

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Daniel Brabandt

**Qualitätssicherung von
textilen Kohlenstofffaser-Preforms
mittels optischer Messtechnik**

Band 216

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Daniel Brabandt

**Qualitätssicherung von
textilen Kohlenstofffaser-Preforms
mittels optischer Messtechnik**

Band 216

Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels optischer Messtechnik

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der Fakultät für Maschinenbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation
von

Dipl.-Ing. Daniel Friedrich Kurt Brabandt
aus Stuttgart

Tag der mündlichen Prüfung: 05. Juni 2018
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herrmann

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6070-6

ISSN 0724-4967

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza für die Übernahme des Hauptreferats. An dieser Stelle möchte ich mich für die Unterstützung und das entgegengebrachte Vertrauen bedanken. Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herrmann für die Übernahme des Korreferats sowie Prof. Dr.-Ing. Peter Gratzfeld für den Prüfungsvorsitz.

Den Mitarbeitern des Forschungsprojektes Technologiecluster Composites TC² sowie des Forschungsprojektes DFG SPP 1712 Intrinsische Hybridverbunde für Leichtbautragstrukturen danke ich für die gute Zusammenarbeit und den wissenschaftlichen Austausch.

Allen Kolleginnen und Kollegen am wbk danke ich für die gute Zusammenarbeit und das freundschaftliche Verhältnis. Besonders bedanken möchte ich mich bei meinen Kollegen Dr.-Ing. Adrian Kölmel, Dietrich Berger, Stefan Stockey und Dr.-Ing. Henning Wagner, die mich jederzeit mit wertvollen Diskussionen unterstützt haben. Ein großer Dank geht an die Studenten, die zum Gelingen dieser wissenschaftlichen Arbeit beigetragen haben.

Mein herzlicher Dank gilt auch Dr. phil. Johanna Gebrande, für ihr großes Verständnis, ihre Unterstützung und den Rückhalt, den sie mir gegeben hat. Abschließend möchte ich meinen größten Dank an meine Eltern und meine Schwester richten, die mich immer in allen Lagen unterstützen und motivieren. Nur dadurch waren die Arbeit und der Weg dorthin möglich.

Stuttgart, 24. März 2018

Daniel Brabandt

Abstract

Individual mobility is a major need of today's society. To enable this also in the future, a sustainable development is needed. Therefore especially the conservation of resources as well as the reduction of emissions is of high importance.

To reduce the energy consumption of cars, the reduction of the moving mass plays a significant role. The use of carbon fiber reinforced plastics offers high potential for mass reduction of cars. Currently the high production costs hinder the use of this group of material in the high volume production. This is due to the complex production process. Especially the form generating preforming process, which is prone to defects, has to be further developed and controlled. To increase the efficiency of production and secure the product quality, production integrated metrology systems are needed.

However, currently there are no existing solutions for an integrated metrology system for the high volume production of preforms. This is due to the challenging requirements of the limp and strongly reflecting semi-finished carbon textile which is the raw material of the preform.

Therefore, the target of the present work is to develop a measurement system for preform evaluation. Especially the geometry deviation is considered as a main characteristic. For the detection of geometry deviations a 3D measurement station based on the laser stripe sensor measurement principle is developed and realized. For the evaluation of the measurement uncertainty during the acquisition of the preform surface by the 3D measurement system, a specimen based methodology is presented. For the integration of metrology systems into the production process several strategies are shown. Apart from cycle time improvement by optimizing the system a multi-stage methodology is developed. The approach is based on the selection of regions of interest. For the fast evaluation of beforehand selected regions a 2D testing system is developed and realized.

Finally, the suitability of the 3D measurement system as well as the 2D testing system is shown in a validation. For this specially developed specimens with integrated geometrical deviations are used.

Hence, the mentioned shortcomings of a process integrated measurement of preforms can be at least partly solved by the presented 3D and 2D devices.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Inhaltsverzeichnis | I |
| Abkürzungen und Formelzeichen | IV |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Ausgangssituation und Motivation | 1 |
| 1.2 Zielsetzung | 3 |
| 1.3 Aufbau der Arbeit | 4 |
| 2 Grundlagen | 6 |
| 2.1 Fahrzeugkarosserie | 6 |
| 2.2 Faserverstärkte Kunststoffe | 6 |
| 2.2.1 Textile Halbzeuge | 7 |
| 2.2.2 Optische Eigenschaften von textilen Halbzeugen | 9 |
| 2.2.3 Herstellung endlosfaserverstärkter Kunststoffbauteile | 10 |
| 2.2.4 Defekte im Preform | 14 |
| 2.3 3D-Messtechnik | 17 |
| 2.3.1 Taktiles Koordinatenmessgerät | 18 |
| 2.3.2 2D-Laser-Lichtschnittverfahren | 18 |
| 2.3.3 3D-Photogrammetrie | 21 |
| 2.3.4 3D-Streifenprojektionsverfahren | 22 |
| 2.3.5 Computertomographie | 22 |
| 2.4 Messtechnikintegration | 23 |
| 2.5 Industrielle Bildverarbeitung | 24 |
| 2.5.1 Bildverarbeitungssystem | 24 |
| 2.5.2 2D-Bildverarbeitung | 25 |
| 2.5.3 3D-Bildverarbeitung | 28 |
| 2.6 Messunsicherheit | 29 |
| 2.6.1 Grundlagen | 29 |
| 2.6.2 Bestimmung der Messunsicherheit | 30 |
| 3 Stand der Forschung und Technik | 34 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.1 | Anforderungen an einen Messtechnikeinsatz | 34 |
| 3.2 | Messtechnik zur Bewertung von Preforms | 35 |
| 3.2.1 | 2D-Laser-Lichtschnitt | 36 |
| 3.2.2 | 3D-Photogrammetrie | 44 |
| 3.2.3 | Computertomographie | 45 |
| 3.2.4 | Wirbelstrom | 46 |
| 3.2.5 | Patente | 47 |
| 3.3 | 3D-Messtechnik in Industrieanwendungen | 47 |
| 3.3.1 | Systeme mit paralleler Kinematik | 47 |
| 3.3.2 | Systeme mit serieller Kinematik | 49 |
| 3.4 | Bewertung existierender Ansätze | 50 |
| 3.5 | Forschungsdefizite | 52 |
| 4 | Lösungsansatz | 53 |
| 5 | 3D-Messtation für Preforms | 55 |
| 5.1 | Anforderungen und Konzeption | 55 |
| 5.1.1 | Messtation | 55 |
| 5.1.2 | Datenverarbeitung | 65 |
| 5.2 | Realisierung | 71 |
| 5.2.1 | Messtation | 71 |
| 5.2.2 | Datenverarbeitung | 77 |
| 5.3 | Parameteroptimierung | 85 |
| 5.3.1 | Relevante Parameter | 85 |
| 5.3.2 | Faktorauswahl | 86 |
| 5.3.3 | Ergebnisse | 89 |
| 5.4 | Experimentelle Messunsicherheitsermittlung | 98 |
| 5.4.1 | Methode | 98 |
| 5.4.2 | Validierung | 104 |
| 6 | Strategien zur Inline-Integration | 111 |
| 6.1 | Integrationsmöglichkeiten der 3D-Messtechnik | 111 |
| 6.2 | Konzepte zur Taktzeitreduktion | 112 |

| | | |
|----------|--------------------------------------|---------------|
| 6.2.1 | Beschleunigung der Digitalisierung | 112 |
| 6.2.2 | Methoden zur Identifikation von ROI | 112 |
| 6.2.3 | Messkonzept unter Verwendung von ROI | 114 |
| 6.3 | 2D-Prüfung für Preforms | 115 |
| 6.3.1 | Anforderungen und Konzeption | 115 |
| 6.3.2 | Realisierung | 119 |
| 6.3.3 | Parameteroptimierung | 122 |
| 7 | Validierung | 128 |
| 7.1 | Prüfkörper | 128 |
| 7.1.1 | Kontur-Prüfkörper | 128 |
| 7.1.2 | Grundgeometrie-Prüfkörper | 129 |
| 7.2 | Material und Lagenaufbau | 132 |
| 7.3 | Validierung 3D-Messtation | 132 |
| 7.3.1 | Auswertestrategie | 133 |
| 7.3.2 | Kontur-Prüfkörper | 133 |
| 7.3.3 | Grundgeometrie-Prüfkörper | 136 |
| 7.4 | Validierung 2D-Prüfstation | 143 |
| 7.4.1 | Auswertestrategie | 143 |
| 7.4.2 | Grundgeometrie-Prüfkörper | 143 |
| 8 | Diskussion und Ausblick | 147 |
| 8.1 | Diskussion | 147 |
| 8.2 | Zukünftiger Handlungsbedarf | 149 |
| 9 | Zusammenfassung | 151 |
| | Literaturverzeichnis | I |
| | Abbildungsverzeichnis | XIX |
| | Tabellenverzeichnis | XXVIII |
| | Anhang | XXIX |

Abkürzungen und Formelzeichen

| Abkürzungen | Volltext |
|-----------------|--|
| a | Jahr |
| AIAG | Automotive Industry Action Group |
| ANOVA | Analysis of Variance |
| ARM | Average and Range Method |
| AVK | Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. |
| bit | binary digit |
| BLOB | Binary Large Object |
| BMUB | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit |
| bspw. | beispielsweise |
| bzw. | beziehungsweise |
| ca. | circa |
| CAD | Computer Aided Design |
| CAM | Computer Aided Manufacturing |
| CCD | Charge-Coupled Device |
| CFK | kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff |
| cm | Zentimeter |
| CMOS | Complementary Metal-Oxide-Semiconductor |
| CNC | Computerized Numerical Control |
| COG | Center Of Gravity |
| COP | Cloud Of Points |
| CO ₂ | Kohlenstoffdioxid |
| CSV | Comma-Separated Values |
| CT | Computertomographie |
| D | Defekt |
| DIN | Deutsches Institut für Normung |

| | |
|--------|---|
| E | Längenmessabweichung |
| EFVK | endlosfaserverstärkter Kunststoff |
| EN | Europäische Norm |
| engl. | Englisch |
| et al. | et alii (dt.: und andere) |
| EU | Europäische Union |
| e. V. | eingetragener Verein |
| evtl. | eventuell |
| FhG | Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. |
| FMS | Fiber Measurement System |
| FVK | Faserverbundkunststoff |
| g | Gramm |
| G-Code | NC Programmiersprache |
| GL | Gelege |
| GUM | Guide to the expression of Uncertainty in Measurement |
| GW | Gewebe |
| h | Stunde |
| HDR | High Dynamic Range |
| HTL | High Threshold Logic |
| ICP | Iterative Closest Points |
| IKTS | Fraunhofer-Institut für keramische Technologien und Systeme |
| ISO | International Organisation for Standardisation |
| IZFP | Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren |
| K | Kelvin |
| k | Kilo bzw. Tausend (auch K bei Filamenten) |
| km | Kilometer |
| KMG | Koordinatenmessgerät |
| kV | Kilovolt |

| | |
|-----------------|---|
| Laser | Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation |
| LCM | Liquid Composite Molding |
| LED | Light-Emitting Diod |
| LLS | Laser-Lichtschnittsystem |
| m | Meter |
| m ² | Quadratmeter |
| MAG | Multiaxial-Gelege |
| max. | maximal |
| Min. | Minute |
| min. | mindestens |
| mm | Millimeter |
| mm ² | Quadratmillimeter |
| mm ³ | Kubikmillimeter |
| MPE | Maximum Permissible Error |
| MSA | Measurement System Analysis |
| mV | Millivolt |
| mW | Milliwatt |
| μA | Mirkoampere |
| μm | Mikrometer |
| μs | Mikrosekunde |
| N/A | not applicable |
| NaN | Not-a-Number |
| NC | Numerical Control |
| nm | Nanometer |
| o | Orientierung |
| PAN | Polyacrylnitril |
| PC | Personal Computer |
| PKW | Personenkraftwagen |

| | |
|-----------|---|
| ply-Datei | Polygon File Format |
| px | Pixel |
| RangMap | Graustufenbild mit Höheninformation (2,5D) nicht kalibriert |
| RMSE | Root-Mean-Square Error |
| ROI | Region Of Interest |
| RS422 | Schnittstellennorm zur seriellen Datenübertragung |
| RTM | Resin Transfer Molding (dt. Harz-Injektionsverfahren) |
| s | Sekunde |
| SD | Längenmessabweichung (Mittelpunktabstand) |
| SPC | Statistical Process Control |
| stl-Datei | Standard Tessellation Language (Stereolithography) Datei |
| TCP | Tool Center Point |
| tex | Fadenfeinheit (lineare Dichte) [g/km] |
| txt-Datei | Text-Datei |
| u. a. | unter anderem |
| UD | Unidirektional (Fasern in einer Richtung) |
| V | Volt |
| v | Geschwindigkeit |
| v. a. | vor allem |
| VDA | Verband der Automobilindustrie e. V. |
| VDE | Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. |
| VDI | Verein Deutscher Ingenieure e.V. |
| vgl. | vergleiche |
| z. B. | zum Beispiel |
| ZfP | Zerstörungsfreie Prüfung |
| ZMap | Graustufenbild mit Höheninformation (2,5D) kalibriert |
| z. T. | zum Teil |
| 2D (3D) | 2-dimensional (3-dimensional) |

| | |
|---|-------------|
| % | Prozent |
| ∅ | Durchmesser |
| ° | Grad |

| Formelzeichen | Größe | Einheit |
|----------------|-------------------------------------|----------------------------|
| α | Längenausdehnungskoeffizient | [$\mu\text{m}/\text{K}$] |
| α | Kamerawinkel | [°] |
| β | Laserwinkel / Beleuchtungswinkel | [°] |
| γ | Seitenwangenwinkel | [°] |
| Δd_m | Höhenänderung | [mm] |
| Δ_x | Skalierungsfaktor x-Koordinate | - |
| Δ_y | Skalierungsfaktor y-Koordinate | - |
| Δy_m | Schwerpunktverschiebung | [mm] |
| ρ | Dichte | [g/cm^3] |
| φ | Triangulationswinkel | [°] |
| φ_{kr} | kritischer Scherwinkel | [°] |
| AV | Vergleichspräzision des Messsystems | - |
| B | Breite | [mm] |
| Bi | systematische Abweichung | [mm] |
| b | Bildweite | [mm] |
| c_g | Messsystempotential | - |
| c_{gk} | Fähigkeitsindex Messsystem | - |
| d_m | gemessene Entfernung | [mm] |
| EV | Wiederholpräzision des Messsystems | - |
| G_E | Eingabebild | - |
| g | Gegenstandsweite | [mm] |
| H | Höhe | [mm] |

| | | |
|-----------------|--|------------|
| K_1 und K_2 | Konstanten | - |
| k | Blendenzahl oder Erweiterungsfaktor | - |
| L | Länge | [mm] |
| M | Zeilenanzahl | - |
| m | Zeilenindex | - |
| N | Spaltenanzahl | - |
| n | Spaltenindex | - |
| Q_{MP} | Eignungskennwert Messprozess | [%] |
| $Q_{MP,max}$ | Eignungsgrenzwert Messprozess | [%] |
| Q_{MS} | Eignungskennwert Messsystem | [%] |
| $Q_{MS,max}$ | Eignungsgrenzwert Messsystem | [%] |
| R | Spannweite | [mm] |
| \bar{R} | mittlere Spannweite | [mm] |
| $\bar{\bar{R}}$ | Mittelwert der mittleren Spannweiten | [mm] |
| r | Radius | [mm] |
| r_{CT} | Radius (CT-Auswertung) | [mm] |
| $r_{CT(HZ)}$ | Radius (CT-Auswertung; mit textilem Halbzeug) | [mm] |
| r_{KMG} | Radius (KMG-Auswertung) | [mm] |
| $r_{LLS(HZ)}$ | Radius (LLS-Auswertung; mit textilem Halbzeug) | [mm] |
| s | Wiederholstandardabweichung | [mm] |
| Tol | Toleranzbreite | [mm] |
| $Tol_{MIN-UMS}$ | minimal mögliche Toleranz des Messsystems | [mm] |
| t | Belichtungszeit | [μ s] |
| U | Messunsicherheit | [mm] |
| u_{BI} | Anteil an der Standardunsicherheit aus systematischer Abweichung | [mm] |
| $u_{BI CT/KMG}$ | systematische Abweichung zwischen CT und KMG | [mm] |
| u_{CAL} | Kalibrierunsicherheit | [mm] |

| | | |
|--------------------|--|------|
| $u_{CAL\ KMG}$ | Kalibrierunsicherheit des KMG | [mm] |
| u_{EVR} | Anteil an der Standardunsicherheit aus der Streuung der Messwerte durch Wiederholmessungen am Normal | [mm] |
| $u_{EVR\ CT}$ | Streuung der CT-Messungen | [mm] |
| $u_{Material\ CT}$ | Materialeinfluss des textilen Halbzeugs bei der Messung mit dem CT | [mm] |
| U_{MP} | erweiterte Unsicherheit des Messprozesses | [mm] |
| u_{MS} | Kombinierte Messunsicherheit des Messsystems | [mm] |
| U_{MS} | erweiterte Unsicherheit des Messsystems | [mm] |
| u_{REST} | sonstige Einflüsse auf das Messsystem | [mm] |
| x | Messwert oder Koordinate | [mm] |
| x_m | CT Referenzwert des kalibrierten Werkstücks (ohne Halbzeug) | [mm] |
| \bar{x} | Mittelwert | [mm] |
| y | Koordinate | [mm] |
| \bar{y}_{CT} | Mittelwert der 25 Messungen des Werkstücks mit CT (ohne Halbzeug) | [mm] |
| $y_{i\ CT}$ | Messung i der 25 Messungen des Werkstücks mit CT (ohne Halbzeug) | [mm] |
| $y_{i\ KMG}$ | Messung i der 25 Messungen des Werkstücks mit KMG (ohne Halbzeug) | [mm] |
| $y_{i\ LLS}$ | Messung i der 25 Messungen des Werkstücks mit Laser-Lichtschnittsystem (mit Halbzeug) | [mm] |
| \bar{y}_{KMG} | Mittelwert der 25 Messungen des Werkstücks mit KMG (ohne Halbzeug) | [mm] |
| \bar{y}_{LLS} | Mittelwert der 25 Messungen des Werkstücks mit Laser-Lichtschnittsystem (mit Halbzeug) | [mm] |
| y_m | Position des Intensitätsschwerpunktes | [mm] |
| z | Koordinate | [mm] |
| $\%GRR$ | Wiederhol- und Vergleichspräzision | [%] |

1 Einleitung

Unabhängig vom Antriebskonzept von Fahrzeugen stellt der Leichtbau aufgrund der Gewichtsreduktion ein zentrales Element zur Energieeinsparung dar. Das größte Leichtbaupotential bieten dabei aktuell endlosfaserverstärkte Kunststoffe (Friedrich 2013). Einem flächendeckenden Einsatz im Automobilbau stehen allerdings die hohen Fertigungskosten entgegen (Eickenbusch & Krauss 2013). Ein wesentliches Element um diese zu senken ist die Entwicklung von Inline-Messtechnik, welche bereits im Fertigungsprozess eine frühestmögliche Bewertung der Qualität ermöglicht (Horoschenkoﬀ 2010; Cherif 2011).

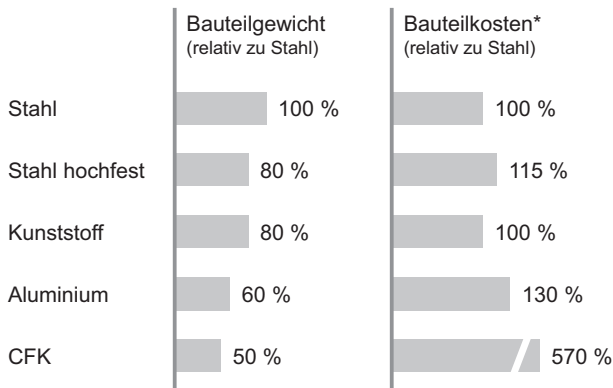
1.1 Ausgangssituation und Motivation

Die individuelle Mobilität ist ein zentrales Element und Bedürfnis der heutigen Gesellschaft. Um diese auch in Zukunft sicher zu stellen, ist eine nachhaltige Entwicklung erforderlich. Hierbei stehen die Ressourcenschonung sowie die Reduktion der Abgasemissionen im Fokus (Braess & Seiffert 2013). Gesetzliche Regulierungen sehen vor, die CO₂-Emissionen von PKW drastisch zu senken, die für 12 % der gesamten CO₂-Emissionen der EU verantwortlich sind (BMUB 2009). Bis zum Jahr 2020 ist es das Ziel, den CO₂-Ausstoß von Personenkraftwagen (PKW) auf durchschnittlich 95 g/km zu reduzieren (Europäische Union 2009).

Um dies zu erreichen, setzt die Automobilindustrie auf vielfältige Lösungsansätze zur Reduktion des Energieverbrauchs von PKW, der in direkter Verbindung zum CO₂-Ausstoß steht. Neben sparsameren Verbrennungsmotoren und neuen Antriebskonzepten ist insbesondere die Massereduktion der Automobile, unabhängig vom Antriebskonzept, ein zentrales Stellglied. So ermöglicht eine Massereduktion von 100 kg bereits eine CO₂-Einsparung von ca. 8,8-12,5 g/km (Drechsler 2010). Aufgrund von wachsenden Anforderungen hinsichtlich Sicherheit, Komfortfunktionen usw. war über die letzten Jahrzehnte eine stetige Gewichtszunahme der Modelle zu verzeichnen. Bei einem typischen Modell der Kompaktklasse werden ca. 36 % des Verbrauchs durch die Fahrzeugmasse beeinflusst (Neubauer & Rudow 2012). Besonders im Karosseriebau können durch Strategien des Stoffleichtbaus Gewichtseinsparungen realisiert werden (Friedrich 2013). Neben etablierten Leichtbauwerkstoffen wie

Aluminium, Magnesium und höchstfesten oder formgehärteten Stählen, gewinnt die Werkstoffgruppe der faserverstärkten Kunststoffe (FVK) auch im Automobilbau zunehmend an Bedeutung (Heuss et al. 2012). Aufgrund ihrer hervorragenden mechanischen Eigenschaften, bei vergleichsweise geringer Dichte, bieten besonders endlosfaserverstärkte Kunststoffe mit Kohlenstofffasern (Carbonfaserverstärkte Kunststoffe - CFK) für Strukturbauteile sowie crash-relevante Karosseriebauteile ein sehr hohes Leichtbaupotential. Hierbei handelt es sich meist um komplex geformte, mehrfach gekrümmte schalenförmige Bauteile (Horoschenkoff 2010).

Aktuell verhindern die im Vergleich zu anderen Werkstoffen zu hohen Kosten für CFK-Bauteile einen großflächigen Einsatz in der Automobilindustrie (Heuss et al. 2012) (vgl. Abbildung 1-1). Dies ist auf die hohen Kosten der Rohmaterialien sowie auf den geringen Automatisierungsgrad bei der Herstellung von CFK zurückzuführen (Lässig et al. 2012).



* Annahme: 60.000 Stück pro Jahr

Abbildung 1-1: Vergleich Bauteilgewicht zu Bauteilkosten nach (Heuss et al. 2012)

Um die Kosten für Leichtbau auf ein tolerierbares Maß zu senken sowie große Stückzahlen produzieren zu können, ist es erforderlich, die Prozessautomatisierung zu erhöhen und die damit verbundenen Zykluszeiten zu senken. Hier haben sich vor allem die Harzinjektionsverfahren, wie das Resin Transfer Moulding (RTM), etabliert. (Eickenbusch & Krauss 2014)

Großes Potential für Einsparungen bietet dabei die Automatisierung des Preforming-Prozesses, auf den ca. 50 % der Herstellungskosten von CFK-Bauteilen entfallen (Eickenbusch & Krauss 2013). Hierbei werden trockene textile Halbzeuge aus ihrer zweidimensionalen Form endkonturnah in die dreidimensionale Form des späteren Bauteils überführt. Die Qualität des Preforms hat signifikanten Einfluss auf die Belastbarkeit des Endbauteils. Aufgrund der biegeschlaffen Eigenschaften und des begrenzten Umformgrades der textilen Halbzeuge ist der Preforming-Prozess jedoch anfällig für die Ausbildung von Defekten (Fleischer & Wagner 2014). Um funktionskritische Defekte zu detektieren und die Wertschöpfung des Fertigungsprozesses zu maximieren (sowie Fehlerfolgekosten zu reduzieren), ist es daher erforderlich den Preform direkt im Herstellungsprozess vor weiteren Bearbeitungsschritten auf Defekte zu prüfen (Schmitt & Damm 2008). Die Verfügbarkeit geeigneter Methoden zur Qualitätssicherung kann daher als „Grundvoraussetzung für den breiten Einsatz von FVK-Strukturen im Fahrzeugbau“ gesehen werden (Eickenbusch & Krauss 2014). Eine Herausforderung stellt dabei die „Entwicklung von leistungsfähigen zerstörungsfreien und schnellen Prüfmethode sowie Qualitätssicherungssystemen für [...] Preforms“ dar (Cherif 2011, S. 5), welche u. a. die Konturgenauigkeit bewerten (Lehold 2011).

1.2 Zielsetzung

Die Kostensenkung für den Produktionsprozess von Preforms aus endlosfaserverstärkten Kunststoffen bildet die Grundlage für einen wirtschaftlichen Einsatz in der Serienfertigung von PKWs (Eickenbusch & Krauss 2013). Hierzu ist die Integration von Messtechnik in den Produktionsprozess erforderlich (Cherif 2011). Allerdings existieren aktuell kaum messtechnische Lösungen, um Kohlenstofffaser-Preforms für automobiler Bauteile inline zu erfassen und zu bewerten.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, geeignete Messverfahren für die Inline-Messung von Preforms, aus endlosfaserverstärktem trockenem textilem Kohlenstofffaserhalbzeug, zu identifizieren. Für die berührungslose Messung der Preform-Oberfläche stehen dabei optische 3D-Messverfahren im Fokus, welche eine berührungslose und vollflächige Digitalisierung der Oberfläche ermöglichen. Aufgrund der Zugänglichkeit des Messobjekts im Preforming-Prozess ist jedoch die optische Messung nicht zeitgleich zum Preforming mög-

lich. Daher ist für den Messprozess ein extra Takt erforderlich. Das Ziel ist folglich eine geeignete Messstation abzuleiten, welche die identifizierten 3D-Messverfahren bestmöglich integriert. Zur Reduktion der Messzeit wird der Ansatz um 2D-Messverfahren erweitert.

Aus der genannten Zielsetzung leiten sich folgende Forschungsfragen ab:

1. Mit welchen optischen Messverfahren können dreidimensionale Defekte in Kohlenstofffaser-Preforms erfasst werden?
2. Wie muss eine Messtechnik realisiert sein, um das ausgewählte optische Messverfahren bestmöglich zur Qualitätssicherung von Kohlenstofffaser-Preforms einzusetzen und wie kann die Güte der Messstation über die Ermittlung der Messunsicherheit bewertet werden?
3. Mit welchen Ansätzen lässt sich geeignete Messtechnik in die Prozesskette zur Preform-Fertigung integrieren und mit welchen weiteren Messverfahren kann die Messzeit reduziert werden?

Die genannten Forschungsfragen sollen im Folgenden bearbeitet werden und stellen somit die Grundlage für die Realisierung einer Inline-Messtechnik für Kohlenstofffaser-Preforms in der Serienproduktion von Karosseriebauteilen dar.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist wie in Abbildung 1-2 dargestellt gegliedert. Zur thematischen Einführung ist in Kapitel 1 die Ausgangssituation beschrieben und die Zielsetzung motiviert. Kapitel 2 beleuchtet die Grundlagen zu faserverstärkten Kunststoffen und deren Fertigungsverfahren sowie Grundlagen zur 3D-Messtechnik und der industriellen Bildverarbeitung. Darauf aufbauend werden in Kapitel 3 existierende Ansätze zur Bewertung von Preforms, relevante Ansätze zur Erfassung von Freiformflächen sowie Verfahren zur Bestimmung der Messunsicherheit vorgestellt. Daraus wird das Forschungsdefizit abgeleitet sowie in Kapitel 4 der Lösungsansatz formuliert. Den Kern der vorliegenden Arbeit bilden Kapitel 5 und 6. In Kapitel 5 wird die Entwicklung einer 3D-Messstation zur Bewertung von Kohlenstofffaser-Preforms durchgeführt. Kapitel 6 betrachtet Strategien zur Messtechnikintegration in die Produktion, schwerpunktmäßig über die Untersuchung eines 2D-Prüfsystems. Die entwickelten Systeme werden in Kapitel 7 anhand von Prüfkörpern, welche typische Geometrien beschreiben, vali-

diert. Die Arbeit schließt mit einer Bewertung der Ergebnisse, dem Ausblick und einer Zusammenfassung.

| Kapitel 1 Einleitung | |
|--|--|
| 1.1 Ausgangssituation und Motivation | 1.2 Zielsetzung |
| 1.3 Aufbau der Arbeit | |
| Kapitel 2 Grundlagen | |
| 2.1 Fahrzeugkarosserie | 2.2 Faserverstärkte Kunststoffe |
| 2.3 3D-Messtechnik | 2.4 Messtechnikintegration |
| 2.5 Industrielle Bildverarbeitung | 2.6 Messunsicherheit |
| Kapitel 3 Stand der Forschung und Technik | |
| 3.1 Anforderungen an einen Messtechnikeinsatz | 3.2 Messtechnik zur Bewertung von Preforms |
| 3.3 3D-Messtechnik in Industrienanwendungen | 3.4 Bewertung existierender Ansätze |
| 3.5 Forschungsdefizite | |
| Kapitel 4 Lösungsansatz | |
| Kapitel 5 3D-Messtation für Preforms | |
| 5.1 Anforderungen und Konzeption | 5.2 Realisierung |
| 5.3 Parameteroptimierung | 5.4 Experimentelle Messunsicherheitsermittlung |
| Kapitel 6 Strategien zur Inline-Integration | |
| 6.1 Integrationsmöglichkeiten der 3D-Messtechnik | 6.2 Konzepte zur Taktzeitreduktion |
| 6.3 2D-Prüfung für Preforms | |
| Kapitel 7 Validierung | |
| 7.1 Prüfkörper | 7.2 Material und Lagenaufbau |
| 7.3 Validierung 3D-Messtation | 7.4 Validierung 2D-Prüfstation |
| Kapitel 8 Diskussion und Ausblick | |
| 8.1 Diskussion | 8.2 Zukünftiger Handlungsbedarf |
| Kapitel 9 Zusammenfassung | |

Abbildung 1-2: Aufbau der Arbeit

2 Grundlagen

Im vorliegenden Kapitel werden Grundlagen zu Konstruktionsprinzipien auto-mobiler Karosserien, dem Aufbau und der Herstellung faserverstärkter Kunststoffe sowie Defekten in Preforms beschrieben. Daran anschließend werden grundlegende Verfahren zur dreidimensionalen Erfassung von Objekten mittels Messtechnik eingeführt sowie die verschiedenen Stufen einer Messtechnikintegration in den Produktionsprozess und Grundlagen der Bildverarbeitung vorgestellt. Abschließend werden Grundlagen und Verfahren zur Bestimmung der Messunsicherheit dargestellt.

2.1 Fahrzeugkarosserie

Die Fahrzeugkarosserie stellt mit ca. 40 % den größten Anteil am Fahrzeuggewicht (Friedrich 2013). Als Konstruktionsprinzipien kommen nach Friedrich (2013) im wesentlichen Rahmen- bzw. Gitterrohrrahmenbauweise, Schalenbauweise, Space-Frame-Bauweise und Monocoque-Bauweise zum Einsatz. Heute stellt die Schalenbauweise die am weitesten verbreitete Variante dar. Hierbei kommen vor allem Blechbauteile zum Einsatz, die vorwiegend aus Stahl gefertigt werden. Aber auch Aluminium und FVK kommen in Form von Blechbauweisen zum Einsatz. Blechbauteile liegen dabei häufig in Form von Blechhohlkörpern, Blechprofilen, Verstärkungen und Beplankungen vor und werden mittels Verbindungstechnik zu einer selbsttragenden Struktur verbunden. (Friedrich 2013)

Die Karosserie lässt sich grob in die Abschnitte Unterbau (Vorderwagen, Unterboden vorne und Unterboden hinten) und Aufbau (Zusammenbauten der Seitenwand, Dach, Rückwand und Anbauteile) untergliedern (Braess & Seiffert 2013). Modellabhängig unterscheiden sich die Dimensionen der verbauten Karosseriebauteile. Außer bei der Außenhaut der Seitenwand, handelt es sich, aufgrund der Segmentierung der Baugruppen in einzelne Bleche und Träger, vorwiegend um Bauteile < 2 m Länge. Beispielhafte Abmessungen verschiedener Fahrzeugklassen können Braess & Seiffert (2013) entnommen werden.

