A vertical stack of five horizontal bars in red, green, blue, orange, and green from top to bottom.

Brennstoffzellenfertigung - Möglichkeiten der Prozessüberwachung bei der Bipolarplattenfertigung im Stanz- und Umformprozess und Inline- Verarbeitung extrem großer Datenmengen

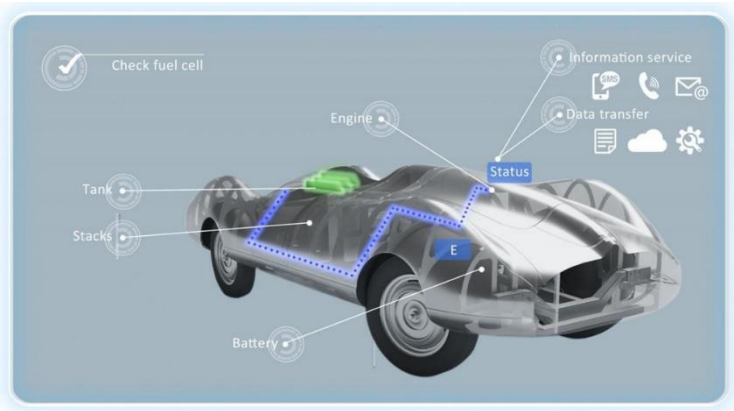
11. April 2024

Alexander Pierer, Fraunhofer IWU – Chemnitz

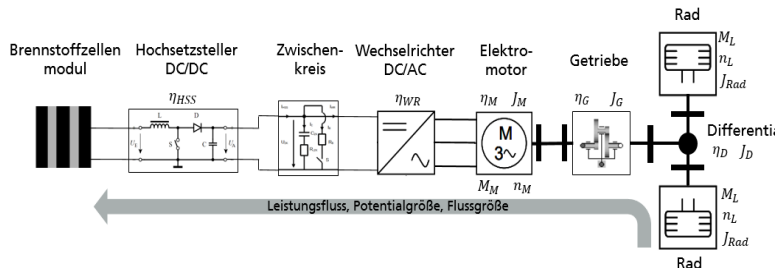
5. FACHTAGUNG zum Stanzen und Umformen

Brennstoffzellen in Mobilitätsanwendungen

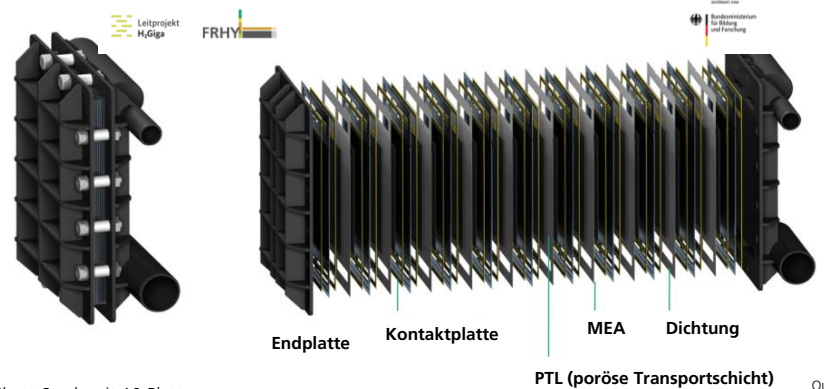
Aktivitäten am Fraunhofer IWU – Abt. Automation



Silberhummel (Oldtimer-Nachbau mit Brennstoffzelle)

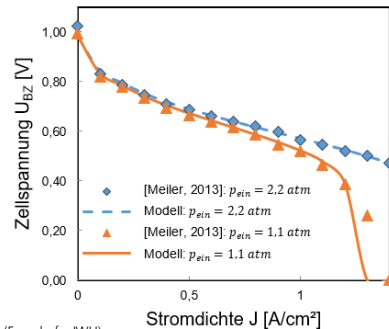


Quelle: R.Löser (Fraunhofer IWU)



Short-Stack mit 10 Platten

Quelle: Projekt FRHY



Fraunhofer IWU - Abt. Automation:

- Simulationsmodelle des elektro-chemischen Verhaltens und des Antriebssystems („von der Zelle bis zur Traktion“)
- Entwicklung von Monitoring-/Steuerungslösungen für H₂-betriebene Fahrzeuge
- Prüfsysteme zur Wasserstoffversprödung
- **Inline-Qualitätsüberwachung**



Der Produktionsprozess für Brennstoffzellen hat immer noch einen starken Manufakturcharakter.

1

Performance

- Verbesserung der Effizienz und Leistung von Brennstoffzellen

2

Kosten

- Entwicklung von kostengünstigen BZ-Stacks und BOP-Komponenten (Peripheriesysteme)
- Fortschrittliche Ansätze für die Großserienfertigung inkl. Qualitätskontrolle
- Ausschuss als Kostentreiber

3

Langlebigkeit und Nachhaltigkeit

- 8.000 h leichte Nutzfahrzeuge, 30.000 h schwere Nutzfahrzeuge, 80.000 h Stromversorgung
- Zuverlässigkeit und Robustheit des Systems unter dynamischen und rauen Betriebsbedingungen
- Verbesserte Kontrollsysteme und Prüfverfahren für eine ressourcenschonende und energieeffiziente Produktion

