



# THÜRINGER ZENTRUM FÜR MASCHINENBAU

FLEXIBEL – PRÄZISE – RESSOURCENSCHONEND

in Ilmenau, Jena und  
Schmalkalden





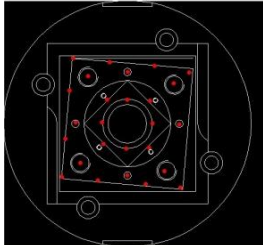
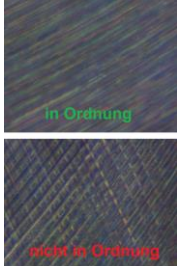

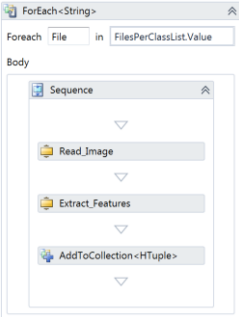
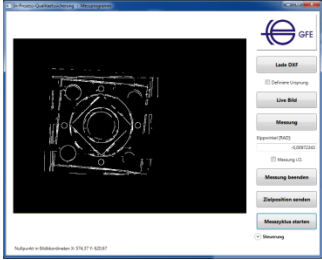
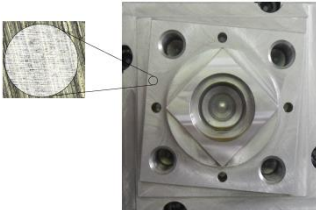
# Assistenzsysteme zur prozessintegrierten Qualitätssicherung in Werkzeugmaschinen

Prof. Frank Barthelmä, Heinz-Wolfgang Lahmann,  
Dr. Daniel Garten (GFE Schmalkalden),

Univ.-Prof. Gunther Notni, Dr. Katharina Anding (TU Ilmenau)

1. Einleitung
2. Geometrieerfassung und -bewertung mittels Bildverarbeitung direkt im Bearbeitungszentrum
3. Oberflächenerfassung und –bewertung mittels maschineller Lernverfahren direkt im Bearbeitungszentrum
4. Zusammenfassung und Ausblick

# 1. Einleitung

<b>Geometrieerfassung und –Bewertung mittels Bildverarbeitung</b>		<b>Oberflächenerfassung und –bewertung mittels maschineller Lernverfahren</b>	
<p><b>Soll-Geometrie mit Messpunkten</b> Definition eines Messzyklus in Form von Messpunkten an der Konstruktionszeichnung (Soll-Kontur)</p>			<p><b>Sammlung von Beispielobjekten für verschiedene Oberflächendefekte bzw. Güteklassen</b> Ein Experte sammelt repräsentative Beispiele für die zu unterscheidenden Oberflächendefekte bzw. Güteklassen</p>
<p><b>Maschinenintegrierbares optisches Messsystem</b> Das optische Messsystem fährt die definierten Messpunkte an und nimmt ein Bild des Bauteilausschnittes auf. Hierzu kommuniziert besitzt das Messsystem spezielle Schnittstellen zur Maschinensteuerung.</p>			<p><b>Automatisierte Generierung eines Prüfprogramms</b> Anhand der Beispieldaten lernt ein intelligentes Verfahren die Unterscheidung unbekannter Objekte und generiert ein automatisiertes Prüfprogramm.</p>
<p><b>Auswerte-Software</b> Die Software detektiert die Objektkanten, wobei Kanten der Oberfläche (Riefen usw.) weitestgehend unterdrückt werden und stellt die an den Messstellen erfasste Ist-Kontur dar.</p>			<p><b>Einsatz des Prüfprogramms in der Maschine</b> In der Maschine werden Bilder der Bauteiloberfläche aufgenommen und der lokale Oberflächenausschnitt durch das Prüfprogramm klassifiziert.</p>



## 2. Geometrieerfassung und -bewertung mittels Bildverarbeitung direkt im Bearbeitungszentrum

**Ziel: Detektion von Kreisbögen, Liniensegmenten und anderen geometrischen Konturen an den aufgenommenen Bauteilkanten**