2.2 Faserverstärkte Kunststoffe

Faserverstärkte Kunststoffe (FVK) vereinen die Eigenschaften zweier Werkstoffe zu einem Verbundwerkstoff. Dabei werden die Eigenschaften einer einbettenden Kunststoff-Matrix durch das Einbringen von Fasern verstärkt. Im

Besonderen werden durch die eingebrachten Fasern die Festigkeit und Steifigkeit des Verbundwerkstoffs erhöht. Die Kunststoff-Matrix übernimmt, neben dem Schutz der Fasern, primär die Aufgabe der Formgebung, Lasteinleitung und Fixierung der Fasern. Für den strukturellen Leichtbau häufig eingesetzte Verstärkungsfasern sind Glasfasern, Kohlenstofffasern und Aramidfasern. (Henning & Moeller 2011; Neitzel, Mitschang & Breuer 2014)

Durch ihre vergleichsweise geringe Dichte bei gleichzeitig hoher Festigkeit und Steifigkeit weisen faserverstärkte Kunststoffe ein sehr hohes Leichtbaupotential auf. Aufgrund ihrer hohen mechanischen Belastbarkeit eignen sich im Besonderen kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) für den Einsatz in hochbelasteten Bauteilen. Faserverstärkungen können als Kurzfasern, Langfasern oder Endlosfasern vorliegen. Für hochbelastete Bauteile werden aufgrund der anisotropen Eigenschaften von Fasern vorzugsweise gerichtete Endlosfaserverstärkungen eingesetzt, die häufig als textile Halbzeuge, wie Gewebe oder Gelege, vorliegen. Textile Halbzeuge können je nach Herstellungsprozess entweder trocken oder mit Matrixwerkstoff vorimprägniert (Prepreg) verwendet werden. Um die gewünschten mechanischen Eigenschaften zu erzielen, werden die textilen Halbzeuge unter alternierenden Faserorientierungen in mehreren Lagen gestapelt. Zur Erzeugung des Verbunds werden die textilen Verstärkungsfasern vollständig mit einer duroplastischen oder thermoplastischen Matrix imprägniert. Für hochbelastete Bauteile werden aufgrund besserer Verarbeitungseigenschaften und sehr guten mechanischen Eigenschaften bevorzugt Duroplaste (z. B. Epoxidharz) eingesetzt. (Ehrenstein 2006; Henning & Moeller 2011; AVK 2014)

2.2.1 Textile Halbzeuge

Die mechanischen Eigenschaften eines Verbundwerkstoffes werden wesentlich durch die Verstärkungsfasern beeinflusst. Zur Herstellung von Kohlenstofffasern werden organische Materialien wie beispielsweise Polyacrylnitril (PAN) carbonisiert. Zum Schutz der Fasern sowie als Haftvermittler zur Matrix wird im Spinnprozess die sogenannte Schlichte auf die Fasern aufgebracht. Die einzelnen Faserfilamente (Durchmesser ca. 5 bis 10 μm (Cherif 2011)) werden im Anschluss zu Rovings zusammengefasst, die aus unterschiedlich vielen Filamenten bestehen können. Die Anzahl der Filamente in einem Roving wird durch die K-Anzahl beschrieben (1 K = 1 Kilo = 1.000 Filamente) sowie durch

die längenbezogene Masse in tex (1 tex = 1 g/1000 m). Für die weitere textiltechnische Verarbeitung werden die Rovings auf Spulen aufgewickelt und bspw. zu Gewebe oder Gelege weiterverarbeitet. (DIN 60905 Teil 1; Henning & Moeller 2011)

Textile Halbzeuge, auch Faserhalbzeuge genannt, sind flächige, biegeschlaffe Gebilde. Für den Einsatz in Verbundwerkstoffen werden vor allem Gewebe, Gelege und Geflechte verwendet, die als technische Fasern Rovings verwenden und somit Endlosfaserverstärkungen darstellen. (AVK 2014)

Gewebe sind nach DIN 60000 „Flächengebilde, die mittels Fachbildung aus sich rechtwinklig verkreuzenden Fäden zweier Fadensysteme, Kette und Schuss, hergestellt sind“. Fäden in Fertigungsrichtung werden Kettfäden genannt, querverlaufende Fäden sind Schussfäden. Als Bindung wird die Art der Verschränkung von Kett- und Schussfäden bezeichnet. Häufig vorkommende Bindungstypen sind Leinwand-, Köper- und Atlasbindung (vgl. Abbildung 2-1). Sie beeinflussen aufgrund der Umlenkung der Fasern die Eigenschaften des Gewebes (z.B. Festigkeit und Drapierbarkeit). (Cherif 2011; AVK 2014)

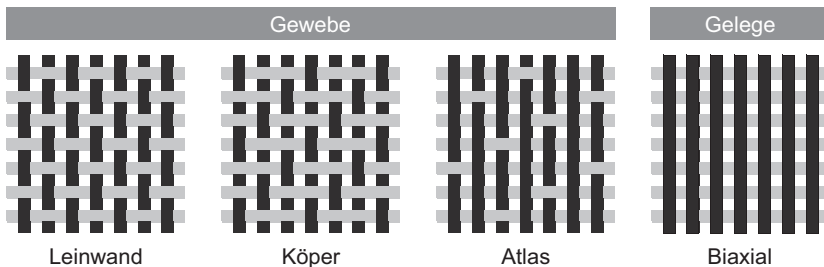


Abbildung 2-1: Aufbau Gewebe und Gelege nach (AVK 2014)

Ein Gelege ist nach DIN EN 13473-1 ein „Flächengebilde, das aus einer oder mehreren parallelen gestreckten Fadenlagen besteht, das unterschiedlich orientiert ist, unterschiedliche Fadendichten der Einzellagen vorweist und in das Faservliese, Folien, Schäume oder andere Materialien integriert werden kann“. Die Fixierung der verschiedenen Lagen erfolgt durch ein Maschensystem oder ein chemisches Bindemittel. Die Fasern liegen dabei ohne Auslenkung aus der Ebene des Textils plan vor (vgl. Abbildung 2-1), weshalb die mechanischen Eigenschaften meist besser sind als die von Geweben. Gelege werden mit

verschieden vorliegenden Orientierungen als Unidirektional- (UD), Biaxial- sowie als Multiaxial-Gelege (MAG) hergestellt. Die Winklorientierung der Fasern wird in Abhängigkeit der Produktionsrichtung definiert (vgl. Abbildung 2-2). (AVK 2014)

In Abhängigkeit von der Breite des verarbeiteten Rovings werden Gewebe und Gelege in verschiedenen Flächengewichten produziert (Ehrenstein 2006). Die Angabe erfolgt in g/m^2 .

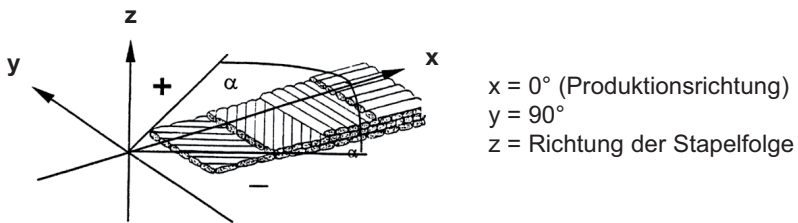


Abbildung 2-2: Definition der Faserorientierung am Beispiel Gelege nach (DIN EN 13473-1)

2.2.2 Optische Eigenschaften von textilen Halbzeugen

Bei der Messung von Bauteilen können die optischen Eigenschaften der Oberfläche eine bedeutende Rolle spielen. Textile Halbzeuge aus Kohlenstofffasern weisen Besonderheiten hinsichtlich ihrer optischen Eigenschaften auf. Diese sind wesentlich durch die hohe Reflektivität der Kohlenstofffasern und durch eine Abhängigkeit von der Polarisation des Lichts geprägt. Sie unterscheiden sich abhängig vom Materialtyp, der Bindungsstruktur sowie vom Einfallswinkel des Lichts (Schmitt, Orth & Nachtmann 2006). Verlaufen die Fasern parallel zum einfallenden Licht, tritt eine spiegelnde Reflexion auf (Schmitt, Orth & Nachtmann 2006). Aufgrund der runden Faserbündel innerhalb des Rovings wird das Licht kreisrund reflektiert (Eitzinger 2013). Durch die ungleichmäßige Oberflächenstruktur kann es zu lokal inhomogenen Reflexionen kommen. So können starke, abgeschwächte oder fehlende Reflexionen auftreten (Schmitt, Orth & Niggemann 2007). Aufgrund des Höhenunterschieds innerhalb des Halbzeugs kann es bei Beleuchtung mit gerichtetem Licht auch zu einer Selbstverschattung kommen, sodass nur ein Teil des eingestrahnten

Lichts in Betrachterrichtung auf die Oberfläche trifft (Grosch 2009; Schmitt, Orth & Niggemann 2007).

Neben der Ausrichtung der Fasern beeinflussen die Geometrie der Rovings sowie der Aufbau des jeweiligen Gewebes oder Geleges das optische Erscheinungsbild. So können bspw. bei einem vernähten Biaxial-Gelege neben den Rovings und den Nähfäden der oberen Lage teilweise auch die darunter liegenden Rovings der zweiten Faserorientierung sichtbar sein (Schmitt et al. 2009). Konfokale Aufnahmen eines vernähten Biaxial-Geleges zeigen die damit sichtbaren Höhenunterschiede (vgl. Abbildung 2-3 (Biaxial-Gelege) und Abbildung 0-1 (Gewebe) im Anhang).

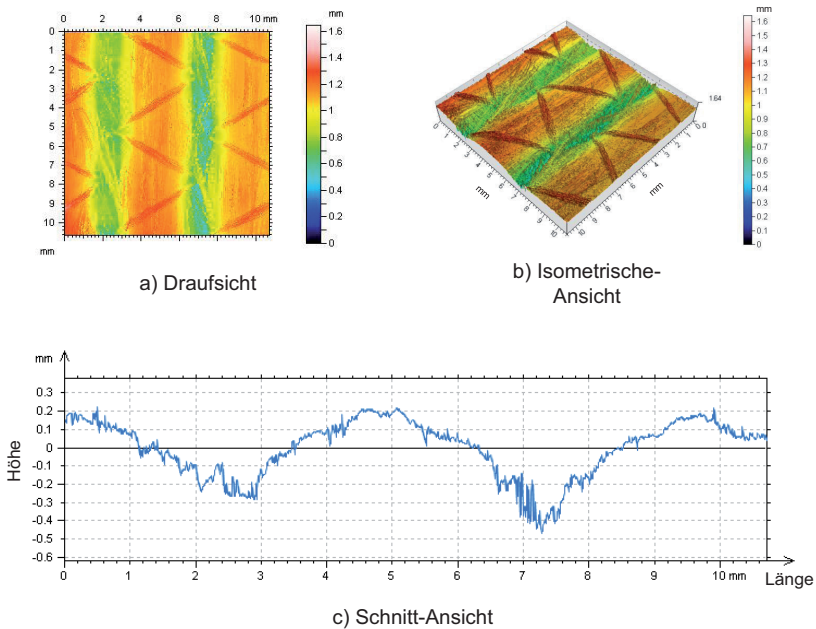


Abbildung 2-3: Konfokale Aufnahme eines vernähten Biaxial-Geleges

2.2.3 Herstellung endlosfaserverstärkter Kunststoffbauteile

Für die Herstellung endlosfaserverstärkter Kunststoffbauteile (EFVK) stehen verschiedene Verfahren zur Auswahl. Die Wahl richtet sich dabei nach Kriterien, wie beispielsweise Bauteilgröße und -komplexität, mechanische Anforder-

rungen, geforderter Faservolumengehalt, verwendete Materialien, geforderte (Oberflächen-) Qualität, Stückzahl und Kosten (Cherif 2011; Neitzel, Mitschang & Breuer 2014). Die Herstellung von EVFK mit Duromer-Matrix lässt sich prinzipiell in drei Klassen untergliedern: Handlaminier-Technologie, Prepreg-Technologie und Flüssigharz-Imprägnierverfahren (LCM-Technologie) (Henning & Moeller 2011). Die Verfahren unterscheiden sich primär darin, wie die Infiltration der Fasern realisiert wird.

Beim Handlaminieren werden trockene textile Halbzeuge manuell mit einer Duromer-Matrix imprägniert. Dieser Prozess wird lagenweise in einem einschaligen Werkzeug durchgeführt. Anschließend erfolgt die Aushärtung bei Raumtemperatur und bei erhöhter Temperatur zur Verbesserung der Bauteileigenschaften. Aufgrund des hohen Zeitbedarfs (bis zu 24 h) sowie des hohen manuellen Aufwands eignet sich das Verfahren nur für kleine Stückzahlen. Weitere Nachteile sind der geringe und schwankende Faservolumengehalt, Porosität sowie Schwankungen der Faserausrichtung. (Henning & Moeller 2011)

Die Prepreg-Technologie (engl. pre impregnated = vorgetränkt) verwendet textiles Halbzeug, welches in einem vorgeschalteten Prozess mit dem Matrixwerkstoff imprägniert wurde. Das Prepreg-Material wird analog zum vorgegebenen Lagenaufbau manuell oder automatisiert in einem einschaligen Werkzeug abgelegt. Die Aushärtung erfolgt anschließend unter Temperaturbeaufschlagung (z. B. Autoklav). Das Verfahren gilt als Referenz hinsichtlich der erzielbaren Laminatqualität und findet daher häufig im Luftfahrtbereich Anwendung. Nachteile des Verfahrens liegen in den hohen Materialkosten, der begrenzten Lagerfähigkeit sowie Einschränkungen bei der Formgebung. (Henning & Moeller 2011)

Bei den Flüssigharz-Imprägnierverfahren (LCM-Technologie) (Liquid Composite Moulding) wird ein trockener Preform („Vorformling“ aus mehreren Lagen textilem Halbzeug) in eine Werkzeugform eingelegt. Prozessabhängig wird im Anschluss über dem Aufbau entweder eine Vakuumfolie oder eine zweite Werkzeugform angebracht. Der Preform wird dann in einem Fließprozess mit einer Duromer-Matrix imprägniert. Hierbei wird je nach Prozess zwischen einer Infusion (Unterdruck) oder einer Injektion (Überdruck) unterschieden. Bei Harzinjektionsverfahren wird der Preform in eine mehrteilige Form eingelegt.

Nach dem Schließen des Werkzeugs wird dann das Harz unter Überdruck injiziert. Die Aushärtung erfolgt in Abhängigkeit vom gewählten Matrixsystem unterschiedlich schnell. Die Vorteile des Harzinjektionsverfahrens liegen u. a. in der Eignung für hochkomplexe Bauteile, der sehr guten Oberflächenqualität (bis Class A), der hohen Maßhaltigkeit und der Eignung für sehr große Stückzahlen (bis zu 50.000 Stück/a) aufgrund kurzer Prozesszeiten (ca. 5 Min.) (Neitzel, Mitschang & Breuer 2014). Ein bekannter Vertreter des Harzinjektionsverfahrens, mit welchem Faservolumenanteile bis ca. 60 % realisiert werden können, ist das Resin Transfer Moulding (RTM)-Verfahren. (Henning & Moeller 2011; Neitzel, Mitschang & Breuer 2014)

2.2.3.1 RTM-Prozesskette

Die Bauteilherstellung mittels des RTM-Verfahrens (Resin Transfer Molding) beinhaltet neben dem zentralen Harzinjektionsverfahren weitere wesentliche Prozessschritte (vgl. Abbildung 2-4). Für die Realisierung großer Stückzahlen, wie sie für die automobiler Serienfertigung erforderlich sind, ist eine automatisierte Verkettung aller Schritte notwendig (Lässig et al. 2012).

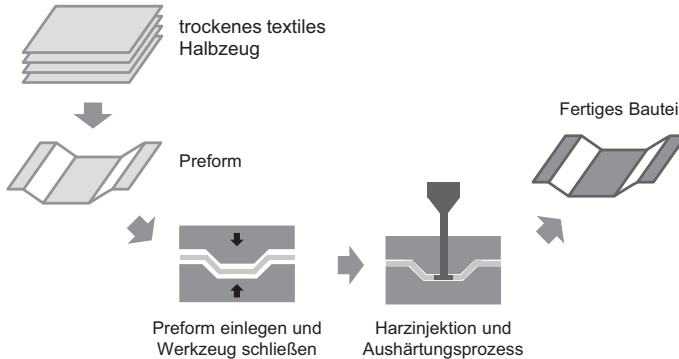


Abbildung 2-4: Resin Transfer Molding Prozesskette nach (Neitzel, Mitschang & Breuer 2014)

Ausgangspunkt des Prozesses bilden trockene textile Halbzeuge, die als Rollenware bereitgestellt werden. Die abgerollten Halbzeuge werden mit vollautomatischen Cutter-Systemen zugeschnitten. Die daraus resultierenden 2D-Zuschnitte werden abgestapelt und entsprechend der verschiedenen Faserorientierungen magaziniert. In einem für die Qualität zentralen Folgeprozess

wird der Preform aus mehreren Lagen des zugeschnittenen textilen Halbzeugs gebildet (vgl. Kapitel 2.2.3.2). Dieser trockene Preform wird nun dem eigentlichen RTM-Prozess zugeführt. Dieser besteht aus vier Prozessschritten (AVK 2014): Einlegen des Preform, Harzinjektion, Aushärten unter Nachdruck und Entformen. Gefolgt wird der Prozess meist von einer mechanischen Nachbearbeitung des Bauteils. (Flemming, Ziegmann & Roth 1999; Hufenbach 2007; Henning & Moeller 2011; AVK 2014; Neitzel, Mitschang & Breuer 2014)

2.2.3.2 Preform und Preforming

Als Preform wird ein endkonturnahes, trockenes Fasergebilde bezeichnet (Henning & Moeller 2011). Er soll sowohl die äußere dreidimensionale Struktur des späteren FVK-Bauteils, als auch die innere Verstärkungsstruktur abbilden, welche für die mechanische Belastbarkeit verantwortlich ist (AVK 2014).

Der Prozess zur Preform-Herstellung, das sog. Preforming, stellt eine zentrale technologische Herausforderung in der RTM-Prozesskette dar (Henning & Moeller 2011). Bei der Herstellung wird zwischen direktem und sequentiellem Preforming unterschieden (Henning & Moeller 2011; Neitzel, Mitschang & Breuer 2014). Beim direkten Preforming wird bspw. durch Flechtprozesse aus einzelnen Rovings direkt eine 3D-Geometrie erstellt. Das sequentielle Preforming (Differentialbauweise) basiert hingegen auf textilen Halbzeugen, welche im Ausgangsstadium zweidimensional vorliegen. Hierbei ist im Besonderen die Binder-Umform-Technik zu nennen (Cherif 2011). Die einzelnen biegeschlaffen Zuschnitte werden dabei zu einem Lagenaufbau gestapelt, umgeformt und durch einen Binder (z. B. Thermoplast) endkonturnah zueinander fixiert. Die Umformung der Halbzeuge, Drapierung genannt, kann dabei durch Presspreformen mittels Stempelsegmenten oder Diaphragma-Verfahren realisiert werden (Henning & Moeller 2011; Neitzel, Mitschang & Breuer 2014). Ergebnis des Prefoming-Prozesses ist eine 2D-Verstärkungsstruktur welche eine 3D-Geometrie besitzt (Cherif 2011).

Bei der Verarbeitung trockener Halbzeuge in Preforms kann es zur Ausbildung von Defekten wie bspw. Materialverzug, Ondulation (Wellenbildung) und lokal divergierender Kompaktierung kommen (Henning & Moeller 2011). Um diese Effekte zu reduzieren, ist eine geeignete Drapierstrategie zu wählen (Wagner et al. 2013). Es kann dabei prinzipiell unterschieden werden, ob Einzellagen

sequentiell umgeformt werden oder der gesamte Lagenaufbau (Stack) in einem Schritt. Das Drapieren von Einzellagen lässt eine geringere Ausbildung von Defekten erwarten. Für eine wirtschaftliche Herstellung ist diese Strategie jedoch aus Taktzeitgründen nicht realisierbar. Um komplexe Geometrien abformen zu können, ist es teils erforderlich den Preform für die Drapierung in mehrere geometrieangepasste Zuschnitte (Patches) oder Subpreforms zu segmentieren und diese in einem Folgeschritt zu einem Gesamt-Preform zu assemblieren. Die Gestaltung des Überlappungsbereichs zwischen Subpreforms beeinflusst die Festigkeit des gesamten Preforms (Do & Lee 2011).

2.2.4 Defekte im Preform

Textile Halbzeuge sind aufgrund ihrer Struktur anfällig für die Ausbildung von Defekten durch die Einwirkung externer Kräfte. Hierzu gehören u. a. Strukturdeformation, Schiebefestigkeit, Biegefestigkeit, Drapierbarkeit und Handhabbarkeit der Halbzeuge (Cherif 2011). Die Drapierbarkeit stellt dabei einen zentralen Einflussfaktor für die Ausbildung von Defekten dar und ist als die sphärische Verformbarkeit von textilen Strukturen ohne Faltenbildung definiert (Cherif 2011; AVK 2014).

Der hierarchische Aufbau von Verbundwerkstoffen führt zu einer Untergliederung in die Mikro- ($< 0,1$ mm), Meso- (0,1 mm – 1,0 cm) und Makroskala (> 1 cm) (Cherif 2011). Defekte können analog zu diesem hierarchischen Aufbau ebenfalls auf unterschiedlichen Ebenen auftreten. So kann es in der Mikroebene zu Faserbrüchen kommen. Auf der Mesoebene kommt es zur Ausbildung von verschiedenen Anomalien im textilen Halbzeug (z. B. Überschreiten des möglichen Scherwinkels). Diese Anomalien führen zu Bauteildefekten auf der Makroebene (z. B. Faltenwurf). (Cherif 2011)

Bei der Herstellung von Preforms ist für eine Inline-Bewertung von Defekten, aus Gründen der erforderlichen Messzeit zur Erfassung sehr kleiner Strukturen, primär eine Betrachtung im Bereich der Meso- und Makroebene zielführend. Des Weiteren ist eine Unterscheidung nach lokal oder global auftretenden Defekten möglich, sowie nach Defekten, welche sich zweidimensional oder dreidimensional ausbilden. Im Folgenden wird eine Übersicht über wesentliche, fertigungsinduzierte Defektarten im Preforming gegeben (vgl. Abbil-

dung 2-5) (Khan, Potter & Wisnom 2006; Potter 2009; Göttinger, Weimer & Miene 2009; Lightfoot, Wisnom & Potter 2013c).



Abbildung 2-5: Defekte im Preform

2.2.4.1 Faserfehlorientierung

Abweichungen in der Faserorientierung (vgl. Abbildung 2-5) können global, wie auch lokal auftreten (Matthews 1999). Globale Abweichungen zur vorgegebenen Orientierung der Fasern treten primär durch eine falsche Ablage des Halbzeugs auf. Lokale Abweichungen sind meist durch drapierbedingten Verzug verursacht und können verschiedene Formen annehmen. Ein Beispiel hierfür stellen Gaps dar, bei welchen sich Rovings in der Ebene verschoben haben. Hierdurch entsteht eine Lücke, welche die darunter liegende Halbzeuglage frei gibt (Miene 2010).

Eine Abweichung der Faserorientierung kann zu einer signifikanten Reduktion der mechanischen Kennwerte des FVK-Bauteils führen (Ehrenstein 2006; Neitzel, Mitschang & Breuer 2014). So kann bspw. bei einem UD-Laminat eine Abweichung der Faserorientierung um 5° bereits eine Reduktion der Zugfestigkeit um ca. 50 % bewirken (Neitzel, Mitschang & Breuer 2014). Des Weiteren können sich durch eine Änderung der Faserdichte die Verarbeitungseigenschaften wie bspw. die Permeabilität bei der Imprägnierung beeinflussen (Ermanni 2007).

2.2.4.2 Falten

Falten gelten als die am häufigsten auftretenden Defekte bei der Formgebung von textilen Halbzeugen (Boisse et al. 2011). Sie sind definiert als „eine kurze senkrechte Aufwerfung, die über die gesamte Breite verlaufen kann“ (DIN 65673, S. 17) (vgl. Abbildung 2-5). Beim Drapieren von komplexen mehrfachgekrümmten Geometrien kommt es häufig zu einer starken Scherung des

Halbzeugs. Die Überschreitung des kritischen Scherwinkels bei der Umformung führt zur Ausbildung von Falten, da eine weitere planare Bewegung der Rovings zueinander nicht mehr möglich ist. In einem Preform können einzelne oder mehrere Lagen, sowie der gesamte Stack eine Falte ausbilden. (Mohammed, Lekakou & Bader 2000; Hayman, Berggreen & Pettersson 2007; Vanclooster, Lomov & Verpoest 2009; Boisse et al. 2011; Lightfoot, Wisnom & Potter 2013c; Lightfoot, Wisnom & Potter 2013a)

Falten im Laminat führen zu einer signifikanten Herabsetzung der mechanischen Eigenschaften. Grund dafür sind mehrere Faktoren. Falten führen zu lokalen Abweichungen der Faserorientierung, Lufteinschlüssen, Harzanreicherungen und trockenen Stellen. Somit sind sie lokale Schwächezonen, welche Ursprung für Risse und Delaminationen durch Kerbwirkung sein können (Kaiser & Karbhari 2001; Günnewig 2010). Hierdurch kann die Festigkeit um bis zu 40 % reduziert werden (Bloom, Wang & Potter 2013). Lokale Aufdickungen durch Falten können ebenfalls dazu führen, dass das Einlegen in eine Kavität sowie das Schließen zur Infiltration nicht möglich ist.

2.2.4.3 Faserwelligkeit

Lokale Faserwelligkeit des Halbzeugs kann sowohl in der Ebene als auch in Dickenrichtung des Laminats auftreten (engl.: in-plane/out-of-plane-waviness). Die in der Literatur häufig genannten Ondulationen sind dabei s-förmige Abweichungen des Faserverlaufs in z-Richtung (vgl. Abbildung 2-5). Faserwelligkeit kann durch Ablegefehler sowie geometriebedingt in Radien entstehen. Bei Verschiebung von Rovings kann es als Folge zu Harzanreicherungen kommen. (Erb 2004; Khan, Potter & Wisnom 2006; Lightfoot, Wisnom & Potter 2013c; Lightfoot, Wisnom & Potter 2013b)

Ondulierte Fasern können im Vergleich zu gestreckten Fasern nicht die volle Last aufnehmen. Daraus entstehende lokale Spannungserhöhungen in der Matrix können zu weiteren Defekten führen (Flemming & Roth 2003; Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V. 2009).

2.2.4.4 Bridging

An konkaven Radien von Formwerkzeugen besteht die Gefahr, dass abhängig von Geometrie und Drapierverfahren die Bauteilzone nicht exakt bis in den Radius abgeformt wird. Es kommt zu einem Überspannen (engl. bridging) des

textilen Halbzeugs (vgl. Abbildung 2-5). Besonders bei der Umformung eines Stacks kann es hier zu einer starken Ausbildung von Bridging kommen. (Lightfoot, Wisnom & Potter 2013c)

Bridging-Effekte können zur Bildung von Falten, Beschädigung der Fasern beim Schließen von Formwerkzeugen sowie zu Harzanreicherungen führen. Harzanreicherungen können interne Spannungen verursachen und zu Rissbildung führen (AVK 2014).

2.2.4.5 Kompaktierung

An konvexen Radien von Formwerkzeugen besteht bei der Drapierung die Möglichkeit einer zu starken Kompaktierung des Stacks (vgl. Abbildung 2-5). Dies führt zu einem veränderten, lokal erhöhten Faservolumengehalt, was die Infiltrierbarkeit negativ beeinflusst und bei einer festen Kavität zur Ausbildung einer Harzanreicherung führt. (Potter et al. 2008; Potter 2009)

2.2.4.6 Fremdkörper

Zusätzlich zu den in Abbildung 2-5 dargestellten Defekten besteht im Produktionsprozess die Möglichkeit, dass sich ein Fremdkörper (bspw. Papier, Fasern) auf dem textilen Halbzeug befindet und in den Preform eingeschlossen wird (Miene 2010).

2.3 3D-Messtechnik

Die dreidimensionale Erfassung von komplex geformten schalenförmigen Bauteilen ist eine wichtige Aufgabe der Qualitätssicherung im Bereich des Karosseriebaus. Die Wahl des Messverfahrens ist dabei im Wesentlichen von der Messaufgabe und den daraus abgeleiteten Anforderungen geprägt. Eine grobe Untergliederung kann hierbei in taktile, optische sowie durchstrahlende Verfahren getroffen werden. Dabei nehmen die optischen Verfahren eine bedeutende und weiterhin wachsende Rolle ein (Sackewitz & Lerchenmüller 2010). Aufgrund der mangelnden mechanischen Stabilität von Preforms wird im Bereich der FVK-Produktion in verschiedene Ansätze ebenfalls mit optischer 3D-Messtechnik gearbeitet.

Im Folgenden wird eine Übersicht über wesentliche Messprinzipien und Verfahren im Bereich der dreidimensionalen Messtechnik (3D-Messtechnik) gegeben.

2.3.1 Taktiles Koordinatenmessgerät

Das Prinzip des Koordinatenmessgeräts (KMG) beruht auf der Erfassung einer großen Zahl von Messpunkten, welche in einem 3D-Koordinatensystem dargestellt werden. Auf den Messpunkten basierend werden Geometrieelemente von funktionsrelevanten Zonen (z. B. Bohrung) einer Werkstückgeometrie berechnet und im Anschluss ein Abgleich der Ist-Gestalt mit der Soll-Gestalt durchgeführt. Der Soll/Ist-Vergleich basiert meistens auf einem vorliegenden CAD-Modell des Bauteils. (Keferstein & Marxer 2015)

KMGs sind in verschiedenen Bauarten verfügbar (Ständer-, Ausleger-, Portal-, Brückenbauart). Hierbei sind jeweils drei zueinander senkrechte Achsen in x-, y- und z-Richtung angeordnet (kartesisches Koordinatensystem). Nach Keferstein & Marxer (2015) gehören zu den wesentlichen Komponenten eines KMG u. a.: Gerätebasis, Tisch zur Werkstückaufnahme, Antrieb und Führung, Maßverkörperung, Ablesesystem, Messkopfsystem, Steuereinheit und Auswerterechner. Als Messkopf werden meist taktile und z. T. auch optische Systeme eingesetzt. Taktile Systeme eignen sich im Bereich FVK aufgrund der berührenden Antastung nur für ausgehärtete Bauteile. (DIN EN ISO 10360-1; Pfeifer & Schmitt 2010; Weckenmann & Gawande 2012; Keferstein & Marxer 2015)

2.3.2 2D-Laser-Lichtschnittverfahren

Beim 2D-Laser-Lichtschnittverfahren handelt es sich um ein optisch messendes Verfahren basierend auf dem Triangulationsprinzip. Hierbei wird von einem Laser (meist Halbleiter-/Dioden-Laser) ein Laserstrahl emittiert, welcher über eine Aufweitungsoptik (z. B. mittels Powell-Linse für eine homogene Lichtverteilung über die Linienbreite) als Linie mit möglichst homogener Intensitätsverteilung auf der Werkstückoberfläche fokussiert wird. Auf einem ortsauflösendem Flächensensor (CCD oder CMOS), mit vorgeschalteter Abbildungsoptik und Bandpassfilter, wird die durch den Laser entstehende Lichtlinie aufgenommen (vgl. Abbildung 2-6). (Beyerer, Puente León & Frese 2012)

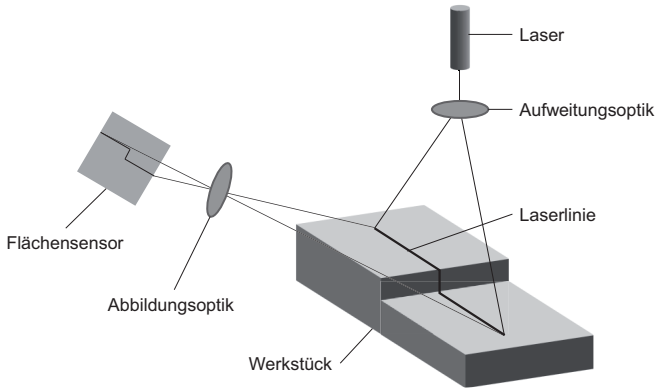


Abbildung 2-6: 2D-Laser-Lichtschnittprinzip nach (Fraunhofer FhG 2002)

Der Winkel, welcher dabei zwischen Laser und Sensor entsteht, wird Triangulationswinkel genannt. Er beeinflusst den Messbereich sowie die Auflösung des Systems. Ein großer Triangulationswinkel bewirkt eine hohe Auflösung bei einem kleinen Höhenmessbereich. Ein kleiner Triangulationswinkel bewirkt im Gegensatz dazu eine reduzierte Auflösung bei einem vergrößerten Höhenmessbereich. Die laterale Auflösung des Systems ist abhängig von der Breite der projizierten Laserslinie sowie der lateralen Auflösung des Sensors. Abbildung 2-7 gibt eine Übersicht über typische Geometrieordnungen von Laser und Sensor. (Koch 1998; Fraunhofer FhG 2003)

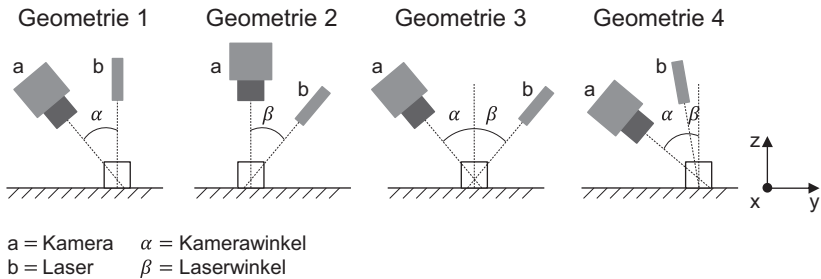


Abbildung 2-7: Typische Geometrieordnungen zur Triangulation (Scanrichtung entlang der y-Achse) nach (AT - Automation Technology GmbH 2014)

Durch die bekannten geometrischen Gegebenheiten zwischen Laser und Sensor ist bei einem kalibrierten System eine Messung der Werkstückoberfläche

möglich. Hierfür ist je nach eingesetztem Kalibrierverfahren eine detaillierte Kenntnis des optischen Systems erforderlich. Approximiert kann nach Koch (1998) eine Höhenänderung Δd_m der gemessenen Entfernung d_m mittels der Ähnlichkeit von Objektdreieck und Bilddreieck über die Schwerpunktverschiebung Δy_m des Signals auf dem Sensor berechnet werden (vgl. Formel 2-1 und Abbildung 2-8). Die Auflösung lässt sich durch eine softwareseitige Detektion der Laserlinie im Subpixelbereich weiter erhöhen.

$$\Delta d_m = \frac{\Delta y_m}{b} \sin(\alpha) \quad \text{Formel 2-1}$$

mit: $b = \text{Bildweite}$

$g = \text{Gegenstandsweite}$

Das Ergebnis einer Messung sind x-, y-, z-Koordinaten, welche entlang der Laserlinie das Werkstück als 2D-Höhenprofil repräsentieren. Bei einer konstanten Aufnahmefrequenz und einer konstanten Relativbewegung zwischen der Messeinheit und dem Bauteil entstehen mehrere 2D-Höhenprofile, welche sich zu einem 3D-Abbild der Oberfläche zusammenführen lassen. Ergebnis ist eine Punktwolke (engl. Cloud Of Points (COP)) welche die Ist-Geometrie abbildet. (Fraunhofer FhG 2003; Forest 2016)

Zur Erfassung von großen Bauteilen können 2D-Laser-Lichtschnittsysteme mittels einer Kinematik (z. B. KMG; Roboter; x-, y-, z-Kinematik) über die Bauteiloberfläche geführt werden.

