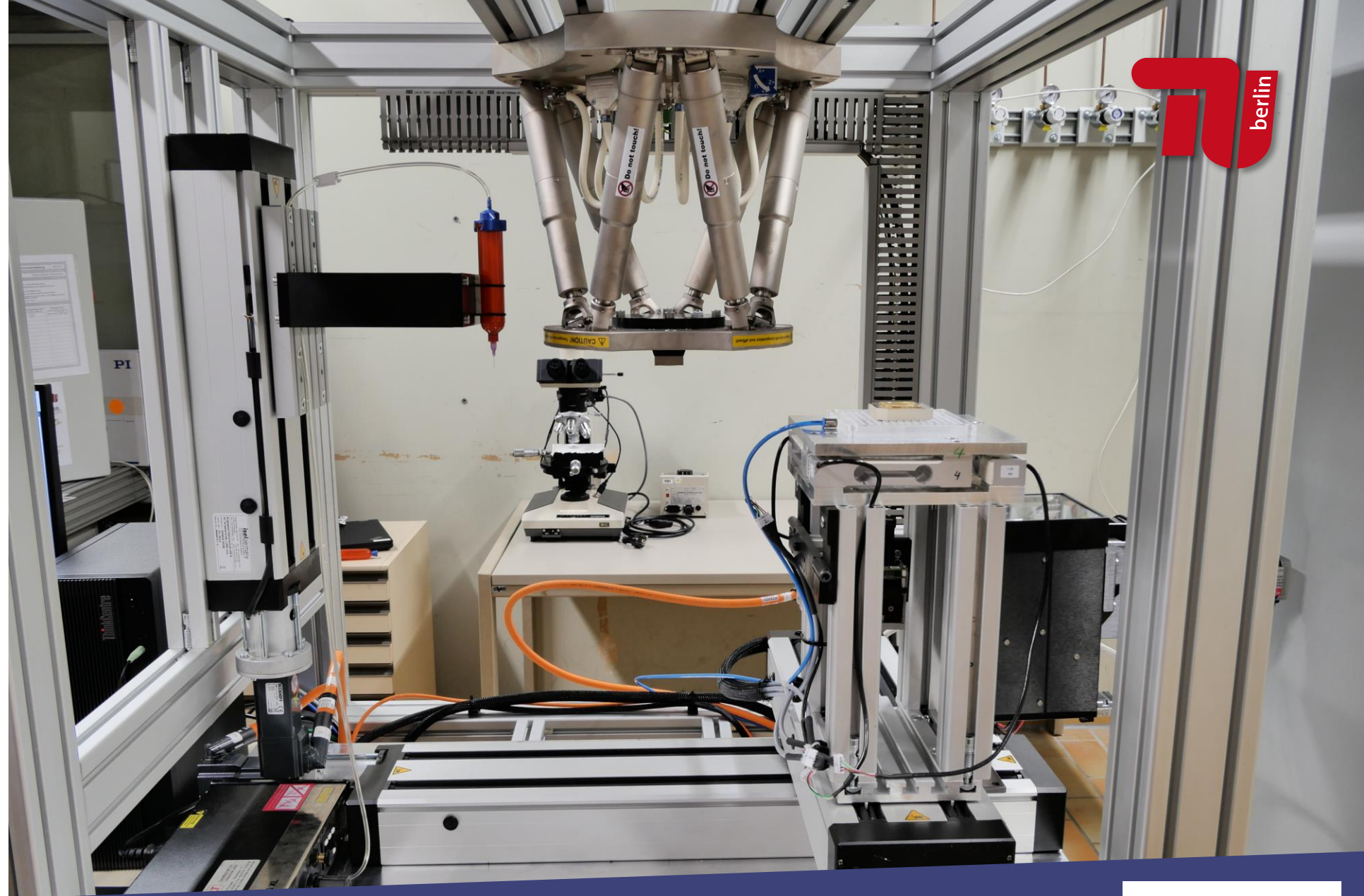
Prozess

Entformen



Prozess

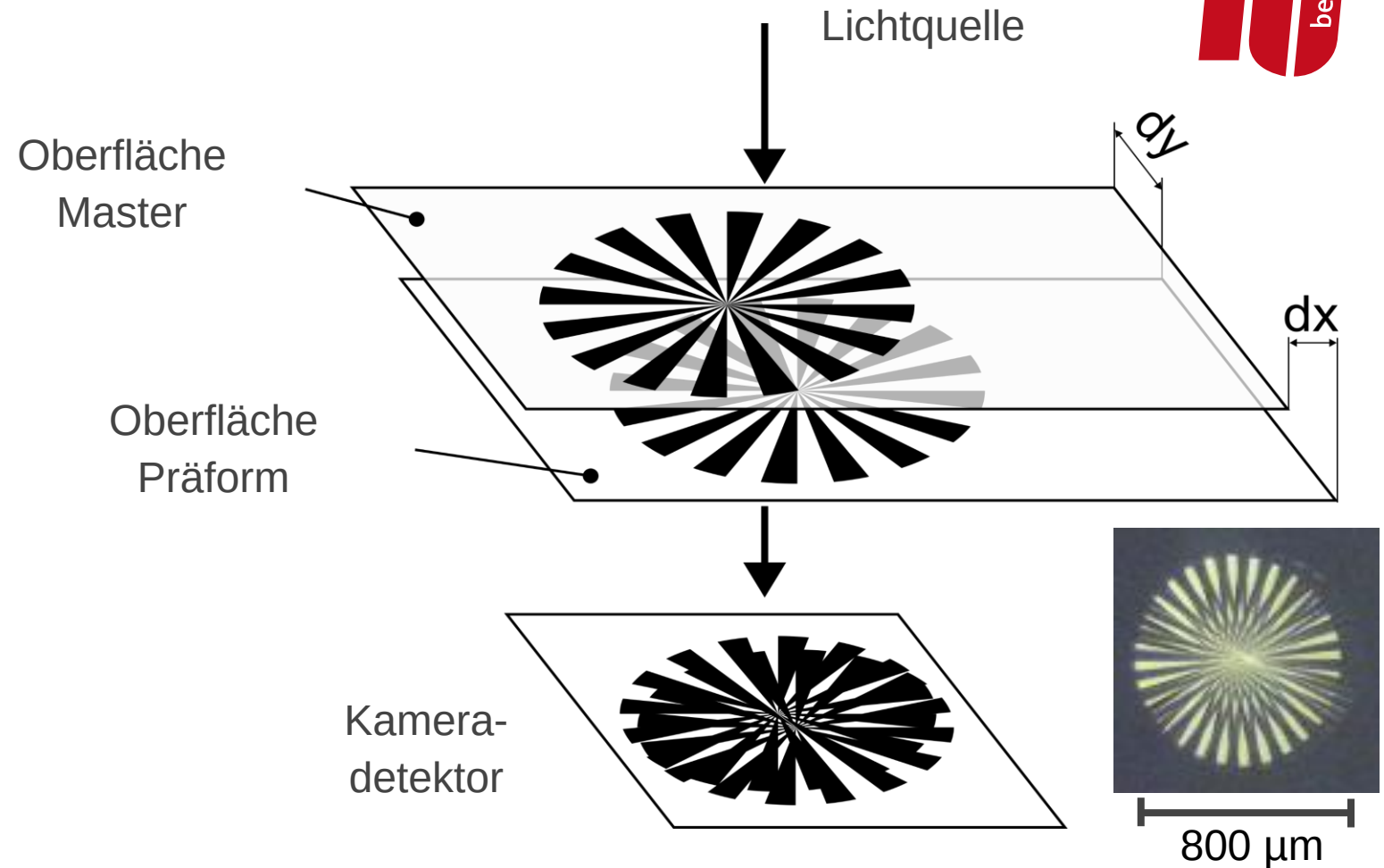
Replikat entnehmen



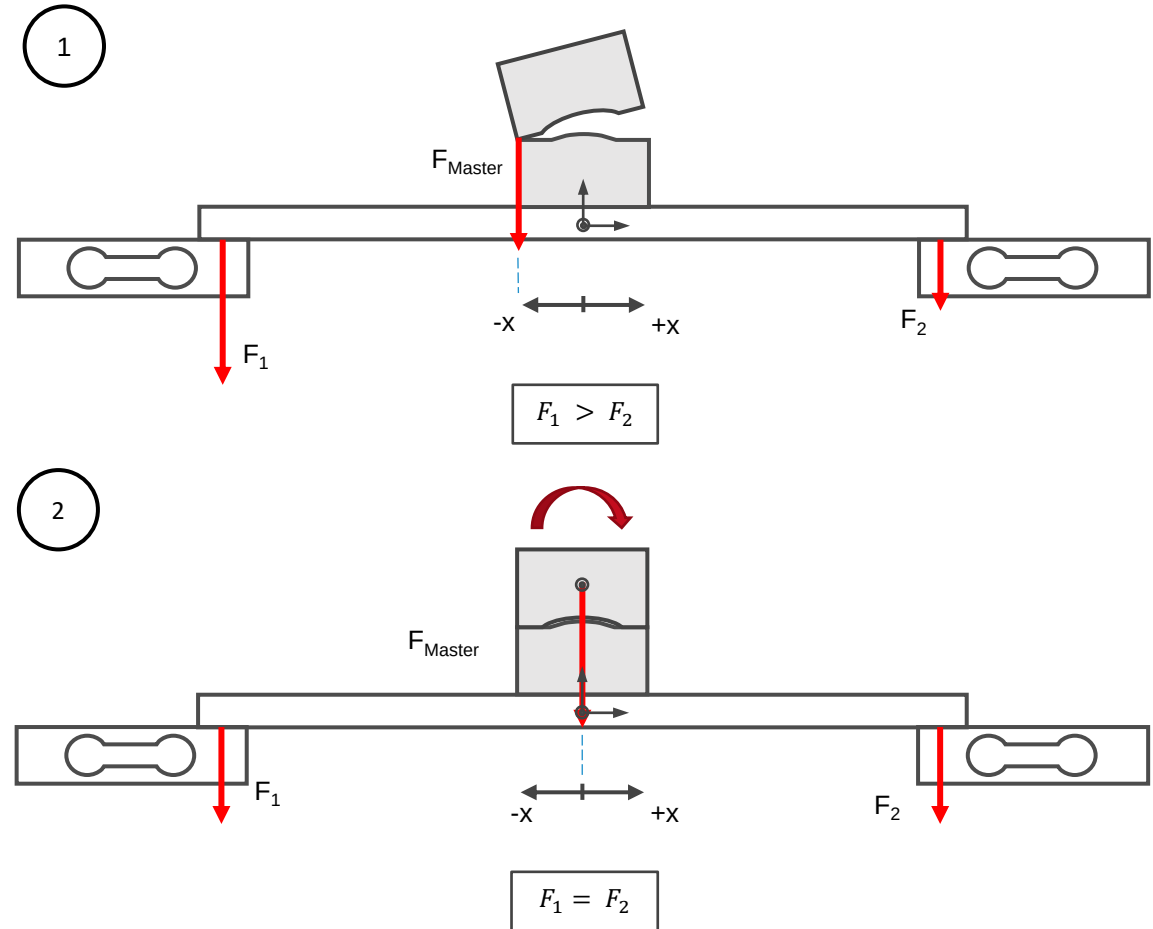
Forschung – Ausrichtung in X, Y und W



- Versuche zur lateralen Ausrichtung durch Auswertung von Moiré-Mustern
- Moiré-Muster für Trainingsdaten werden durch Überlagerung von zwei Chrommasken auf der Replikationsmaschine erzeugt
- Verschiebung der Messmarken gegeneinander wird mit dem detektierten Muster in Verbindung gebracht