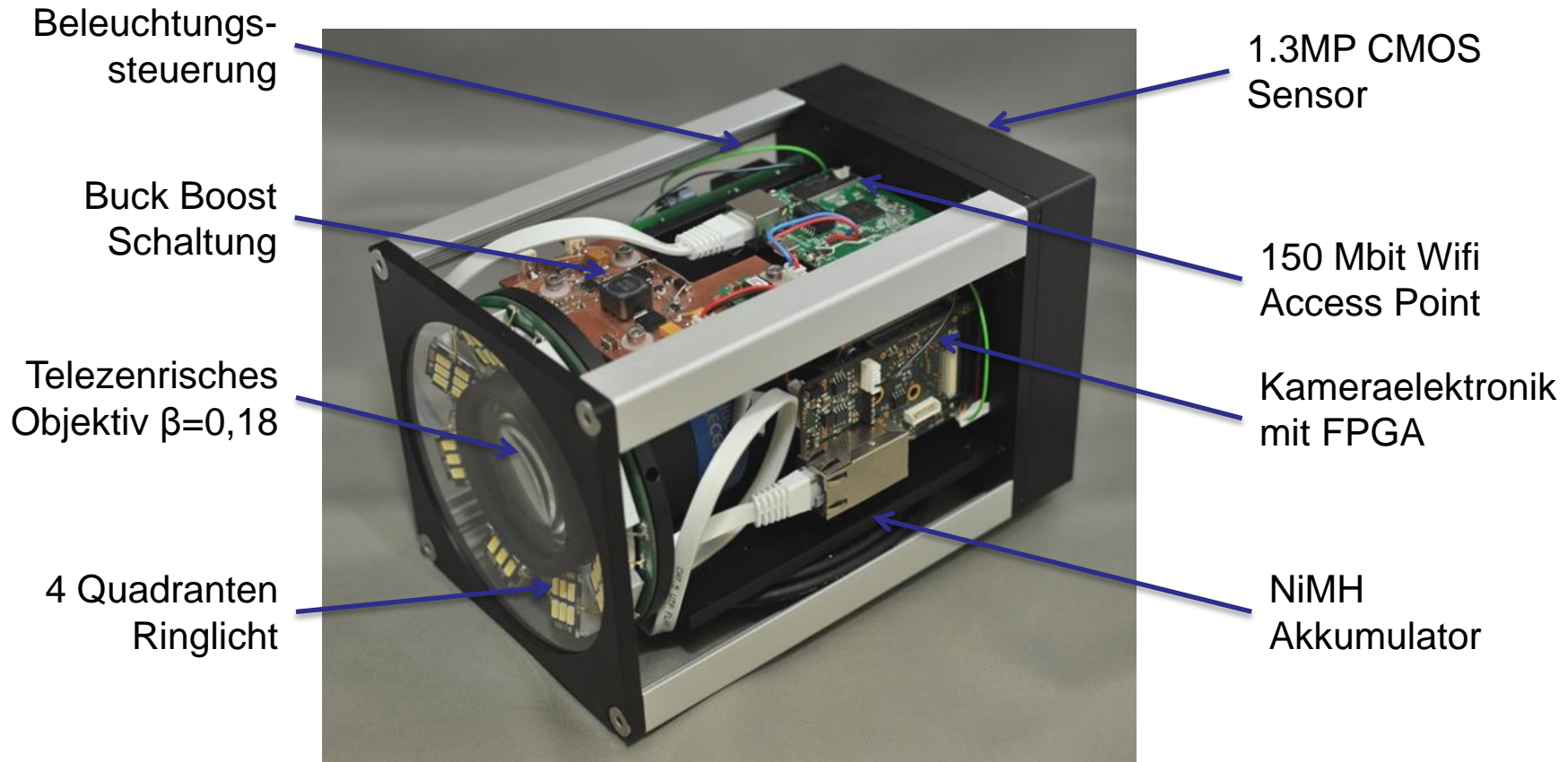
## Verarbeitungsschritte:

1. Aufnahme eines Bildes mit optimalem Kontrast zwischen Bauteil und Hintergrund (Optimierung der Beleuchtungsintensität sowie der Integrationszeit der Kamera)
2. Segmentierung von Bauteil und Hintergrund im Bild
3. Detektion der Kanten des Bauteils
4. Finden von Eckpunkten
5. Zerlegen der Kanten in Linien- und Kreisbogensegmente
6. Berechnung der Parameter:
  - Gerade – Anfangs- und Endpunkte bzw. Geradengleichung
  - Kreisbogensegment – Mittelpunkt und Radius

- Raue Umgebungsbedingungen / mechanischer Schutz der Einzelkomponenten / Stabilität bei Beschleunigung (Schutzklassengehäuse IP 67)
- Objektiv- und Beleuchtungsschutz
- HSK Werkzeugaufnahme verhindert externe Spannungsversorgung im Betrieb → Akkubetrieb mit diversifizierten Ansprüchen der Versorgungsspannung → Bereitstellung verschiedener, stabiler Gleichspannungen
- Drahtlose Datenkommunikation → Datenrate 630 Mbit/s (bei 60Hz, 1,3MP)
- Werkstückreinigung (Integration einer Reinigungsvorrichtung)