© Max Wei, Simon Thompson, Elizabeth Connelly, Neha Rustagi, Hossein Ghezel-Ayagh, Chris Capuano, Josh Mermelstein, DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record: Reversible Fuel Cell Targets, 6/23/20, Available: <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/20001-reversible-fuel-cell-targets.pdf>

Übersicht wichtiger Komponenten von Brennstoffzellen / Elektrolyseuren

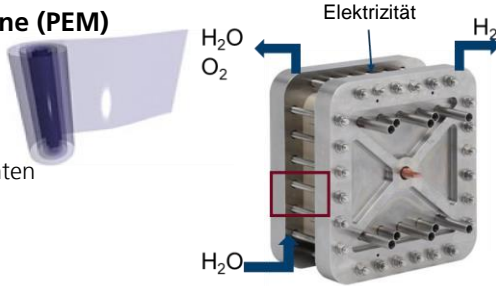


Polymer Electrolyte Membrane (PEM)

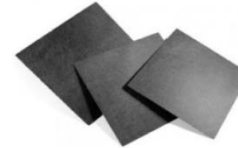
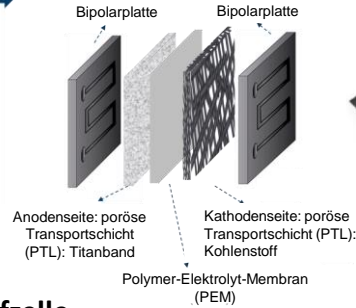
(d = 50 - 150 µm)

(Nafion, PFSA, PSF, PEEK, PBI)

- Protonenleitend H⁺
- Elektrisch isolierend
- Mechanische Barriere für Reaktanten



PEM-Elektrolyseur



Gas Diffusion Layer (GDL)

(FC: 100 - 200 µm, EL: 200 - 300 µm)

+ Microporous layer (MPL)
(d = 20 - 100 µm)

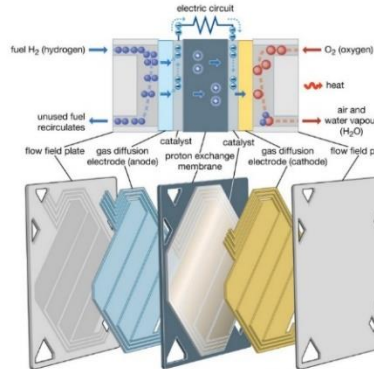
- (Kohlepapier/-fasergeflecht/Vlies)
- Elektrische Leitfähigkeit
- Gasdurchlässigkeit
- Korrosionsbeständigkeit
- Mechanische Stabilität
- Förderung des Wasserabflusses

Katalysatorschicht (CL)

(d = 10 - 20 µm)

- Senkung der Aktivierungsenergie
- Platin auf Kohlenstoffträger
- Vergrößerung der Oberfläche
- Korrosionsbeständigkeit
- Toleranz gegenüber Verunreinigungen

PEM-Brennstoffzelle

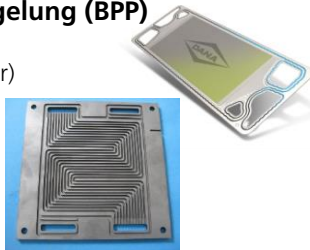


Bipolarplatten inkl. Versiegelung (BPP)

(d = 1 - 2 mm)

(Metall/Grafit-Komposite/Polymer)

- Verteilung von Gasen
- Ableitung von Wasser
- Kühlung
- Elektronenleitung
- Korrosionsbeständigkeit



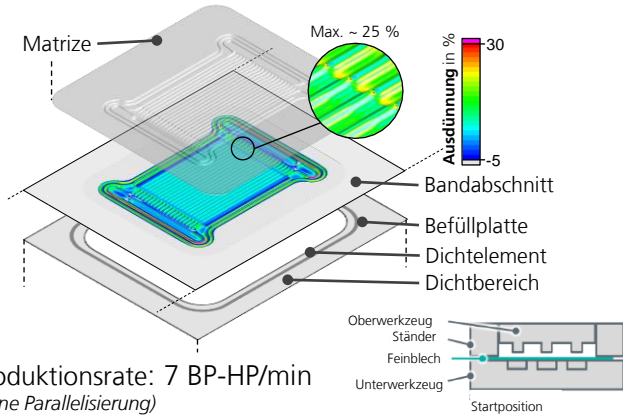
Endplatten und mech. Stackaufbau

- Homogene Druckverteilung
- Kontaktierung der Bipolarplatten
- Ableitung der Prozesswärme
- Mechanische Stabilität
- Hohe Formtreue
- Chemische Beständigkeit
- Gewicht

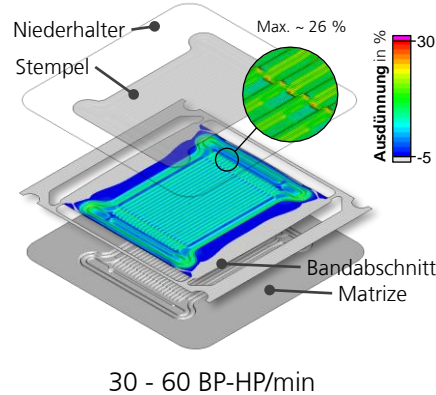


Quellen: Encyclopedia Britannica, Inc., Dana, SGL, Chemours, fuelcellstore.com, KIT - IPEK, Joachim Scholta 2020