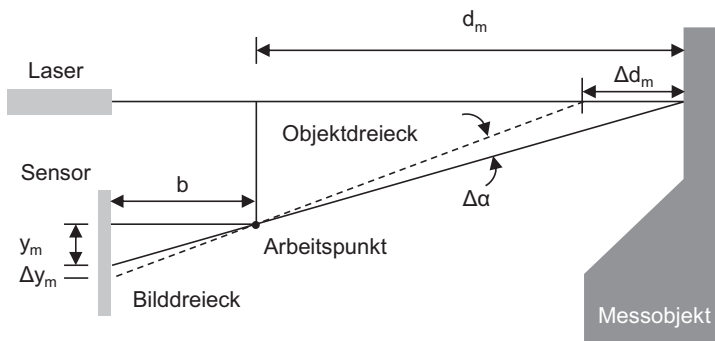


Abbildung 2-8: Berechnung der Höhendifferenz beim Triangulationsverfahren nach (Koch 1998)

Nach Pfeifer & Schmitt (2010) ist die Messunsicherheit von Laser-Lichtschnittsystemen wesentlich von den Oberflächeneigenschaften des Werkstücks abhängig. Dabei sind ideal diffus streuende Oberflächen am besten geeignet (Koch 1998). Bei ihnen wird die Intensitätsverteilung der Laserlinie als Gaussverteilung auf dem Sensor abgebildet. Hierdurch ist eine ideale Bestimmung des Maximums möglich (z. B. nach dem Center Of Gravity (COG) Verfahren (AT - Automation Technology GmbH 2014)). Die genaue Ermittlung der realen Position der Linie auf der Werkstückoberfläche führt zu einer sehr geringen Messunsicherheit. Jedoch existiert ein erheblicher Einfluss auf die Messunsicherheit bei stark spiegelnden Oberflächen und wechselnden Oberflächeneigenschaften (Koch 1998). In Abhängigkeit vom zu messenden Objekt und der Geometrie des Triangulationssystems kann es besonders an steilen Flanken zu Abschattungseffekten des Sende- oder Reflexionsstrahls kommen, welche die Messung negativ beeinflussen (vgl. Abbildung 2-9) (Koch 1998). (Koch 1998; Pfeifer & Schmitt 2010; Beyerer, Puente León & Frese 2012; Sackewitz 2014; Keferstein & Marxer 2015)

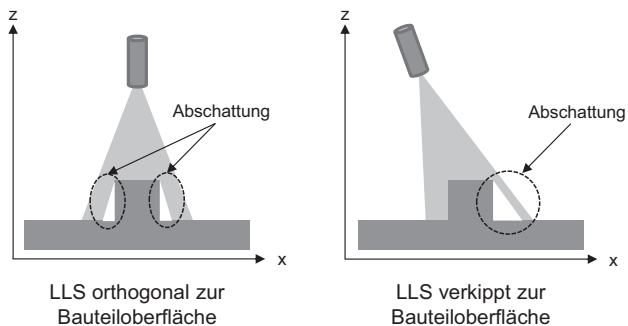


Abbildung 2-9: Abschattungseffekte bei 2D-Laser-Lichtschnittsystemen nach (Brabandt & Lanza 2015)

2.3.3 3D-Photogrammetrie

Das Verfahren der Photogrammetrie beruht auf dem Messprinzip der Triangulation und wird vorwiegend für große Werkstücke eingesetzt. Dabei wird das Werkstück aus mindestens zwei Richtungen mittels Kameras digitalisiert (Steriomessung). Es können dabei entweder mehrere Kameras zum Einsatz

kommen oder eine Kamera, welche aus verschiedenen Richtungen Aufnahmen erstellt. Die Erhöhung der Anzahl an Beobachtungsrichtungen reduziert die Messabweichung und vermindert Abschattungen. Die Berechnung der 3D-Koordinaten des Werkstücks erfolgt auf Basis der 2D-Bilder der einzelnen Perspektiven. Hierbei werden die Abbildungsstrahlen zum Schnitt gebracht. Zur Unterstützung der Messung kommen meist Markierungen auf dem Werkstück zum Einsatz. Anstelle von Markern wird häufig strukturiertes Licht (z. B. Kreuzgitter) verwendet, um ein Muster auf das Werkstück zu projizieren. Dabei wird die Messabweichung von der Reflektivität der Werkstückoberfläche beeinflusst. (Pfeifer & Schmitt 2010; Keferstein & Marxer 2015)

2.3.4 3D-Streifenprojektionsverfahren

Beim Verfahren der Streifenprojektion (Projected-Fringe-Technik) wird mittels eines Projektors ein periodisches Streifenmuster auf das Werkstück projiziert und mittels mindestens einer hierzu relativ verschieden positionierten Kamera beobachtet. Das Verfahren wird häufig zur Digitalisierung von Freiformflächen eingesetzt. Das äquidistante Streifenmuster wird aufgrund der 3D-Geometrie des Werkstücks verformt und bildet einzelne Lichtschnitte. Mittels der Triangulation kann hieraus für jeden Bildpunkt eine 3D-Koordinate errechnet werden und ergibt eine Punktwolke des Werkstücks. Voraussetzung ist, dass Lage und Orientierung der Kamera sowie des Projektors bekannt sind. Zur Erhöhung der Genauigkeit kommen häufig dynamische Verfahren zum Einsatz (vgl. Phase-Shift-Methode). (Pfeifer & Schmitt 2010; Beyerer, Puente León & Frese 2012; Keferstein & Marxer 2015)

Die Messunsicherheit des Systems wird wesentlich durch die Reflektivität der Werkstückoberfläche beeinflusst, da auf sehr dunklen oder stark spiegelnden Oberflächen eine Messung des projizierten Streifenmusters erschwert ist. In der Praxis wird daher häufig ein Spray eingesetzt, welches auf der Oberfläche einen diffus reflektierenden Film erzeugt. (Keferstein & Marxer 2015)

2.3.5 Computertomographie

Systeme zur industriellen Computertomographie (CT) finden vermehrt den Einsatz im Bereich der dimensionellen Messtechnik. Neben der Volumenprüfung von Bauteilen hinsichtlich Fehlstellen (z. B. Lunker, Porosität), bietet sie die Möglichkeit von außen nicht zugängliche Bereiche messtechnisch zu er-

fassen. Des Weiteren ist das berührungslos arbeitende Verfahren für weiche und deformierbare Werkstücke geeignet.

Die Computertomographie beruht auf dem Prinzip der Röntgentechnik. Das Werkstück wird von einem kegelförmigen Röntgenstrahl durchstrahlt. Dabei findet eine materialspezifische Absorption der Strahlung statt. Ein Flächendetektor erfasst die Intensität der Röntgenstrahlung nach der Durchstrahlung. Zur Erzeugung einer dreidimensionalen Aufnahme steht das Werkstück auf einem Drehtisch und wird schrittweise für die einzelnen Projektionen (2D-Durchstrahlungsbilder) gedreht. Um das Werkstück exakt zu positionieren, ist der Drehtisch auf einer hochgenauen x-, y-, z-Positioniereinheit angebracht (Manipulator). Die Aufspannung auf dem Drehtisch muss sicherstellen, dass das Werkstück während der Aufnahme nicht verrutscht, um Bewegungsartefakte zu verhindern. Die einzelnen Projektionen werden im Anschluss über eine Rekonstruktion zu einem 3D-Modell (Voxel-Modell) umgerechnet. (Sackewitz 2010; Pfeifer & Schmitt 2010; Weckenmann & Gawande 2012; Schmitt & Isenberg 2014; Keferstein & Marxer 2015)

2.4 Messtechnikintegration

Die Integration von Fertigungsmesstechnik in der Produktion kann in unterschiedlichem Maße realisiert werden. So bietet ein hoher Integrationsgrad den Vorteil einer sinkenden Reaktionszeit für mögliche Regelungen. Man unterscheidet dabei zwischen Fertigungsferner-, Fertigungsnaher-, Inline-, Maschinenintegrierter- und In-Prozess-Messtechnik (aufgeführt nach zunehmendem Integrationsgrad). (Schmitt & Damm 2008)

Als fertigungsfern gelten Messungen, welche in einem Messraum durchgeführt werden. Fertigungsnaher Messungen werden in Nähe der Fertigungslinie durchgeführt. Messungen, welche innerhalb der Linie im Fertigungstakt realisiert werden, werden Inline genannt. Findet die Messung in den Nebenzeiten oder während des Fertigungsprozesses statt, handelt es sich um eine maschinenintegrierte Messung. Den höchsten Integrationsgrad bildet die In-Prozess Messung, welche während des Prozesses durchgeführt wird. (Schmitt & Damm 2008)

Durch die Verwendung einer fertigungsnahen Messung (z. B. Inline) besteht die Möglichkeit einer schnellen 100 %-Prüfung. Die 100 %-Prüfung ist definiert

als „Qualitätsprüfung an allen Einheiten eines Prüfloses“ (DIN 55 350 Teil 17, S. 3), wobei als Qualitätsprüfung die Feststellung „inwieweit eine Einheit die Qualitätsforderungen erfüllt“ verstanden wird (DIN 55 350 Teil 17, S. 3). Bei einer 100 %-Prüfung werden nur ausgewählte Merkmale betrachtet.

Im Produktionsprozess werden die gewonnenen Messdaten zur Statistischen Prozesskontrolle (SPC) genutzt. Die hierdurch gewonnenen Informationen können für die Prozessregelung verwendet werden. Des Weiteren können Ausschusskosten reduziert werden, da die weitere Prozessierung von defekten Zwischenerzeugnissen in der Produktion verhindert wird. (Schmitt & Damm 2008)

2.5 Industrielle Bildverarbeitung

Um die hohen Qualitätsanforderungen in der Produktion sicherzustellen, werden immer öfter 100 %-Prüfungen eingesetzt, die mittels automatisierter Systeme durchgeführt werden. Häufig wird hierzu optische Messtechnik wie z. B. 2D-Kamerasysteme oder 2D-Laser-Lichtschnittsysteme eingesetzt. Der Einsatz von automatisierten Prüfsystemen wird durch die Verwendung von Methoden der industriellen Bildverarbeitung (engl. machine vision) zur Auswertung der generierten Daten ermöglicht. Ziel ist es, den initial großen Datenumfang einer Bildszene über Bildverarbeitungsschritte soweit zu reduzieren, dass zuletzt eine Messung/Sortierung ermöglicht wird. (Kefenstein & Marxer 2015)

2.5.1 Bildverarbeitungssystem

In Abbildung 2-10 ist nach VDI/VDE 2632 Blatt 1 eine Übersicht über die Struktur eines Bildverarbeitungssystems in der industriellen Fertigung dargestellt. Wesentliche Bestandteile sind dabei das Beleuchtungssystem, die Kamertechnik mit Optik, Bildsensor und Digitalisierung, der Industrie-PC mit Bildverarbeitungssoftware sowie die Kommunikation mit der Fertigungssteuerung (Demant, Streicher-Abel & Springhoff 2011).

Störeinflüsse auf die einzelnen Komponenten des Bildverarbeitungssystems können die Güte der generierten Daten negativ beeinflussen. Sie sind daher möglichst zu minimieren bzw. bei der Wahl der Komponenten des Systems zu berücksichtigen (z. B. Wellenlänge des Umgebungslichts, Staub, Vibration).

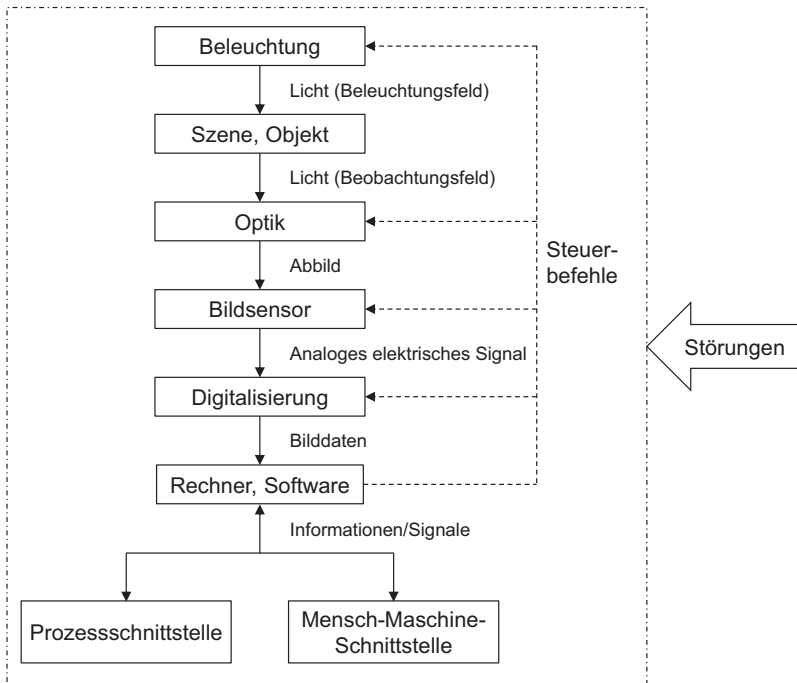


Abbildung 2-10: Struktur eines Bildverarbeitungssystems nach (VDI/VDE 2632 Blatt 1)

2.5.2 2D-Bildverarbeitung

Im Folgenden wird eine Übersicht über Grundlagen der 2D-Bildverarbeitung gegeben. Hierzu zählen u. a. der Aufbau digitaler Bilder wie auch verschiedene Filteroperationen.

2.5.2.1 Digitale Bilder

Ein Bild wird definiert als ein 2D-Abbild einer Szene, wobei die Szene ein Ausschnitt der dreidimensionalen Umwelt darstellt (VDI/VDE 2632 Blatt 1; Steinmüller 2008). Ein digitales Bild besteht aus einem zweidimensionalen Punktfeld bestehend aus Pixeln (px) bzw. Bildpunkten (x, y) . Der Wert des Bildpunkts beschreibt die lokale Bestrahlungsstärke (z. B. dargestellt als Grauwert). In der Bildverarbeitung wird zur Darstellung die Matrixnotation, beste-

hend aus Zeilenindex m und Spaltenindex n , genutzt. Das Bild wird durch eine $M \times N$ -Matrix beschrieben (vgl. Abbildung 2-11). (Jähne 2012)

Bei der Bildakquisition ist das Ziel ein Bild mit maximalem Informationsgehalt zu generieren, welches eine einfache Weiterverarbeitung mittels Algorithmen ermöglicht.

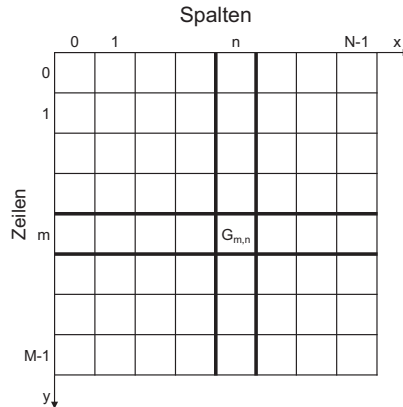


Abbildung 2-11: Darstellung eines 2D-Digitalbildes nach (Jähne 2012)

2.5.2.2 Bildvorverarbeitung

Die Bildvorverarbeitung hat das Ziel der Bildverbesserung, um nachfolgende Verarbeitungsschritte zu erleichtern. Hierbei kommen verschiedene Arten von Filtern zum Einsatz, welche sich primär auf den Kontrast auswirken. Pixelbasierte Verfahren erzielen durch Vergrößerung des Abstandes zwischen den Grauwerten eine Kontrastverbesserung (z. B. Grauwertspreizung). Eine andere Methode ist die lineare Filterung. Hierbei wird die Nachbarschaft eines Pixels bewertet und für die Veränderung des Pixels herangezogen. Diese Verfahren werden v. a. zur Glättung und Rauschunterdrückung eingesetzt und basieren auf einer Faltung (Konvolution) zwischen dem Bild und einem Faltungskern. Faltungskerne sind meist symmetrisch mit einer ungeraden Anzahl an Zeilen und Spalten aufgebaut. Wesentliche Faltungskerne sind Mittelwertfilter und Gaußfilter. Des Weiteren existieren nichtlineare Filterungen wie der Medianfilter. (Tönnies 2005; Erhardt 2008; Steinmüller 2008)

2.5.2.3 Segmentierung

Die Segmentierung hat das Ziel ein Bild (Eingabebild $G_E = g_E(m, n)$) in sinnvolle Teile aufzugliedern, um im Anschluss Objekte zu extrahieren. Hierzu werden Pixel nach bestimmten Kriterien gruppiert, wofür verschiedene Verfahren existieren. Als Kriterium können beispielsweise gleiche Grauwerte dienen. Diese Eigenschaft wird als Homogenitätskriterium bezeichnet.

Ein Verfahren zur Segmentierung ist die punktorientierte Segmentierung. Ausschlaggebend für die Entscheidung, ob ein Pixel dem Segment angehört, ist die Eigenschaft des Pixels (z. B. Grauwert). Hierzu kann eine Schwellwertbildung (Thresholding) durchgeführt werden. Diese kann entweder mittels eines festgelegten Schwellwerts T oder über ein histogrammbasiertes Verfahren durchgeführt werden. Ergebnis ist ein Binärbild, bei welchem das Segment bspw. durch 1 und der Hintergrund durch 0 repräsentiert werden. (Tönnies 2005; Erhardt 2008; Steinmüller 2008)

2.5.2.4 Morphologische Operationen

Morphologische Operatoren sind Nachbarschaftsoperationen für Binärbilder, welche die Form von Objekten modifizieren, indem sie Pixel zu einem Objekt hinzufügen (Dilatation) oder aus einem Objekt löschen (Erosion). Es handelt sich dabei um eine binäre Faltung. Durch den Einsatz einer Erosion wird das Objekt größer und kleine Lücken (z. B. fehlende Messwerte) werden geschlossen. Ebenso werden Konturen glatter (vgl. Abbildung 2-12).

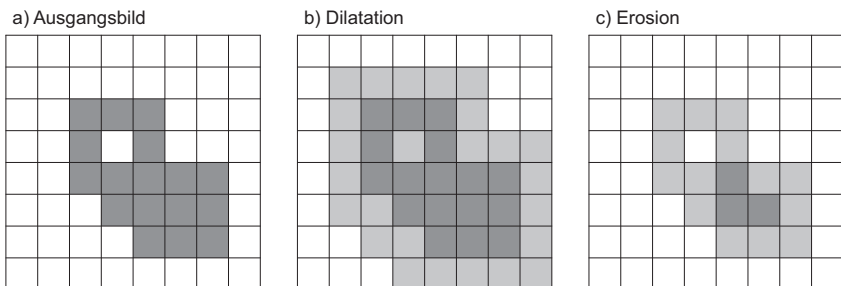


Abbildung 2-12: Morphologische Operationen nach (Tönnies 2005; Jähne 2012)

Die Dilatation bewirkt, dass einzelne Punkte (z. B. Artefakte), welche kleiner als die Filtermaske sind, verschwinden und kleine Brücken zwischen Objekten aufgebrochen werden (vgl. Abbildung 2-12). Die Filtermaske wird auch Strukturelement genannt und kann unterschiedliche Formen annehmen. (Tönnies 2005; Steinmüller 2008; Jähne 2012)

Morphologische Operatoren können in der Anwendung zu zusammengesetzten Operatoren wie bspw. Opening und Closing kombiniert werden.

2.5.2.5 Merkmale von Objekten und Klassifikation

Im Anschluss an die Segmentierung liegen Segmente im Bild vor, für welche nun Merkmale berechnet werden können. Bei der Merkmalsextraktion werden meist geometrische Merkmale (Formparameter) wie bspw. Länge, Breite, Schwerpunkt, Fläche, Umfang oder Umhüllende berechnet. Mittels der berechneten Merkmale findet eine Zuordnung der Segmente zu Objekten statt. Die Parameter können zur Klassifikation der Objekte und so bspw. zur Qualitätsbewertung herangezogen werden. Die Klassifikation kann z. B. mittels statistischer Verfahren erfolgen. (Erhardt 2008; Steinmüller 2008; Jähne 2012; Keferstein & Marxer 2015)

Die Schritte der Merkmalsextraktion und Klassifikation werden häufig unter dem Begriff der BLOB-Analyse (Binary Large Object) zusammengefasst (Moeslund 2012).

2.5.3 3D-Bildverarbeitung

3D-Bilddaten bieten den Vorteil einer Tiefeninformation, deren Art der Gewinnung sich in Abhängigkeit der Messtechnik unterscheiden kann (vgl. Kapitel 2.3). Die Rohdaten liegen meist in einer Range Map (2,5D-Bild) als pixelbasiertes Höhenbild vor. Hierbei stellen die Grauwerte im Bild die Höhenwerte als 16 bit Integer Wert dar. Zur Rauschunterdrückung können die Bilddaten mit den in Kapitel 2.5.2 vorgestellten Verfahren bearbeitet werden. Für eine weitere Analyse müssen die Daten einer Kalibrierung unterzogen werden. Das Ergebnis der 3D-Rekonstruktion ist eine Punktwolke (engl. Cloud Of Points (COP) oder Point Cloud). Die Daten können dabei strukturiert oder unstrukturiert vorliegen. Im Fall einer strukturierten COP liegen die Daten in einer $M \times N \times 3$ Matrix vor. Die Matrix beschreibt somit für jeden Punkt eine x-, y-

und z-Koordinate. Die x-, y- und z-Koordinaten werden in drei separate $M \times N$ Matrizen gespeichert. Werden für die Digitalisierung zwei oder mehr Quellen verwendet, müssen die 3D-Daten über einen Registrierungsprozess in einem Koordinatensystem zusammengeführt werden. (Forest 2011; Forest 2016)

Zur Auswertung von COPs werden häufig Soll/Ist-Vergleiche eingesetzt. Hierbei wird die COP mit einem CAD-Modell abgeglichen. Dabei kommen u. a. Iterative Closest Points (ICP) Algorithmen zum Einsatz.

Für die Auswertung von 3D-Daten kommen häufig die Methoden der 2D-Bildverarbeitung zum Einsatz (Demant, Streicher-Abel & Springhoff 2011). Dazu werden COPs orthogonal in die x-, y-Ebene projiziert und als 2D-Bild gespeichert. Man spricht dabei von einer ZMap oder Depth Map, welche in einer 2D-Funktion $z(x, y)$ dargestellt werden kann. Um die 3D-Position rekonstruieren zu können, werden die festen Skalierungsfaktoren Δ_x und Δ_y im Bild gespeichert. (Forest 2011; Smith 2012; Castellani & Bartoli 2012; Forest 2016)

2.6 Messunsicherheit

Im folgenden Kapitel werden Grundlagen zum Thema Messunsicherheit sowie Vorgehen zur Bestimmung der Messunsicherheit eingeführt.

2.6.1 Grundlagen

Ziel bei der Messung einer Messgröße ist es, den wahren Wert zu ermitteln. Aufgrund vielfältiger Einflüsse auf den Messprozess (u. a. Mensch, Messobjekt, Methode, Mitwelt, Messgerät) sind bei jeder Messung Messabweichungen zu erwarten, welche durch die Messunsicherheit abgeschätzt werden (Pfeifer & Schmitt 2010). Hierbei ist zwischen systematischen und zufälligen Messabweichungen zu unterscheiden, welche möglichst auf ein Minimum zu reduzieren sind. Die Messunsicherheit ist definiert als ein „dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden könnte“ (DIN V ENV 13005, S. 8; JCGM 2008). Die Messunsicherheit beschreibt dabei nicht direkt die Messabweichung. Vielmehr beschreibt sie einen Bereich, der als größer oder gleich der tatsächlichen Messabweichung angenommen wird (DIN 1319-1). Messunsicherheit und Messabweichung beziehen sich nicht auf ein Messgerät, sondern auf die jeweilige Messung (Pfeifer & Schmitt 2010).

Bei Messungen an Werkstücken mit geringen Fertigungstoleranzen (Spezifikationsbereich) ist die Kenntnis der Messunsicherheit U von Bedeutung, um auch bei Messungen nahe an den Spezifikationsgrenzen eindeutig bewerten zu können, ob es sich um ein Gut-Teil handelt (vgl. Konformitätsbereich in Abbildung 2-13).

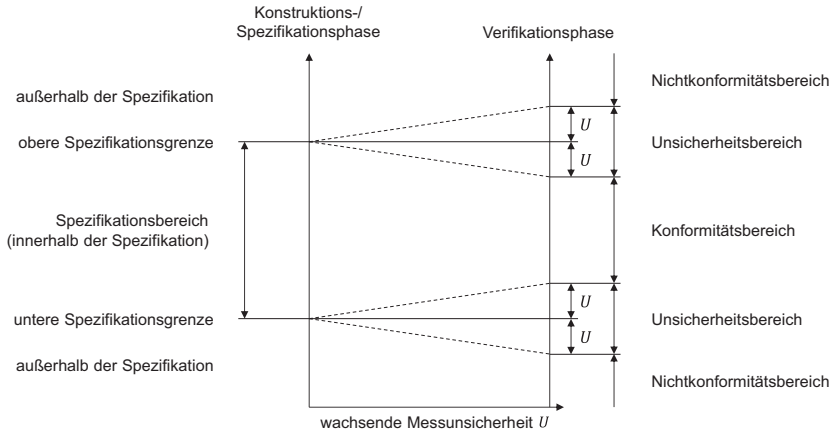


Abbildung 2-13: Messunsicherheit nach (DIN EN ISO 14253-1)

2.6.2 Bestimmung der Messunsicherheit

Messmittel müssen bezüglich ihrer Eignung für den jeweiligen Einsatz bewertet werden. Hierfür ist eine Aussage über die Qualität des Messergebnisses erforderlich. Das Messergebnis setzt sich zusammen aus dem ermittelten Messwert x und der Unsicherheit des Messprozesses U_{MP} , welche daher ebenfalls bestimmt werden muss (DIN EN ISO 14253-1; VDA 2011).

Im Bereich der Automobilindustrie stellen die Verfahren Measurement System Analysis (MSA) (AIAG 2010) nach der Automotive Industry Action Group (AIAG) sowie VDA Band 5 (VDA 2011) nach dem Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA) die gängigsten Verfahren dar (Dietrich 2011).

2.6.2.1 Messsystemanalyse und Firmenrichtlinien

Die MSA (Measurement System Analysis) basiert auf verschiedenen Firmenrichtlinien aus dem Bereich der Automobilindustrie (AIAG 2010). Die beschrie-

bene Vorgehensweise wird häufig aufgegriffen und an die jeweiligen Anforderungen angepasst (Conrad 2014).

Zu Beginn erfolgt eine Bewertung der Auflösung des Messgeräts. Dabei darf die Auflösung des Messgeräts 5 % der Toleranzbreite Tol des betrachteten Prüfmerkmals nicht übersteigen (AIAG 2010).

Im Anschluss wird Verfahren 1 der MSA durchgeführt. Hierfür ist ein kalibriertes Normal erforderlich, welches über den Untersuchungszeitraum hinweg stabil ist. Basierend auf min. 20 Wiederholmessungen wird die Wiederholstandardabweichung s der erfassten Werte berechnet. Neben der Wiederholstandardabweichung wird die systematische Abweichung Bi berechnet. Sie ermittelt sich aus der Differenz des Mittelwerts der Messwerte zum Ist-Wert des Normals. Hierauf aufbauend kann nun mittels der Kennwerte c_g und c_{gk} eine erste Bewertung der Fähigkeit erfolgen. Der Kennwert c_g berücksichtigt dabei lediglich zufällige Einflüsse, wohingegen c_{gk} auch den systematischen Einfluss beinhaltet.

$$c_g = \frac{0,2 * Tol}{6 s} \quad \text{Formel 2-2}$$

$$c_{gk} = \frac{0,1 * Tol - |Bi|}{3 s} \quad \text{Formel 2-3}$$

Sind beide Kennwerte $\geq 1,33$ kann das Messgerät als fähig gesehen werden und im Folgenden die Betrachtung nach Verfahren 2 und 3 erfolgen.

Verfahren 2 betrachtet die Erhebung des Bedienerinflusses sowie der Wiederholpräzision. Hierfür werden reale Bauteile aus dem betrachteten Prozess herangezogen. Die Beurteilung erfolgt mittels der ANOVA-Methode (Analysis of Variance) oder über die einfacher zu bestimmende Mittelwert-Spannweiten-Methode (ARM Average and Range Method). Bei der ARM-Methode prüfen mehrere Bediener mehrmals mehrere Messobjekte. Die Umgebungsbedingungen werden dabei konstant gehalten. Je Bediener werden für die einzelnen Messobjekte die Spannweite R ermittelt. Hierauf basierend werden ebenfalls je Bediener und Messobjekt die mittlere Spannweite \bar{R} und die Mittelwerte \bar{x} berechnet. Zur Bewertung werden die Wiederholpräzision EV (vgl. Formel 2-4) und die Vergleichspräzision AV (vgl. Formel 2-5) berechnet.

$$EV = K_1 * \bar{R}$$

Formel 2-4

mit \bar{R} : Mittelwert der mittleren Spannweiten \bar{R}

$$AV = K_2 * (\bar{x}_{max} - \bar{x}_{min})$$

Formel 2-5

Die verwendeten Konstanten K_1 und K_2 sind dabei einer Tabelle der MSA zu entnehmen. Sie sind abhängig von der gewählten Anzahl an Bedienern, Messobjekten und Wiederholungen (AIAG 2010).

Abschließend wird zur Bewertung der Ergebnisse die kombinierte Wiederhol- und Vergleichspräzision $\%GRR$ berechnet (vgl. Formel 2-6). Ein Wert $\leq 10\%$ beschreibt einen fähigen; zwischen $> 10\%$ und $\leq 30\%$ einen bedingt fähigen; $> 30\%$ einen nicht fähigen Messprozess (AIAG 2010).

$$\%GRR = \frac{\sqrt{EV^2 + AV^2}}{Tol} * 100\%$$

Formel 2-6

Verfahren 3 stellt eine Sonderform von Verfahren 2 dar. Es kommt bei Messsystemen zum Einsatz, welche keinen Bedienerinfluss aufweisen (z. B. automatisierte Messsysteme). Die Auswertung erfolgt analog zu Verfahren 2 (Dietrich 2002).

Im Anschluss an Verfahren 2 bzw. 3 erfolgt eine Bewertung der Linearität. Dies ist erforderlich um zu bewerten, ob über den gesamten Messbereich die Genauigkeit des Messsystems geeignet ist (Dietrich 2002; AIAG 2010).

Abschließend erfolgt die Bewertung der Stabilität des Messsystems über die Zeitdauer des Einsatzes (Dietrich 2002).

2.6.2.2 Messprozesseignung

VDA Band 5 beschreibt ein praxisgerechtes Vorgehen für die Bestimmung der Messunsicherheit mit dem Fokus auf die Automobil- und Zulieferindustrie (VDA 2011). Die beschriebenen Verfahren basieren auf der GUM (engl. Guide to the expression of uncertainty in measurement) (DIN V ENV 13005) und der Norm DIN EN ISO 14253-1.

Analog zum Vorgehen aus Kapitel 2.6.2.1 wird die Auflösung des Messgeräts bewertet. Relativ zur Toleranzbreite Tol des Prüfmerkmals darf die Auflösung des Messgeräts 5% nicht übersteigen (VDA 2011).

Die Bestimmung der Messunsicherheit für eine spezifische Messung des Messsystems u_{MS} erfolgt soweit nicht bekannt nach Verfahren 1 der MSA. Ist der Grenzwert der Messabweichung bekannt und dokumentiert, kann u_{MS} und somit die erweiterte Messunsicherheit U_{MS} hierauf basierend berechnet werden (VDA 2011).

$$U_{MS} = k * u_{MS} \quad \text{Formel 2-7}$$

Durch den Erweiterungsfaktor k wird ein Wertebereich definiert, welcher den wahren Wert der Messgröße mit großer Wahrscheinlichkeit enthält (DIN 1319-3). Vorzugsweise ist $k = 2$ zu setzen und gibt die Überdeckungswahrscheinlichkeit von ca. 95 % an (DIN 1319-3).

Die Messsystemeignung erfolgt über die Bestimmung des Eignungskennwerts Q_{MS} . Q_{MS_max} soll dabei $< 15 \%$ betragen (VDA 2011).

$$Q_{MS} = \frac{2 * U_{MS}}{Tol} * 100 \% \quad \text{Formel 2-8}$$

Für die Betrachtung des gesamten Messprozesses müssen zusätzliche Unsicherheitseinflüsse bestimmt werden. Hierfür erfolgt für den Messprozess die Bestimmung der erweiterten Messunsicherheit U_{MP} analog zu Verfahren 2 der MSA. Analog zur Messsystemeignung wird für die Messprozesseignung der Eignungskennwert Q_{MP} ermittelt, welcher $Q_{MP_max} < 30 \%$ betragen soll (VDA 2011).

$$Q_{MP} = \frac{2 * U_{MP}}{Tol} * 100 \% \quad \text{Formel 2-9}$$

Um neue Einflussfaktoren oder Beschädigungen, welche den Messprozess beeinflussen können, entdecken zu können, ist eine kontinuierliche Überwachung der Messbeständigkeit (Stabilität) erforderlich (VDA 2011). Hierzu finden an Bezugsnormalen Messungen in regelmäßigen Abständen statt.

Aufbauend auf VDA Band 5 beschreibt VDA Band 5.1 „Rückführbare Inline-Messtechnik im Karosseriebau“ ein Vorgehen zur Anlagenfreigabe von Inline-Messstationen im Umfeld des Karosseriebaus. Hierbei wird zur Bestimmung der Messunsicherheit neben Normalen auf kalibrierte Bauteile zurückgegriffen.

3 Stand der Forschung und Technik

Das vorliegende Kapitel beschreibt die Anforderungen sowie den Stand der Forschung und Technik des Messtechnikeinsatzes bei der Herstellung von Preforms aus Kohlenstofffasern. Des Weiteren werden aus anderen Applikationen relevante Lösungen zur 3D-Geometrieerfassung beschrieben.

3.1 Anforderungen an einen Messtechnikeinsatz

Ausgangspunkt für die Anforderungen an einen Messtechnikeinsatz ist die Zielsetzung dreidimensionale Defekte (z. B. Falten) eines Preforms aus trockenem Kohlenstofffaser-Halbzeug zu detektieren (vgl. Kapitel 1.1 und 1.2). Somit werden die Anforderungen in einem ersten Schritt durch die Eigenschaften des Preforms abgeleitet. Das Messen von komplexen Preform-Geometrien erfordert ein Verfahren, welches eine vollflächige Erfassung und Auswertung der Bauteiloberfläche ermöglicht und den Zustand des Preforms nicht beeinflusst. Da Defekte prinzipiell über die gesamte Bauteilfläche verteilt vorkommen können, muss eine vollflächige Erfassung des Bauteils in ausreichend hoher Auflösung gewährleistet werden. Die Auflösung des Messsystems soll sich daher am Stand der Technik orientieren.