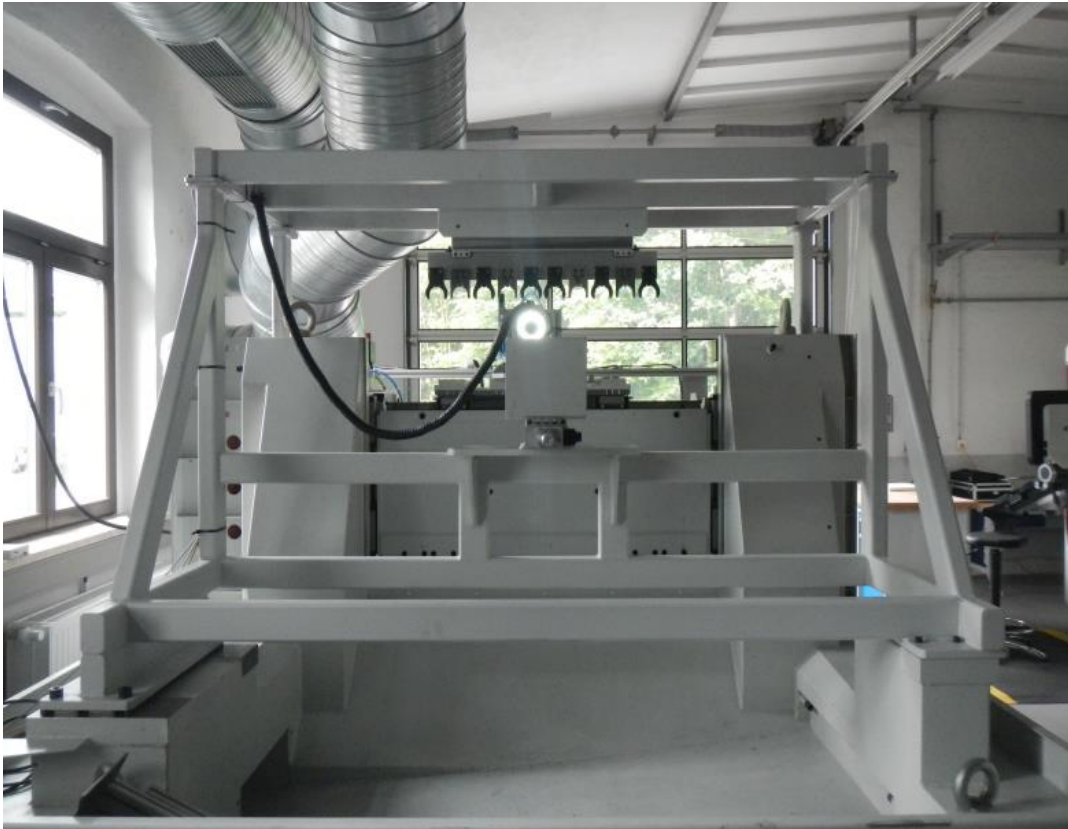


# Demonstrator Sensorkopf



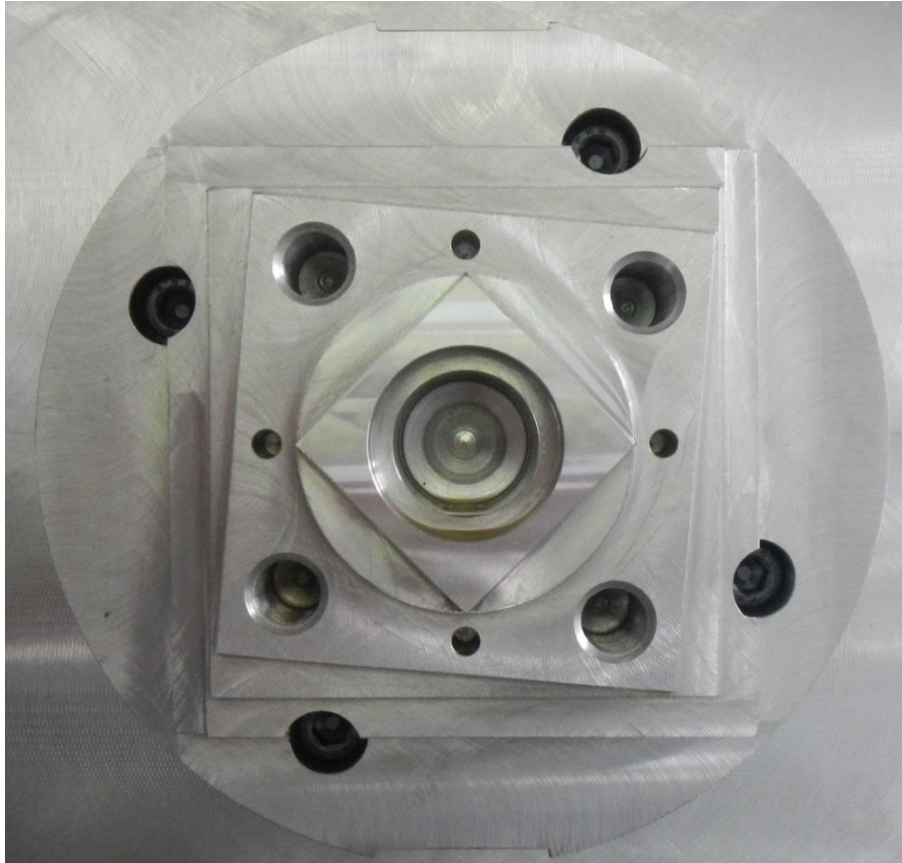


# Demonstrator zur Bildaufnahme in der Werkzeugmaschine

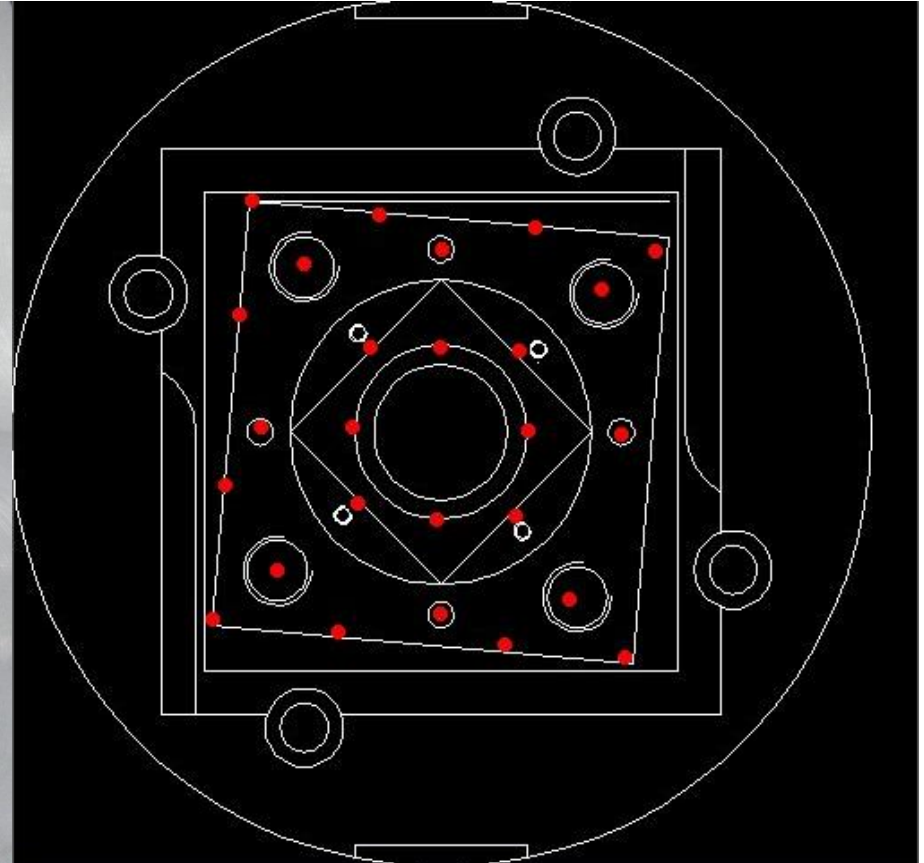


- **Kabelloses Kamerasystem, integriert in Werkzeugwechsel**
- **Steuer-Software zur Bildaufnahme, Auswertung und Maschinensteuerung**