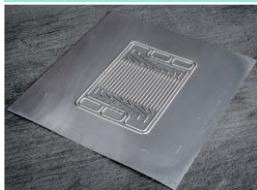
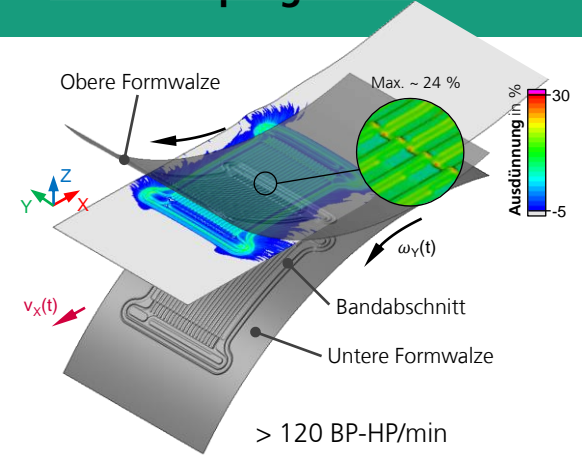
Hochdruckblechumformung (Hydroforming)



Hohlprägen

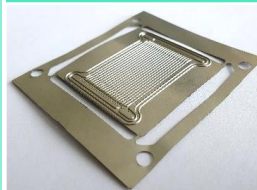


Hohlprägewalzen



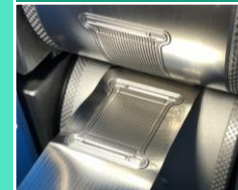
- Nur eine Werkzeugform
- Hohe BP-HP Qualität
- Potenziale durch passives Hydroforming

„Kleinere Stückzahlen“



- Höhere Produktionsrate
- Am meisten etablierte industrielle Umformtechnik

Mittlere Stückzahlen

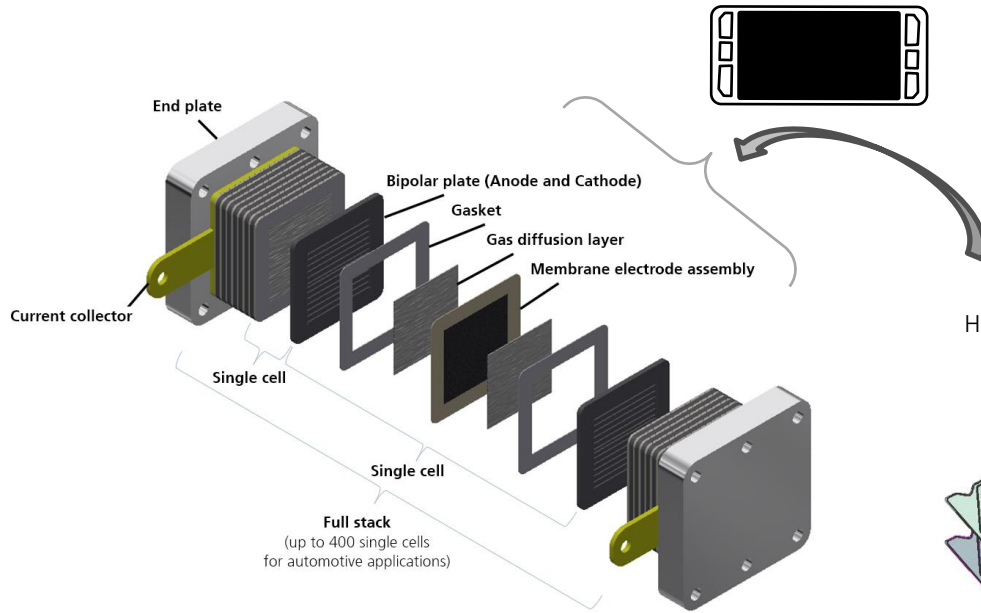


- Geringe Prozesskräfte und Energieverbrauch
- Derzeit niedriger TRL

Potenzial für Massenproduktion

Von der Bipolarplatte zum Stack

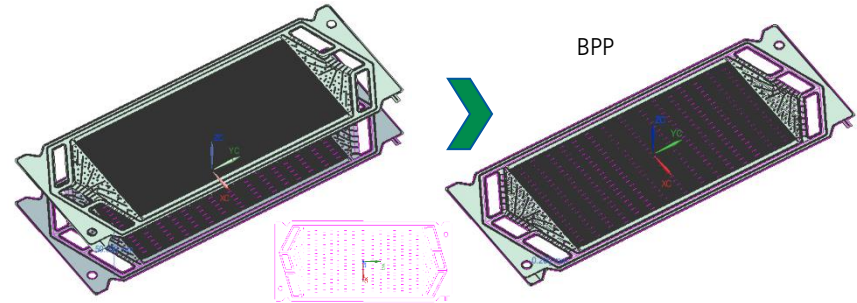
Montageübersicht



Halbplatte



Halbplatte - Kathode + Anode



Quelle: basierend auf dem Schaubild von DiLiCo engineering GmbH

Referenzprüfkette mit Qualitätsanforderungen Bipolarplatte

Prozessschritte und Prüfaufgaben

Anlieferung Bandmaterial

- Oberflächenqualität
- Dickentoleranz Bandmaterial
- Mechanische Kennwerte



Quelle: Coil-Monitoring UVB Technik s.r.o.

