
MULTISENSOR-MESSSYSTEM FÜR DAS ROBOTERGESTÜTZTE BOHREN

Fraunhofer-Allianz Vision Technologietag 2016, Fürth



Jens Kühnle
Andreas Frommknecht

Überblick

- Roboterbasiertes Bohren
- Stand der Technik: Referenzierung, orthogonale Ausrichtung
- Komponenten des Multisensor-Messsystems
- Messaufgaben: Referenzierung, orthogonale Ausrichtung
- Durchgeführte Tests

Roboterbasiertes Bohren

Einleitung

■ Hauptanwendungsgebiete:

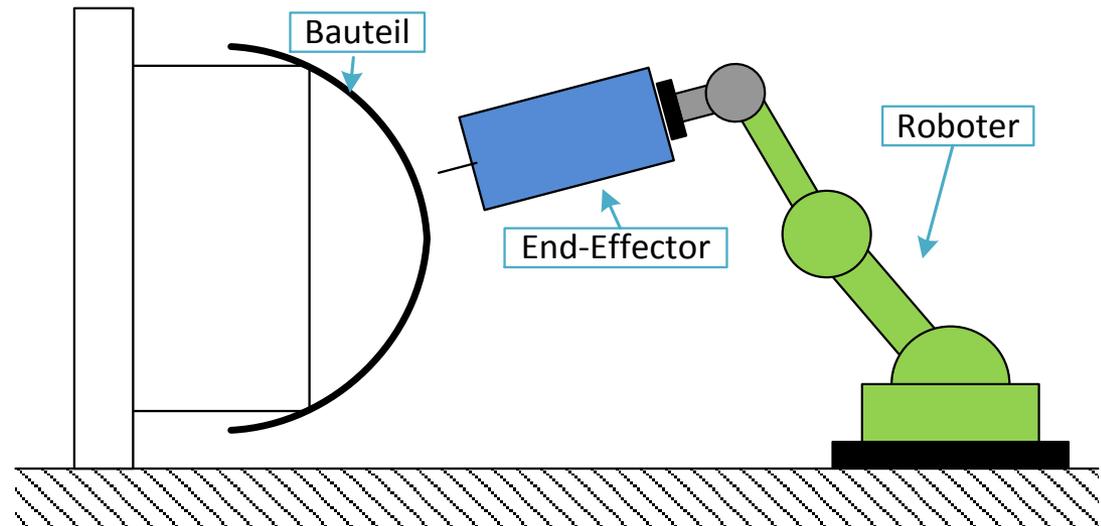
- Luftfahrt
- Automobilbranche

■ Vorteile:

- Flexibilität
- Geschwindigkeit

■ Herausforderungen:

- hohe Genauigkeit
- Referenzierung des Bauteils
- Orthogonalität der Bohrlöcher



Prinzipskizze roboterbasiertes Bohren

Roboterbasiertes Bohren

Genauigkeitsanforderungen

Typische Werte in Luftfahrtbranche

Bohrloch-
position $\pm 0,5$ mm

Ortho-
gonalität $0,5^\circ$



Aufgespannte Flugzeugschale
(Quelle: Broetje-Automation)

Methoden zur Referenzierung

Externe Messsysteme

■ externe Messsysteme

- sind nicht Teil des Roboter-/ End-Effectorsystems
- nutzen Marken oder Reflektoren, die an Bauteil angebracht werden
- Beispiele:
 - indoor GPS (iGPS)
 - Lasertracker
 - kamerabasierte Triangulation/ Photogrammetrie
- Vorteil: hohe Genauigkeit erreichbar
- Nachteil: Sichtbarkeit Reflektoren/Marken

iGPS Beispiel Aufbau
(Quelle: Nikon Metrology)

Lasertracker mit Reflektoren
(Quelle: Leica)

Kamerabasierte Triangulation
(Quelle: Nikon K-Series)

Methoden zur Referenzierung

Interne Messsysteme

■ interne Messsysteme

- werden als Teil des Roboter-/End-Effektorsystems mitgeführt
- Positionsmessungen hängen somit von Positioniergenauigkeit des Roboters ab
- Vorteil: Sichtbarkeit von Marken bzw. Bauteil
- Nachteil: Abhängigkeit von Positioniergenauigkeit des Roboters