Es ist zu berücksichtigen, dass das verwendete Messprinzip im Sinne der Messunsicherheit eine höhere Auflösung bereitstellen muss, als die kleinste Defektgröße. Als Faustformel kann hier die „Goldene Regel der Messtechnik“ herangezogen werden, welche besagt, dass das Verhältnis von Messunsicherheit zur Toleranz 10 % nicht überschreiten sollte (Keferstein & Marxer 2015). Neben dem Auflösungsvermögen eines Messsystems hängt die Messunsicherheit eines Systems wesentlich von der Bauteiloberfläche ab. Diese lässt sich jedoch im Einzelfall nur experimentell ermitteln.

Für den Einsatz der Messtechnik ist es das Ziel eine Inline-Messung im Fertigungsprozess zu realisieren. Um möglichst reale Bedingungen abbilden zu können, ist daher die Untersuchung anhand von realen Bauteilen aus dem industriellen Umfeld als Demonstrator von Vorteil. Besonders für großflächige Bauteile spielen dabei Ansätze zur Taktzeitreduktion eine wichtige Rolle.

Abbildung 3-1 gibt einen Überblick über die allgemeinen Anforderungen an einen Messtechnikeinsatz für die Qualitätssicherung von Kohlenstofffaser-Preforms.

| Allgemeine Anforderungen an einen Messtechnikeinsatz |
|---|
| • Messung an trockenen textilen Kohlenstofffaser-Halbzeugen durchgeführt (ohne Vorbehandlung) |
| • Prozessintegrationsgrad (Inline) |
| • vollflächige Auswertung |
| • Erfassung von komplexen Geometrien |
| • Realbauteil als Demonstrator |
| • Bewertung der Messunsicherheit (Geometrie) |
| • Ansätze zur Taktzeitreduktion für großflächige Bauteile |

Abbildung 3-1: Anforderungen an einen Messtechnikeinsatz

3.2 Messtechnik zur Bewertung von Preforms

Für die Messung und Prüfung von fertigen CFK-Bauteilen bestehen zahlreiche Systeme aus dem Bereich der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) (Kochan 2011; Frey et al. 2012; Oster 2012). Dabei kommen u. a. Ultraschall, Computertomographie, Thermographie und Scherographie¹ zum Einsatz. Grund für die Vielzahl der verfügbaren Lösungen ist der langjährige Einsatz von CFK im Flugzeugbau und die daraus abgeleitete Notwendigkeit adäquater Messtechnik für deren Prüfung (Oster 2012). Die Erfassung und Bewertung trockener Preforms mittels Messtechnik befindet sich hingegen aktuell noch im Forschungsstadium. Im Folgenden werden relevante Ansätze vorgestellt.

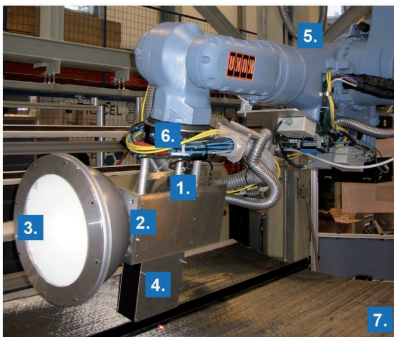
¹ Spezielles Speckleinterferometrierverfahren, welches eingesetzt wird, um innere Defekte eines Bauteils unter Aufbringen einer Belastung als Oberflächendeformation sichtbar zu machen. (Beyerer, Puente León & Frese 2012)

3.2.1 2D-Laser-Lichtschnitt

Der Großteil der Lösungsansätze zur Bewertung von Preforms basiert auf der Digitalisierung mittels 2D-Laser-Lichtschnittsystemen. Die Ansätze unterscheiden sich hinsichtlich der Komplexität der untersuchten Geometrie (z. B. ebenes textiles Halbzeug, Probekörper, Flugzeugbauteil), der Auswertelogik (z. B. lokale Erfassung, globale Erfassung) sowie ihres maximalen Messvolumens.

3.2.1.1 Lagepositionserfassung

Schmitt, Niggemann & Mersmann (2008; 2009) und Orth (2008) betrachten in ihren Arbeiten, welche im Rahmen des FALCON-Forschungsprojekts erstellt wurden, u. a. die Konturerfassung von textilen Halbzeugen mittels eines Laser-Lichtschnittsystems. Basierend auf dem erfassten Stufenprofil am Rand eines Zuschnitts werden Lage, Form und andere geometrische Abweichungen des Halbzeugs bestimmt. Genutzt wird hierzu der Sensor TAGLIO der Firma NoKra Optische Prüftechnik und Automation GmbH (50 mW; 670 nm; Schutzklasse 3B). Dieser wird mittels eines 3-Achs-Positioniersystems geführt bzw. im FALCON-Projekt mittels eines Roboters verfahren (vgl. Abbildung 3-2).



1. Sensor Prototyp
2. Machine Vision System
3. Diffuse Dom-Beleuchtung
4. Laser-Lichtschnittsystem
5. Roboter
6. Sensor Interface
7. Messobjekt

Abbildung 3-2: FALCON-Prüfsystem nach (Schmitt, Gries & Herrmann 2008)

Der Arbeitsabstand des Sensors beträgt 85 mm bei einem lateralen Erfassungsbereich von 10 mm und einer Tiefenschärfe von ebenfalls 10 mm. Zur Bestimmung der Kontur werden die einzelnen Lichtschnitte in 1 mm Schritten aufgenommen und mittels einer Approximation ausgewertet. Diese werden im Anschluss zu einem Polygon, welches den Konturverlauf beschreibt, zusammengefügt. Als Herausforderungen der Messanwendung werden die hohe

Lichtreflexion sowie die komplexe Faserstruktur genannt. Als Demonstrator werden verschiedene textile Halbzeuge verwendet, die im FALCON Projekt in ein schalenförmiges Bauteil von 1800 mm Länge und einem Radius von 2000 mm überführt werden. Beabsichtigt wird die Erfassung von bis zu 12 m² großen schalenförmigen Luftfahrtstrukturen. (Schmitt, Pfeifer & Orth 2006; Schmitt, Orth & Niggemann 2007; Orth 2008; Schmitt et al. 2008; Schmitt, Niggemann & Mersmann 2008; Schmitt, Gries & Herrmann 2008; Schmitt, Niggemann & Mersmann 2009; Schmitt et al. 2009)

Zur Validierung der Ablageposition von Zuschnitten aus trockenem textilem Halbzeug (Biaxial-Gelege) untersucht das DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.) den Einsatz eines robotergeführten Laser-Lichtschnittsystems (Micro Epsilon scanCONTROL). Hierfür wird die errechnete Konturlage des abgelegten Preforms mit dem Sensor gescannt und die Kantenposition nach einer Glättung über den Stufensprung innerhalb einer Messung ermittelt. Die Bewertung der Ablagequalität erfolgt über einen Soll/Ist-Vergleich. Die betrachtete Zielgeometrie orientiert sich an einem zylindrischen Flugzeugumpf. (Gerngross, Schmidt & Krebs 2011; Schmidt & Dutta 2013)

Beide in diesem Abschnitt vorgestellten Ansätze zur Lagepositionserfassung fokussieren auf die Erfassung der Außenkontur eines Zuschnitts bzw. eines abgelegten Preforms. Eine Übertragbarkeit auf die Erfassung von Geometrieabweichungen komplexer Formen ist nicht gegeben.

3.2.1.2 Geometrieerfassung von Materialproben

Göttinger, Weimer & Miene (2009) untersuchen im Rahmen der Forschungsprojekte ProCFK/PROSA, LOKOST/PROBEC, FACT/ITech und IMac-Pro u. a. die Topologieerfassung an Proben aus trockenen textilen Halbzeugen (Gewebe, Gelege) mittels eines Laboraufbaus. Hierbei wird ein Laser-Lichtschnittsensor der Firma Keyence eingesetzt (Modell LJ-G 200; Arbeitsabstand 200 mm; lateraler Erfassungsbereich 62 mm), welcher mittels einer Linearachse über das Bauteil geführt wird (Verfahrgeschwindigkeit 6 mm/s) (vgl. Abbildung 3-3). Die laterale Auflösung in Verfahrrichtung beträgt 0,1 mm. Die Datenauswertung basiert auf einem Soll/Ist-Vergleich zwischen dem Scan eines idealen Bauteils und dem zu messenden Bauteil. Zur Eliminierung von Ar-

tefakten wurde ein Median- sowie ein Mittelwertfilter eingesetzt. Hintergrund der Untersuchungen stellt der zunehmende Einsatz von CFK in der Hub-schrauberfertigung bei der Eurocopter Deutschland GmbH dar, welcher eine genaue Kenntnis u. a. der Ablagequalität erfordert. (Göttinger, Weimer & Miene 2009)

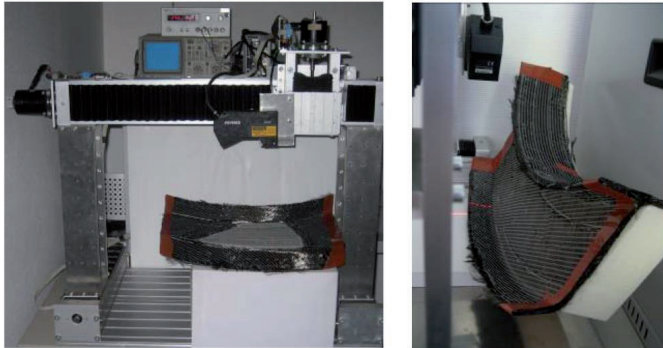


Abbildung 3-3: Laboraufbau nach (Göttinger, Weimer & Miene 2009)

Faidi et al. (2011) untersuchen für das General Electric Global Research Center Inline-Messsysteme für die automatisierte Ablage von Prepreg Tape (vor-impregniert) basierend auf optischer Messtechnik und Ultraschall. Zielanwendung ist der Einsatz von CFK in der Fertigung von Rotorblättern von Windkraftanlagen und die Detektion von Faserwelligkeit ($> 0,5$ mm out of plane und in-plane). Als Laser-Lichtschnittsystem wird eine Sick Ranger Kamera in Kombination mit einem Linienlaser verwendet. Das System wird mit einer Linearachse über die Probe geführt. Zur Abbildung von Defekten werden Drähte und Unterlegscheiben verschiedener Durchmesser zwischen die Prepreg-Lagen positioniert. Aufgrund der materialimmanenten Oberflächenschwankungen können bei unausgehärteten Bauteilen erst Defekte ab 1 mm Größe detektiert werden. Des Weiteren wird beobachtet, dass eine Aufdickung, hervorgerufen durch einen Fremdkörper, erst mehrere Lagen später im Lagenaufbau detektiert werden kann. Für die Auswertung der Defekte in den planar vorliegenden Proben wird das Bild in definierte Segmente unterteilt und die Standardabweichung ermittelt. Diese wird mit einem empirischen Schwellwert abgeglichen, um festzustellen, ob im Segment eine Anomalie aufgrund eines Defekts vorliegt. (Faidi et al. 2011)

Das Messsystem Drapetest wurde durch das Faserinstitut Bremen, die Textechno Herbert Stein GmbH & Co. KG und weitere Forschungseinrichtungen zur Charakterisierung der Drapierbarkeit von textilen Halbzeugen (Gewebe und Gelege) entwickelt (Miene 2011; Christ, Miene & Moerschel 2012). Es basiert auf einem Prototyp, welcher von der Firma SAERTEX GmbH & Co. KG gebaut wurde. Hierzu wird mittels eines Kegelstumpfs eine eben gespannte runde Textilprobe (\varnothing 310-330 mm) in z-Richtung verformt (max. 100 mm) und somit die Umformung bei zweifach gekrümmten Oberflächen abgebildet. Neben einer 2D-Kamera, welche die Faserorientierung detektiert, beinhaltet das System einen Laser-Lichtschnittsensor zur Erfassung der geometrischen Verformung (z. B. Faltenbildung und Welligkeit). Für die vollständige Erfassung der Oberfläche wird die Probe rotiert (vgl. Abbildung 3-4). Nach einer Filterung werden die Daten zu einem Soll/Ist-Vergleich herangezogen. Zur Bewertung werden Fläche und Volumen der Falten bestimmt. Zur statistischen Bewertung der Unebenheit wird zusätzlich in einem Höhenschnitt die Auslenkung erfasst. Neben der Digitalisierung der Oberfläche werden die zugehörigen Umformkräfte gemessen. (Miene 2011; Christ, Miene & Moerschel 2012)

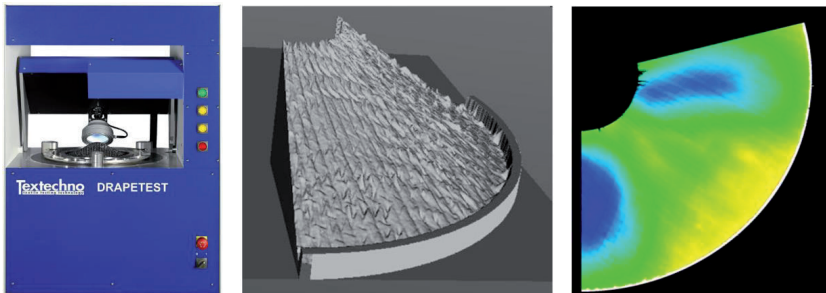


Abbildung 3-4: Drapetester nach (Christ, Miene & Moerschel 2012)

Der Untersuchungsgegenstand von Miesen et al. (2013; 2015) ist die Detektion von geometrischen Abweichungen wie z. B. Falten sowie der Lagenanzahl im Laminat von Luftfahrtanwendungen. Für die Untersuchungen wird der Laser-Lichtschnittsensor Keyence LJ-V7200 sowie LJ-V7060 (405 nm; Arbeitsabstand 200 mm; lateraler Erfassungsbereich 51-73 mm) verwendet. Die Probe wird manuell auf einem Schlitten bewegt, wobei in 100 μ m Intervallen das Laser-Lichtschnittsystem getriggert wird. Betrachtet wird eine Prepreg-

Materialprobe bestehend aus 8 Lagen ($150 \times 50 \text{ mm}^2$) und einer maximalen Höhe von 1,2 mm. Verwendet wird ein unidirektionaler sowie bidirektionaler Lagenaufbau. Die Untersuchungen zeigen, dass bidirektionales Material eine erhöhte Standardabweichung gegenüber unidirektionalem aufweist (ca. 17 zu $53 \text{ }\mu\text{m}$). (Miesen et al. 2013; Miesen et al. 2015)

Die vorgestellten Ansätze betrachten anhand von Materialproben die Möglichkeiten zur Geometrieerfassung textiler Halbzeuge. Dabei betrachten Miesen et al. (2013; 2015) und Faidi et al. (2011) lediglich vorimprägniertes Material. Hintergrund der Untersuchungen sind primär Anwendungen aus dem Bereich der Luftfahrt. Eine Übertragbarkeit auf die Erfassung von Geometrieabweichungen von Bauteilen ist prinzipiell möglich. Die Untersuchungen beinhalten jedoch keine Ansätze bezüglich eines Übertrags auf komplexe flächige Bauteile.

3.2.1.3 Geometrieerfassung einfacher Formen

Im Rahmen des Projektes AutoPreforms (Henning, Gries & Flachskampf 2008), welches sich mit der wirtschaftlichen Herstellung von Faserverbundbauteilen basierend auf automatisiert hergestellten textilen Preforms beschäftigt, wird durch das WZL Aachen für die Faltenerkennung ein robotergeführtes Laser-Lichtschnittsystem untersucht. Hierzu wird eine CCD-Grauwertkamera mit 1024×1024 Pixel eingesetzt. Die Leistung des verwendeten Lasers beträgt 35 mW bei einer Wellenlänge von 660 nm. Der Arbeitsabstand des Systems beträgt ca. 500 mm. Ziel ist es, Falten von min. 50 mm Länge und 5 mm Höhe zu erkennen. Als Demonstrator dient ein Segment eines PKW-Daches, welches aus multiaxialem Kohlenstofffaser-Gelege aufgebaut ist. Die Geometrie des Versuchsträgers lässt sich als ebene Fläche mit gekrümmten Seiten beschreiben. Die Auswertung der Messdaten beruht auf einem bildbasierten Vergleich zwischen der Messung und einer Referenzaufnahme an derselben Position. Hierzu werden die pro Lichtschnitt aufgenommenen Grauwertbilder in Binärbilder konvertiert und die Linien extrahiert. Zur Detektion von Abweichungen wird anschließend der Abstand der Punktfolgen von der Messung zur Referenzaufnahme minimiert, um Anomalien zu detektieren. Die gewählte Auswertemethodik bietet in Abhängigkeit der Lage der Bildpunkte die Gefahr von Fehlinterpretationen. Aufgrund der niederen Laserklasse wird keine geschlossene Laserlinie zur Auswertung detektiert. (Henning, Gries & Flachskampf 2008)

Schmitt, Niggemann & Mersmann (2009) erweitern die Arbeiten von Orth (2008) und Schmitt, Niggemann & Mersmann (2008) um die vollständige dreidimensionale Erfassung eines Preforms mittels eines Laser-Lichtschnittsystems (Leistung 50 mW; 670 nm; Arbeitsabstand 205 mm; lateraler Erfassungsbereich 50 mm; Auflösung 1280 x 1024 pixel) im Rahmen des FALCON Projekts. Ziel ist die Nutzung der Laser-Lichtschnittsensordaten zur Prozessregelung mit der Produktionsanlage durch ein lagenweises Scanen. Hierzu werden die Messdaten mit dem CAD-Modell des Lagenaufbaus abgeglichen. Für die Auswertung werden Lücken zwischen Rovings sowie überstehende Nähfäden herausgefiltert, um für einen Vergleich lediglich die Fasern zu berücksichtigen. Angestrebtes Ziel ist eine Messunsicherheit $< \pm 200 \mu\text{m}$. Für die Messunsicherheitsbetrachtung wird ein statischer Versuchsaufbau gewählt, bei dem einzelne Höhenprofile ausgewertet werden. Die Messungen werden an einer textilen Probe durchgeführt, welche in diskreten Inkrementen auf einem Drehtisch rotiert werden. Als Demonstrator dient ein Spant mit langgezogenem Radius (vgl. Abbildung 3-5). (Schmitt, Niggemann & Mersmann 2009)

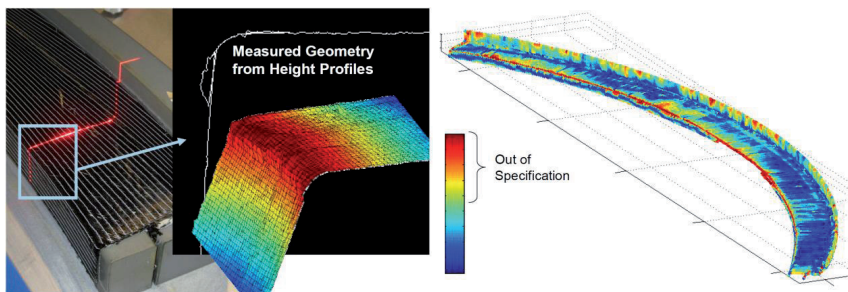


Abbildung 3-5: 3D-Scan eines Spanten mit Soll/Ist-Vergleich nach (Schmitt, Niggemann & Mersmann 2009)

Mersmann (2012) untersucht in seiner Arbeit, neben dem Konturverlauf des Preformzuschnittes die gesamte Geometrie eines textilen Preforms mittels eines Laser-Lichtschnittsystems. Das Sensorsystem wird mit einem Roboter geführt. Die Geometrie soll dabei die Toleranz von $\pm 1 \text{ mm}$ einhalten. Aufgrund von Ungenauigkeiten des Robotersystems muss vor der eigentlichen Messung und vor Ablage des Halbzeugs die Werkzeugform gemessen werden. Diese Messung dient der Absolutkalibrierung des Roboters. Als Demonstrator dient

primär ein Spant, welcher in seiner L-Form eine Biegung mit großem Radius aufweist. Des Weiteren wird das Höhenprofil von geflochtenen Preforms sowie die Ablagequalität von Prepreg Tape betrachtet. (Mersmann 2012)

Basierend auf den Vorarbeiten von Göttinger, Weimer & Miene (2009) wird im Rahmen des Verbundprojekts FACT, Teilprojekt Vi-TECH (Balvers, Gubernatis & Margossian 2012), eine Weiterentwicklung beschrieben. Hierbei wurde der untersuchte Sensor auf ein robotergeführtes System übertragen. Die gewonnenen Höhendaten werden u. a. zur Überlagerung von 2D-Aufnahmen herangezogen. Als Validierungsbauteil wird ein Spant gewählt. Die Auswertung der Daten erfolgt mittels der Software EuroPAS (Eurocopter Preform Analysis System), wobei als Auswertekriterium Mittelwert und Standardabweichung der Aufnahmen herangezogen werden. (Balvers, Gubernatis & Margossian 2012)

Im Projekt AutoBraid (Jeschke et al. 2014) wird ein Laser-Lichtschnittsensor zur Geometriebewertung eines zylindrischen, geflochtenen Preforms (\varnothing ca. 80 mm) genutzt. Eingesetzt wird der Sensor TAGLIO 205/105x120 der Firma Nokra Optische Prüftechnik und Automation GmbH, welcher statisch an der Radialflechtmaschine befestigt ist. Die 3D-Daten werden kombiniert mit den Aufnahmen einer 2D-Kamera, welche zur Bestimmung der Faserorientierung eingesetzt wird. Aufgrund der statischen Installation des Messsystems ist nur die Erfassung von geflochtenen Preforms möglich, welche prozessbedingt eine Relativbewegung zum Laser-Lichtschnittsystem vollziehen. Eine Erfassung von schalenförmigen 3D-Freifformflächen ist daher nicht möglich. (Jeschke et al. 2014)

Die betrachteten Untersuchungen zur Geometrieerfassung einfacher Formen beziehen sich schwerpunktmäßig auf Luftfahrtanwendungen. Sie zeigen in Abgrenzung zu den Ansätzen in Kapitel 3.2.1.2 bereits komplexere Formen auf. Aufgrund der großen Bauteilgeometrien kommen dabei zur Positionierung des Sensors Robotersysteme zum Einsatz. In den Untersuchungen wurde nicht berücksichtigt, wie die Systeme auch für komplexer geformte Bauteile eingesetzt werden können.

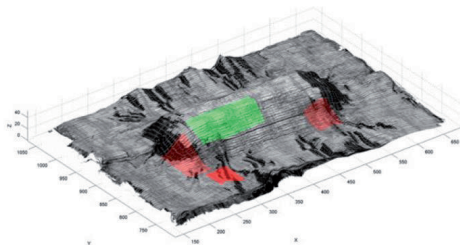
3.2.1.4 Geometrierfassung komplexer Formen

Das Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen hat zur Detektion und Bewertung von Produktionsfehlern in Preforms das Fiber Measurement System (FMS) entwickelt (vgl. Abbildung 3-6 links) (Kosse, Fürtjes & Schmitt 2014). Das roboterbasierte System verwendet ein Laser-Lichtschnittsystem zur Erfassung von 3D-Geometrien und ein 2D-Kamerasystem zur Detektion der Faserorientierung. Der eingesetzte Laser befindet sich im roten Wellenlängenbereich. Die erfassten Daten des Lichtschnittsystems werden mit den erfassten Texturen fusioniert. Demonstriert wird das System am Beispiel einer schalenförmigen, konvexen Geometrie der Größe 500 mm x 280 mm und einer Höhendifferenz von 70 mm. Für die Digitalisierung werden 1120 Laser-Lichtschnitte aufgenommen, was einer Rasterung von 1 mm x 1 mm entspricht. Es werden deutliche Abschattungen von Bauteilzonen beobachtet.

Das System liefert eine Fehlererkennung und -klassifizierung am Beispiel der Faserwelligkeit. Die Bewertung der Faserwelligkeit in der Bauteildicke erfolgt über die Bewertung einzelner Schnitte durch das gemessene Höhenprofil der Geometrie. Dabei wird für die Bewertung die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (engl. root-mean-square error (RMSE)) zwischen der Soll-Geometrie und der Ist-Geometrie verwendet (vgl. Abbildung 3-6 b)).



a) Messsystem



b) Digitalisierter Preform

Abbildung 3-6: Fiber Measurement System (FMS) nach (Basler AG 2014)

Als wesentliche Einflussgröße wird das Messobjekt mit seiner komplexen Struktur, den inhomogenen Reflexionen und der Abhängigkeit der Laserlinie zur Faserorientierung genannt. Einen weiteren großen Einfluss hat die Kalib-

rierung des Systems. (Basler AG 2014; Kosse, Fürtjes & Schmitt 2014; Schmitt 2016)

Hierauf aufbauend vertreibt die Apodius GmbH als Spin-off des WZL das Apodius Vision System – AVS 3D (Apodius GmbH 2015a). Zur Erfassung der Geometrie kommt dabei ein robotergeführter Laser-Lichtschnittsensor vom Typ scanCONTROL der Firma Micro Epsilon zum Einsatz. Der Sensor wird für den Scan orthogonal zur Oberflächennormalen nachgeführt. Die Auswertung der Geometrie erfolgt mittels Soll/Ist-Vergleich. Die Abweichungen der Geometriemessung werden mit +/- 0,1 mm angegeben. (Apodius GmbH 2015a; Apodius GmbH 2015b; Apodius GmbH 2015c; Roberz & Leutner 2015)

Die Untersuchungen zur Geometrieerfassung komplexer Formen erfassen mittels einer Kombination aus Laser-Lichtschnittsystem und 2D-Flächenkamera die Preformoberfläche. Zur Positionierung des Sensorsystems wird ein Roboter eingesetzt. Die in der Untersuchung festgestellten Abschattungseffekte bei komplexen Geometrien wurden jedoch nicht näher betrachtet.

3.2.2 3D-Photogrammetrie

Vanclooster, Lomov & Verpoest (2009) betrachten im Rahmen ihrer Untersuchungen die Deformation eines Glasfaser-Preforms im Umformprozess. Hierzu wird mittels eines kugelförmigen Stempels mit 100 mm Durchmesser ein Lagenaufbau aus Gewebe umgeformt. Zur Bewertung der sich dabei ausbildenden Scherwinkel wird ein 3D-Photogrammetrie System eingesetzt. Als Referenz wird vor dem Umformprozess ein weißes Muster auf das textile Halbzeug aufgebracht. Dieses ist für die Auswertesoftware zur Berechnung der Oberflächengeometrie erforderlich. Trotz künstlich aufgebrachtem Referenzmuster kommt es aufgrund von Lichtreflexionen an vereinzelten Stellen zu einer lückenhaften Berechnung der Oberfläche. (Vanclooster, Lomov & Verpoest 2009)

Die vorgestellte Untersuchung betrachtet lediglich Glasfaser-Preforms. Da bereits hierfür das Aufbringen eines weißen Musters auf der Oberfläche erforderlich ist, ist nicht anzunehmen, dass eine Messung von Kohlenstofffaser-Preforms ohne zusätzliches Muster möglich ist.

3.2.3 Computertomographie

Lightfoot, Wisnom & Potter (2013c) betrachten in ihrer Arbeit die Detektion von Falten, Faserwelligkeit und Bridging in Preforms mittels Computertomographie. Untersucht wird dabei sowohl eine komplex geformte Demogeometrie ($140 \times 140 \text{ mm}^2$) (vgl. Abbildung 3-7) als auch der Preform eines Hubschrauber-Rotorblatts (2000 mm Länge) mit künstlich eingebrachten Defekten. Zur Durchführung der Scans wird das Rotorblatt in 120 mm lange Segmente geschnitten.

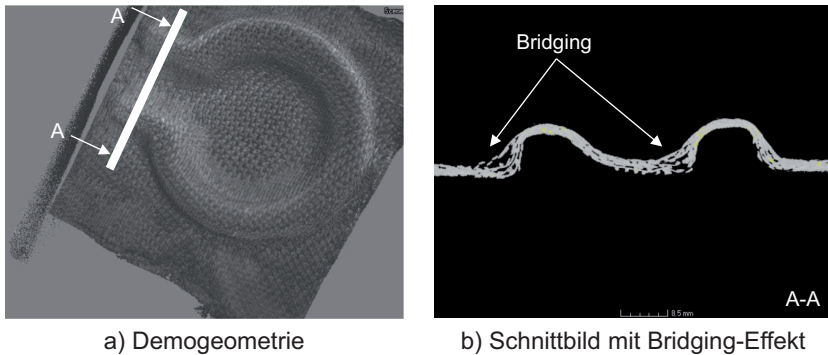


Abbildung 3-7: CT-Scan einer Demogeometrie nach (Lightfoot, Wisnom & Potter 2013c)

Für die Untersuchungen werden Aufnahmen mit 1000 Projektionen je 360° erstellt. Der verwendete Detektor besitzt $2000 \times 2000 \text{ px}$. Gescannt wird mit 100 kV Röntgenröhrenspannung ($120 \mu\text{A}$) und 250 ms Belichtungszeit. Die Rekonstruktion erfolgt mit der Nikon CTPro Software, die weitere Auswertung mittels VGMax Studio 2.1. Die Auswertung ermöglicht die Detektion von Defekten sowie die lagenweise Analyse des Preforms sowie der Faserorientierung. Aufgrund des limitierten Messraums sowie der Mess- und Auswertedauer wird die Untersuchung mittels CT lediglich als Werkzeug im Bereich der CFK-Komponentenentwicklung gesehen und aktuell nicht für die Inline-Prüfung eingesetzt. (Lightfoot, Wisnom & Potter 2013c)

3.2.4 Wirbelstrom

Das Fraunhofer IZFP Dresden und das Fraunhofer IKTS mit seinem Spin-Off Suragus GmbH nutzen das bildgebende Hochfrequenz-Wirbelstromverfahren zur Detektion von Defekten in Kohlenstofffaser-Preforms (Schulze et al. 2009; Schulze et al. 2010; Pooch et al. 2013; Heuer et al. 2015; Schulz et al. 2016; Heuer 2016; Suragus GmbH 2016). Zur Messung wird die elektrische Leitfähigkeit der Kohlenstofffasern genutzt. Zur flächigen Erfassung wird mittels einer Kinematik der Sensor in mehreren Bahnen orthogonal zur Oberfläche über die Probe geführt. Die Auswertung der gerasterten Aufnahme ergibt ein Impedanz-Mapping. Die Projektion von Amplitudenwerten ermöglicht die Darstellung der Messwerte als Grauwertbild mit anschließender Bewertung. Die Auswertung der Daten bietet die Möglichkeit Messsignale den einzelnen Lagen zuzuordnen.

Wirbelstrom wird primär zur Detektion von 2D-Anomalien wie bspw. Faserorientierung, Welligkeit und Lücken aber auch zur Detektion von Falten in trockenen Preforms und konsolidierten Bauteilen eingesetzt. Die Messung erfolgt berührungslos oder mit leichtem Kontakt. Für die Planung der Messung ist eine genaue Kenntnis der Bauteilgeometrie erforderlich. (Schulze et al. 2009; Schulze et al. 2010; Pooch et al. 2013; Heuer et al. 2015; Schulz et al. 2016; Heuer 2016; Suragus GmbH 2016)

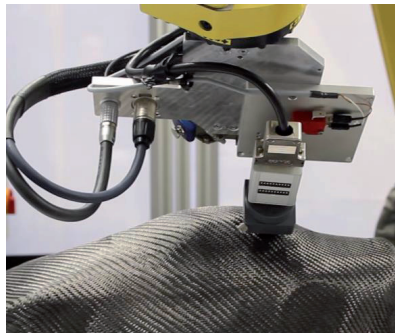


Abbildung 3-8: 3D-Scan eines Demonstrators nach (Schulz et al. 2016; Suragus GmbH 2014)

Für die Wirbelstrommessung an einem 3D-Bauteil setzt daher das robotergeführte System EddyCus® CF rob von Suragus GmbH auf eine Digitalisierung

der Preformkontur mittels Stereokamera. Basierend darauf erfolgt die Bahnplanung für den Scanablauf des Wirbelstromsensors (vgl. Abbildung 3-8). (Surgus GmbH 2014)

Die vorgestellten Untersuchungen zum Einsatz von Wirbelstromverfahren zeigen eine gute Erfassungsqualität. Mittels des robotergeführten Sensors ist das Messen größerer Formen prinzipiell möglich. Aufgrund des sehr kleinen Scan-Kopfes ist jedoch die Erfassung großer Geometrien sehr zeitaufwändig.

3.2.5 Patente

Walton hat in seinen Patenten, welche für The Boeing Company angemeldet wurden, verschiedene Anwendungen betrachtet, welche die Detektion von Defekten im Tape-Legprozess bei Luftfahrtanwendungen adressieren. Hierbei werden ein bis zwei Laser in Kombination mit einer Kamera als Laser-Lichtschnittsysteme eingesetzt, mit dem Ziel der Abschattungsreduktion. Die beschriebenen Anwendungen sollen mittels Detektion und Auswertung sowohl Gaps als auch Falten detektieren. (Walton 2007; Walton 2009; Walton 2010; Walton 2011; Walton 2013)

Öffentliche Ergebnisse oder Berichte sind nicht bekannt und daher kann eine abschließende Bewertung in Abbildung 3-11 nicht erfolgen.

3.3 3D-Messtechnik in Industrieranwendungen

Im Folgenden werden verschiedene Anwendungen für optische 3D-Messtechniken außerhalb der CFK-Produktion herausgegriffen. Die Gliederung erfolgt anhand des Kinematikprinzips.

3.3.1 Systeme mit paralleler Kinematik

In Koordinatenmessgeräten (KMG) werden neben taktilen Tastern häufig auch berührungslos messende optische Systeme als Messkopf eingesetzt. Hierbei werden meist Laser-Lichtschnittsysteme genutzt, die beispielsweise Freiformflächen oder unbekannte Topologien dreidimensional erfassen (Keferstein & Marxer 2015).