# Vergleich von Soll- und Ist-Geometrie am Beispiel

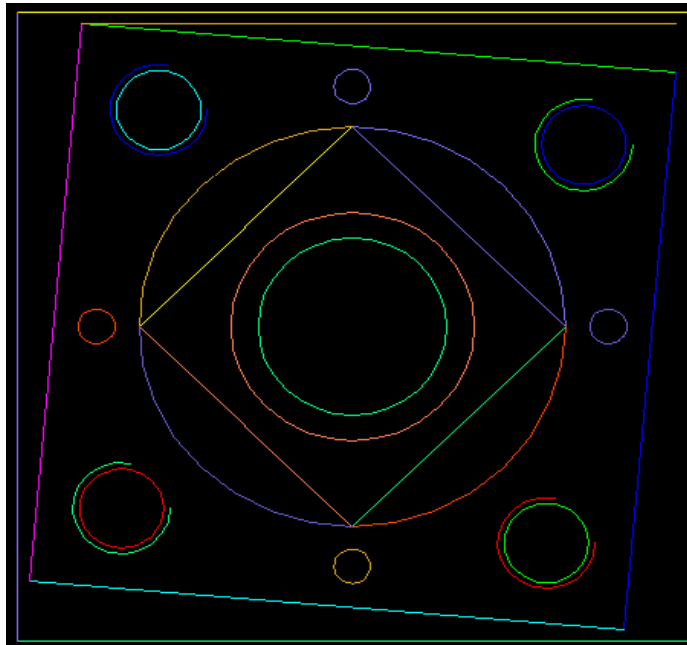


**Bauteil (Ist-Geometrie)**

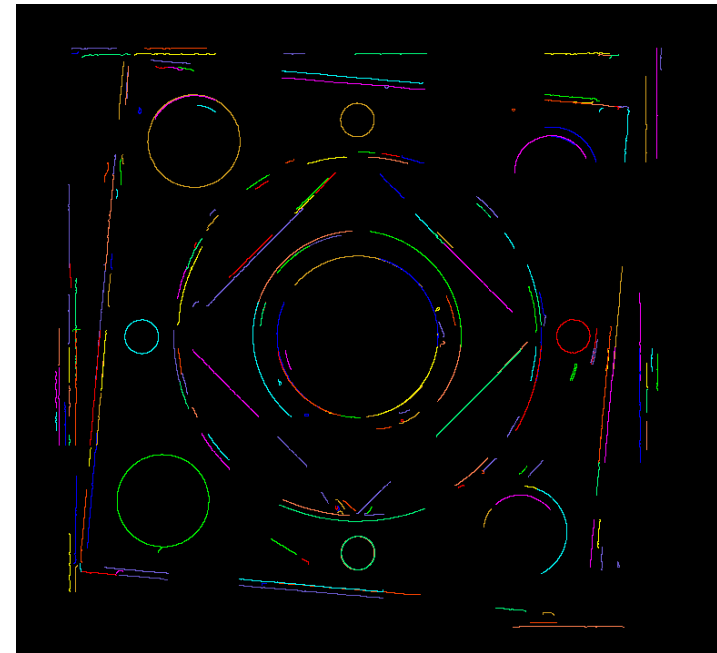


**CAD-Modell mit definierten  
Messpunkten (Soll-Geometrie)**

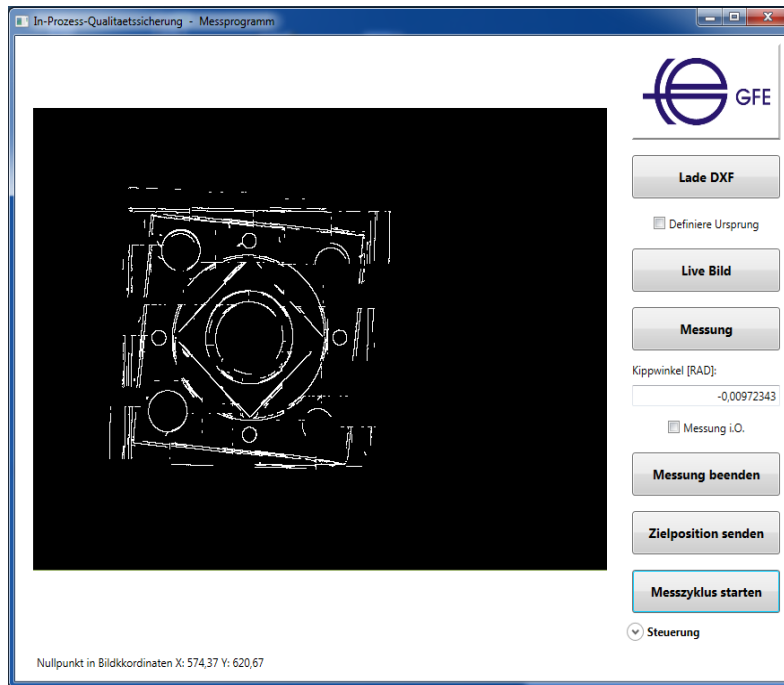
## Soll DXF-Contour exportiert vom CAD-System



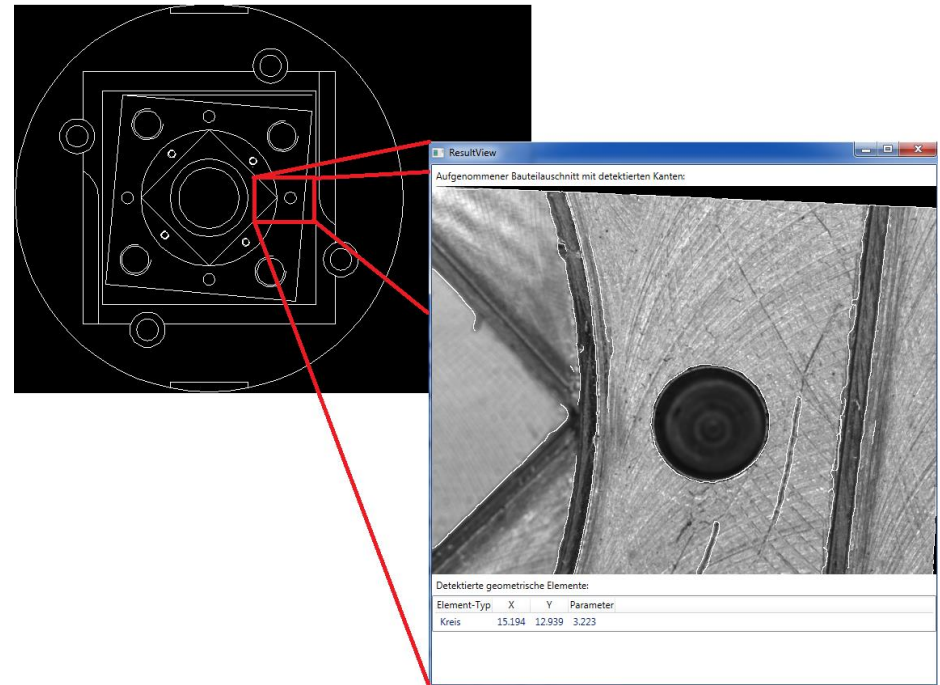
## Gemessene DXF-Contour aus den detektierten Kantenübergängen an den definierten Messpositionen