Methoden zur orthogonalen Ausrichtung

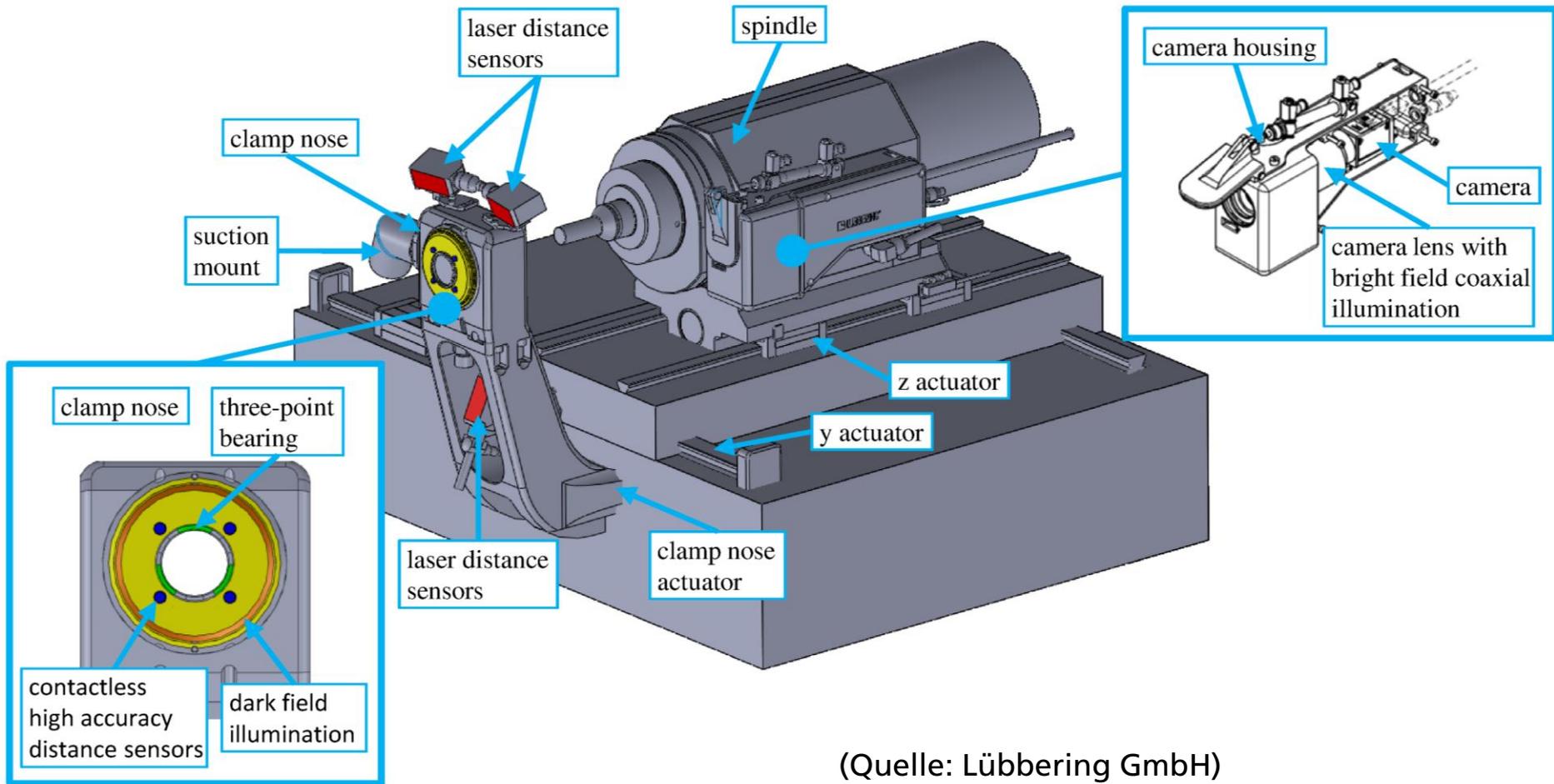
Beispiele

- Bewegliche Druckstempelbuchse (DSB) (Eguti 2012)
 - Auslenkung wird mit vier induktiven Sensoren gemessen
 - Orthogonalität von $\pm 0.5^\circ$ wird erreicht
- Projektor mit fünf Laserstrahlen (Lee 2011)
 - Verfahren speziell für Freiformflächen
 - aus den fünf Auftreffpunkten wird Normale berechnet
 - Orthogonalität von 0.846° wird erreicht

Beispiel für End-Effector mit Beweglicher DSB
(Quelle Eguti 2012)