Das System BentelerLaserGauge® von der Benteler Maschinenbau GmbH ist für die Anwendung in der Herstellung von Blechformteilen entwickelt (Benteler Maschinenbau GmbH 2013a). Ziel ist es, mit dem System eine Alternative zu

Einzelteilelehren darzustellen, um spezifische Merkmale im Produktionsumfeld mit einer universellen elektronischen Lehre zu prüfen. Zur Digitalisierung des Bauteils werden als Messsystem zehn schwenkbare Laser-Lichtschnittsysteme eingesetzt (Auflösung je 4 MPixel), welche mittels eines Portals über das Bauteil geführt werden (vgl. Abbildung 3-9). Das System besteht aus einem Granittisch mit einem Messvolumen von $2000 \times 650 \times 200 \text{ mm}^3$. Die Genauigkeit wird mit $\pm 0,1 \text{ mm}$ angegeben. Die generierte Punktwolke wird im Nachgang mittels spezieller Software hinsichtlich Referenz- oder Sollwerten ausgewertet. (Finke et al. 2006; Finke 2006; Benteler Maschinenbau GmbH 2007; Erfling et al. 2009; Falkenrich 2012; Benteler Maschinenbau GmbH 2013a; Benteler Maschinenbau GmbH 2013b)

Optische Messsysteme basierend auf Laser-Lichtschnittsystemen werden in zunehmendem Maße zum maschinenintegrierten Messen auf Werkzeugmaschinen eingesetzt. In den Untersuchungen von Bichmann et al. (2005) wird ein Sensor der Firma Steinbichler Optotechnik GmbH über das Werkzeugspannfutter fixiert, um das Werkstück in der Maschinenaufspannung messen zu können. Für die Digitalisierung führt die Werkzeugmaschine den Sensor in mäanderförmigen Bahnen über das Werkstück. Zur Auswertung der generierten Punktwolke wird ein Soll/Ist-Vergleich durchgeführt. (Bichmann et al. 2005)

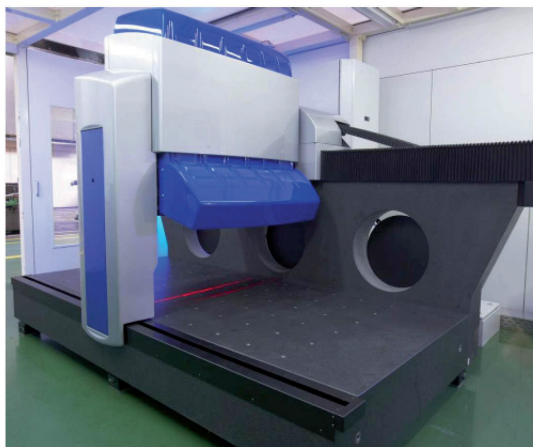


Abbildung 3-9: Messstation BentelerLaserGauge® (Falkenrich 2012)

3.3.2 Systeme mit serieller Kinematik

Zur Digitalisierung großer Objekte mittels Streifenprojektion, werden häufig mehrere Kamerabetrachtungsrichtungen kombiniert. Hierzu werden z. T. roboterbasierte Systeme eingesetzt, welche das Streifenprojektionssystem über das Werkstück führen und aus verschiedenen Perspektiven mittels des Projektors ein periodisches Streifenmuster auf das Werkstück projiziert. Beispielhaftes Einsatzgebiet ist der Karosseriebau in der Automobilindustrie. (GOM - Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH 2016)



Abbildung 3-10: Robotergeführtes Messsystem (Falkenrich 2012)

Ein weiterer Ansatz zur Messung kleinerer dreidimensionaler Bauteile beschreibt das robotergeführte optische Messsystem der Benteler Maschinenbau GmbH (Falkenrich 2012). Es wird ein kombiniertes System bestehend aus Laser-Lichtschnitt und Photogrammetrie eingesetzt, welches mittels eines 6-Achs-Roboters geführt wird (vgl. Abbildung 3-10). Das Messvolumen beträgt $380 \times 200 \text{ mm}^2$ (Roboterabhängig). (Falkenrich 2012)

Die in Kapitel 3.3.1 und 3.3.2 vorgestellten Ansätze aus verschiedenen Industrieanwendungen wurden nicht für die speziellen Herausforderungen zur Messung von Kohlenstofffaser-Preforms konzipiert (vgl. Kapitel 3.1). Es liegen keine Informationen über Versuche vor, welche mittels der Systeme an Kohlenstofffaser-Halbzeugen durchgeführt wurden. Im Besonderen wurden daher nicht die stark reflektiven Eigenschaften der Preforms berücksichtigt. So ist bspw. eine Erfassung von Preforms mittel Streifenlichtprojektion nicht möglich. Die vorgestellten Systeme sind weitestgehend als Fertigungsferne- bzw. Fertigungsnahe-Messtechnik konzipiert und stellen keine Konzepte zur Inline-

Integration dar. Einzelne Konzepte wie z. B. die BentelerLaserGauge® sind des Weiteren als elektronische Lehre zu prüfzwecken konzipiert und nicht primär für messtechnische Aufgaben.

3.4 Bewertung existierender Ansätze

Abbildung 3-11 zeigt die Bewertung der vorgestellten Ansätze zur messtechnischen Erfassung von Kohlenstofffaser-Preforms hinsichtlich der definierten Anforderungen.

| Bewertungseinheit ● = voll erfüllt ◐ = teilweise erfüllt ○ = nicht erfüllt | Anforderungen | | | | | | | |
|---|---|----------------------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------------------|--|---|--|
| | Messung an trockenen textilen Kohlenstoffaser-Halbzügen durchgeführt (ohne Vorbehandlung) | Prozessintegrationsgrad (inline) | Vollflächige Auswertung | Erfassung von komplexen Geometrien | Realbauteil als Demonstrator | Bewertung Messunsicherheit (Geometrie) | Ansätze zur Taktzeitreduktion für großflächige Bauteile | |
| Relevante Ansätze (Literaturquelle) | | | | | | | | |
| 1. 2D-Laser-Lichtschnitt | | | | | | | | |
| Lagepositionserfassung | | | | | | | | |
| Schmitt, Pfeifer & Orth 2006; Schmitt, Orth & Niggemann 2007; Orth 2008; Schmitt et al. 2008; Schmitt, Niggemann & Mersmann 2008; Schmitt, Gries & Herrmann 2008; Schmitt, Niggemann & Mersmann 2009; Schmitt et al. 2009 | ● | ◐ | ○ | ○ | ◐ | ◐ | ○ | |
| Gemgross, Schmidt & Krebs 2011; Schmidt & Dutta 2013 | ● | ◐ | ○ | ○ | ◐ | ○ | ○ | |
| Geometrieerfassung von Materialproben | | | | | | | | |
| Göttinger, Weimer & Miene 2009 | ● | ○ | ● | ○ | ◐ | ○ | ○ | |
| Faidi 2011 | ◐ | ○ | ● | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| Miene 2011; Christ, Miene & Moerschel 2012 | ● | ○ | ● | ◐ | ○ | ○ | ○ | |
| Miesen et al. 2013; Miesen et al. 2015 | ◐ | ○ | ● | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| Geometrieerfassung einfacher Formen | | | | | | | | |
| Henning, Gries & Flachkampf 2008 | ● | ◐ | ● | ◐ | ◐ | ○ | ○ | |
| Schmitt, Niggemann & Mersmann 2009 | ● | ◐ | ● | ◐ | ● | ◐ | ○ | |
| Mersmann 2012 | ● | ◐ | ● | ◐ | ● | ○ | ○ | |
| Balvers, Gubernatis & Margossian 2012 | ● | ◐ | ● | ◐ | ● | ○ | ○ | |
| Jeschke et al. 2014 | ● | ● | ● | ◐ | ● | ○ | ● | |
| Geometrieerfassung komplexer Formen | | | | | | | | |
| Basler AG 2014; Kosse, Fürjtes & Schmitt 2014; Schmitt 2016 | ● | ◐ | ● | ◐ | ◐ | ◐ | ○ | |
| Apodius GmbH 2015a; Apodius GmbH 2015b; Apodius GmbH 2015c; Roberz & Leutner 2015 | ● | ◐ | ● | ◐ | ◐ | ◐ | ○ | |
| 2. 3D-Photogrammetrie | | | | | | | | |
| Vancooster, Lomov & Verpoest 2009 | ○ | ○ | ● | ◐ | ○ | ○ | ○ | |
| 3. Computertomographie | | | | | | | | |
| Lightfoot, Wisnom & Potter 2013a | ● | ○ | ◐ | ● | ◐ | ○ | ○ | |
| 4. Wirbelstrom | | | | | | | | |
| Schulze et al. 2009; Schulze et al. 2010; Pooch et al. 2013; Heuer et al. 2015; Schulz et al.; Heuer; Suragus GmbH 2016 | ● | ◐ | ● | ● | ◐ | ○ | ○ | |
| 5. 3D-Messtechnik in Industrieanwendungen | | | | | | | | |
| Systeme mit paralleler Kinematik | | | | | | | | |
| Kefenstein & Marxer 2015 | ○ | ◐ | ● | ● | ◐ | ● | ○ | |
| Finke et al. 2006; Finke 2006; Benteler Maschinenbau GmbH 2007; Erling et al. 2009; Falkenrich 2012; Benteler Maschinenbau GmbH 2013a; Benteler Maschinenbau GmbH 2013b | ○ | ● | ● | ● | ● | ○ | ● | |
| Bichmann et al. 2005 | ○ | ◐ | ● | ● | ● | ○ | ◐ | |
| Systeme mit serieller Kinematik | | | | | | | | |
| GOM - Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH 2016 | ○ | ◐ | ● | ● | ● | ● | ○ | |
| Falkenrich 2012 | ○ | ◐ | ● | ● | ○ | ○ | ◐ | |

Abbildung 3-11: Bewertung existierender Ansätze zur messtechnischen Erfassung von Kohlenstoffaser-Preforms

3.5 Forschungsdefizite

In Kapitel 3 wurden verschiedene Ansätze vorgestellt, welche die messtechnische Erfassung von dreidimensionalen Defekten in Kohlenstofffaser-Preforms behandeln. Die Ansätze betrachten jedoch fast ausschließlich Herausforderungen aus Luftfahrtanwendungen. Dies spiegelt sich in den meist einfach und großflächig gekrümmten Bauteilen wieder, welche als Demonstratoren herangezogen wurden. Häufig sind lediglich plan vorliegende Halbzeug-Muster Gegenstand der Untersuchungen. Komplex gekrümmte, schalenförmige Bauteile, wie sie häufig im Automobilbau zum Einsatz kommen, werden unzureichend betrachtet. Neben der noch nicht hinreichend gelösten fehlerfreien Erfassung der stark reflektierenden Kohlenstofffaser-Oberfläche der trockenen textilen Halbzeuge bildet jedoch gerade die Erfassung komplexer Bauteiloberflächen eine zentrale Herausforderung. In den bekannten Ansätzen wird zudem das durch Abschattungseffekte an komplexen Bauteilzonen eingeschränkte Erfassungsvermögen der Messsysteme nicht näher betrachtet. Gerade diese Zonen sind allerdings qualitätskritisch, da sich aufgrund hoher lokaler Umformgrade die Möglichkeit für Faltenbildung im textilen Halbzeug ergibt. Die vorgestellten Ansätze bieten meist keine Aussage über die zu erwartende Messunsicherheit bei Messungen auf Kohlenstofffasern sowie einen adäquaten Vergleich mittels Messungen durch Referenzsysteme. Der Einsatz von Inline-Messsystemen im Bereich der automobilen Serienfertigung erfordert eine kurze Messzeit innerhalb des Produktionstakts. Aufgrund der Fokussierung auf Anwendungen im Bereich der Luftfahrt wurde in den bekannten Ansätzen kein Vorgehen vorgestellt, welches dies adressiert. Bezogen auf die Taktzeitanforderungen der automobilen Preformproduktion weisen die Systeme alle zu lange Messzeiten auf. Hier besteht die Notwendigkeit, Strategien hinsichtlich Messtechnikintegration und Messzeitreduktion intensiver zu betrachten.

4 Lösungsansatz

Kapitel 4 gibt einen Überblick über den gewählten Lösungsansatz, der in Kapitel 5 und 6 vertieft wird.

Um die im vorangegangenen Kapitel 3.5 identifizierten Forschungsdefizite zu beheben, werden in Kapitel 5 eine 3D-Messstation zur Qualitätssicherung von Preforms und in Kapitel 6 Strategien zur Inline-Integration vorgestellt (vgl. Abbildung 4-1). Die entwickelten Verfahren werden in Kapitel 7 validiert.

| Kapitel 5 3D-Messstation für Preforms | |
|--|---------------------------------------|
| 5.1 Anforderungen und Konzeption | |
| • Messstation | • Datenverarbeitung |
| 5.2 Realisierung | |
| • Messstation | • Datenverarbeitung |
| 5.3 Parameteroptimierung | |
| • Relevante Parameter | • Faktorauswahl |
| • Ergebnisse | |
| 5.4 Messunsicherheitsermittlung | |
| • Methode | • Validierung |
| Kapitel 6 Strategien zur Inline-Integration | |
| 6.1 Integrationsmöglichkeiten der 3D-Messtechnik | |
| 6.2 Konzepte zur Taktzeitreduktion | |
| • Beschleunigung der Digitalisierung | • Methoden zur Identifikation von ROI |
| • Messkonzept mit ROI | |
| 6.3 2D-Prüfung für Preforms | |
| • Anforderungen und Konzeption | • Realisierung |
| • Parameteroptimierung | |

Abbildung 4-1: Vorgehen zur Qualitätssicherung von textilen Kohlenstoffasfer-Preforms mittels optischer Fertigungsmesstechnik

Zur Entwicklung einer 3D-Messstation zur Qualitätssicherung von komplex geformten, schalenförmigen Kohlenstofffaser-Preforms werden in einem ersten Schritt Anforderungen an eine Messstation und an die erforderliche Datenauswertung formuliert. Abgeleitet daraus wird ein Lösungskonzept erarbeitet, welches die Defizite des Forschungsstands wie bspw. Abschattung und fehlende Inline-Fähigkeit aufgreift. Im Folgenden werden die Realisierung der Messstation sowie der Datenauswertung erläutert. Basierend auf den relevanten Einflussgrößen wird eine Parametervariation durchgeführt. Die Messunsicherheit des 3D-Messsystems wird experimentell an Kohlenstofffaser-Preforms erarbeitet.

Im zweiten Schritt werden Strategien zur Messtechnikintegration in einen Serienprozess vorgestellt. Neben der Integration werden Maßnahmen zur Messzeitreduktion der zuvor vorgestellten 3D-Messstation diskutiert. Basierend auf den Anforderungen einer Serienproduktion werden weitere Ansätze zur Reduktion der Messzeit über eine Selektion kritischer Zonen erarbeitet. Hierzu zählen Bereiche mit großer geometrischer Formänderung oder preformingbedingten Übergangszonen zwischen Subpreforms. Es wird ein Ansatz vorgestellt, wie durch die Kombination der 3D-Messstation und eines nicht sequentiell arbeitenden 2D-Prüfsystems für die Bewertung kritischer dreidimensionaler Bauteilzonen, eine weitere Messzeitreduktion und somit eine Inline-Integration möglich ist. Analog zur 3D-Messstation wird das 2D-Prüfsystem realisiert und neben der Datengenerierung auch die Datenauswertung betrachtet. Da das hier eingesetzte 2D-System lediglich eine Prüfaussage liefert, wird für das System keine Messunsicherheitsermittlung durchgeführt.

Studentische Arbeiten, die in diesem Rahmen inhaltlich als auch organisatorisch vom Autor der vorliegenden Arbeit angeleitet wurden, sind im Folgenden in der Form (A_<Nachname> <Jahr>) aufgeführt.

5 3D-Messstation für Preforms

Im vorliegenden Kapitel werden die Anforderungen, die Konzeption sowie die Realisierung der 3D-Messstation zur Qualitätssicherung von Kohlenstofffaser-Preforms behandelt. Anschließend erfolgt eine Parameteroptimierung des Messsystems. Zur Bewertung der Messunsicherheit wird mittels eines hierfür angefertigten kalibrierten Werkstücks exemplarisch eine experimentelle Messunsicherheitsermittlung mit der entwickelten Messstation durchgeführt.

5.1 Anforderungen und Konzeption

Basierend auf den in Kapitel 3.1 definierten Anforderungen an einen Messtechnikeinsatz werden im Folgenden die Anforderungen an die 3D-Messstation konkretisiert sowie die daraus abgeleitete Konzeption erarbeitet.

5.1.1 Messstation

Der folgende Absatz beschreibt die Anforderungen und Konzeption der Messstation, welche im Wesentlichen aus dem Messprinzip sowie der Kinematik, die zur Positionierung des Messsystems erforderlich ist, besteht. Hierzu gehören neben der Auswahl des prinzipiellen Aufbaus auch Fragen der Prozesslogik, welche den Messablauf zur Datengenerierung betreffen.

5.1.1.1 Anforderungen an das Messprinzip

Ausgehend von den Anforderungen aus Kapitel 3.1 muss eine weitere Detaillierung der Anforderungen an das Messprinzip erfolgen. Basis für eine vollflächige Auswertung komplexer Preform-Geometrien ist die vollflächige Erfassung des Bauteils mittels Verfahren, welche 3D-Messdaten (als Punktwolke) generieren. Die Betrachtung der relevanten dreidimensionalen Defekte (z. B. Falten) (vgl. Kapitel 2.2.4) ergibt, dass es das Ziel sein muss, Defekte ab einer Größe von 5 mm (Länge/Breite bzw. Höhe) zu erfassen (Henning, Gries & Flachskampf 2008). Aufgrund der Nachgiebigkeit und den biegeschlaffen Eigenschaften des textilen Halbzeugs ist ein berührungslos messendes Verfahren erforderlich, um eine Beschädigung des Preforms durch taktiles Messen auszuschließen (Preußler 2007). Um die mechanischen Eigenschaften des Laminats nicht zu beeinflussen, kann des Weiteren nur auf Messprinzipien zurückgegriffen werden, welche keine weiteren Hilfsstoffe zur Digitalisierung erfordern. Bei der Wahl des Messprinzips sind dabei die herausfordernden opti-

schen Eigenschaften des Materials zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 2.2.2). Die in Kapitel 3 betrachteten Ansätze bieten dabei einen Anhaltspunkt bezüglich der prinzipiellen Tauglichkeit der Messsysteme für den Anwendungsbereich.

Um 100 % der Bauteile vollflächig im Produktionstakt messen zu können, ist eine inline-fähige Bauteilerfassung erforderlich. Dies erfordert in Abhängigkeit vom Messprinzip eine hohe Messgeschwindigkeit, was im Besonderen bei sequentiell messenden Verfahren von Bedeutung ist.

(Lanza & Brabandt 2012b; Brabandt & Lanza 2015; Brabandt, Lanza & Hettich 2015)

Abbildung 5-1 stellt eine Konkretisierung der Anforderungen basierend auf den Anforderungen aus Kapitel 3.1 dar.

| Allgemeine Anforderungen (vgl. Kapitel 3.1) | Konkretisierung der Anforderungen bezüglich des Messprinzips |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> Messung an trockenen textilen Kohlenstofffaser-Halbzeugen durchgeführt (ohne Vorbehandlung) | <ul style="list-style-type: none"> berührungslos messendes Verfahren keine weiteren Hilfsstoffe erforderlich existierende Ansätze zur Preform Digitalisierung |
| <ul style="list-style-type: none"> Prozessintegrationsgrad (Inline) | <ul style="list-style-type: none"> inline-fähige Bauteilerfassung hohe Messgeschwindigkeit |
| <ul style="list-style-type: none"> vollflächige Auswertung | <ul style="list-style-type: none"> vollflächige Erfassung Defekte ab einer Größe von 5 mm erfassen |
| <ul style="list-style-type: none"> Erfassung von komplexen Geometrien | <ul style="list-style-type: none"> 3D-Messung |
| <ul style="list-style-type: none"> Realbauteil als Demonstrator | |
| <ul style="list-style-type: none"> Bewertung der Messunsicherheit (Geometrie) | |
| <ul style="list-style-type: none"> Ansätze zur Taktzeitreduktion für großflächige Bauteile | |

Abbildung 5-1: Anforderungen an das Messprinzip

5.1.1.2 Konzeption des Messprinzips

Für die dreidimensionale Erfassung von Geometrien stehen generell verschiedene Messprinzipien zur Wahl (vgl. Kapitel 2.3). Im Stand der Technik wurden Ansätze zur Digitalisierung von Preforms vorgestellt (vgl. Kapitel 3.2). Basierend auf einer Auswahl der Anforderungen für die Erfassung von Preforms (vgl. Kapitel 3.1 und 5.1.1.1) kann aus den vorgestellten Messprinzipien eine Wahl für ein geeignetes Messprinzip getroffen werden. Abbildung 5-2 zeigt die Bewertung im Überblick.

Bewertungseinheit
 0 = nicht erfüllt
 1 = schlecht erfüllt
 2 = gut erfüllt
 3 = sehr gut erfüllt

| Anforderungen | taktiler Koordinatenmessgerät | 2D-Laser-Lichtschnitt | 3D-Photogrammetrie | 3D-Streifenprojektionsverfahren | Computertomographie | Wirbelstrom |
|--|-------------------------------|-----------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------|-------------|
| berührungslos messendes Verfahren | 0 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 |
| keine weiteren Hilfsstoffe erforderlich | 3 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 |
| existierende Ansätze zur Preform Digitalisierung | 0 | 3 | 1 | 0 | 2 | 1 |
| inline-fähige Bauteilerfassung | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| hohe Messgeschwindigkeit | 1 | 2 | 2 | 2 | 0 | 1 |
| vollflächige Erfassung | 3 | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 |
| Defekte ab einer Größe von 5 mm erfassen | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 3D-Messung | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 1 |
| Erfüllungsgrad | 14 | 19 | 17 | 16 | 18 | 12 |

Abbildung 5-2: Vergleich und Bewertung verschiedener Messprinzipien

Mit Ausnahme des taktilen Koordinatenmessgeräts und teilweise der Wirbelstrommessung handelt es sich bei allen betrachteten Systemen um berührungslose Systeme. Für stark reflektive Oberflächen wird sowohl für die 3D-Photogrammetrie wie auch für die 3D-Streifenprojektion häufig ein mattierendes Spray oder Marker auf die Oberfläche aufgebracht. Im Stand der Forschung und Technik (vgl. Kapitel 3) existieren im Besonderen für den Einsatz von 2D-Laser-Lichtschnittsysteme eine große Anzahl an Untersuchungen, die das Potential des Messprinzips für das Einsatzgebiet im Bereich der Kohlenstofffaser-Halbzeuge zeigen. Hinsichtlich der inline-fähigen Bauteilerfassung weist das 2D-Laser-Lichtschnittprinzip einen sehr guten Erfüllungsgrad auf, was durch den hohen Verbreitungsgrad in diversen industriellen Anwendungen bestätigt wird. Die taktile Koordinatenmesstechnik und die Computertomographie sind hier aufgrund ihrer vergleichsweise komplexeren Inline-Integrationsfähigkeit

prozessbedingt meist nur schlecht einzusetzen. Dieser Bewertung schließt sich die Messgeschwindigkeit an. Hinsichtlich der Bewertung der Kriterien „vollflächige Erfassung“ und „3D-Messung“ ist anzumerken, dass es sich sowohl beim 2D-Laser-Lichtschnitt als auch beim Wirbelstrom im Gegensatz zu den anderen Messprinzipien um Lösungen handelt, die eine ergänzende Kinematik zur Messung von 3D-Geometrien erfordern (vgl. Kapitel 5.1.1.3). Folglich wurden die beiden Prinzipien hinsichtlich der beiden Kriterien mit einem vergleichsweise schlechteren Erfüllungsgrad bewertet.

Die Bewertung zeigt, dass das 2D-Laser-Lichtschnittverfahren die Anforderungen am besten erfüllt. Im Folgenden wird der Einsatz des 2D-Laser-Lichtschnittverfahrens für die dreidimensionale Digitalisierung von Preform-Oberflächen gewählt und weiter verfolgt.

Das Laser-Lichtschnittverfahren ermöglicht ein berührungsloses dreidimensionales Messen von Kohlenstofffaser-Preforms, ohne Einbringung zusätzlicher Materialien, bei gleichzeitig kurzer Messzeit. Aufgrund des zweidimensionalen Messprinzips ist jedoch für die Realisierung der 3D-Erfassung eine Kinematik erforderlich, welche für die Relativbewegung zwischen Messsystem und Messobjekt sorgt.

Für die Digitalisierung mehrfachgekrümmter Geometrien ist sicherzustellen, dass das eingesetzte Laser-Lichtschnittsystem eine vollflächige Erfassung der Preform-Oberfläche gewährleistet. Um die prinzipbedingten Abschattungseffekte (vgl. Kapitel 2.3.2) zu kompensieren, ist bei einfacher Überfahrt der Kinematik die Kombination mehrerer zueinander verkippt angeordneter Systeme zu einem optischen Messkopfsystem erforderlich. Hierdurch ist die Generierung redundanter Informationen möglich (Koch 1998). Für eine vollflächige Erfassung dreidimensionaler Oberflächen sind mindestens zwei Laser-Lichtschnittsysteme (LLS_1 und LLS_2) zu kombinieren (vgl. Abbildung 5-3). Hierbei werden die beiden LLS diagonal zueinander um die x- und y-Achse verkippt angeordnet. LLS_1 schaut somit in die positive x- und y-Richtung. LLS_2 in die negative x- und y-Richtung.

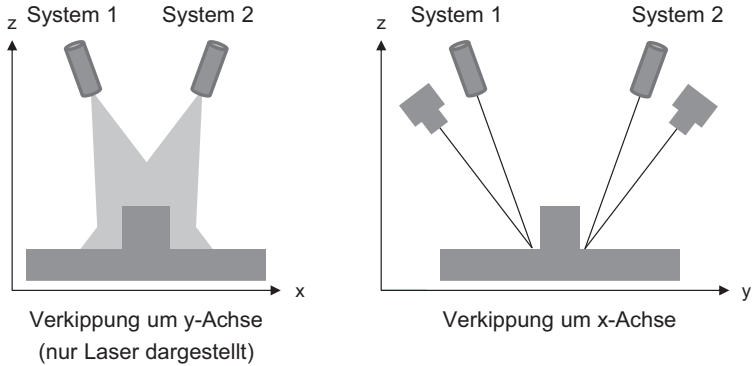


Abbildung 5-3: Verkipfung der Laser-Lichtschnittsysteme (Verfahrriichtung entlang der y-Achse) nach (Brabandt & Lanza 2015)

Zur Synchronisierung der beiden LLS, sowie um ein definiertes wegabhängiges Messraster in y-Richtung zu realisieren, ist eine wegabhängige externe Triggerung der beiden LLS erforderlich. Da die y-Bewegung des LLS-Messkopfs durch die Kinematik realisiert wird, hat die Triggerung der LLS durch die Kinematik zu erfolgen.

Aufgrund der begrenzten Tiefenschärfe der LLS ist sicherzustellen, dass sich die Systeme kontinuierlich in ihrem Fokusbereich befinden. Dies muss durch eine kontinuierliche äquidistante Höhennachführung der LLS in Abhängigkeit von der zu erfassenden Bauteilgeometrie erfolgen (vgl. Abbildung 5-4).

Der Fokuspunkt, auf welchen die Höhennachführung des Systems ausgelegt wird, befindet sich auf einer vertikalen Achse durch das Zentrum des optischen Messkopfsystems. Daher müssen beide LLS auf denselben Punkt fokussiert werden, um eine Unschärfe bei starken lokalen Höhendifferenzen der Geometrie zu minimieren. Gleichzeitig muss jedoch eine Interferenz der beiden LLS vermieden werden.

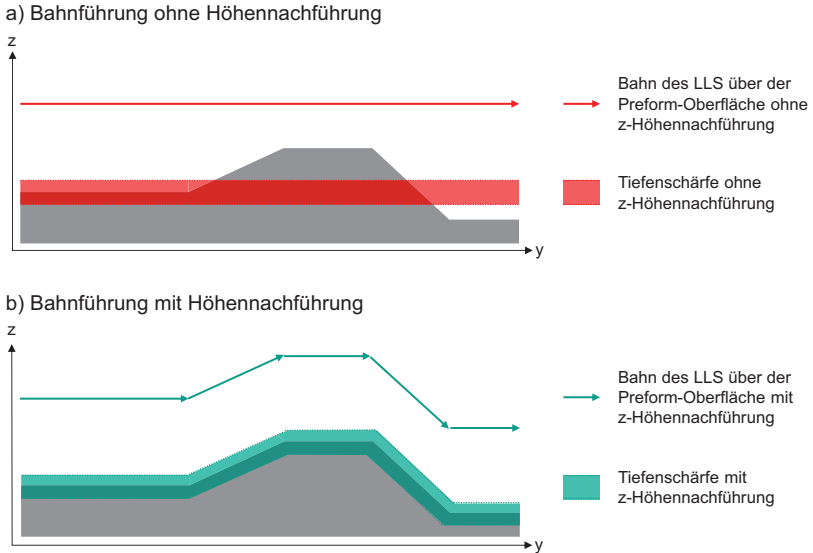


Abbildung 5-4: Höhennachführung des LLS zur Sicherstellung der Tiefenschärfe nach (Brabandt & Lanza 2015)

Eine möglichst hohe Datendichte wird durch die zeitgleiche Triggerung beider Systeme erzielt, da hierdurch pro Position die doppelte Anzahl an Messpunkten generiert wird. Die zeitgleiche Triggerung erfordert eine Separierung der Aufnahmen zwischen LLS_1 und LLS_2 . Aufgrund der Tatsache, dass die Laserlinien von LLS_1 und LLS_2 auf dieselbe Position projiziert werden, kann bei diesem Ansatz eine eindeutige Zuordnung der Messdaten lediglich über den Einsatz von Lasern mit verschiedenen Wellenlängen erfolgen. Hierfür müssen die Kamerasysteme von LLS_1 und LLS_2 analog zu den eingesetzten Wellenlängen von $Laser_1$ und $Laser_2$ einen Bandpassfilter besitzen, welcher eine Separierung der Signale ermöglicht.

Eine Alternative hierzu bildet die alternierende Triggerung der beiden LLS (vgl. Abbildung 5-5). Dabei wird, in Abhängigkeit vom zurückgelegten Weg pro absolutem Triggerpunkt, alternierend an eines der beiden LLS ein Triggersignal gesendet. Somit wird verhindert, dass zwei Laserlinien gleichzeitig an dieselbe Position projiziert werden.

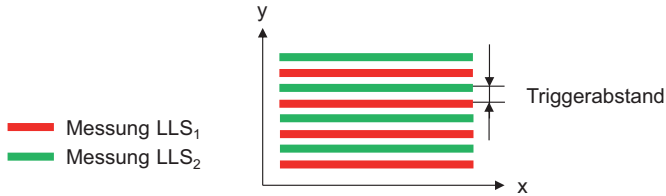


Abbildung 5-5: Scan mit alternierender Triggerung nach (A_Hornung 2015)

Aufgrund der reflexionsabhängigen Erfassungsqualität der Messungen besteht die Möglichkeit, dass durch den Einsatz verschiedener Laserwellenlängen die Qualität der Messdaten neben der Bauteiloberfläche durch den eingesetzten Laser selbst beeinflusst wird. Des Weiteren muss für zwei Systeme getrennt eine Parameteroptimierung erfolgen, welche zu einer unterschiedlichen Aufnahmequalität führen kann. Daher wird im Folgenden der Ansatz der alternierenden Triggerung verfolgt.

Wegen der begrenzten lateralen Erfassungsbreite der LLS (Breite der Laserlinie) muss das Bauteil sequenziell in mehreren parallelen Bahnen gescannt werden (vgl. Abbildung 5-6).

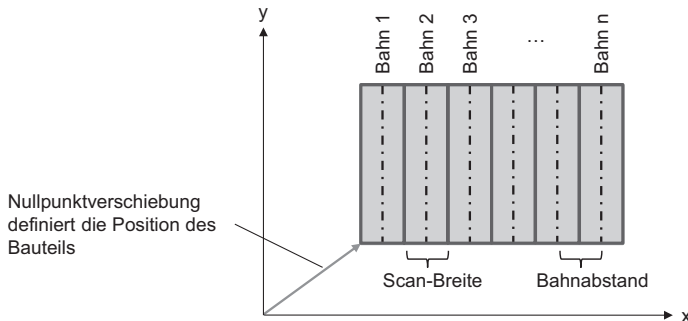


Abbildung 5-6: Segmentierung der Preform-Geometrie in Scan-Bahnen nach (Brabandt & Lanza 2015)

5.1.1.3 Anforderungen an die Kinematik

Der Begriff Kinematik beschreibt den mechanischen sowie räumlich-geometrischen Aufbau verschiedener Bewegungskonfigurationen (Favre-Bulle

2004). Sie orientiert sich u. a. an den Anforderungen, gegeben durch den Prozess, sowie die zu erreichende Positionier- und Absolutgenauigkeit des Systems. Für den speziellen Einsatz als Messgerät bestehen eine Vielzahl an Bauarten von x-, y-, z-Kinematiken (vgl. DIN EN ISO 10360-1; Gevatter 2006; Weckenmann & Gawande 2012). Aufgrund der geringeren Absolutgenauigkeit werden Industrieroboter für Messprozesse seltener eingesetzt. Hierfür kommen je nach Anwendung u. a. Auslegerbauweisen, Ständerbauweisen, Portalbauweisen (Gantry) oder Brückenbauweisen zum Einsatz (DIN EN ISO 10360-1).

Die Anforderungen an die Kinematik ergeben sich in erster Linie durch das Messprinzip und die zu erzielende Genauigkeit der Messung. 3D-Messsysteme, die ohne Relativbewegung zum Messobjekt direkt 3D-Daten erfassen, benötigen bei ausreichend großem Erfassungsbereich keine Kinematik. Sequentiell messende Systeme (1D- oder 2D-Messsysteme) wie das in Kapitel 5.1.1.2 gewählte 2D-Laser-Lichtschnittsystem erfordern zur Generierung von 3D-Daten ein meist kontinuierliches Überführen des Messsystems über das Messobjekt. Abhängig vom Erfassungsbereich des Messsystems erfolgt dies in mehreren Bahnsegmenten (vgl. Abbildung 5-6). Aufgrund der meist eingeschränkten Tiefenschärfe optischer Messsysteme, ist in Abhängigkeit der Preformkontur eine Höhennachführung des Messsystems in z-Richtung erforderlich (vgl. Abbildung 5-4). Ausgehend von Demonstrator-Geometrien muss das Messprinzip in der Lage sein, für den Automobilbau typische Bauteilgrößen mit komplex gekrümmten Geometrien zu erfassen (vgl. Kapitel 2.1). Für die vorliegende Arbeit wird die Annahme getroffen, dass ein Bauteil mit einer quadratischen Grundfläche von $\leq 1 \text{ m}^2$ und einer Höhendifferenz von max. 300 mm erfasst werden können muss. Als beispielhaftes Bauteil ist die Stirnwand eines PKW zu nennen. Für einen flexiblen Einsatz des Messsystems ist für die Positionierung des Bauteils eine Fixierung bzw. eine Wechselvorrichtung vorzuhalten, welche je nach technischer Ausführung ca. 100 mm Bauraum in z-Richtung erfordert. Folglich muss die Kinematik ein Messvolumen von min. 1000 mm in x- und y-Richtung und min. 400 mm in z-Richtung aufweisen. Die Verfahrensgeschwindigkeit des Systems muss eine Inline-Anwendung des Messsystems im Prozesstakt ermöglichen. Maßgebend sind jedoch die Messgeschwindigkeit sowie der Erfassungsbereich des zu wählenden Messsystems.