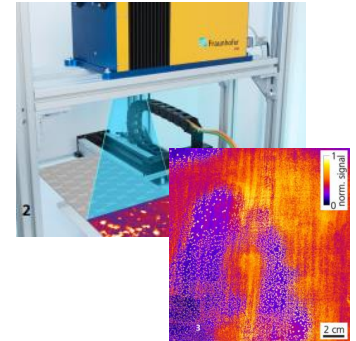
Umformen

- Verschleißerkennung Werkzeug
- Risserkennung Bipolarhalbplatte
- Detektion von Geometrieabweichungen (v.a. im flowfield)
- Erkennung unvollständig ausgestanzter Bereiche
- Erfassung von Gratbildung an den Schnittkanten
- Bruch oder Verformung von Bauteilen
- Erfassung von Einschnürungen
- Ebenheitsprüfung

Vereinzeln & Schneiden

Reinigung

- Erkennung von Rückständen auf den Bipolarhalbplatten



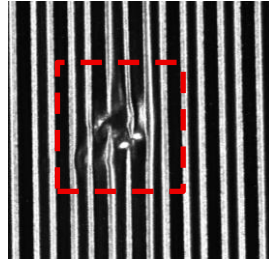
Quelle: UV-Fluoreszenzmessung organischer/ölicher Benetzungen F-Scanner, Fraunhofer IPM

Referenzprüfkette mit Qualitätsanforderungen Bipolarplatte

Fehlermerkmale und Erfassungsmethoden

	Maßhaltigkeitsfehler	Oberflächenfehler	Herstellbarkeitsfehler
Beschreibung	<ul style="list-style-type: none">○ Abweichungen zwischen Ist- und Soll-Geometrie○ Konturfehler (innen und außen)○ Beschichtung (Dicke)	<ul style="list-style-type: none">○ Einfallstellen○ Druckstellen○ Welligkeiten○ Kontaminationen○ Anhau- und Nachlaufkanten○ Beschichtung (homogen?)	<ul style="list-style-type: none">○ Reißen○ Einschnürungen○ Falten
Bewertung	<ul style="list-style-type: none">○ stichprobenartige Prüfung mittels optischer Messsysteme oder mechanischer Messaufnahmen○ 3D-Formerfassung (Lichtschnitt, Streifenprojektion)○ Bildverarbeitung oft mit telezentrischen Systemen	<ul style="list-style-type: none">○ (optische) Detektion der Abweichungen des visuellen Erscheinungsbildes○ 2D-Bildverarbeitung (klassische Methoden + ML-basierte Methoden)○ Beleuchtungsstrategien + Bildverarbeitung	<ul style="list-style-type: none">○ Besonders kritische Fehler, da Funktionalität beeinträchtigt sein kann○ Einsatz geeigneter Beleuchtungsstrategien und Sensorik

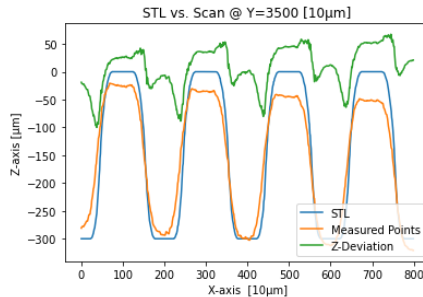
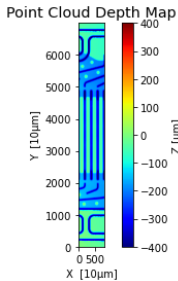
Multi-Kamera-System – 2D-Oberflächenprüfung



Hochauflösender Laserlinienscan – 3D-Geometrie



Quelle: KEYENCE



- Inline-Fähigkeit der Sensoren und Messprinzipien (2D/3D)
- Bestimmung der geeigneten Sensoranordnung
- Sicherstellung einer vollständigen Oberflächenabdeckung bei geforderter Auflösung
- Begrenzung der Sensoren (z.B. **Datenrate/-menge, Auflösung, Genauigkeit, Messbereich ...**)
- Verlustfreie Datenübertragung (hohe Datenraten bis zu mehreren GB/s)
- Schnelle Erfassung und Verarbeitung (Multi-Core/GPU)
- **Handelt es sich um einen funktionskritischen Fehler oder nur um eine tolerable Anomalie?**
- **Wie sensitiv ist das Prüfsystem einzustellen (Prüfslupf, Pseudoausschuss)?**

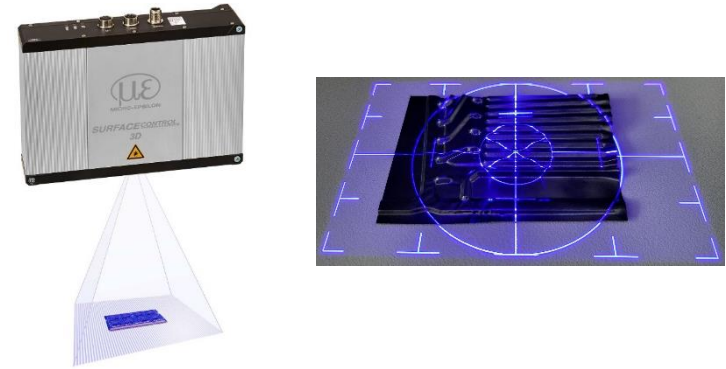


Lichtschnitt/Laserlinienscan



- ✓ Erfassung in Bauteilbewegung (32 mm/s @ 16 kHz)
- ✓ Bis ca. 2 μm -Punktabstand
- ✓ Messzeit = Durchlaufzeit Bauteil (ohne Verarbeitung)
- ? Hochauflösender Encoder für Triggerung
- ✗ Verfälschung durch Wippen, Vibrationen, unruhigen Bahnlauf