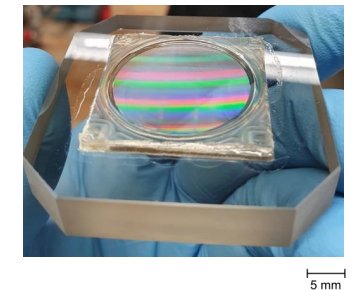
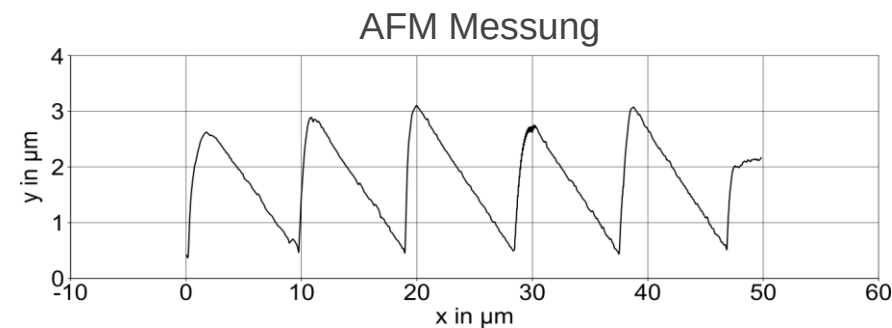
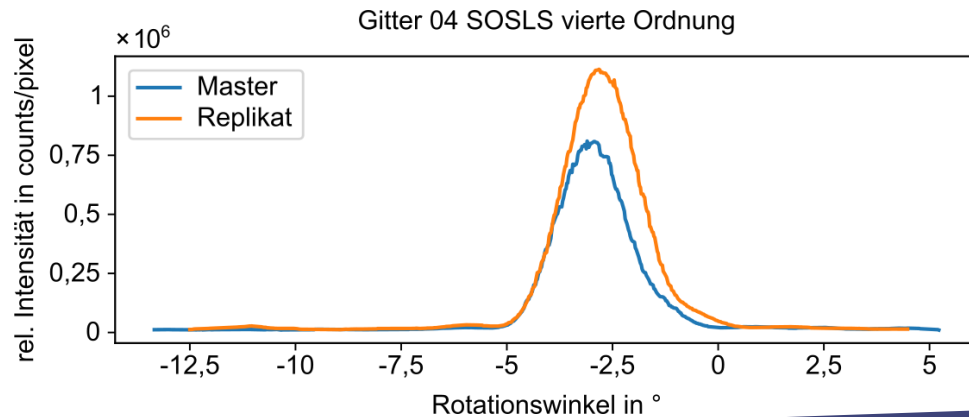
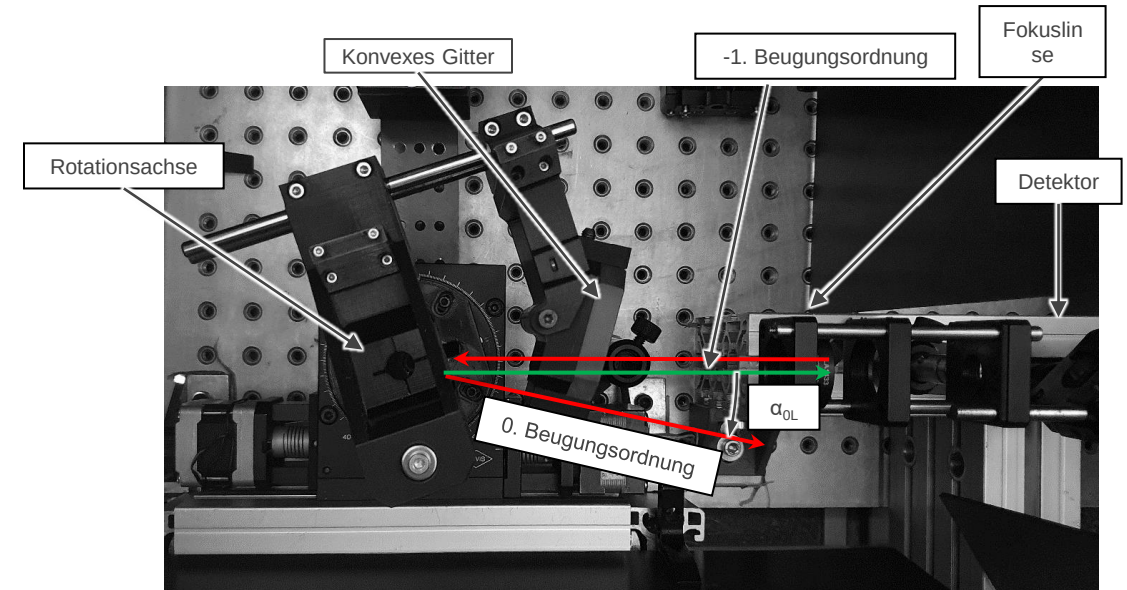


- theoretisch wird durch Verkipfung von Master und Präform an einer Wägezelle ein größeres Signal gemessen
- Verkipfung regeln, so dass:
 - Signale gleich groß sind
 - Kontaktpunkt in der Mitte liegt
 - Stellweg maximal wird
- erste Versuche vielversprechend, aber noch Probleme



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



- 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@tu-berlin.de

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