## Partiell erfasste Ist-Kontur



## Ermittlung geometrischer Kenngrößen

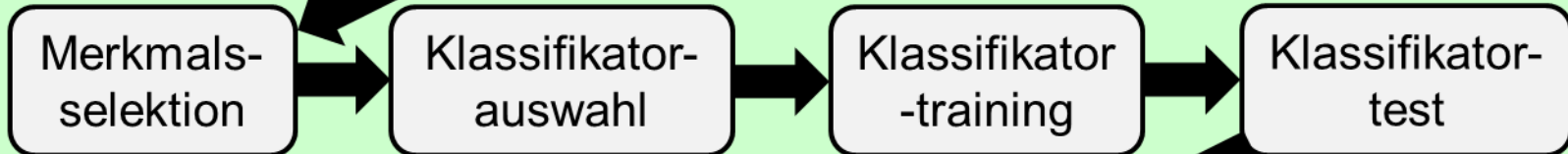
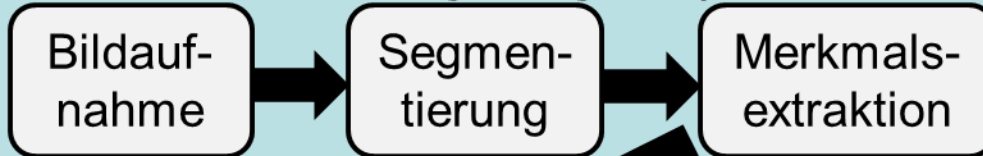


Ermittelter Kreisdurchmesser:  
3,22 mm

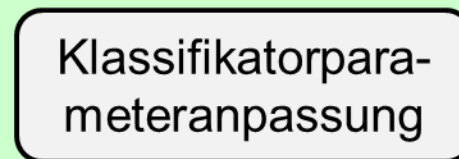


# 3. Oberflächenerfassung und –bewertung mittels maschineller Lernverfahren direkt im Bearbeitungszentrum

## Manuelle Anpassungsaufgabe (applikationsspezifisch)

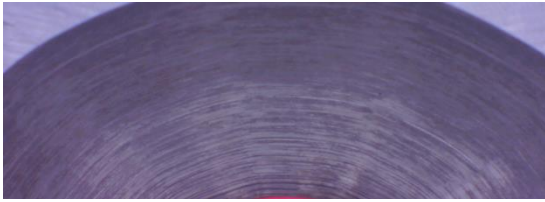
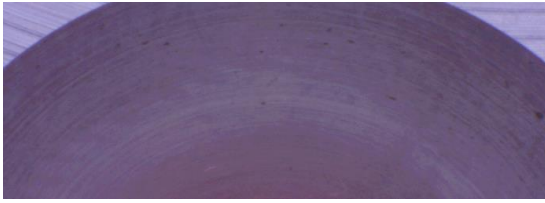
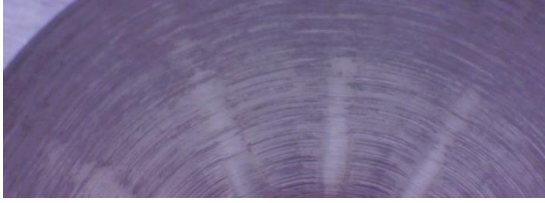


zu automatisierende  
Optimierungsaufgabe



⇒ **Neuheit: vollautomatischer Klassifikatorentwurf basierend auf einem repräsentativen Lerndatensatz**

## Charakteristik des zugrundeliegenden Lerndatensatzes

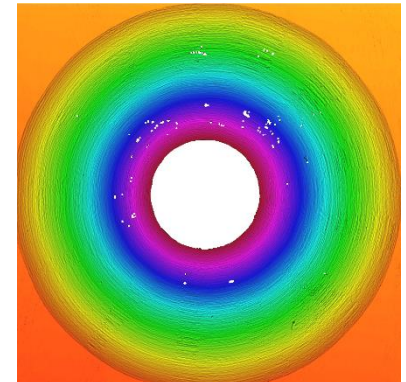
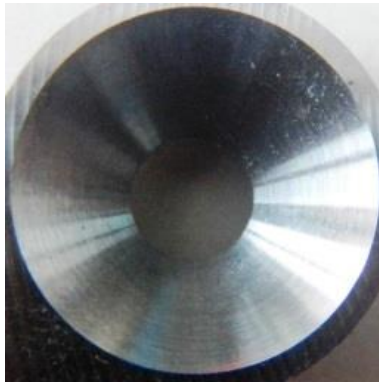
Klassennummer	Klassenname	Objektanzahl	Beispielbild
1	Longitudinale Rillen	128	
2	Perfekt (i.O.)	64	
3	Rattermarken	82	

### Warum Senkbohrungen:

- Bohrungen sind ein häufig im Maschinenbau erzeugtes Formelement
- Bohrungen sind in Bezug auf die Bildverarbeitung ein sehr anspruchsvolles Analyseobjekt:
  - kein Einsatz von Dunkelfeld als Beleuchtung möglich
  - hoher Tiefenbereich erfordert hohe Schärfentiefe
  - stark gerichtete Reflexion mit partieller Über- und Unterbelichtung