Beweglicher DSB
(Quelle Eguti 2012)

Komponenten des End-Effectors



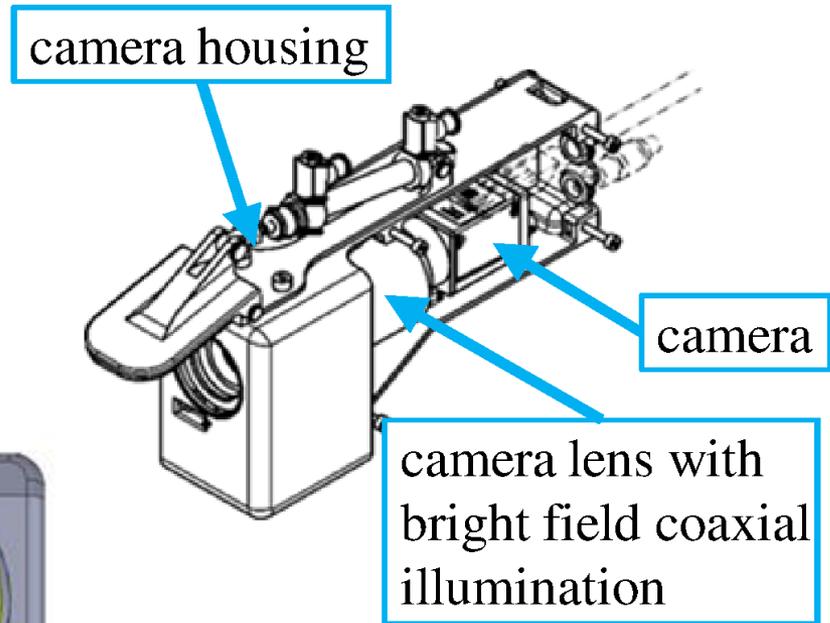
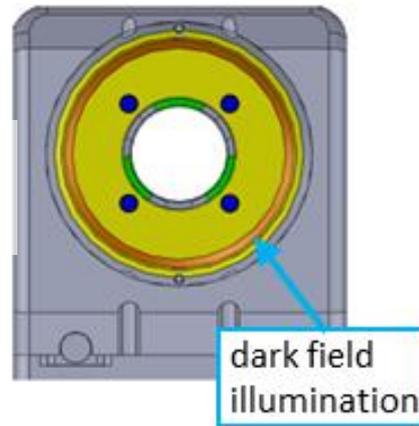
(Quelle: Lübbering GmbH)

Komponenten des Multi-Sensor Messsystems

2D Kamera System

- 5 Mega Pixel Basler Kamera, versehen mit Schutzgehäuse
- koaxiale Hellfeldbeleuchtung (montiert an Kameraobjektiv)
- Dunkelfeld Beleuchtung (eingebaut in DSB)
- Messaufgabe: Messung Referenzmerkmale

DSB mit
Dunkelfeldbeleuchtung
(Quelle: Lübbing GmbH)

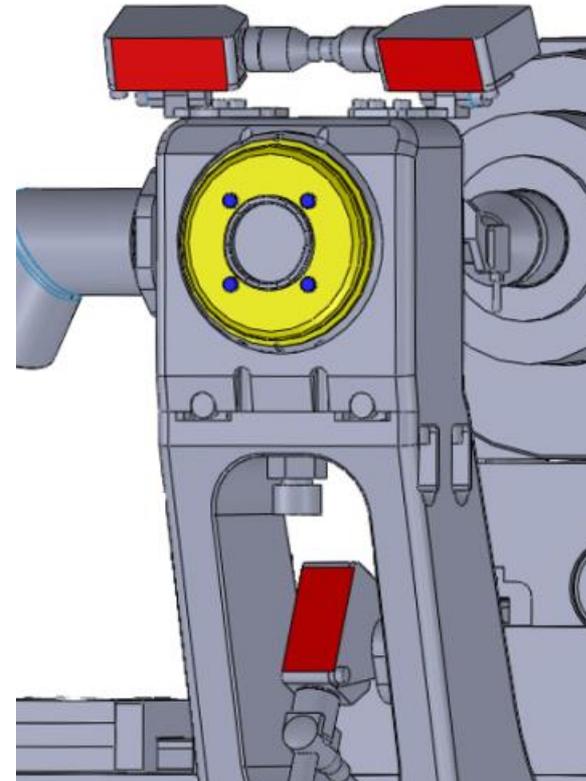


Kamera mit Objektiv und
koaxialer Beleuchtung
(Quelle: Lübbing GmbH)