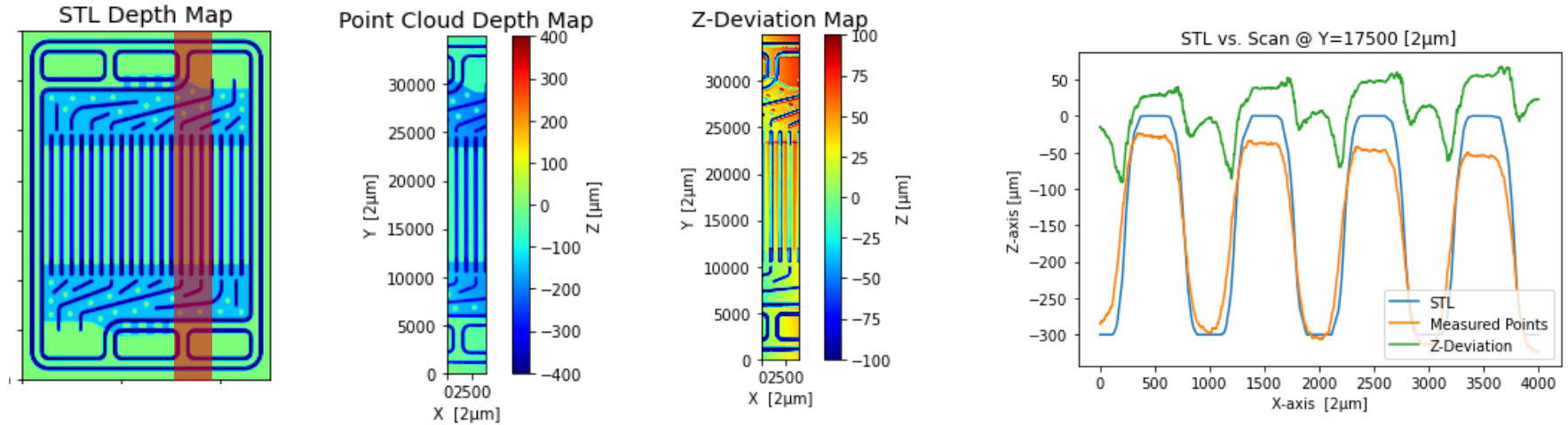
Streifenprojektion



- ✓ Erfassung lateralen Messfeldes (Single-Shot)
- ✗ Bauteilstillstand erforderlich
- ? Messzeit 0,4 s - 2 s (ca. 2.2 Mio. Punkte/s)
- ? Lateraler Punktabstand x/y 40 μm

Optische 3D-Prüfsysteme

Datenmengen & Verarbeitungszeiten – Ein Beispiel ...



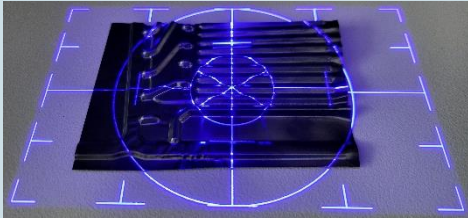
- Aufbau: Linienscanner Keyence LIX8020, Encoder 130 k Inkr/U
- Scanfeld auf BPP: 7,3 mm x 70 mm, 2 μm laterale Auflösung
- PC: Win 10, Intel i7-9700K 3.6 GHz DualCore, 16 GB-RAM
- Datenmenge: 86,5 Mio-Punkte / Dateigröße: ca. 300 MB binär, 1,26 GB als CSV
- Verarbeitungsdauer: ca. 18 min (Python-Script)

Name	Größe	Scandaten
pcd_2micron.csv	1.256.441 KB	
pcd_2miron.npy	295.735 KB	
stl_2micron.csv	10.614.167 KB	
stl_2miron.npy	1.709.102 KB	
z_diff_map_2micron.csv	985.808 KB	
z_diff_map_2micron.npy	273.438 KB	