## Untersuchung zur Korrelation zwischen geeigneten 2D- und 3D Bildmerkmalen der gleichen Objektregion

72 Bilder wurden aufgenommen und analysiert



### 2D Bilder:

- a) Alicona Infinite Focus G4 , RGB, 1440x1520
- b) Industriekamerabilder, RGB, 2048 x 1536 Pixel und 2560 x 1920 Pixel

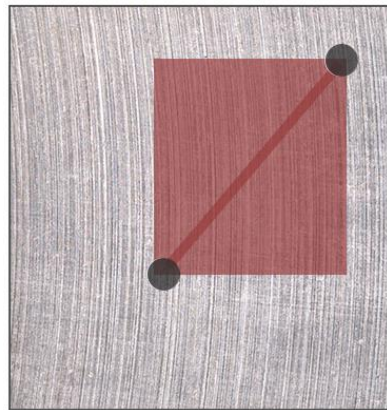
### 3D Oberfläche:

- a) Alicona Infinite Focus G4 (Prinzip: Fokusvariation)

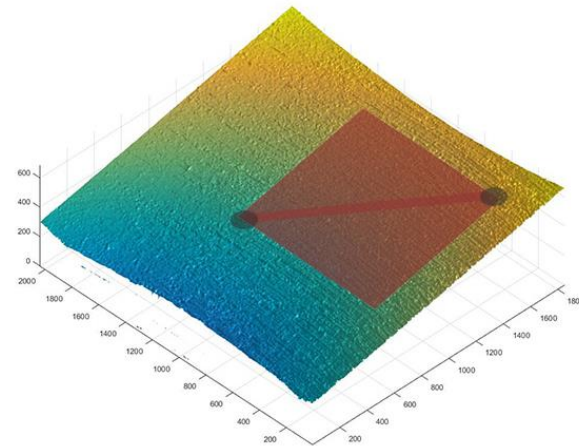


## Untersuchung zur Korrelation zwischen geeigneten 2D- und 3D Bildmerkmalen der gleichen Objektregion

72 Bilder wurden aufgenommen und analysiert



## ISO 25178-2:2012



### 2D Bilder:

- a) Alicona IF G4, RGB, 1440x1520
- b) Industriekamerabilder, RGB, 2048 x 1536 Pixel und 2560 x 1920 Pixel

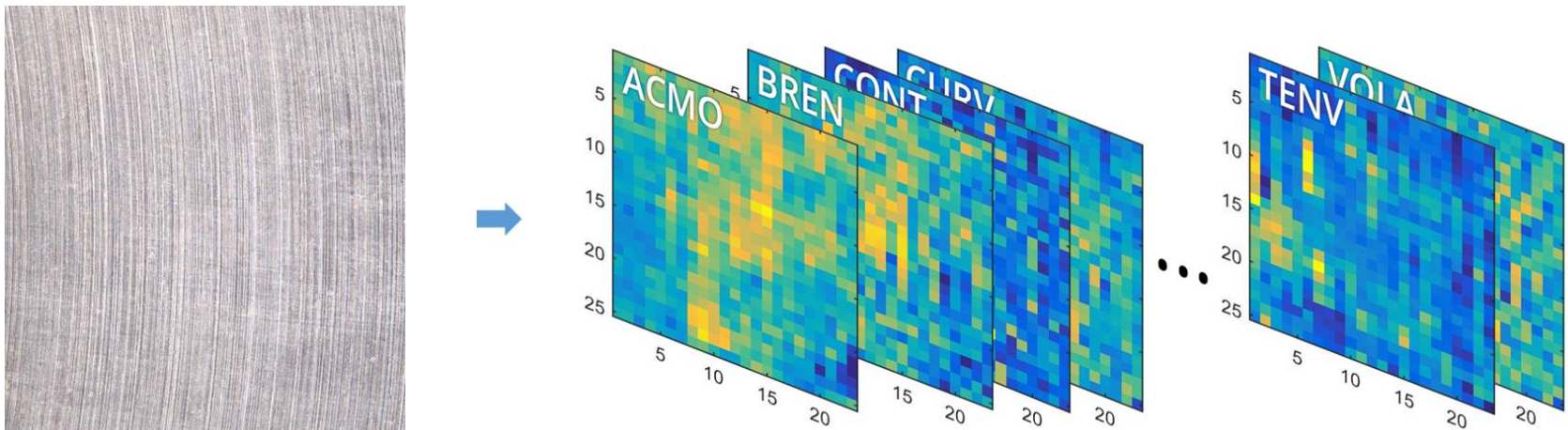
### 3D Oberfläche:

- a) Alicona IF G4 (Prinzip: Fokusvariation)

## Untersuchung zur Korrelation zwischen geeigneten 2D-und 3D Bildmerkmalen

### 27 verschiedene 2D-Texturmerkmale:

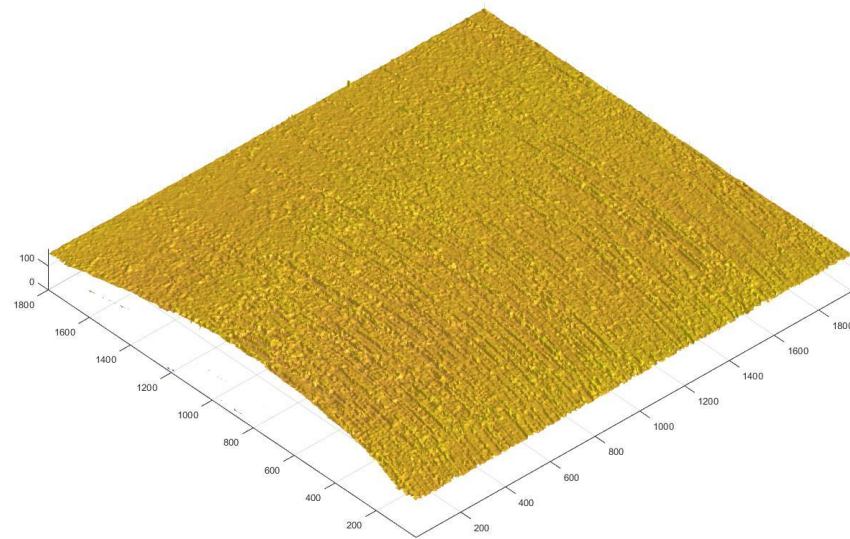
Absolute Central Moment (ACMO), BREN (Brenner gradient), CONT (Image contrast), CURV (Image Curvature), TENV (Tenengrad variance), VOLA (Vollath's correlation), GRAE (Energy of gradient), GRAT (Thresholded gradient), SFRQ (Spatial frequency), SFIL (Steerable filters), ..