Komponenten des Multi-Sensor Messsystems

Laserabstandssensoren

- drei Laserabstandssensoren
Sick OD Mini
- Messbereich: 100 mm
- Auflösung: 20 μm
- angeordnet um DSB
- Messaufgaben:
 - orthogonale Ausrichtung
 - Verifikation Bauteilposition

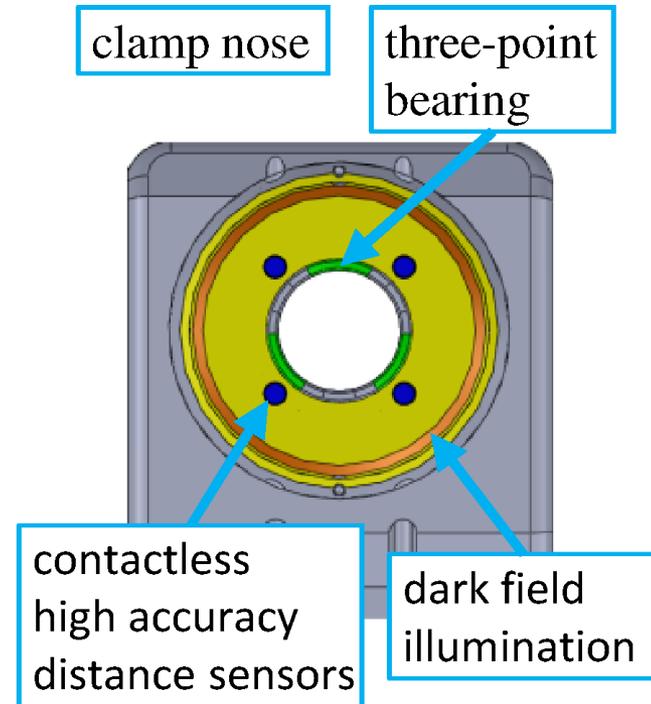


Laserabstandssensoren
angeordnet um DSB
(Quelle: Lübbeling GmbH)

Komponenten des Multi-Sensor Messsystems

Kontaktfreie Abstandssensoren mit höher Genauigkeit

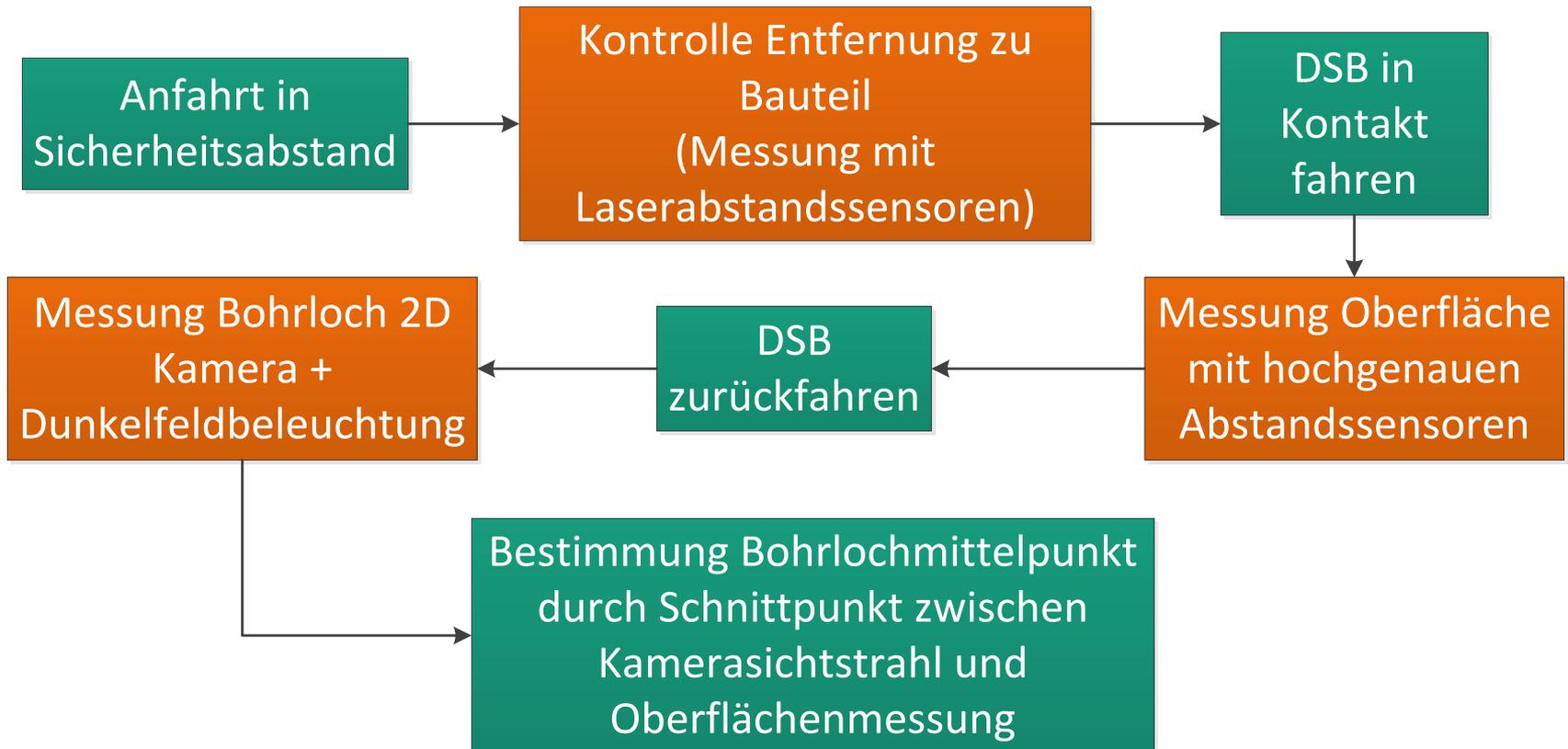
- unabhängig von optischen Eigenschaften der Oberfläche
- Messbereich: 3 mm
- Auflösung: 10 μm
- eingebaut in DSB
- Messaufgabe:
 - Messung Referenzmerkmale
 - orthogonale Ausrichtung