Optische 3D-Prüfsysteme

Beispiel - Geometrieabweichungen & Ebenheit

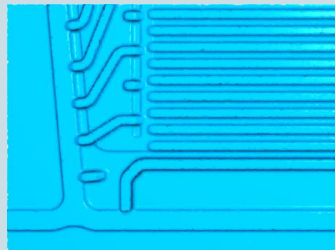
3D-Scan



Sensorkalibrierung

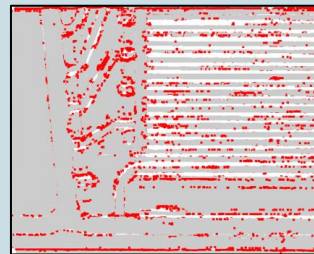


Scan der BPP

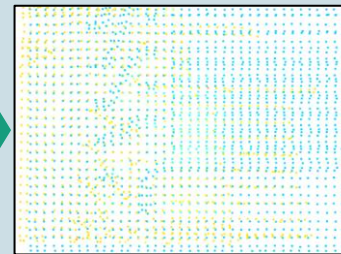


3D-CAD-Modell als Punktwolke

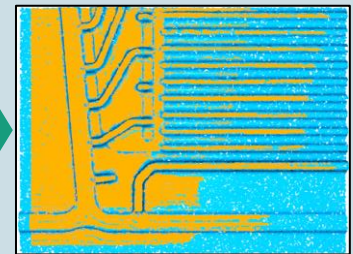
Xeidana® + Open3D Implementierung



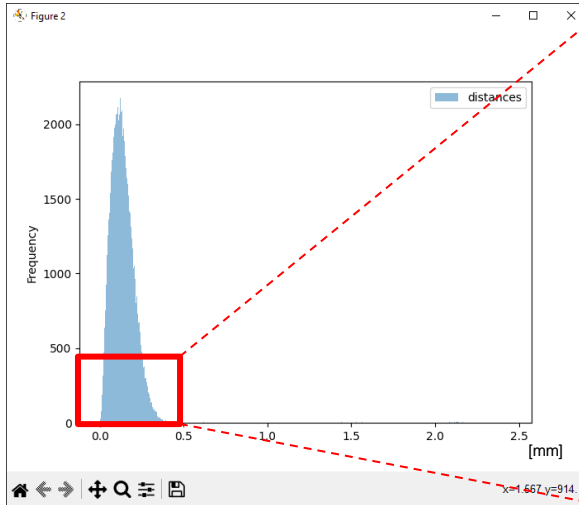
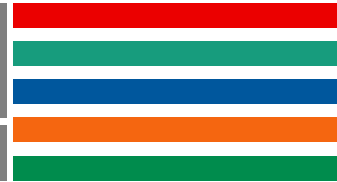
Ausreißer-Eliminierung



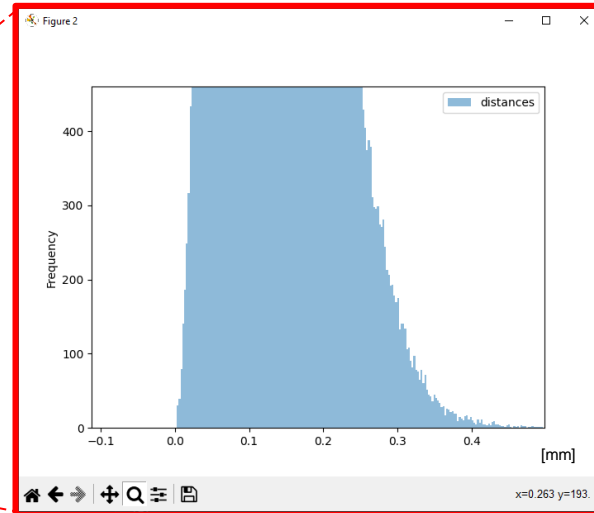
Globale-3D-Registrierung (Fitting)



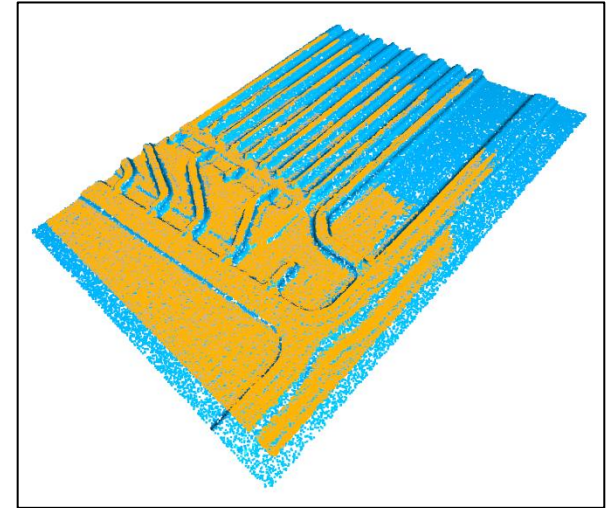
Lokale-3D-Registrierung (Fitting), Detektion von Geometrieabweichungen, Ebenheit



Histogramm Soll-Ist-Abgleich zwischen CAD und Scan



Histogrammbereich vergrößert



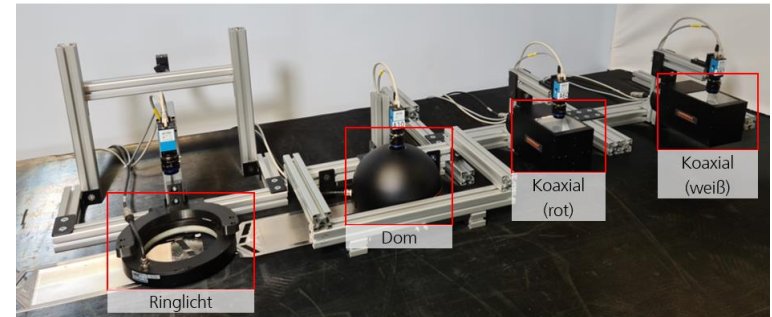
Beispielhaftes Ergebnis der 3D-Registrierung (Fitting)

- Datenqualität der Punktwolke an steilen Flanken bzw. aufgrund hoher Reflexion lückenhaft