## Untersuchung zur Korrelation zwischen geeigneten 2D- und 3D Bildmerkmalen

### 11 verschiedene 3D-Rauheitsparameter nach DIN EN ISO 25178:

$S_a$	Arithmetischer Mittelwert der Höhen der Fläche
$S_q$	Quadratischer Mittelwert der Höhen der Fläche
$S_{sk}$	Schiefe der Fläche
$S_{ku}$	Kurtosis der Fläche
$S_v$	Größte Tiefe der Fläche
$S_p$	Größte Höhe der Fläche
$S_{10z}$	Zehn-Punkt-Höhe der Fläche
$S_{sc}$	mittlere Krümmung auf lokalen Gipfeln
$S_{dq}$	Quadratischer Mittelwert der Steigungen
$S_{dr}$	Verhältnis des Überschusses der wahren Fläche zur projizierten Fläche



(Quelle: Dokumentation Alicona-Measure-Suite)

Korrelationskoeffizient  $r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2)(\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2)}}$  mit  $x$  – 3-D-Rauheitsparameter  
 $y$  – 2-D-Texturparameter

## Untersuchung zur Korrelation zwischen geeigneten 2D- und 3D Bildmerkmalen

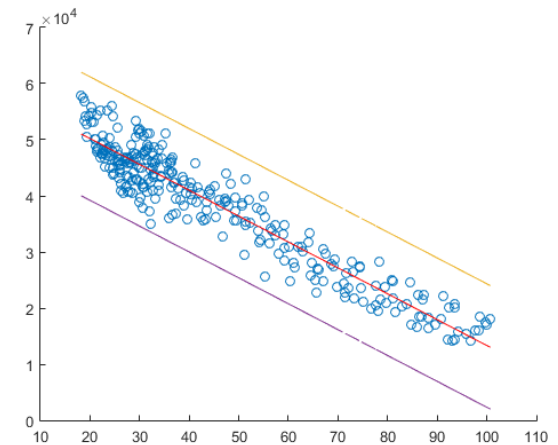
### Verteilung der Korrelationen:

stark ( $0,6 < r < 0,8$ ):	98 (33,0%) Parameterpaare
mittel ( $0,4 < r < 0,6$ ):	82 (27,6%) Parameterpaare
schwach ( $0,2 < r < 0,4$ ):	82 (27,6%) Parameterpaare
sehr schwach ( $0 < r < 0,2$ ):	35 (11,8%) Parameterpaare

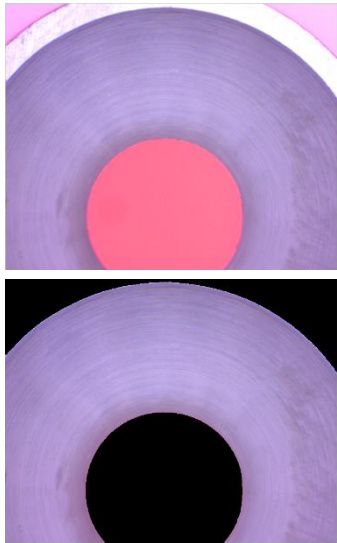
### Am stärksten korrelierende Parameter ( $0,6 < r < 0,8$ ):

3D-Merkmale:		2D-Merkmale:
$S_a$	Arithmetischer Mittelwert der Höhen der Fläche	ACMO
$S_q$	Quadratischer Mittelwert der Höhen der Fläche	GRAT
$S_v$	Größte Tiefe der Fläche	SFRQ
$S_p$	Größte Höhe der Fläche	
$S_{10z}$	Zehn-Punkt-Höhe der Fläche	
$S_{sc}$	mittlere Krümmung auf lokalen Gipfeln	
$S_{dq}$	Quadratischer Mittelwert der Steigungen	
$S_{dr}$	Verhältnis des Überschusses der wahren Fläche zur projizierten Fläche	