DSB mit eingebauten
Abstandssensoren
(Quelle: Lübbeling GmbH)

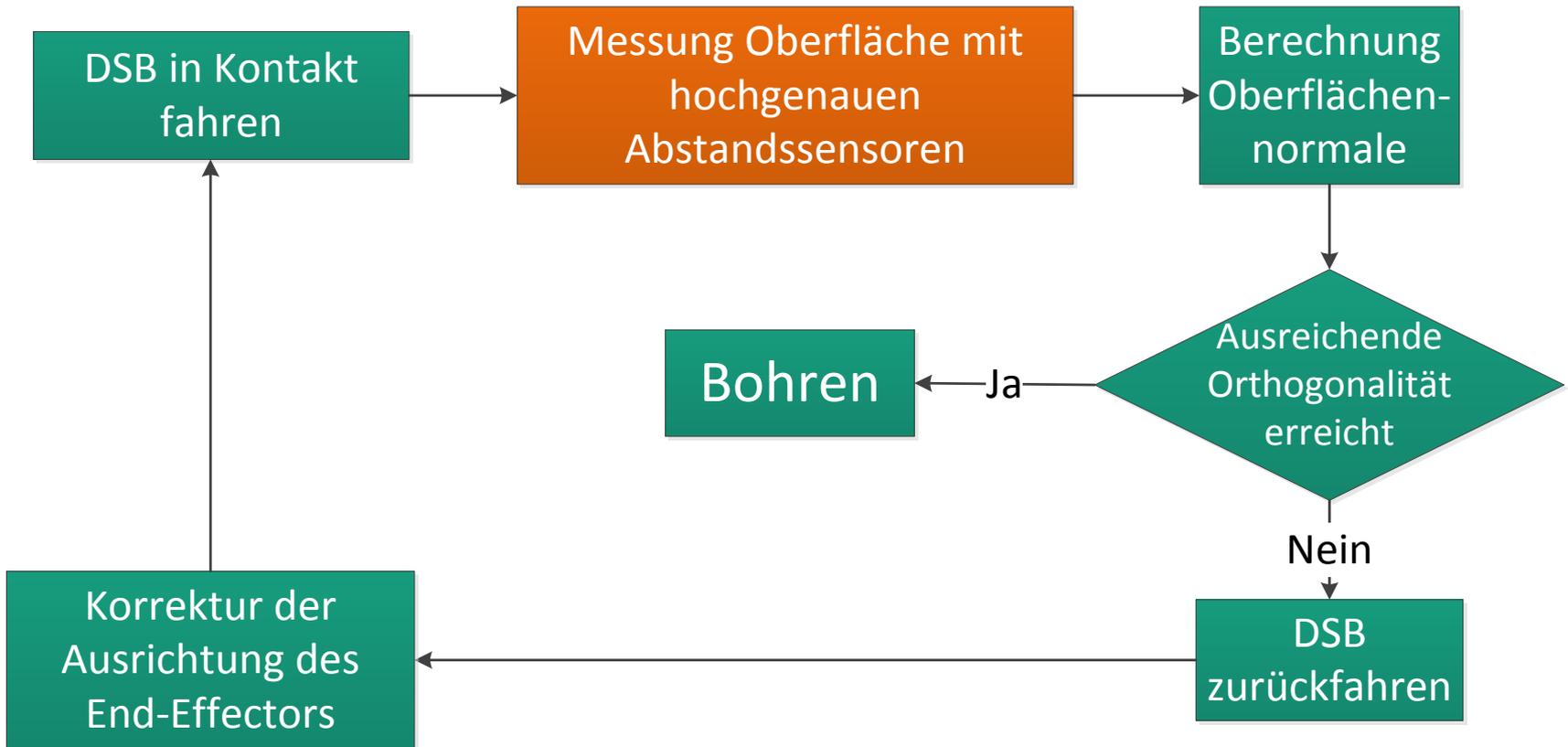
Messaufgaben

Referenzierung anhand von Bohrlöchern



Messaufgaben

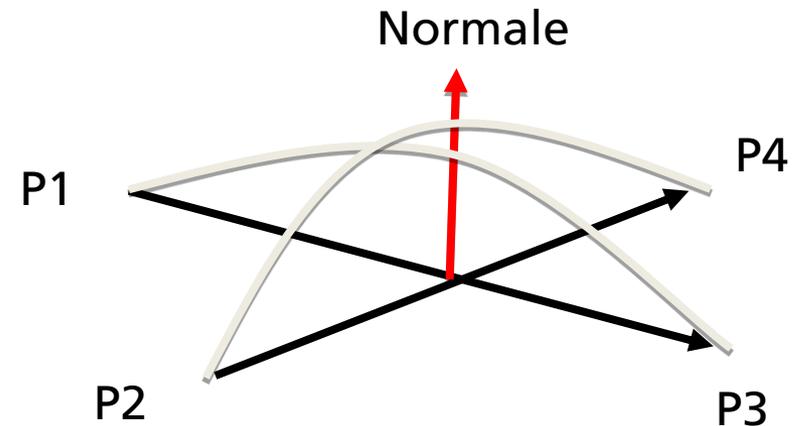
Orthogonal Ausrichten



Orthogonalität

Berechnung Oberflächennormale

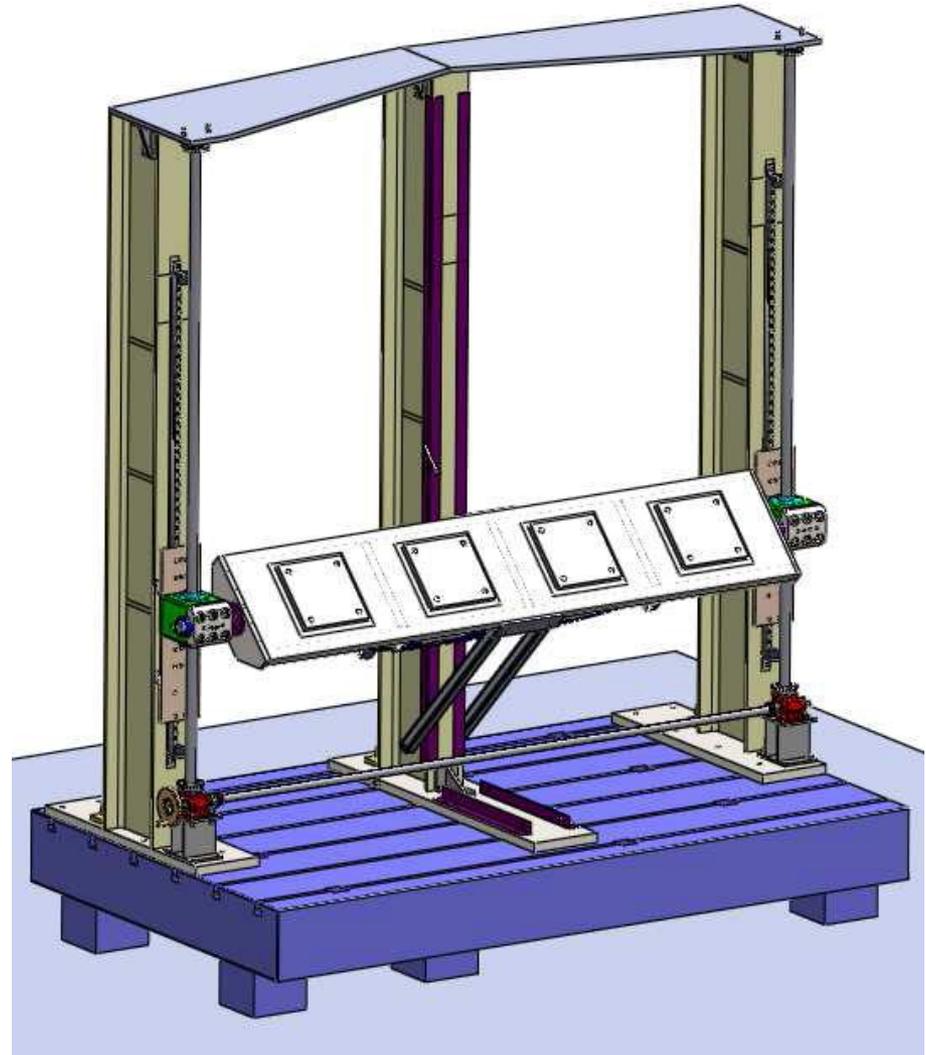
- jeder der pneumatischen Sensoren liefert Abstandswert