Die erforderliche Absolutgenauigkeit der Kinematik richtet sich bei sequentiell messenden Systemen nach der geforderten Auflösung des Messsystems. Diese wird analog zum Stand der Technik mit 50 μm festgelegt. Um bei sequentiell messenden Systemen ein homogenes Raster an Messpunkten zu erzeugen, muss die Kinematik in Abhängigkeit von ihrer Position das Messsystem mittels Triggersignalen ansteuern können. Diese Trigger müssen ebenfalls in einer Schrittweite von 50 μm entlang der x- oder y-Achse ausgelöst werden können, um dadurch eine wegabhängige und nicht zeitabhängige Triggerung zu erzielen. Die Steuerung der Kinematik muss die Koordinaten der Ist-Position zum Triggerzeitpunkt speichern, um eine Fusion mit den Messdaten zu ermöglichen.

Inline Messsysteme werden innerhalb der Produktionslinie eingesetzt und nicht in klimatisierten Messräumen (vgl. Kapitel 2.4). Hierdurch ergeben sich erhöhte Anforderungen an eine robuste Auslegung des Systems. Eine wesentliche Einflussgröße auf die Messunsicherheit von Messsystemen ist die thermische Drift aufgrund von Temperaturschwankungen (Keferstein & Marxer 2015). Folglich dürfen die Komponenten der Kinematik nur eine geringe thermische Ausdehnung aufweisen. In Abbildung 5-7 werden die Anforderungen an die Kinematik zusammengefasst.

(Lanza & Brabandt 2013; Brabandt & Lanza 2015; Brabandt, Lanza & Hettich 2015)

Anforderungen an die Kinematik:

- kontinuierliches Überführen des 2D-Laser-Lichtschnittsystems
- Modularer Aufbau (ca. 40 kg Nutzlast)
- Höhennachführung in z-Richtung
- Messvolumen von min. $1000 \times 1000 \times 400 \text{ mm}^3$ (x, y, z)
- Verfahrensgeschwindigkeit für Inline-Anwendung
- Absolutgenauigkeit 50 μm
- Ausgabe von wegabhängigen Triggersignalen in 50 μm Schritten (x-, y-Achse)
- Speichern der Positions-Koordinaten zum Triggerzeitpunkt
- Konstruktive Reduktion des thermischen Drifts

Abbildung 5-7: Anforderungen an die Kinematik

5.1.1.4 Konzeption der Kinematik

Entsprechend den Anforderungen aus Kapitel 5.1.1.3 wird eine Bewertung typischer Kinematiken durchgeführt (vgl. Abbildung 5-8).

| Anforderungen | Koordinatenmessgerät | Portal Kinematik/ kartesischer Roboter | Knickarmroboter |
|--|--|---|-----------------|
| | Bewertungseinheit 0 = nicht erfüllt 1 = schlecht erfüllt 2 = gut erfüllt 3 = sehr gut erfüllt | | |
| kontinuierliches Überführen des 2D-Laser-Lichtschnittsystems | 2 | 3 | 3 |
| modularer Aufbau (ca. 40 kg Nutzlast) | 1 | 3 | 2 |
| Höhenachführung in z-Richtung | 3 | 3 | 3 |
| Messvolumen von min. 1000*1000*400 mm ³ (x, y, z) | 3 | 3 | 2 |
| Verfahrgeschwindigkeit für Inline-Anwendung | 2 | 3 | 3 |
| Absolutgenauigkeit 50 µm | 3 | 2 | 1 |
| Ausgabe von wegabhängigen Triggersignalen in 50 µm Schritten (x-, y-Achse) | 2 | 3 | 2 |
| Speichern der Positions-Koordinaten zum Triggerzeitpunkt | 2 | 3 | 2 |
| konstruktive Reduktion des thermischen Drifts | 3 | 3 | 1 |
| Erfüllungsgrad | 21 | 26 | 19 |

Abbildung 5-8: Vergleich und Bewertung verschiedener Kinematiken

Die Bewertung zeigt, dass eine Kinematik in Portalbauweise mit beweglichem Portal am besten für den Einsatz geeignet ist. Im Besonderen sind die vielfältigen individuellen Anpassungsmöglichkeiten von Vorteil. Um eine möglichst hohe Flexibilität des Systems zu erzielen, soll an der z-Achse eine Drehachse integriert werden, um eine Drehung des Messkopfs und somit ein Scannen in x- und y-Richtung zu ermöglichen.

Die z-Achse soll für eine zulässige Nutzlast von ca. 40 kg ausgelegt werden, um den experimentellen Aufbau des Messkopfs aufnehmen zu können. Die geforderte Genauigkeit am Tool Center Point (TCP) (Stelle, an dem sich der Messkopf befindet) erfordert folglich eine steife Ausführung der Kinematik.

Um die thermische Drift zu minimieren, sollen wesentliche Komponenten der Kinematik aus Hartgestein (z. B. Granit) gefertigt werden. Hartgestein bietet mit einem Längenausdehnungskoeffizienten $\alpha = 8 \mu\text{m/K}$ eine geringere Anfälligkeit für Temperaturschwankungen als Stahl mit $\alpha \approx 10\text{-}16 \mu\text{m/K}$ (Keferstein & Marxer 2015).

Die Fixierung des Messobjektes soll mittels in den Maschinentisch eingebrachter Gewindebuchsen erfolgen. Diese können ebenfalls als Fixierung für eine automatische Bauteilzuführung genutzt werden.

Um eine wegabhängige Triggerung des LLS zu ermöglichen, sollen hochauflösende Wegmesssysteme in den Achsen des Portals eingesetzt werden. Das Auslesen der Wegmesssysteme sowie die gesamte Steuerung des Portals sollen mittels einer Werkzeugmaschinen-CNC-Steuerung erfolgen, welche bereits die Grundfunktionen zur Achsansteuerung implementiert hat. Die Positions-Koordinaten zum Triggerzeitpunkt müssen als Paare, bestehend aus fortlaufender Nummer sowie x-, y- und z-Position, gespeichert werden.

(Lanza & Brabandt 2013; Brabandt, Lanza & Hettich 2015; Brabandt & Lanza 2015)

5.1.2 Datenverarbeitung

Die Datenverarbeitung beinhaltet die Datengenerierung und Datenaufbereitung der generierten Punktwolken sowie die nachfolgende Auswertung.

5.1.2.1 Anforderungen an die Datenverarbeitung

Ziel der Datenverarbeitung ist die Detektion von Defekten eines Preforms, in Form von Geometrieabweichungen von der Soll-Geometrie (z. B. Falten). Zur Analyse der gesamten Bauteiloberfläche ist eine vollflächige Auswertung der Messdaten erforderlich. Hierfür müssen die Daten in einer globalen Punktwolke ($\text{COP}_{\text{Global}}$) vorliegen, welche die gesamte gemessene Preformgeometrie repräsentiert. In Abhängigkeit vom Messprinzip muss vorgeschaltet zur Datenauswertung eine Datenaufbereitung stattfinden, welche aus den Daten der

einzelnen erfassten Segmente ($COP_1, COP_2, \dots, COP_i$) eine COP_{global} erzeugt. Zur Bewertung der Daten muss im Anschluss ein Abgleich mit den Soll-Geometriedaten des Bauteils erfolgen. Mittels eines Grenzwerts sollen die Zonen der COP_{global} bewertet werden können, welche eine zu große Abweichung vom Soll-Wert aufweisen. Abbildung 5-9 fasst die Anforderungen an die Datenauswertung zusammen. (Brabandt & Lanza 2015; Brabandt, Lanza & Hettich 2015)

Anforderungen an die Datenverarbeitung:

- Datenaufbereitung bei sequentiellem Scannen in Bahnen - Erzeugen einer globalen Punktwolke (COP_{global}) aus einzelnen Bahnsegmenten ($COP_1, COP_2, \dots, COP_i$)
- Datenauswertung einer COP_{global} durch Abgleich mit der Soll-Geometrie

Abbildung 5-9: Anforderungen an die Datenverarbeitung

5.1.2.2 Konzeption der Datengenerierung

Aus der Festlegung des Messsystems leiten sich Anforderungen an den Prozess des Gesamtsystems ab. Zur Realisierung des in Kapitel 5.1.1.2 beschriebenen Messprinzips müssen, in Abhängigkeit von der Tiefenschärfe der Abstand des LLS zur Oberfläche, sowie die Bahnbreite definiert werden. Hierfür muss der zu digitalisierende Preform als 3D CAD-Modell vorliegen. Mittels CAD/CAM-Software wird aus dem Modell, sowie den Informationen zu Scan- und Bahnabstand, eine Offline-Bahnplanung durchgeführt, deren Ergebnis als sogenannter G-Code vorliegt. Der G-Code mit den Bahninformationen kann im Folgenden in die Werkzeugmaschinen-CNC-Steuerung geladen werden. Vor Beginn des Scans muss die Nullpunktreferenz (Werkstückkoordinatensystem) gesetzt sowie der Soll-Wert des Triggerabstands definiert werden. Das Triggersignal muss über eine geeignete Schnittstelle an LLS_1 und LLS_2 gesendet werden. Während des Scans müssen die Ist-Koordinaten des TCP zum Triggerzeitpunkt ausgelesen und gespeichert werden, um eine Fusion mit den LLS-Daten zu ermöglichen. Ergebnis des Scan-Prozesses sind, für jede gescannte Bahn n , zwei separat vorliegende Punktwolken ($COP_{1/Bahn\ n}$ und $COP_{2/Bahn\ n}$) sowie die x-, y-, z-Koordinaten zum Triggerzeitpunkt entlang der Bahn n . Der Prozess der Datengenerierung wird in Abbildung 5-10 zusam-

menfassend dargestellt. (Brabandt & Lanza 2015; Brabandt, Lanza & Hettich 2015)

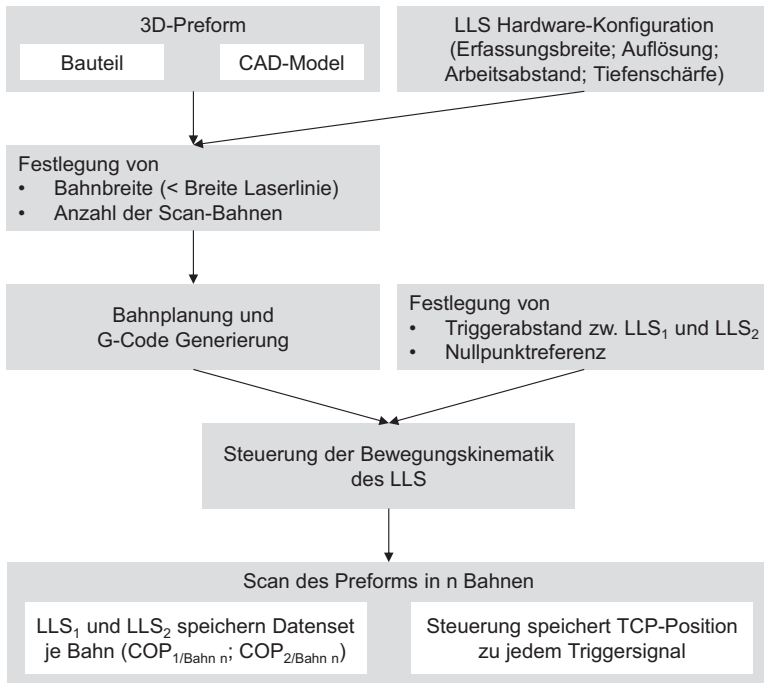


Abbildung 5-10: 3D-Datengenerierung nach (Brabandt & Lanza 2015)

5.1.2.3 Konzeption der Datenaufbereitung

Für die nachgeschaltete Auswertung der Messung ist es erforderlich, zuerst je gescannter Bahn die Daten der beiden Laser-Lichtschnittsysteme zu fusionieren und anschließend die gemeinsam vorliegenden Daten der einzelnen Bahnen zusammenzuführen, um sie nachfolgend in einer globalen Punktwolke (COP_{Global}) vorliegen zu haben. Eine globale Punktwolke ist erforderlich, um basierend auf einer höheren Datendichte eine abschließende Auswertung und Qualitätsbewertung des Preforms auch bei ungünstigen Reflexionsbedingungen durchführen zu können.

Für die Generierung der COP_{Global} werden die Punktwolken der einzelnen Sensoren ($COP_{1/Bahn n}$ und $COP_{2/Bahn n}$) zunächst einer Höhenkorrektur je Bahn

unterzogen. Hierzu werden die Positionswerte der z-Achse des Portals zum Zeitpunkt der Triggerung mit den Koordinaten der Punktwolken verrechnet (Abbildung 5-11). Dies erfolgt mittels der gespeicherten Positionsdaten des TCPs. Anschließend werden die beiden in ihren z-Werten korrigierten Punktwolken einer Bahn ($COP_{1/Bahn\ n}$ und $COP_{2/Bahn\ n}$) fusioniert. Somit entsteht für die digitalisierte Bahn eine Punktwolke $COP_{Bahn\ n}$, welche aus zwei Perspektiven fusioniert ist wodurch Abschattungseffekte reduziert werden. Dieser Ablauf wird für jede Bahn des Bauteils wiederholt.

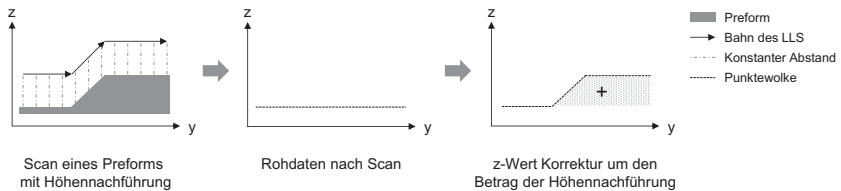


Abbildung 5-11: z-Wert Korrektur der COP nach (Brabandt & Lanza 2015)

Um die einzelnen fusionierten Bahnsegmente in ein gemeinsames 3D-Abbild des gescannten Bauteils zu überführen (COP_{Global}), müssen abschließend alle höhenkompensierten Bahnen noch einem x-Offset unterzogen werden. Dieser Offset entspricht der im CAD/CAM-System festgelegten Bahnbreite. Das Zusammenführen mehrerer Sensordaten in einem Koordinatensystem wird als Registrierung bezeichnet (Batchelor 2012). Diese erfolgt über ein gemeinsames Bezugssystem. Abbildung 5-12 fasst den Ablauf der Datenaufbereitung zusammen. (Brabandt & Lanza 2015; Brabandt, Lanza & Hettich 2015)

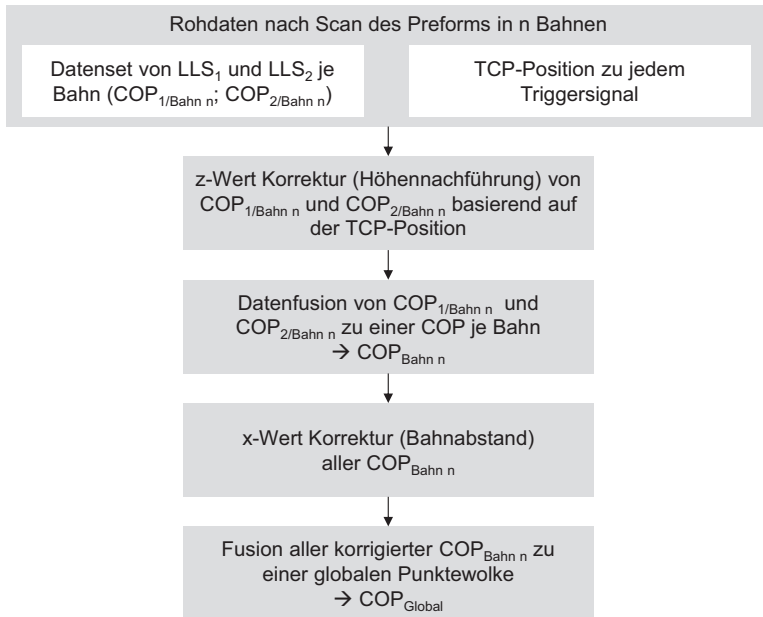


Abbildung 5-12: 3D-Datenaufbereitung nach (Brabandt & Lanza 2015)

5.1.2.4 Konzeption der Datenauswertung

Ziel der Datenauswertung ist es, Geometrieabweichungen auf der Preform-Oberfläche zu detektieren (vgl. Abbildung 5-13). Für einen Abgleich mit der digitalisierten Oberfläche ist ein CAD-Modell des Formwerkzeugs oder besser der Preform-Geometrie erforderlich. Zwischen Formwerkzeug und Preform-Geometrie besteht ein Offset, welcher sich aus der Aufdickung durch n-Lagen textilen Halbzeugs ergibt.

Die fusionierte Punktwolke COP_{Global} (Ist) kann nun mittels eines Soll/Ist-Vergleichs mit dem CAD-Modell (Soll) abgeglichen werden. Die daraus resultierenden metrischen Abweichungswerte in z-Richtung (Höhenwerte) können für eine weiterführende Auswertung in die 2D-Ebene projiziert werden. Hierbei werden die Höhenabweichungen in Verbindung mit der x-, y-Position als Grauwert repräsentiert.

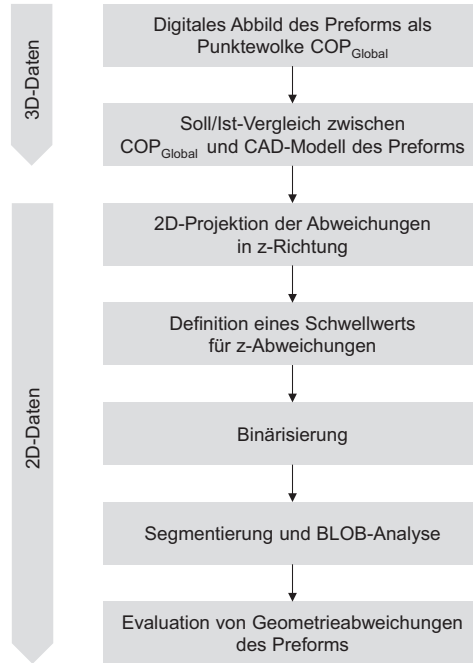


Abbildung 5-13: 3D-Datenauswertung

Für eine detailliertere Analyse der Preform-Oberfläche und der Defekte muss eine Extraktion der Defekte erfolgen. Hierfür ist die Festlegung eines Grenzwerts für die Höhenabweichung, abgeleitet von den Toleranzanforderungen des Preforms, erforderlich, welcher im Folgenden als Schwellwert über das 2D-Grauwert-Bild gelegt werden kann (vgl. Kapitel 2.5.2). Darauf folgend findet eine Binärisierung statt. Das resultierende Binärbild repräsentiert die Bereiche wie beispielsweise Falten oder Formabweichungen des Preforms, die oberhalb des gesetzten Schwellwerts liegen. Sie repräsentieren folglich Defekte. Für die Ermittlung defektspezifischer Merkmale müssen die einzeln vorliegenden Pixel in eine zusammenhängende Fläche überführt werden. Dieser Schritt wird als Segmentierung bezeichnet (Beyerer, Puente León & Frese 2012). Nachfolgend kann eine BLOB-Analyse (Binary Large Object) durchgeführt werden. Hierbei werden zusammenhängende Zonen des Binärbilds erfasst und können hinsichtlich verschiedener Kriterien, wie ihrer Position (x-, y-Koordinate) und Fläche, ausgewertet werden. Somit ist eine abschließende

Lokalisierung und Bewertung der Defekte des Preforms möglich. (Brabandt & Lanza 2015; Brabandt, Lanza & Hettich 2015)

5.2 Realisierung

Im folgenden Kapitel werden die wesentlichen Komponenten der Messstation sowie die Realisierung der Datenauswertung vorgestellt.

5.2.1 Messstation

Basierend auf der in Kapitel 5.1 dargestellten Konzeption werden im Folgenden das Messsystem sowie die Portalkinematik erläutert. Abbildung 5-14 zeigt den Portal-Messaufbau sowie eine Detailabbildung des optischen Messkopfsystems (vgl. Abbildung 0-2 im Anhang).

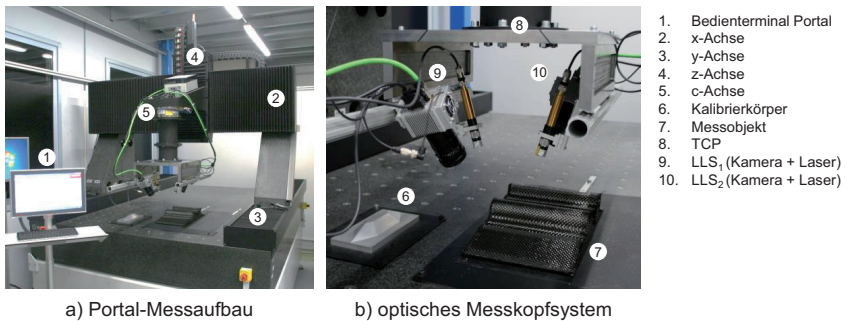


Abbildung 5-14: 3D-Messstation nach (Brabandt, Lanza & Hettich 2015)

5.2.1.1 Optisches Messkopfsystem

Für den Aufbau des optischen Messkopfsystems werden zwei Laser-Lichtschnittsysteme eingesetzt, die jeweils aus einer Kamera und einem Linienlaser bestehen. Als Kamera kommt die C4-2040-4M-GigE der AT – Automation Technology GmbH zum Einsatz. Die Auflösung des CMOS-Sensors beträgt 2048×2048 Pixel bei einer 16 bit Grauwertabstufung. Die 3D-Hochgeschwindigkeits-Kamera für Triangulationsanwendungen mit interner Extraktion der 3D-Profile besitzt für die Messung auf Oberflächen mit inhomogener Reflektivität den Multiple-Slope Modus, eine spezielle HDR-3D-Funktion (High Dynamic Range). Der Multiple-Slope Modus hat das Ziel, durch Mehrfachauslesen des Sensors innerhalb der Belichtungszeit, zu verhindern, dass

ein Pixel in die Sättigung gerät (max. Wert) und keine weitere Unterscheidung möglich ist. Die Detektion der Laserlinie erfolgt mittels des Center Of Gravity (COG) 3D-Algorithmus. Bei diesem Algorithmus wird die Mitte der Laserlinie über den Schwerpunkt der Intensitätsverteilung bestimmt. (AT - Automation Technology GmbH 2014)

Als Objektiv wird das FUJINON HF25SA-1/1,4 von Fujifilm Europe GmbH verwendet (Stemmer Imaging GmbH 2015b). Der Arbeitsabstand liegt bei ca. 250 mm. Das System arbeitet mit dem Linienlaser Z120M18H-660-LP30-V2 der Z-Laser Optoelektronik GmbH (Stemmer Imaging GmbH 2015c). Die Wellenlänge des Schutzklasse 3B Lasers mit 120 mW beträgt 660 nm und befindet sich im roten Farbspektrum. Beim vorliegenden Öffnungswinkel von 30° und genanntem Arbeitsabstand beträgt die Breite der Laserlinien ca. 130 mm. Zur Abschirmung von Fremdlicht ist in das optische System ein Bandpassfilter (660 nm +/- 30 nm).

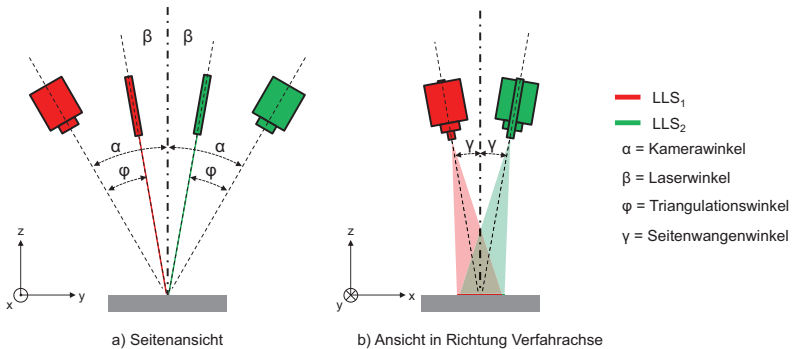


Abbildung 5-15: Anordnung der Laser-Lichtschnittsysteme nach (A_Hornung 2015)

Die beiden LLS, deren Anordnung jeweils analog zu Geometrie 4 gewählt ist (vgl. Abbildung 2-7), werden zur Reduktion von Abschattungseffekten diagonal zueinander verkippt angeordnet (vgl. Kapitel 5.1.1.2 und Abbildung 5-15). Die Kamera sowie der Laser sind jeweils an einer Seitenwange befestigt, welche an eine Basisplatte montiert sind. Die Basisplatte ist an den TCP des Portals angeflanscht. Um verschiedene seitliche Verkippfungswinkel der LLS zu realisieren, wurden Seitenwangen mit 0°, 5°, 10° und 15° Neigungswinkel als Stahlkonstruktion gefertigt (vgl. Abbildung 5-14 b)).

Beide LLS sind jeweils so positioniert, dass sie einen gemeinsamen Messbereich auf der Oberfläche abdecken. Der Bildausschnitt des Objektivs wird so gewählt, dass Randbereiche der Laserlinie für die Auswertung nicht berücksichtigt werden, da sowohl der Laser als auch das Objektiv in den Randbereichen, in Abhängigkeit vom gewählten Neigungswinkel sowie der Oberflächengeometrie, nicht mehr im Tiefenschärfenbereich liegen (vgl. Abbildung 5-16) und die homogene Intensitätsverteilung des Lasers nicht mehr gegeben ist. Desweiteren ist in den Randbereichen nicht sichergestellt, dass sowohl LLS_1 als auch LLS_2 den Bereich erfassen. Im Folgenden wird von einer durchschnittlichen lateralen Erfassung des Kamerasystems von ca. 100 mm ausgegangen. Somit ergibt sich bei einer lateralen Sensorauflösung von 2048 Pixeln eine rechnerische Auflösung von $49 \mu\text{m}$.

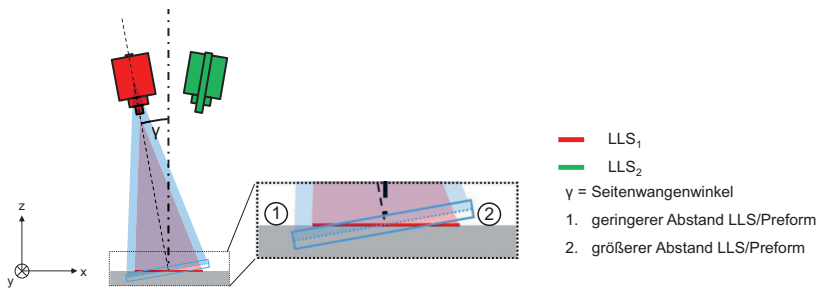


Abbildung 5-16: Tiefenschärfenbereich nach (A_Hornung 2015)

Zur metrischen Kalibrierung von LLS_1 und LLS_2 wird ein speziell für den Einsatz bei Verkippung in x-y-Richtung konstruierter Kalibrierkörper gescannt und die generierten Daten mit den hinterlegten Ist-Daten des Kalibrierkörpers verrechnet (vgl. Abbildung 5-14 b); Abbildung 0-3 und Abbildung 0-4 im Anhang).

5.2.1.2 Portal-Kinematik

Die Portal-Kinematik ist analog zur Konzeption in den wesentlichen Komponenten aus Granit ausgeführt (vgl. Abbildung 5-14 a)). Das Messvolumen beträgt $1300 \times 1300 \times 400 \text{ mm}^3$ (x, y, z). Die x-, sowie die y-Achse besitzen Linearantriebe. Die z-Achse ist aufgrund der Selbsthemmung als Kugelgewindetrieb ausgeführt. Der Drehbereich der c-Achse beträgt $\pm 90^\circ$. Die Verfahrensgeschwindigkeit der x-, y-, z-Achsen beträgt max. 400 mm/s. Um die hohen An-

forderungen an das Messsystem sicherzustellen, sind die Achsen mit hochauflösenden Glasmaßstäben ausgeführt. Somit kann bei einer maximalen Nutzlast von 40 kg eine TCP-Positioniergenauigkeit $\leq 50 \mu\text{m}$ sowie eine TCP-Wiederholgenauigkeit $\leq 25 \mu\text{m}$ erzielt werden (RAMPF 2014b).

Das System nutzt als CNC-Steuerung Beckhoff TwinCAT 3 mit dem Werkzeugmaschinenmodul. Somit können die Grundfunktionalitäten wie G- und M-Befehle in der Programmierung genutzt werden (DIN 66025 Teil 1; Industrielle Steuerungstechnik GmbH 2013). Für den Datenaustausch ist der Steuerungs-PC mit dem Auswerterechner der LLS verbunden. Der Nullpunkt des Maschinenkoordinatensystems kann mittels der Steuerung auf ein Werkstückkoordinatensystem verschoben werden (G54 Nullpunktverschiebung). Die Definition der Achsen folgt nach DIN 66217. Der Nullpunkt des Systems ist in der linken vorderen Ecke lokalisiert. Die Achse auf dem Gantry beschreibt die x-Richtung. Die beiden Achsen, welche das Gantry tragen, beschreiben die y-Richtung. (RAMPF 2014a; RAMPF 2014b)

Um eine homogene Auflösung der $\text{COP}_{\text{Global}}$ zu erzielen, wird, abgeleitet aus dem Wegsignal der Glasmaßstäbe der Verfahrachse (y-Achse), durch die Portalsteuerung ein Triggersignal in einem definierten Weginkrement gesendet. Der Triggerabstand kann über die Bedienoberfläche der CNC frei gewählt werden. Im Folgenden wird ein Triggerintervall von $50 \mu\text{m}$ verwendet, um somit in x- und y-Richtung annähernd dieselbe Auflösung zu erzielen. Man kann folglich von einer hohen Punktedichte ($\leq 0,1 \text{ mm}$) sprechen (DIN EN ISO 10360-1). Das Triggersignal wird als RS422 Signal alternierend an LLS_1 und LLS_2 gesendet. Zum Zeitpunkt der Triggerung wird die TCP-Position (x-, y-, z-Position im Werkstückkoordinatensystem) in Verbindung mit einer fortlaufenden Nummer in eine CSV-Datei geschrieben.

Um für die einzelnen Bahnen jeweils separat vorliegende Scans zu erzeugen, wird die Aufnahme des Frames zu Beginn der Bahn mittels des M-Befehls M101 gestartet und ein 24 V HTL-Signal an die beiden LLS gesendet. Am Ende der Bahn wird die Aufnahme durch den M-Befehl M100 beendet sowie die CSV-Datei gespeichert und an den Auswertungsrechner übertragen.

Abbildung 5-17 visualisiert die Ansteuerung der LLS über die Portal-Kinematik.

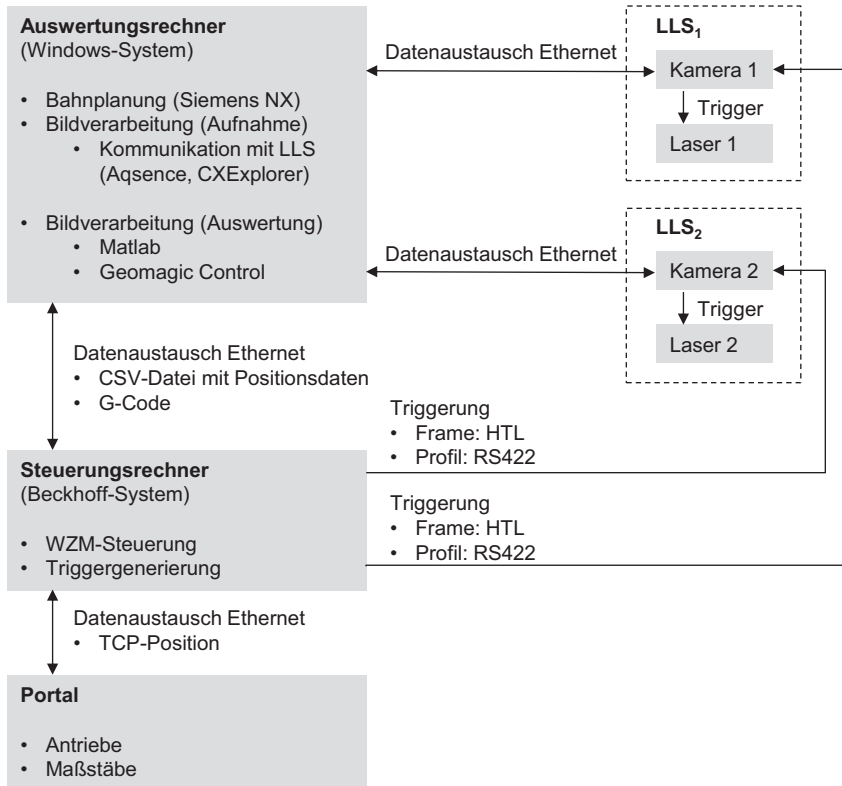


Abbildung 5-17: Ansteuerung 3D-Messstation

5.2.1.3 Messablauf

Zur Vorbereitung der Messung erfolgt eine Bahnplanung mittels der CAD/CAM Software Siemens NX. Basierend auf dem gewünschten Werkstückkoordinatensystem, dem Bahnabstand, der Scanrichtung sowie des Scanabstands erfolgt die G-Code Generierung. Mittels eines Interpreters wird der G-Code an das Format der Beckhoff-Steuerung angepasst. Des Weiteren werden M-Befehle als Start-/Stopp-Punkte der Trigger, welche die Bahnen definieren, eingefügt. Anschließend wird der G-Code in die Steuerung geladen. Das Triggerintervall sowie die Wahl zwischen alternierender und synchroner Triggerung der Laser wird in der Bedienoberfläche der Steuerung definiert. In Ab-

hängigkeit von der Werkstückposition wird eine Nullpunktverschiebung relativ zum Werkstückkoordinatensystem durchgeführt.

Vor der Durchführung der Messung ist eine Kalibrierung der beiden LLS erforderlich. Hierfür wird eine Kalibrierfahrt durchgeführt, bei welcher die beiden LLS den auf dem Maschinentisch fixierten Kalibrierkörper digitalisieren (vgl. Abbildung 5-18). Im Anschluss daran werden die erfassten Daten je LLS mit der hinterlegten Soll-Geometrie des Kalibrierkörpers abgeglichen und in der Aqsence SL Software 3D Express eine Kalibriermatrix erstellt. Nach der Kalibrierung liegt das Koordinatensystem der generierten 3D-Daten beider LLS im Ursprung des Kalibrierkörpers. Somit wird eine Registrierung der Aufnahmen sowie die Datenfusion ermöglicht.