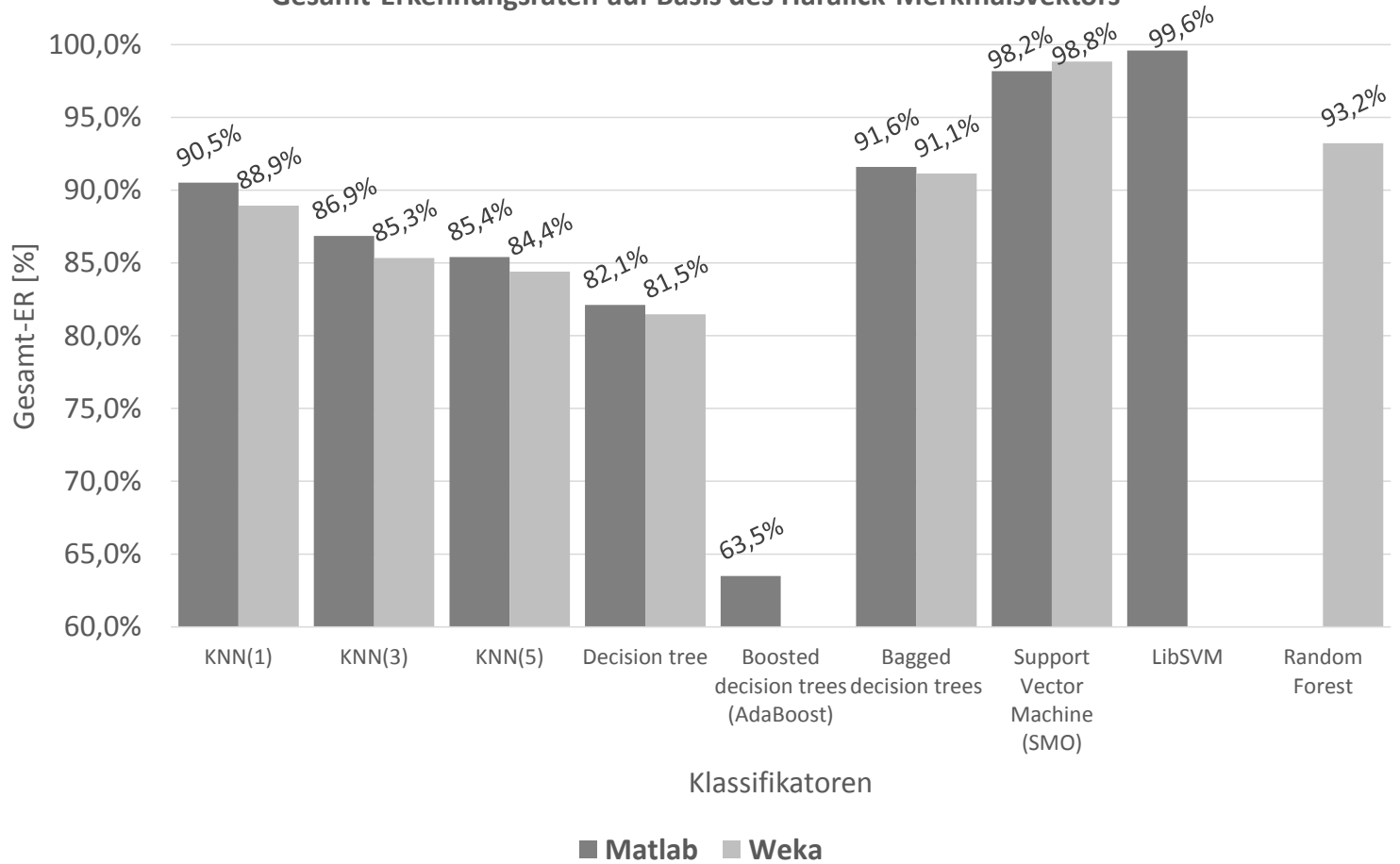
3D Alicona Raw/2D Ring Light,  
**Sp/ACMO (Part GS\_1)**



# Klassifikationsverfahren und deren Ergebnisse auf dem Applikationsbeispiel



Gesamt-Erkennungsraten auf Basis des Haralick-Merkmalvektors



## Mögliche Störeinflüsse

Störeinfluss	Lösungsansatz zur Beseitigung	Auftrittshäufigkeit
Staubanhaftung	- Ausblasen des Objektfeldes mit Druckluft	gering
Spananhaftung	- Optimierung der Spanleitgeometrie - Optimierung des KSS*-Strahls - Ausblasen des Objektfeldes mit Druckluft	mittel
KSS-Anhaftung	- Ausblasen des Objektfeldes mit Druckluft	hoch
Fremdlichteinfluss	- Einhausung des Objektfeldes - Erhöhung der Lichtintensität bei gleichzeitiger Verringerung von Integrationszeit bzw. Verkleinerung der Blendenöffnung	gering bis hoch (je nach Aufstellort der Maschine)
Vibrationen	- Dämpfung der Sensoreinheit - Nutzung kurzer Integrationszeiten	mittel

## Beleuchtungssteuerung

Konzept geht von einer festen Lichtstärke aus. Die Bildhelligkeit wird über die Integrationszeit der Kamera geregelt. (Vorteil: Reduktion von Komplexität und Fehleranfälligkeit durch Einsparung einer Schnittstelle)

- Technologie: **Windows-Workflow-Foundation-Dienst**
- Grundgedanke: Workflow-Dienst läuft als Server-Prozess (zentraler leistungsfähiger Auswerterechner), Host-Prozesse (kompakte Rechner mit Kamera) schicken die Bilddaten und Befehle über Netzwerk (TCP/IP) an den Auswerterechner (Interprozesskommunikation),
- Datenhaltung Klassifikatormodell und Indizes relevanter Merkmale als serialisierte Objekte, Kameraparameter als INI-Datei,
- Vorteile: flexible Anpassung durch das Workflowmodell (eigene Vorverarbeitungsfilter, andere Kameramodelle...) sowie räumliche Trennung von Bildaufnahme und Erkennung (Stichwort Anforderungen aus Industrie 4.0)



## 4. Zusammenfassung und Ausblick



1. Die Gewinnung von auswertbaren Bildern mittels kabelloser Bildsensoren in Werkzeugmaschinen wurde vorgestellt.
2. Aus den gewonnenen Bildern lassen sich geometrische Merkmale bestimmen sowie Oberflächenfehler automatisiert detektieren.
3. Die Umsetzung definierter Messzyklen erfolgt durch eine PC-basierte Steuer-Software mit NC-Schnittstelle zur Werkzeugmaschine.
4. Dies ermöglicht automatisierte, maschinenintegrierte und flexible Messzyklen ohne Ausspannen des Werkstücks.
5. Mithilfe derartiger Technologien können Assistenzsysteme für den Maschinenbau aufgebaut werden, welche den Übergang zu Industrie 4.0 erleichtern.



**GFE - Gesellschaft für Fertigungstechnik und  
Entwicklung Schmalkalden e.V.**



TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
ILMENAU



Günter-Köhler-Institut  
für Fügetechnik und Werkstoffprüfung GmbH

**-4H-JENA engineering GmbH**

Optische Inspektions- und Messtechnik aus Jena



**SAMAG**  
GROUP

**FKT®**

Danke für Ihre Aufmerksamkeit.