- aufgrund der bekannten Positionen der Sensoren in DSB und entsprechender Kalibrierungen werden Oberflächenpunkte P1, P2, P3 und P4 bestimmt
- Normale ergibt sich aus Kreuzprodukt zwischen $P1P3$ und $P2P4$



Testvorrichtung

Gesamtaufbau

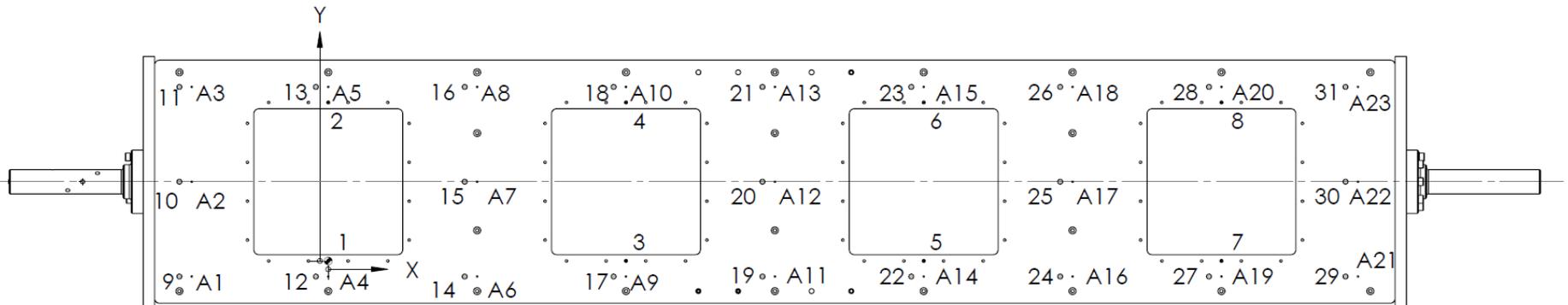
- Aluminiumplatte mit Rahmen für Testteile, aufgespannt in Testvorrichtung
- ermöglicht Tests verschiedener Bohrszenarien (Position Roboter in Bezug zum Bauteil)
- höhenverstellbar
- mehrere Winkelpositionen zum schrägstellen der Aluminiumplatte



Testvorrichtung
(Quelle: Fraunhofer IPA)

Testvorrichtung

Trägerplatte für Testteile



- Aluminiumplatte 2 m x 0,4 m
- Rahmen für vier Testplatten
- 23 hochgenaue Referenzlöcher A1, A2, ..., A23