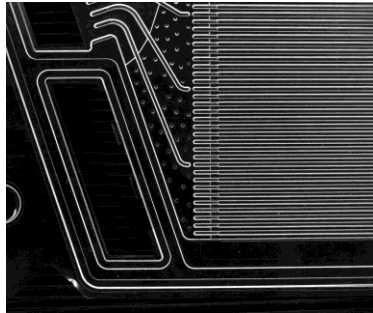
Optische 2D-Prüfsysteme

Beleuchtungskonzepte

Vergleich verschiedener Beleuchtungskonzepte zur Hervorhebung von Geometrie-, Fertigungs- (Umform-) und Schweißfehler mit optischen 2D-Sensoren

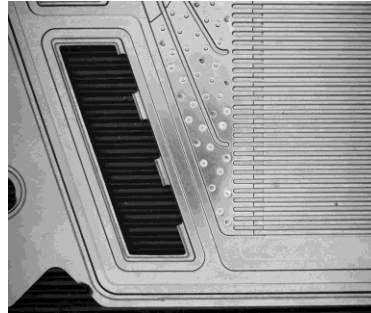


Dunkelfeld



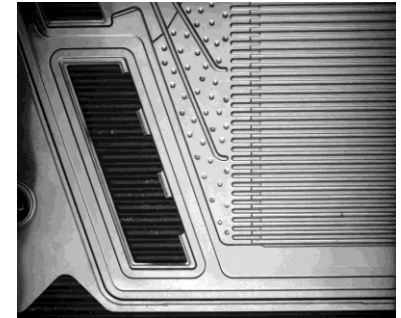
Geeignet für Herstellbarkeitsfehler
Nicht geeignet für Schweißnaht- oder Oberflächenprüfung

Dom (allseitig diffus)



Gut geeignet für Schweißnähte

Koaxial



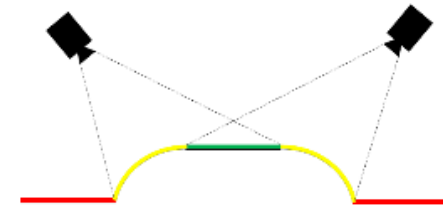
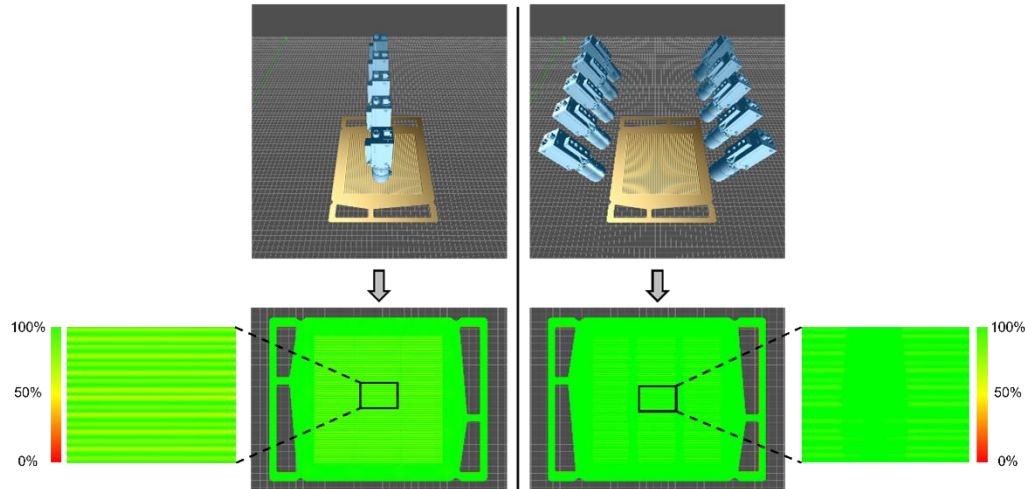
Gut geeignet für Schweißnähte & Oberflächenanomalien



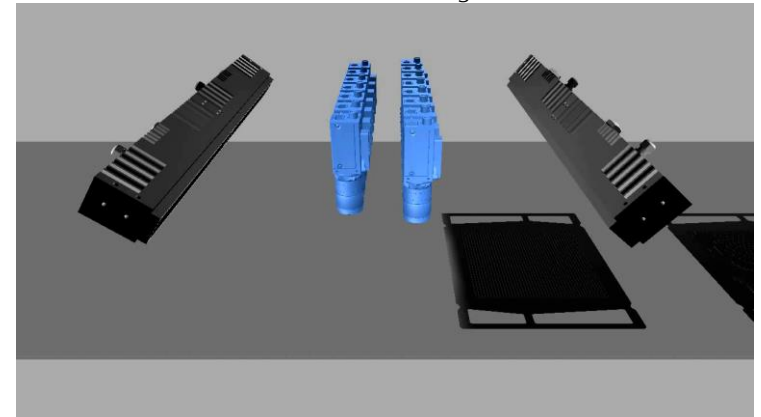
Abdeckungssimulation von Multi-Kamera-Systemen:

Orthogonale Anordnung

V-Anordnung

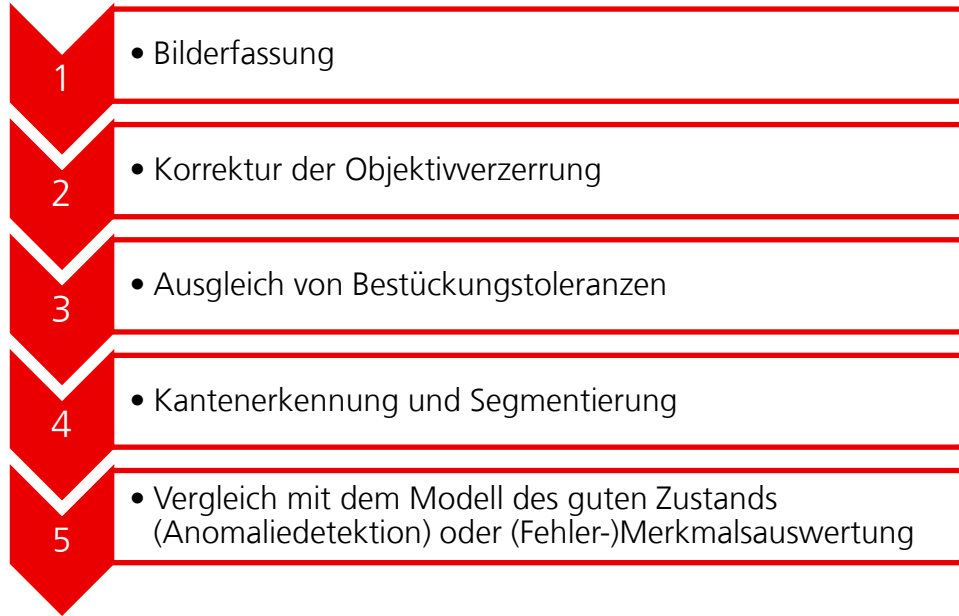


Beispiel mit erforderlicher zweifacher Kameraredundanz:
grün = ok, gelb = geringe Redundanz, rot = keine Abdeckung



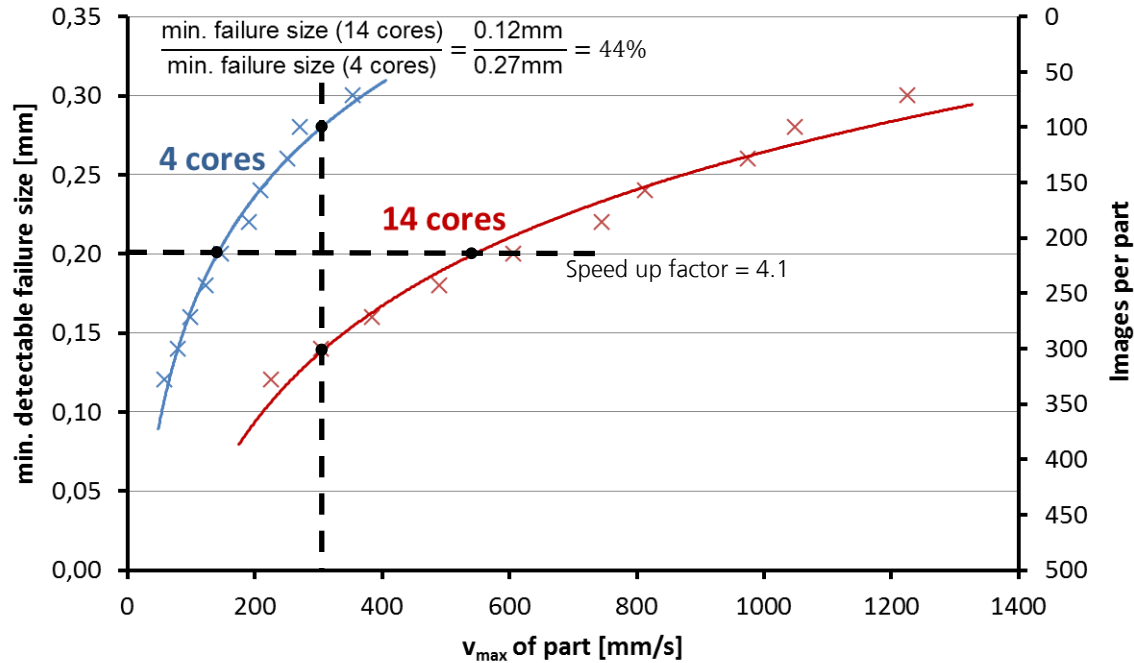
Quelle: L.Gjakova (Fraunhofer IWU)

Verarbeitungsprogramm je Kamera:



Optische 2D-Prüfsysteme

Auflösung, Geschwindigkeit und Rechenzeit - immer ein Kompromiss ...



- 3D-Messsysteme erzeugen i.d.R. sehr hohe Datenmengen, deren Inline-Verarbeitung oft noch Probleme bereitet
- 3D-Messsysteme erfordern Bauteilstillstand oder störungsarme Bauteilbewegung
- 2D-Messsystem in Inline-Anwendungen einfacher zu beherrschen
- 2D-Messsysteme liefern nur indirekt Informationen zu 3D-Merkmalen abhängig von der Kamera-Beleuchtungsanordnung
- Vollständige und ggf. redundante Abdeckung der Überwachungsbereiche ist zu beachten und kann simulativ betrachtet werden
- Detektierbare min. Fehlergröße, Bauteilgeschwindigkeit und Rechenleistung sind mit einander verknüpft. Sollen immer feinere Fehler bei gleicher Geschwindigkeit detektiert werden, steigt die erforderliche Rechenleistung überproportional