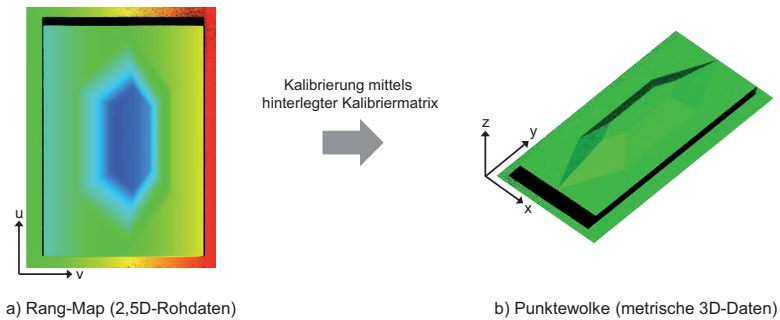


Abbildung 5-18: Kalibrierung nach (A_Hornung 2015)

Die generierten 3D-Daten müssen für die weitere Verarbeitung als COP vorliegen. Startpunkt ist die Erfassung der Laserlinie auf dem Sensorchip. Hierfür wird jeder aufgenommene Frame mittels des COG-Algorithmus ausgewertet und einzelne Profile abgeleitet. Diese resultieren in einer Graustufen-RangMap (vgl. Kapitel 2.5.3). Der Koordinatenursprung liegt in der linken vorderen Ecke der RangMap. Mittels der hinterlegten Kalibriermatrix wird die 2,5D RangMap in eine metrische 3D COP überführt. Der Koordinatenursprung befindet sich nun relativ zum Kalibrierkörper. Neben der 3D COP stehen die Daten auch als 2,5D ZMap zur Verfügung.

Bei der Erfassung einer Preform-Geometrie wird folglich nach der LLS Kalibrierung der G-Code abgefahren und für jede Bahn ein Messdatenpaar, bestehend aus $COP_{1/Bahn\ n}$, $COP_{2/Bahn\ n}$ und einer CSV-Datei $_{Bahn\ n}$, erzeugt.

5.2.2 Datenverarbeitung

Im vorliegenden Kapitel wird die Realisierung der Datenverarbeitung vorgestellt. Hierzu gehören die Aufbereitung der Rohdaten, die Datenmanipulation und –fusion sowie die Auswertung mittels eines Soll/Ist-Vergleiches.

Abbildung 5-19 bietet einen Überblick über die eingesetzten Software-Tools, deren Funktion und deren Verknüpfung.

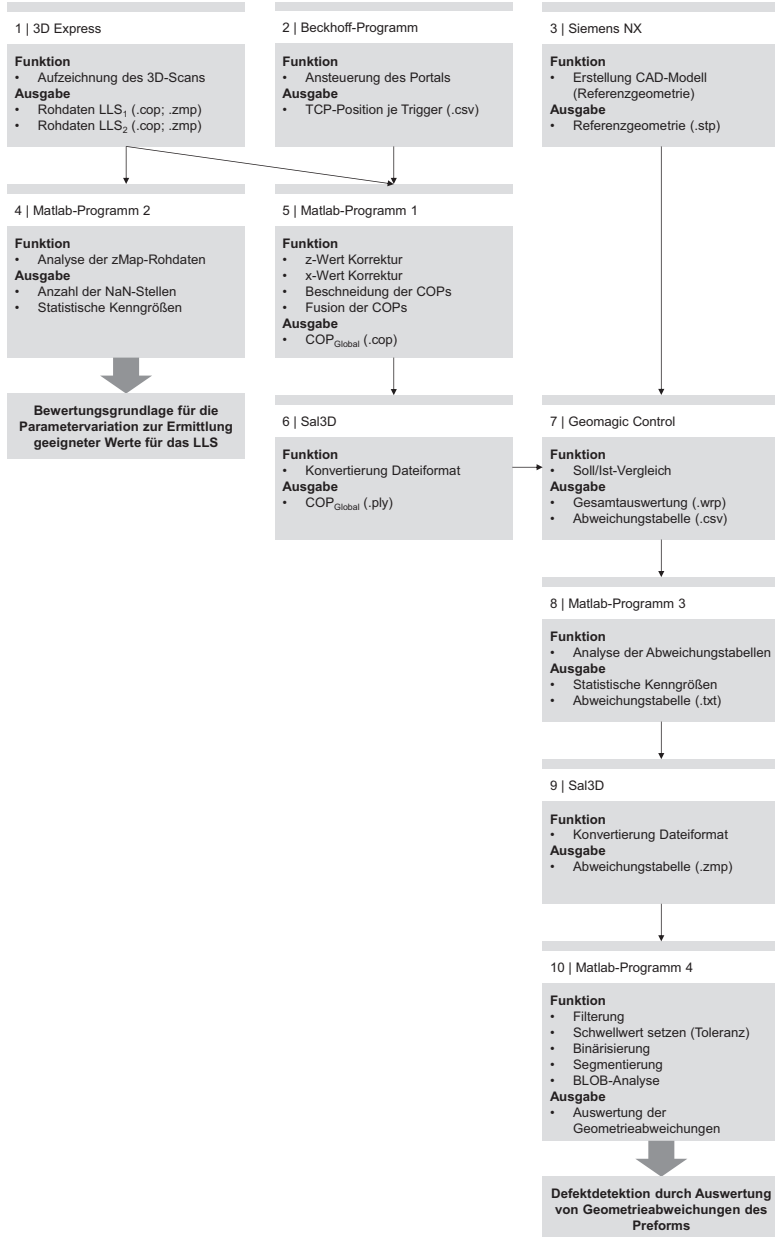


Abbildung 5-19: Gesamtsystem Datenverarbeitung nach (A_Hettich 2015; A_Hornung 2015)

5.2.2.1 Datenaufbereitung

Für die Auswertung ist eine Aufbereitung der Rohdaten der beiden LLS erforderlich. Die Datenmanipulation und –fusion wurde in MATLAB® implementiert (vgl. Abbildung 5-23).

Die als COP vorliegenden Daten von LLS₁ und LLS₂ (vgl. Abbildung 5-19; Schritt 1) werden in Matlab importiert (Schritt 5). Aufgrund der Höhennachführung des Portals bilden die erfassten Daten nicht mehr das Höhenprofil der Geometrie ab. Zur Kompensation werden die alternierend erfassten Profile von COP_{1/Bahn n} und COP_{2/Bahn n} basierend auf der zugehörigen CSV-Datei (Schritt 2) einer z-Wert Korrektur unterzogen (vgl. Abbildung 5-20). Hierfür wird die Differenz Δh zwischen dem Null-Punkt des Werkstückkoordinatensystems und der z-Position des TCP der jeweiligen Triggerposition berechnet.

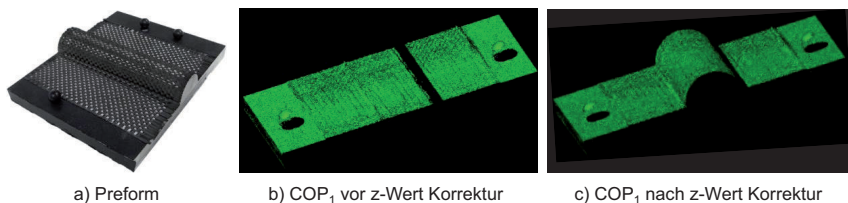


Abbildung 5-20: z-Wert Korrektur der COP nach (A_Hornung 2015)

Um eine ungleichmäßige Überlappung der COPs in den Randbereichen zu vermeiden, erfolgt eine Beschneidung der Ränder, sodass durch beide COPs derselbe Bereich abgebildet wird. Anschließend werden die beiden separat vorliegenden COPs zu einer gemeinsamen COP_{Bahn n} fusioniert in dem die Daten in eine gemeinsame Datei geschrieben werden (vgl. Abbildung 5-21). Die Registrierung wird durch das gemeinsame Koordinatensystem ermöglicht, welches durch den Kalibrierkörper festgelegt ist.

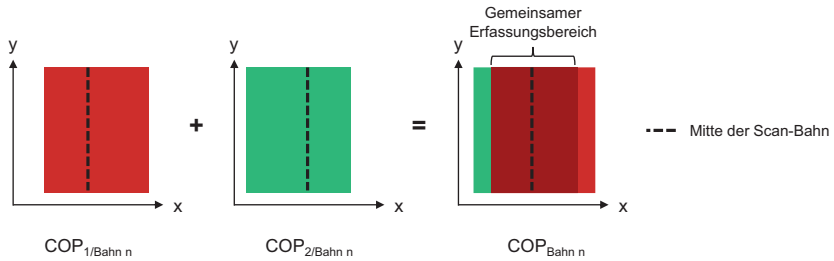


Abbildung 5-21: Fusion $COP_{1/Bahn\ n}$ und $COP_{2/Bahn\ n}$ nach (A_Hornung 2015)

Um eine COP_{Global} zu erhalten, welche die gesamte Preform-Geometrie repräsentiert, müssen alle fusionierten Bahnen $COP_{Bahn\ 1...n}$ zusammengeführt werden. Hierfür erfolgt eine x -Wert Korrektur von Bahn 2 bis n um den gewählten Bahnabstandsfaktor (vgl. Abbildung 5-22). Nach erfolgter z - und x -Korrektur werden abschließend die COPs aller Bahnen in eine gemeinsamen COP_{Global} fusioniert.

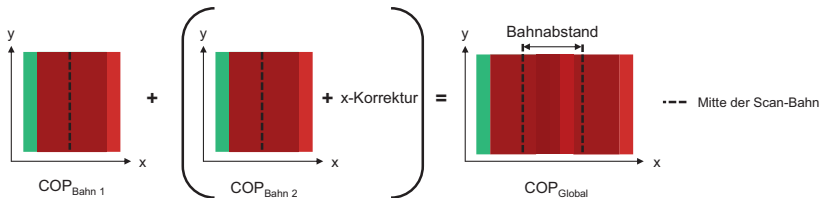


Abbildung 5-22: Korrektur des x -Offsets nach (A_Hornung 2015)

Für die Basis der Datenauswertung erfolgt die Analyse der Geometrieabweichungen mittels der Software Geomagic Control von 3D Systems Inc. (Schritt 7). Dies erfordert den Export der COP_{Global} und die anschließende Konvertierung in das Dateiformat .ply mittels Sal3D von Aqsense SL (Schritt 6).

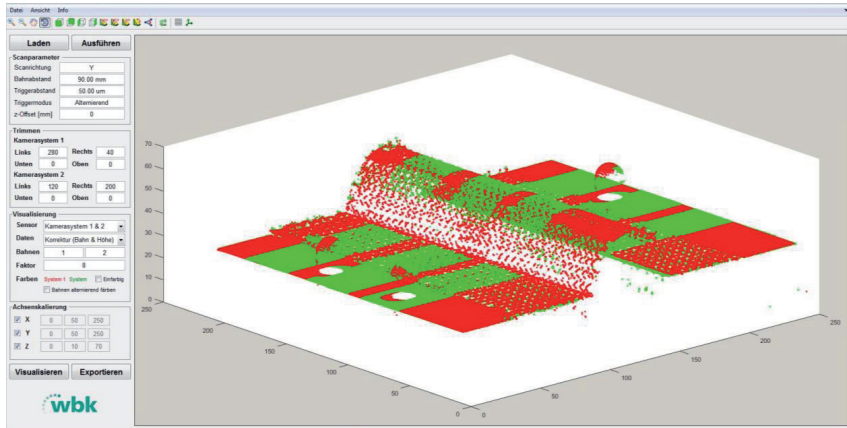


Abbildung 5-23: Matlab Tool - Datenfusion

5.2.2.2 Datenauswertung

Die Datenauswertung der gemessenen Preform-Geometrien basiert auf der Auswertung von Geometrieabweichungen mittels Soll/Ist-Vergleich. Für die Durchführung des Soll/Ist Vergleichs besteht die Möglichkeit die Ausrichtung vollflächig unter Einbezug der gesamten Geometrie oder mittels geometrischer Merkmale zu erzeugen. Die flächige Ausrichtung zeigt Schwächen bei COPs, deren Daten aufgrund bspw. der Oberflächenaufdickung durch das textile Halbzeug nicht exakt dem Soll-Modell entsprechen (vgl. Abbildung 5-24 a)). Bei der Ausrichtung mittels Merkmalen wird eine definierte Geometrie (z. B. Kugel) für die Ausrichtung herangezogen, welche einzig zum Zweck der Bauteilausrichtung genutzt wird (vgl. Abbildung 5-24 b)).

Für die weitere Durchführung wird auf eine Ausrichtung mittels geometrischer Merkmale zurückgegriffen, welche über die Software Geomagic Control erfolgt (Schritt 7). Hierzu werden in einer bekannten Position zum Preform mindestens drei Kugeln positioniert und beim Scan digitalisiert. Um Fehler in der Messkette zu reduzieren, müssen die Merkmale, welche auf der Form angebracht sind, mittels KMG gemessen werden und ihre Ist-Position im CAD Modell hinterlegt werden.

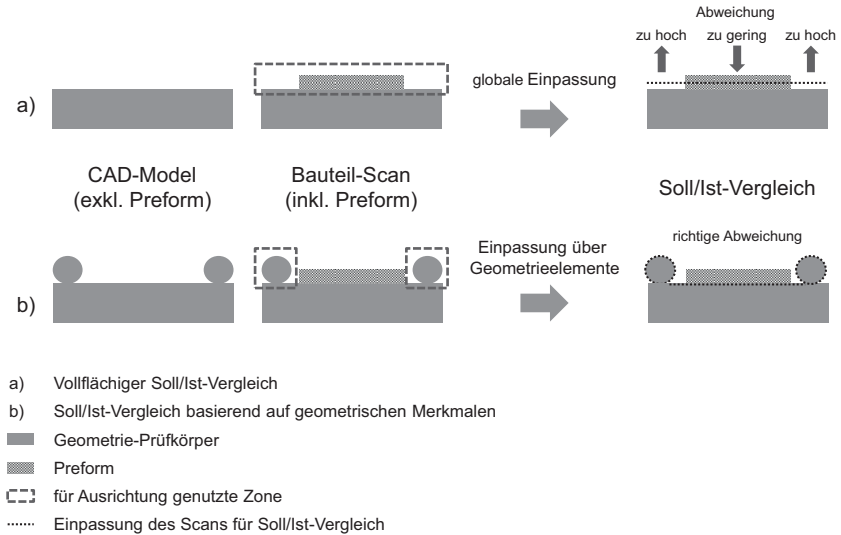


Abbildung 5-24: Soll/Ist-Vergleich

Voruntersuchungen haben gezeigt, dass die Qualität der Digitalisierung am besten gewährleistet ist, wenn der Kontrast zwischen geometrischem Merkmal und dem textilen Halbzeug gering ist. Eine schwarze Oberfläche hat sich als geeignet erwiesen. Hierdurch wird das Auftreten von Artefakten minimiert (A_Hornung 2015).

Für den Soll/Ist-Abgleich werden mittels Geomagic die Kugeln im Scan (Ist) selektiert und den Kugeln im Referenzmodell (Soll) zugeordnet, woraufhin die Ausrichtung erfolgt (vgl. Abbildung 5-25).

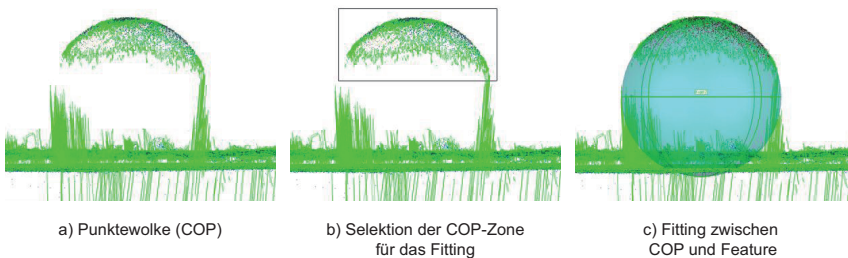


Abbildung 5-25: Extraktion von geometrischem Merkmal aus Punktwolke nach (A_Hornung 2015)

Anschließend kann die Soll/Ist-Abweichung ermittelt werden (vgl. Abbildung 5-26). Um lediglich den gewünschten Bereich des Preforms auszuwerten, werden an den Rändern Beschneidungsgrenzen festgelegt. Für weiterführende Auswertungen kann eine Abweichungstabelle im .csv-Format exportiert werden.

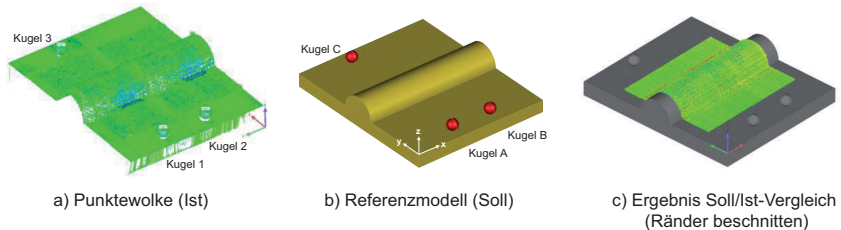


Abbildung 5-26: Soll/Ist-Vergleich nach (A_Hornung 2015)

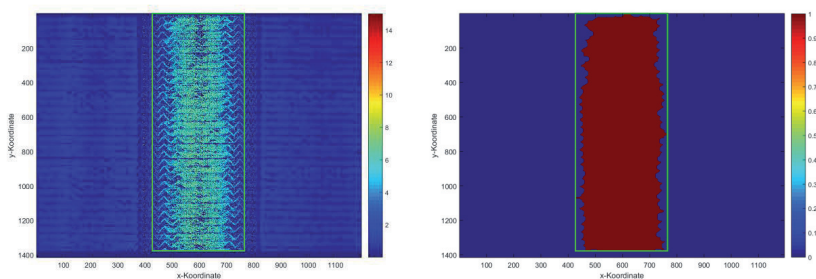
Die .csv-Datei wird über Matlab in eine .txt-Datei konvertiert (Schritt 8). Als Basis für eine statistische Analyse sowie für eine Defekterkennung mittels 2D-Bildverarbeitung ist die Projektion der z-Abweichungen in die 2D-Ebene erforderlich. Mittels Sal3D werden die Daten der txt-Datei in eine ZMap überführt (Schritt 9).

Die statistische Analyse der ZMap in Matlab erlaubt die Auswertung der NaN-Stellen (Not-a-Number), des Medians, des Mittelwerts, der Standardabweichung, der Min./Max.-Werte sowie der Verteilung der Messwerte, dargestellt im Histogramm (Schritt 4). Die Auswertung bildet die Bewertungsgrundlage für die Parametervariation zur Ermittlung geeigneter Werte für das LLS. Für die Analyse wird die noch nicht fusionierte ZMap verwendet.

Zur Detektion von Geometrieabweichungen wurde in Matlab eine Auswertung der ZMap basierend auf einer 2D-Bildverarbeitung implementiert (Schritt 10) (vgl. Kapitel 2.5.2).

Um mögliche Artefakte, erzeugt durch Reflexionen des textilen Halbzeugs, zu minimieren, erfolgt zu Beginn eine Bildvorverarbeitung mittels eines Mittelwertfilters. Anschließend erfolgt die Segmentierung. Hierbei wird in Abhängigkeit vom Material und der zu treffenden Toleranz ein Schwellwert definiert. Der Schwellwert definiert die Höhenabweichung/Toleranz, über welcher ein Defekt im Preform vorliegt. Das Ergebnis der Segmentierung ist ein Binärbild. Das

Segment, welches über dem Schwellwert liegt, wird rot visualisiert (vgl. Abbildung 5-27). Aufgrund der Reflexionseigenschaften des textilen Halbzeugs ist es materialabhängig, ob die vorliegende Punktwolke geschlossen ist oder Lücken aufweist. Lücken sowie evtl. nach der Bildvorverarbeitung noch vorhandene Artefakte, werden mittels morphologischer Operationen geschlossen bzw. reduziert. Lücken (NaN-Stellen) innerhalb des Segments werden mittels der Funktion Hole Removal geschlossen. Mittels der Funktionen Erosion und Dilatation werden Artefakte eliminiert und die Außenkontur geglättet. Die Werte (Anzahl Pixel) sind in Abhängigkeit vom Halbzeug sowie der Orientierung relativ zur Laserlinie zu wählen. Abschließend werden aus den Segmenten relevante Merkmale ermittelt, über welche sich die detektierten Defekte beschreiben lassen. Die Auswertung ermöglicht die Ausgabe von Fläche, Schwerpunkt (x, y), Umfang, Länge, Breite und Exzentrizität. Die Merkmalsextraktion erfolgt mittels BLOB-Analyse. Die ermittelten Merkmale bieten die Möglichkeit einer Klassifikation der Defekte. Beispielsweise ist es denkbar, Falten anhand ihrer länglichen Ausprägung über den Wert der Exzentrizität bzw. über das Verhältnis zwischen Länge und Breite des umhüllenden Rechtecks zu klassifizieren. Die implementierte Auswertung ermöglicht zur besseren Lokalisierung die Visualisierung der detektierten Außenkontur des Defekts in der ZMap (vgl. Abbildung 5-27).



- a) ZMap mit z-Abweichungswerten nach Soll/Ist-Vergleich und überlagerter Außenkontur (grün) des Defekts aus der BLOB-Analyse
- b) BLOB-Analyse mit Segment (rot) über definiertem Schwellwert

Abbildung 5-27: Defektdetektion mittels BLOB-Analyse (Schritt 10)

5.3 Parameteroptimierung

Basis für eine qualitativ hochwertige Digitalisierung von Preforms ist die Wahl geeigneter Parameter für die LLS und die Portalkinematik. Im Folgenden werden Einflussgrößen auf die Messung, das Vorgehen zur Auswahl geeigneter Parameter sowie die Ergebnisse der Parametervariation vorgestellt.

5.3.1 Relevante Parameter

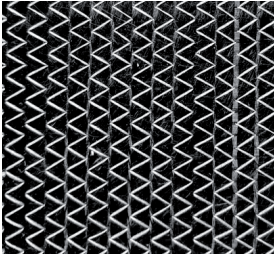
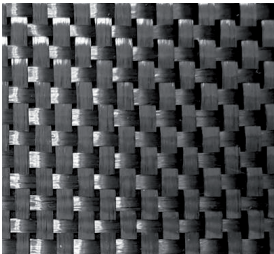
Die Messung der 3D-Messstation wird durch vielfältige Größen beeinflusst. Diese Einflüsse kommen im Wesentlichen zustande durch Material, Portaleinstellungen und Einstellungen von Kamera sowie Laser der beiden LLS. Tabelle 5-1 gibt einen Überblick über relevante Parameter des Systems (A_Barthold 2013; A_Öppling 2014; A_Pernel 2015; A_Hettich 2015; A_Hornung 2015).

Tabelle 5-1: Übersicht des Parameterfelds

| | Veränderbarer Parameter | Einheit |
|---|---|------------------------|
| Material | Art des textilen Halbzeugs (Gewebe; Gelege) | - |
| | Orientierung relativ zur Laserline (0°, 45°, 90°) | ° |
| Portal | Triggerintervall | μm |
| | Verfahrgeschwindigkeit | mm/min |
| | Bahnabstand | mm |
| LLS | Kamera | |
| | • Blende | - |
| | • Belichtungszeit | μs |
| | • Fokuspunkt | - |
| | • Slope mode | - |
| | • Threshold | - |
| | • Art des 3D Kamera Algorithmus (z.B. COG) | - |
| | Laser | |
| | • Spannung | V |
| | • Belichtungszeit | μs |
| | • Fokuspunkt | - |
| | Anordnung | |
| | • Geometrieordnung (1 bis 4) | - |
| | • Kamerawinkel α | ° |
| • Laserwinkel β | ° | |
| • Triangulationswinkel φ | ° | |
| • seitliche Verkippung (Seitenwangen 0°, 5°, 10°, 15°) γ | ° | |

Für die Durchführung der Versuche werden zwei repräsentative Referenzmaterialien definiert. Bei den textilen Halbzeugen handelt es sich um das Gelege HP-B412C (HP-Textiles GmbH 2013) und das Gewebe HP-P400C (HP-Textiles GmbH 2010) jeweils mit einem Flächengewicht von 400 g/m² (vgl. Tabelle 5-2).

Tabelle 5-2: Referenzmaterial

| Material | Beschreibung | Darstellung |
|------------------------------------|--|---|
| Bidirektional-Gelege (HP-B412C) | <ul style="list-style-type: none"> - Faserorientierung: 0/90° - Flächengewicht: 400 g/m² - Nähbindung: Trikot - Garnfeinheit: 50K |  |
| Gewebe (HP-P400C) | <ul style="list-style-type: none"> - Faserorientierung: 0/90° - Flächengewicht: 400 g/m² - Garnfeinheit: 12K (Kett/Schuss) |  |

5.3.2 Faktorauswahl

Die Anzahl der aufgeführten Parameter ergibt eine Vielzahl an Kombinationen, welche im Rahmen der Untersuchungen nicht vollumfänglich betrachtet werden können. Um relevante Parameter zu identifizieren, findet mittels Vorversuchen eine Eingrenzung statt.

Die Bewertung der Ergebnisse erfolgt anhand der Anzahl der NaN-Stellen (Schritt 4) der ZMap sowie der Standardabweichung des Soll/Ist-Vergleichs (Schritt 8). Für die Analyse der NaN-Stellen wird eine definierte horizontale Zone des LLS₁ herangezogen. Die Standardabweichung wird basierend auf

dem Soll/Ist-Vergleich der COP_{Global} ausgewertet und fallabhängig für die Auswertung in Zonen selektiert.

Untersuchungen zeigen, dass die LLS-Anordnung Geometrie 3 (vgl. Abbildung 2-7) die besten Messergebnisse erzielt (A_Barthold 2013; A_Öppling 2014). Geometrie 3 bietet jedoch Defizite hinsichtlich Abschattung bei stark gekrümmten Oberflächen. Um, wie in der Zielsetzung formuliert, möglichst effektiv Abschattungseffekte zu reduzieren, wird daher Geometrie 4 für die weiteren Untersuchungen verwendet. Hierbei werden mit einem Triangulationswinkel von $\varphi = 30^\circ$ die besten Ergebnisse erzielt (A_Öppling 2014). Der Laserwinkel ist dabei möglichst klein zu wählen (A_Hettich 2015). Für die folgenden Versuche wird daher ein Laserwinkel $\beta = 3^\circ$ und ein Kamerawinkel $\alpha = 33^\circ$ festgelegt (A_Hornung 2015).

Die seitliche Verkippung hat das Ziel mögliche Abschattungen zu reduzieren. Es ist jedoch zu beachten, dass hierdurch die Qualität der Digitalisierung nicht übermäßig beeinträchtigt wird. Die Betrachtung zeigt, dass bei einer seitlichen Verkippung von $\gamma = 15^\circ$ u. a. die Scheimpflug-Bedingung² verletzt wird. Des Weiteren ist unter Verkippung die Tiefenschärfe der Kamera nicht über den gesamten Bereich der Aufnahme vorhanden (vgl. Abbildung 5-16). Messungen des Kalibrierkörpers und Auswertungen der Kalibrierung mittels der Software Metric Calibration Tool der Firma Aqsence (vgl. Abbildung 5-28) bestätigen, dass die Güte der Aufnahmen bei $\gamma = 15^\circ$ stark abnimmt. Folglich werden für die weiteren Untersuchungen lediglich die seitlichen Verkippungen mit $\gamma = 0^\circ$, 5° und 10° betrachtet (A_Hornung 2015). Die Winkeleinstellungen der eingesetzten LLS sind punktsymmetrisch zum TCP.

² „Damit zwei Ebenen im Raum scharf aufeinander abgebildet werden können, muss ihre Schnittgerade in der Linsenebene liegen“ (Beyerer, Puente León & Frese 2012, S. 158-159)

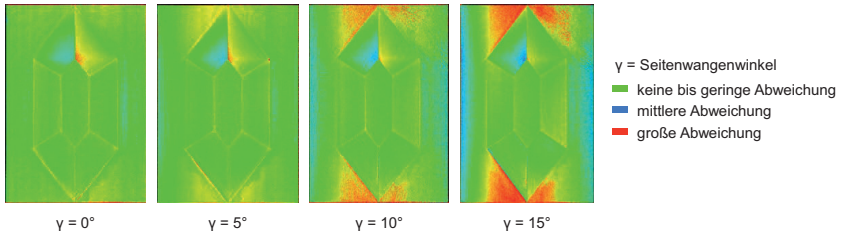


Abbildung 5-28: Güte der Kalibrierung in Abhängigkeit von der seitlichen Verkipfung nach (A_Hornung 2015)

Untersuchungen zur Laserintensität haben einen Zusammenhang zwischen der Reduzierung der NaN-Stellen und einer Zunahme der Standardabweichung bei einer Erhöhung der elektrischen Spannung ergeben (A_Pernel 2015). Der Effekt bildet sich in Abhängigkeit von Material und Faserorientierung verschieden stark aus (A_Pernel 2015). Aufgrund der Beschaffenheit der Kohlenstofffaser-Halbzeuge ist jedoch tendenziell eine hohe Laserspannung zu wählen, um eine ausreichende Erfassung zu gewährleisten. Daher werden im folgenden Werte von 3,5 V bzw. 4,0 V herangezogen (A_Hornung 2015).

Bezüglich der Belichtungszeit ergibt sich dieselbe Korrelation wie bei der Laserintensität. Höhere Werte ergeben eine Reduktion der NaN-Stellen bei gleichzeitig zunehmender Standardabweichung (A_Pernel 2015). Für die weiteren Untersuchungen wird der Bereich von 300 μs bis 1200 μs in Schritten von 300 μs betrachtet (A_Hornung 2015).

Die Blendenzahl beeinflusst Schärfe, Auflösungsvermögen sowie Lichteinfall auf den Sensor. Von Seiten des Systemanbieters wird ein Wert von $k = 5,6$ empfohlen, was beim gewählten Objektiv in Hinblick auf die kritische Blende ein Optimum hinsichtlich Aberationsunschärfe und Beugungsunschärfe darstellt. Der Arbeitsabstand des Objektivs liegt bei 250 mm.

Durch die Wahl des Thresholds kann das Rauschen der Messwerte wesentlich beeinflusst werden und somit die Qualität der Daten gesteigert werden. Untersuchungen zeigen, dass ein Wert von 150 nicht unterschritten werden sollte, da hier Bereiche, welche nicht zur Laserlinie gehören, einen signifikanten Einfluss erlangen (A_Hornung 2015). Dennoch ist eine Erhöhung nur bis zu einem Wert von ca. 600 sinnvoll, da bei höheren Werten trotz stark reduziertem

Rauschen häufig die Berechnung der Laserlinie über den Schwerpunkt der Gaußkurve nicht mehr möglich ist (A_Hornung 2015). Im Folgenden werden die Threshold-Werte 150, 250, 400 und 600 betrachtet.

Aufgrund des hohen Dynamikumfangs des reflektierenden textilen Halbzeugs ist die Wahl des Triple Slope Modes vorteilhaft. Untersuchungen mit verschiedenen Schwellwerten zeigen lediglich geringe Einflüsse (A_Pernel 2015). Daher werden im Folgenden die Standardeinstellungen verwendet (Schwelle bei 60 % und 90 % der Belichtungszeit).

Die elektronischen Parameter werden für die Versuche an beiden LLS identisch variiert.

Für das Portal wird eine Verfahrensgeschwindigkeit von $v = 500$ mm/min bei einem alternierenden Triggerabstand von $50 \mu\text{m}$ gewählt (A_Hornung 2015).

Für die Versuche wird ein Prüfkörper (vgl. Kapitel 7.1.2; Abbildung 0-3 im Anhang) mit konvexer Zone und drei Referenzkugeln in zwei Messbahnen gescannt (vgl. Abbildung 5-26). Die Überlappung der Bahnen beträgt < 10 mm. In Abhängigkeit von den verschiedenen Seitenwangen wird für die Versuche ein gleichbleibender Bahnabstand von 90 mm gewählt (A_Hornung 2015).

Untersuchungen zeigen, dass aufgrund der sehr unterschiedlichen Helligkeit und Oberflächenbeschaffenheit des Kalibrierkörpers (vgl. Abbildung 5-14 Nr. 6; Abbildung 0-3 im Anhang) im Vergleich zum textilen Halbzeug ein separater Parametersatz für die Kalibrierung zu verwenden ist. Für die weiteren Untersuchungen (vgl. Kapitel 5.3.3, Kapitel 5.4.2 und Kapitel 7) wird im Folgenden die Kalibrierung mit den Werten Laserintensität = $2,5$ mV, Belichtungszeit = $700 \mu\text{s}$ und Threshold = 150 durchgeführt.

5.3.3 Ergebnisse

Basierend auf den Voruntersuchungen erfolgt die Parameteroptimierung für die Materialien Gelege 0° , 45° und 90° sowie Gewebe 0° und 45° analog zum Versuchsplan in Tabelle 5-3. Für jedes Material wird der Einfluss der seitlichen Verkipfung γ mit 0° , 5° und 10° untersucht.

Tabelle 5-3: Versuchsplan je seitlicher Verkippung und Materialkombination nach (A_Hornung 2015)

| Belichtungszeit [μ s] | Laserintensität 3,5 V | | | | Laserintensität 4,0 V | | | |
|----------------------------|-----------------------|-----|-----|-----|-----------------------|-----|-----|-----|
| | Threshold | | | | Threshold | | | |
| | 150 | 250 | 400 | 600 | 150 | 250 | 400 | 600 |
| 300 | | | | | | | | |
| 600 | | | | | | | | |
| 900 | | | | | | | | |
| 1200 | | | | | | | | |

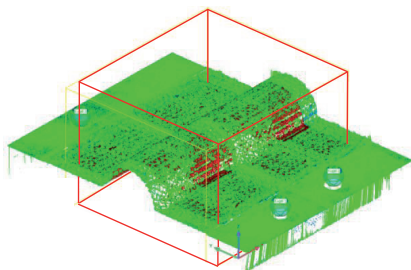
Zur vereinfachten Nomenklatur werden im Folgenden die in Tabelle 5-4 eingeführten Abkürzungen verwendet.