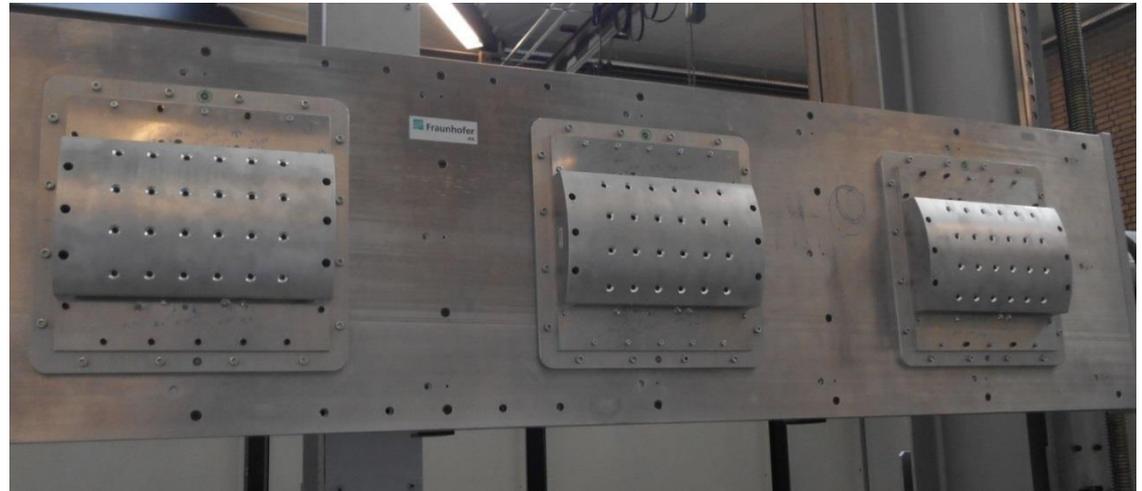
Testteilespektrum

■ verschiedene Materialien:

- Aluminium
- Titan
- Kohlefaserkunststoffe
- Stacks aus genannten Materialien

■ Verschiedene Krümmungsradien:

- flach
- 100 mm
- 200 mm
- 500 mm



Testteile mit 200 mm
Krümmungsradius
(Quelle: Fraunhofer IPA)

Ergebnisse

Bohrlochposition

- berechneter Referenzierungsfehler (hochgenaue Referenzlöcher auf ebenen Flächen):
 - $<0,015$ mm
 - Positionsabweichung der Bohrlöcher (100 Testbohrungen):
 - maximal: 0,651 mm
 - durchschnittlich: 0,285 mm
- ⇒ Ergebnisse entsprechen den im Luftfahrtbereich geforderten Genauigkeiten
- ⇒ hohes Optimierungspotential durch niedrigen Referenzierungsfehler

Ergebnisse

Orthogonalität

■ Bei den durchgeführten Tests haben sich für den Krümmungsradius folgende Winkelabweichungen ergeben:

- maximal: 0,48°
- durchschnittlich: 0,27°

⇒ Anforderungen sind erfüllt

⇒ durch weitere Optimierung Winkelabweichung $\leq 0,2^\circ$ möglich

ID	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Winkle Abweichung in Grad	0.28	0.26	0.31	0.27	0.24	0.30	0.34	0.31	0.27
ID	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Winkle Abweichung in Grad	0.20	0.15	0.48	0.20	0.20	0.26	0.40	0.11	0.27

Projektkonsortium

- Broetje-Automation Assembly & Turnkey Systems GmbH:
 - Projektleitung
 - Gesamtapplikation (u.a. Robotik, Kommunikation, Steuerung)
- Johannes Lübbering GmbH:
 - Konstruktion und Bau End-Effector
- Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung:
 - Genauigkeitssteigerung Robotik
 - Design End-Effector und Testvorrichtung
 - Messtechnik

Literatur

Eguti 2012

C. C. A. Eguti, G. Trabasso, E. Villani, G. K. Coracini and L. F. F. Furtado, "Development of a robotic end-effector of drilling and fasteners inserter for aircraft structures", SAE 2012 Aerospace Manufacturing and Automated Fastening Conference & Exhibition, Fort Worth, Texas, United States, 2012

Lee 2011

R.-T. Lee and F.-J. Shiou, "Multi-beam laser probe for measuring position and orientation of freeform surface", Measurement, Vol.44, No. 1, pp. 1-10, 2011

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Kontakt

Jens Kühnle

Fraunhofer IPA
Nobelstr. 12
70569 Stuttgart

Tel.: +49 (0)711 970-1861

Fax: +49 (0)711 970-1004

E-Mail: jens.kuehnle@ipa.fraunhofer.de