Tabelle 5-4: Abkürzungen in Versuchsdurchführung nach (A_Hornung 2015)

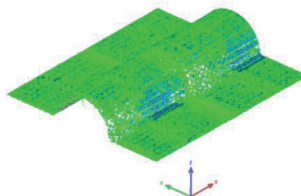
| Material und Faserorientierung [$^{\circ}$] | | Seitliche Verkippung γ [$^{\circ}$] | | Laserintensität [V] | | Belichtungszeit [μ s] | | Threshold [-] | | |
|---|----|--|----|---------------------|------|----------------------------|------|---------------|-----|-------|
| Gelege | 0 | GL0 | 0 | sw0 | 3,50 | U3.5 | 300 | t300 | 150 | Th150 |
| | 45 | GL45 | 5 | sw5 | 4,00 | U4.0 | 600 | t600 | 250 | Th250 |
| | 90 | GL90 | 10 | sw10 | | | 900 | t900 | 400 | Th400 |
| Gewebe | 0 | GW0 | | | | | 1200 | t1200 | 600 | Th600 |
| | 45 | GW45 | | | | | | | | |

Ziel der Untersuchung ist es, je Material und Faserorientierung ein optimales Parameterset zu ermitteln. Die Untersuchungen werden anhand eines Prüfkörpers mit konvexer Zone durchgeführt. Um die Einflüsse geometrischer Zonen bewerten zu können, wird in der folgenden Auswertung sowohl eine Auswertung von ebenen Zonen als auch der gesamten Zone des Prüfkörpers, welcher eine konvexe Zone beinhaltet, durchgeführt (vgl. Abbildung 5-29) (A_Hornung 2015). Die ebenen Zonen werden so gewählt, dass sie keine Artefakte der konvexen Zonen beinhalten.

a) konvexer Auswertungsbereich

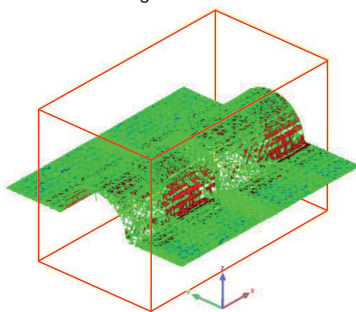


i) Selektion Auswertungsbereich (ohne Rand und Kugeln)

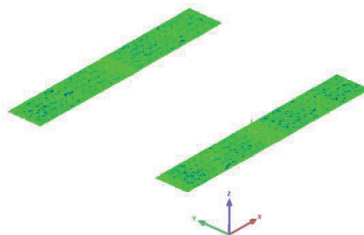


ii) beschnittener konvexer Auswertungsbereich

b) ebener Auswertungsbereich



i) Selektion konvexe Zone des Auswertungsbereichs



ii) beschnittener ebener Auswertungsbereich

Abbildung 5-29: Auswertungsbereiche des Prüfkörpers nach (A_Hornung 2015)

Für die Untersuchungen werden als Zielgrößen die Anzahl der NaN-Stellen (in Prozent) und die Standardabweichung der Messwerte (in mm) aus dem Soll/Ist-Vergleich herangezogen. Ziel ist es dabei eine möglichst geringe Anzahl an NaN-Stellen zu erhalten, bei gleichzeitig niedriger Standardabweichung der Werte (vgl. Abbildung 5-30). Eine geringe Anzahl an NaN-Stellen spricht für eine vollflächige Erfassung der Oberfläche ohne merkliche Lücken, welche z. B. aufgrund von Reflexionen des Materials auftreten können. Ein niedriger Wert der Standardabweichung spricht für eine geringe Streuung der Messwerte von der Ist-Geometrie und somit für eine gute Erfassungsqualität.

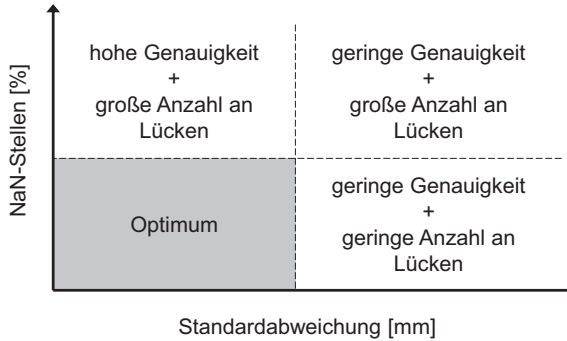


Abbildung 5-30: Beziehung zwischen den Zielgrößen

Abbildung 5-31 gibt einen Überblick über das Gesamtergebnis der Auswertung. Die links dargestellten Werte mit geringer Standardabweichung $\leq 0,29$ mm stellen die Ergebnisse für die ebenen Auswertungsbereiche dar. Die Werte inklusive der konvexen Zone ergeben durchweg höhere Standardabweichungswerte $\geq 1,81$ mm. Die Detaildarstellungen je Material und Faserorientierung sowie für die Messdaten sind in Abbildung 0-9 bis Abbildung 0-28 im Anhang dargestellt. (A_Hornung 2015)

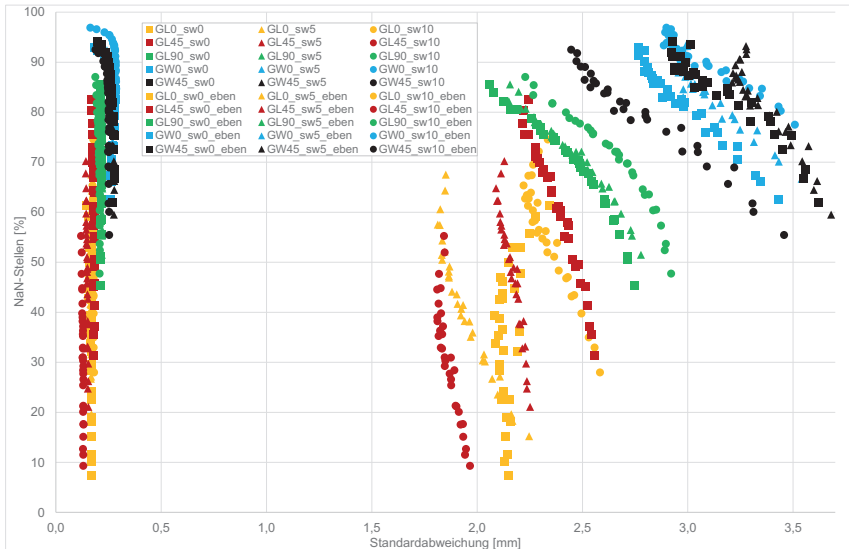


Abbildung 5-31: Versuchsergebnisse gesamt (A_Hornung 2015)

Abbildung 5-32 zeigt exemplarisch für Gelege 45° die Zusammenhänge, welche sich durch die Variation der Parameter Laserintensität, Belichtungszeit und Threshold auf die Zahl der Not-a-Number (NaN)-Stellen ergeben. Je Belichtungszeit sind Messungen mit einer schrittweisen Erhöhung des Thresholds durchgeführt (Threshold-Stufen von links nach rechts aufsteigend: 150, 250, 400, 600). Die Zusammenhänge gelten für alle untersuchten Materialien (vgl. Abbildung 0-29 bis Abbildung 0-33 im Anhang). Eine Erhöhung der Laserintensität führt zu einer Verringerung der NaN-Stellen. Die Erhöhung der Belichtungszeit ergibt ebenfalls eine Reduktion der NaN-Stellen. Die Erhöhung des Thresholds führt zu einer erhöhten Anzahl an NaN-Stellen. (A_Hornung 2015)

Unabhängig von der gewählten Seitenwangenneigung wird die minimale Zahl an NaN-Stellen immer durch die Parameterkombination mit der Bezeichnung [SW]_U4.0_t1200_Th150 erzielt und die maximale Zahl an NaN-Stellen durch die Parameterkombination [SW]_U3.5_t300_Th600 (A_Hornung 2015).

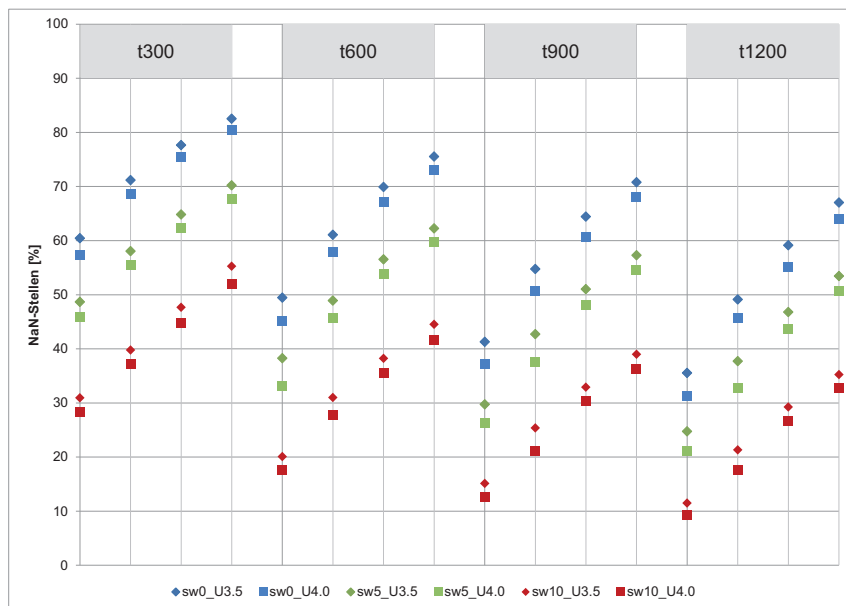


Abbildung 5-32: NaN-Stellen für GL45 – je Belichtungszeit erfolgt eine schrittweise Erhöhung des Thresholds (A_Hornung 2015)

Das Verhalten der Standardabweichung der Messwerte des LLS unterliegt im Gegensatz zum Verhalten der NaN-Stellen keinem systematischen Muster. Die Auswirkungen von Laserintensität, Belichtungszeit und Threshold variieren in Abhängigkeit vom verwendeten Material sowie der Faserorientierung. (A_Hornung 2015)

Bezüglich einzelner Konstellationen lassen sich wiederum Beziehungen aufzeigen, welche in Abbildung 5-33 exemplarisch für Gelege 45° dargestellt sind (A_Hornung 2015). Abbildung 0-34 bis Abbildung 0-38 im Anhang geben die weiteren Ergebnisse für das Verhalten der Standardabweichung wieder.

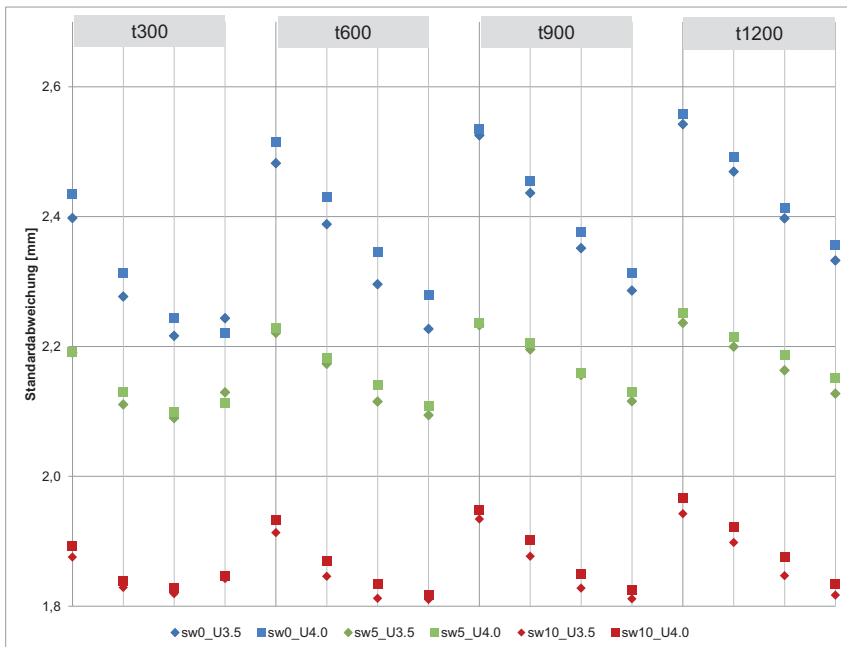
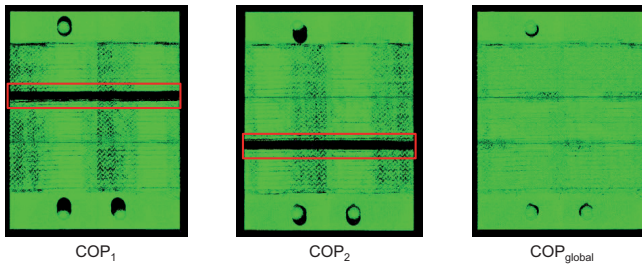


Abbildung 5-33: Standardabweichung konvexer Bereich für GL45 – je Belichtungszeit erfolgt eine schrittweise Erhöhung des Thresholds (A_Hornung 2015)

Die Untersuchungen bestätigen die Hypothese, dass Lücken durch Abschattungseffekte in Verfahrrichtung (y-Richtung) mittels der Datenfusion der zwei LLS geschlossen werden können (vgl. Abbildung 5-34).

Die Untersuchungen zeigen, dass es an Geometriezonen mit starker Steigung (z. B. Übergang von eben zu konvex) zur Ausbildung von Artefakten kommen kann (A_Hettich 2015). Hier werden die Grenzen der optischen Messtechnik sichtbar (Koch 1998). Der Grund hierfür liegt in einer sich gegenseitig negativ beeinflussenden Kombination aus lokaler Oberflächennormale, Reflexion des textilen Halbzeugs und geometrischer Anordnung des LLS. Diese Effekte können durch geeignete Scan-Strategien (Ausrichtung der Preform-Geometrie zum Laser) reduziert werden.

a) Draufsicht



b) Seitenansicht

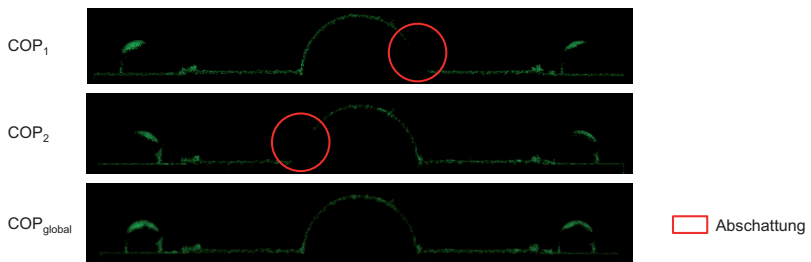


Abbildung 5-34: Vermeidung von Abschattung durch Datenfusion nach (A_Hornung 2015)

Die Auswertung der Messungen ergibt einen signifikanten Einfluss des Materials sowie der Faserorientierung auf die Güte der Digitalisierung. Die beste Erfassung der Oberfläche ist bei einer parallelen Ausrichtung von Kohlenstofffasern und Laserlinie zu beobachten, wohingegen eine orthogonale Ausrichtung je nach Parameterwahl die Digitalisierung stark negativ beeinflusst. Bei Gelege ist somit in der 90° Ausrichtung vorzugsweise eine Erfassung der Wirkfäden zu beobachten (vgl. Abbildung 5-35). Aufgrund der Lücken zwischen den

Rovings ist z. T. auch eine Erfassung des Untergrunds bzw. der darunter liegenden Lage zu beobachten (vgl. Abbildung 5-35 GL 90°). Trotz der hohen Anzahl an NaN-Stellen bei GL90 durch die schlechte Erfassung der vertikal verlaufenden Rovings ist aufgrund der guten Erfassung der Wirkfäden sowie Anteilen der unteren Lage eine gute Preform-Digitalisierung möglich.

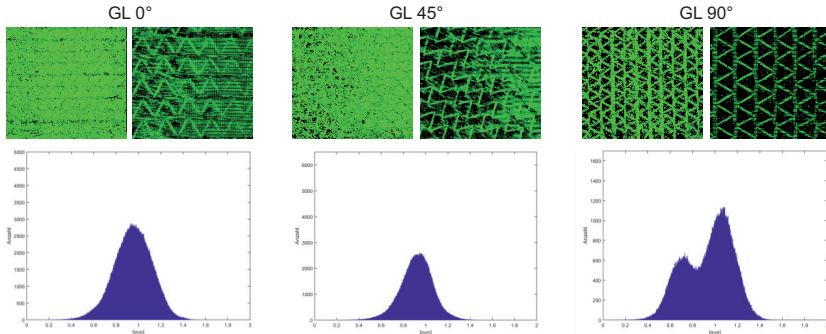


Abbildung 5-35: Erfassung Gelege nach (A_Hornung 2015)

Die zwei existierenden Faserorientierungen bei Geweben führen durchweg zu einer schlechteren Güte der Digitalisierung. Es werden vorwiegend Rovings mit der Orientierung 0° erfasst. Die Histogramm-Auswertung gibt daher zwei Peaks aus. Der rechte repräsentiert die 0°-orientierten Rovings, der linke gibt den Anteil der Form wieder, welcher durch die Lücken an den Kreuzungspunkten der Rovings hindurch erfasst wurde (vgl. Abbildung 5-36).

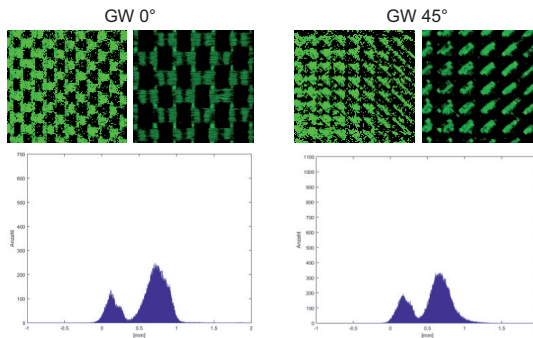


Abbildung 5-36: Erfassung Gewebe nach (A_Hornung 2015)

Für die Ermittlung der optimalen Parameterkonfiguration werden im Folgenden die Messungen mit seitlicher Verkippung von 0° nicht berücksichtigt, da sie nicht zur Reduktion der Abschattung beitragen. Nach Abbildung 5-31 liegen die optimalen Parameter je Material innerhalb der in Tabelle 5-5 aufgelisteten Bereiche der seitlichen Verkippungen vor (A_Hornung 2015).

Tabelle 5-5: Bereich der optimalen Parameter

| Material | Faserorientierung | Seitliche Verkippung γ |
|----------|-------------------|-------------------------------|
| Gelege | 0° | 5° |
| | 45° | 10° |
| | 90° | 5° |
| Gewebe | 0° | 5° |
| | 45° | 10° |

Innerhalb der selektierten Klassen gilt die Standardabweichung als erstes Auswahlkriterium. Es wird folglich bevorzugt weniger, aber dafür genauere Messpunkte zu erfassen. Aufgrund der z. T. sehr hohen Anzahl an NaN-Stellen ist es nicht möglich durchweg das Parameterset mit der geringsten Standardabweichung zu wählen. Daher werden je Klasse die 10 % der Werte mit der geringsten Standardabweichung berücksichtigt. Anschließend wird nach minimaler NaN-Stellenanzahl sowie ausreichend guter Erfassung der kritischen Übergangszone (eben/konvex) selektiert. In Tabelle 5-6 sind die optimalen Parametersets in Abhängigkeit von Material und Faserorientierung aufgelistet.

Tabelle 5-6: Optimale Parametersets nach Material

| Material | Faserorientierung [°] | Seitliche Verkippung γ [°] | Laserintensität [V] | Belichtungszeit [μ s] | Threshold [-] |
|----------|-----------------------|-----------------------------------|---------------------|----------------------------|---------------|
| Gelege | 0 | 5 | 3,5 | 600 | 400 |
| | 45 | 10 | 3,5 | 1200 | 600 |
| | 90 | 5 | 3,5 | 600 | 600 |
| Gewebe | 0 | 5 | 3,5 | 300 | 600 |
| | 45 | 10 | 3,5 | 300 | 600 |

5.4 Experimentelle Messunsicherheitsermittlung

Ein wesentlicher Aspekt beim Einsatz von Messtechnik ist die Kenntnis der Messunsicherheit des betrachteten Messsystems. Einen signifikanten Einfluss haben dabei neben dem Messsystem auch das Messobjekt und seine Oberflächenbeschaffenheit.

In den vorherigen Kapiteln wurde eine Messtation basierend auf dem Laser-Lichtschnittverfahren vorgestellt, mit dem Ziel der berührungslosen, vollflächigen messtechnischen Erfassung der Preform-Oberfläche. Aktuell gibt es keine bekannten Ansätze zur Bewertung der Messunsicherheit von LLS auf Kohlenstofffaser-Preforms. Hierfür besteht der Bedarf zur Entwicklung geeigneter Prüfkörper und Normale (Kosse, Fürtjes & Schmitt 2014).

5.4.1 Methode

Zur Ermittlung der experimentellen Messunsicherheit für das in Kapitel 5.1 bis 5.3 vorgestellte Messsystem wird im Folgenden nach VDA Band 5.1 „Rückführbare Inline-Messtechnik im Karosseriebau“ in Anlehnung an das Vorgehen zur Bewertung der „Aufbauphase“ vorgegangen (VDA 2012).

Die kombinierte Messunsicherheit u_{MS} berechnet sich analog zu VDA (2012) nach Formel 5-1:

$$u_{MS} = \sqrt{u_{CAL}^2 + u_{EVR}^2 + u_{BI}^2 + u_{REST}^2} \quad \text{Formel 5-1}$$

mit u_{CAL} : Kalibrierunsicherheit des Referenzwertes eines Merkmals

u_{EVR} : Anteil an der Standardunsicherheit aus der Streuung der Messwerte durch Wiederholmessungen am Normal

u_{BI} : Anteil an der Standardunsicherheit aus systematischer Abweichung

u_{REST} : Sonstige Einflüsse

Da in der „Aufbauphase“ noch keine Serienbauteile verfügbar sind, kann die Messsystemeignung nur anhand von Normalen nachgewiesen werden. Die geometrischen Merkmale der Normale „sollen dabei ausgewählten Merkmalen der zukünftigen Serienbauteile entsprechen“ (VDA 2012, S. 17). Typische Normale, wie sie im Bereich der Messtechnik zum Einsatz kommen (z. B. Ku-

gelnormale), können für die betrachtete Anwendung nicht herangezogen werden, da keine Normale aus Kohlenstofffaser-Halbzeug erhältlich sind. Daher ist im Folgenden auf den Einsatz eines kalibrierten Werkstücks für Preforms zurückzugreifen, welches den Anforderungen entsprechend entwickelt werden muss.

5.4.1.1 Referenzmesssystem

Für die experimentelle Ermittlung der Messunsicherheit ist ein Referenzsystem erforderlich, welches für die Anforderungen gegeben durch das Messobjekt sowie die Messaufgabe geeignet ist. Abgeleitet aus den in Kapitel 5.4 einführerend genannten Aspekten, ergeben sich für das Referenzsystem, wie in Abbildung 5-37 aufgeführt, mehrere Anforderungen.

| Allgemeine Anforderungen (vgl. Kapitel 3.1) | Konkretisierung der Anforderungen bezüglich des Referenzmesssystems |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> Messung an trockenen textilen Kohlenstofffaser-Halbzeugen durchgeführt (ohne Vorbehandlung) | <ul style="list-style-type: none"> berührungslos messendes Verfahren keine optische Messung |
| <ul style="list-style-type: none"> Prozessintegrationsgrad (Inline) | |
| <ul style="list-style-type: none"> vollflächige Auswertung | <ul style="list-style-type: none"> vollflächige Erfassung |
| <ul style="list-style-type: none"> Erfassung von komplexen Geometrien | <ul style="list-style-type: none"> 3D-Messung |
| <ul style="list-style-type: none"> Realbauteil als Demonstrator | |
| <ul style="list-style-type: none"> Bewertung der Messunsicherheit (Geometrie) | <ul style="list-style-type: none"> geringe Längenmessabweichung |
| <ul style="list-style-type: none"> Ansätze zur Taktzeitreduktion für großflächige Bauteile | |

Abbildung 5-37: Anforderungen an das Referenzmesssystem

Basierend auf den Anforderungen stellt die Computertomographie (CT) das geeignete Referenzsystem für die Ermittlung der Messunsicherheit von kohlenstofffaserverstärkten Preforms dar (vgl. Abbildung 5-38).

Bewertungseinheit
 0 = nicht erfüllt
 1 = erfüllt

| Anforderungen | taktilen Koordinaten- messgerät | 1D-Lasertriangulation | 2D-Laser-Lichtschnitt- system | Computertomographie |
|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------|----------------------------------|---------------------|
| berührungslos | 0 | 1 | 1 | 1 |
| keine optische Messung | 1 | 0 | 0 | 1 |
| vollflächige Erfassung | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 3D-Messung | 1 | 1 | 1 | 1 |
| geringe Längenmess- abweichung | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Erfüllungsgrad | 4 | 3 | 3 | 5 |

Abbildung 5-38: Auswahl des Referenzmesssystems

Das CT arbeitet berührungslos und digitalisiert das Objekt ohne optische Interaktion, was ein Alleinstellungsmerkmal bei der Auswahl des Referenzsystems darstellt. Dabei sind ebenso die erforderliche vollflächige Erfassung sowie die hohe Auflösung bei geringer Längenmessabweichung gegeben. Da aufgrund der textilen Oberfläche eine taktile Kalibrierung nicht möglich ist, wird im Folgenden als Referenzwert für die Ermittlung der Messunsicherheit der Messwert eines CT gewählt.

5.4.1.2 Entwicklung eines kalibrierten Werkstücks für Preforms

Wie in Kapitel 5.4.1 eingeführt, sollen die geometrischen Merkmale des Normals ausgewählten Merkmalen der zukünftigen Serienbauteile entsprechen. Es müssen dabei die Ähnlichkeitsanforderungen berücksichtigt werden (DIN EN ISO 15530-3). Aufgrund fehlender Normale aus Kohlenstofffaser-Halbzeug muss für die Ermittlung der Messunsicherheit auf ein kalibriertes Werkstück zurückgegriffen werden (DIN EN ISO 15530-3) (vgl. Abbildung 0-3 im Anhang). Das Material des kalibrierten Werkstücks muss dem Zielmaterial entsprechen, um dieselben Rahmenbedingungen, welche das Messsystem beeinflussen können, zu erhalten. Des Weiteren ist die Eignung für Messungen

mit dem Laser-Lichtschnittsystem sowie dem CT erforderlich. Besonders der Einsatz im CT erfordert eine spezielle Betrachtung der Materialdichte des Trägermaterials des kalibrierten Werkstücks. Folglich ergeben sich Anforderungen und Restriktionen, welche in Abbildung 5-39 zusammengefasst sind. Das kalibrierte Werkstück kann im Sinne von DIN 1319-1 als Referenzmaterial betrachtet werden.

Anforderungen an ein kalibriertes Werkstück für Preforms:

- Abbilden geometrischer Merkmale typischer Karosseriebauteile
- Oberfläche aus Kohlenstofffaser-Halbzeug
 - Gewebe
 - Gelege
 - Faserorientierungen
- CT-Eignung des kalibrierten Werkstücks
 - Größe
 - Dichte des Trägermaterials
- LLS-Eignung des kalibrierten Werkstücks
 - Keine großen Helligkeitsunterschiede zw. Trägermaterial und textilem Halbzeug
- Eindeutiges Koordinatensystem

Abbildung 5-39: Anforderungen an ein kalibriertes Werkstück für Preforms nach (A_Bartholmé 2015)

5.4.1.3 Bestimmung der Standardunsicherheit der Kalibrierung

Die Erfassung des kalibrierten Werkstücks mittels CT erfordert eine softwaretechnische Oberflächenbestimmung. Dieser Prozess kann zu einer Beeinflussung der erfassten Bauteilgeometrie führen. Zur Berücksichtigung dieses Einflusses wird zur Kalibrierung des Werkstücks ein KMG als Referenz herangezogen. Es weist im Vergleich zum CT eine geringere Längenmessabweichung auf. Des Weiteren ist die Oberflächenbestimmung geringeren Einflüssen unterworfen. Aufgrund der taktilen Antastung ist es jedoch nicht möglich, direkt das textile Halbzeug zu messen, sondern es muss auf die Güte der Erfassung des kalibrierten Werkstücks ohne textilem Halbzeug zurückgegriffen werden. Die Kalibrierunsicherheit u_{CAL} setzt sich nach Formel 5-2 aus der Kalibrierunsicherheit des KMG $u_{CAL\ KMG}$ (vgl. Formel 5-3), der Streuung der CT-Messungen $u_{EVR\ CT}$ (vgl. Formel 5-4), der systematischen Abweichung zwischen CT und KMG $u_{BI\ CT/KMG}$ (vgl. Formel 5-5) und dem Materialeinfluss des

textilen Halbzeugs bei der Messung mit dem CT $u_{Material\ CT}$ (vgl. Formel 5-6) zusammen. Bei allen Messungen wird ein spezifisches geometrisches Merkmal (z. B. der Radius einer konvexen Zone) über 25 Messungen ermittelt.

$$u_{CAL} = \sqrt{u_{CAL\ KMG}^2 + u_{EVR\ CT}^2 + u_{BI\ CT/KMG}^2 + u_{Material\ CT}^2} \quad \text{Formel 5-2}$$

$$u_{CAL\ KMG\ (Werkstück)} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{i\ KMG} - \bar{y}_{KMG})^2} \quad \text{Formel 5-3}$$

mit $y_{i\ KMG}$: Messung i der 25 Messungen des Werkstücks (ohne Halbzeug)

\bar{y}_{KMG} : Mittelwert der 25 Messungen des Werkstücks (ohne Halbzeug)

$$u_{EVR\ CT\ (Werkstück)} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{i\ CT} - \bar{y}_{CT})^2} \quad \text{Formel 5-4}$$

mit $y_{i\ CT}$: Messung i der 25 Messungen des Werkstücks (ohne Halbzeug)

\bar{y}_{CT} : Mittelwert der 25 Messungen des Werkstücks (ohne Halbzeug)

$$u_{BI\ CT/KMG\ (Werkstück)} = \frac{|\bar{x} - x_m|}{\sqrt{3}} \quad \text{Formel 5-5}$$

mit \bar{x} : Mittelwert der KMG Messwerte (ohne Halbzeug)

x_m : CT Referenzwert des kalibrierten Werkstücks (ohne Halbzeug)

$$u_{Material\ CT} = |u_{EVR\ CT\ (Werkstück)} - u_{EVR\ CT\ (Halbzeug)}| \quad \text{Formel 5-6}$$

mit $u_{EVR\ CT\ (Werkstück)}$: Streuung der CT-Messungen (ohne Halbzeug)

$u_{EVR\ CT\ (Halbzeug)}$: Streuung der CT-Messungen (mit Halbzeug)

5.4.1.4 Bestimmung der Standardunsicherheit des Messsystems

Zur Bestimmung der Standardunsicherheit der 3D-Messtation wird die Streuung (equipment variation) u_{EVR} nach Formel 5-7 ermittelt. Hierzu wird das kalibrierte Werkstück mit textilem Halbzeug 25 mal mit dem Laser-

Lichtschnittsystem gemessen und jeweils das Maß des geometrischen Merkmals ermittelt.

$$u_{EVR} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_{iLLS} - \bar{y}_{LLS})^2} \quad \text{Formel 5-7}$$

mit y_{iLLS} : Messung i der 25 Messungen des Werkstücks (mit Halbzeug)

\bar{y}_{LLS} : Mittelwert der 25 Messungen des Werkstücks (mit Halbzeug)

5.4.1.5 Bestimmung der Systematischen Abweichung

Die systematische Abweichung u_{BI} nach Formel 5-8 berücksichtigt die Abweichung zwischen der Messung mit dem LLS und dem Referenzsystem (CT). Hierzu wird das geometrische Merkmal des kalibrierten Werkstücks mit textilem Halbzeug 25 mal gemessen und ausgewertet. Für die Unsicherheit der systematischen Abweichung wird eine Rechteckverteilung angenommen (VDA 2012).

$$u_{BI} = \frac{|\bar{x} - x_m|}{\sqrt{3}} \quad \text{Formel 5-8}$$

mit \bar{x} : Mittelwert der LLS Messwerte (mit Halbzeug)

x_m : CT Referenzwert des kalibrierten Werkstücks (mit Halbzeug)

5.4.1.6 Bestimmung des Erweiterungsfaktors

Zur Ermittlung der erweiterten Messunsicherheit U_{MS} wird die Messunsicherheit u_{MS} mit dem Erweiterungsfaktor k multipliziert (vgl. Formel 5-9).

$$U_{MS} = k * u_{MS} \quad \text{Formel 5-9}$$

5.4.1.7 Bestimmung der minimal möglichen Toleranz

Um den geeigneten Bereich für den Einsatz des Messsystems klassifizieren zu können, ist eine Ermittlung der minimal möglichen Toleranz empfehlenswert (VDA 2011). Die minimal mögliche Toleranz des Messsystems $TOL_{MIN-UMS}$ berechnet sich nach Formel 5-10 mit $Q_{MS,max}$ als Eignungskennwert für das Messsystem (VDA 2011). Als Grenzwert für $Q_{MS,max}$ wird 15 % empfohlen (VDA 2011).

$$TOL_{MIN-UMS} = \frac{2 * U_{MS}}{Q_{MS_{max}}} * 100 \%$$

Formel 5-10

5.4.2 Validierung

Basierend auf der in Kapitel 5.4.1 vorgestellten Methode erfolgt die experimentelle Messunsicherheitsermittlung für die 3D-Messtation.

5.4.2.1 Ausrüstung

Betrachtungsobjekt der Messunsicherheitsermittlung ist die vorgestellte 3D-Messtation. Als Referenzsystem wird der Computertomograph Metrotom 800 der Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH eingesetzt. Die angegebene Längenmessabweichung des Systems beträgt $SD_{MPE} = 0,004 + L/100 \text{ mm}$ bzw. $E_{MPE} = 0,008 + L/100 \text{ mm}$. Die Datenauswertung erfolgt über die Software VG Studi MAX der Volume Graphics GmbH.

Für die Ermittlung der Standardunsicherheit der Kalibrierung wird das 3D Koordinatenmessgerät Prismo der Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH eingesetzt. Die angegebene Längenmessabweichung des Systems beträgt eindimensional $0,9 + L/400 \mu\text{m}$ bzw. dreidimensional $1,2 + L/350 \mu\text{m}$. Die Datenauswertung erfolgt über die Software Zeiss Calypso der Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH.

5.4.2.2 Realisierung des kalibrierten Werkstücks für Preforms

Die Realisierung der kalibrierten Werkstücke basiert auf den in Kapitel 5.4.1.2 definierten Anforderungen. Für die Betrachtung der Messunsicherheit soll auf einfache Geometriemerkmale zurückgegriffen werden, die sich in ähnlicher Form in realen Bauteilen wiederfinden. Es werden daher konvexe, konkave und ebene Zonen sowie Winkel betrachtet (vgl. Abbildung 5-40).

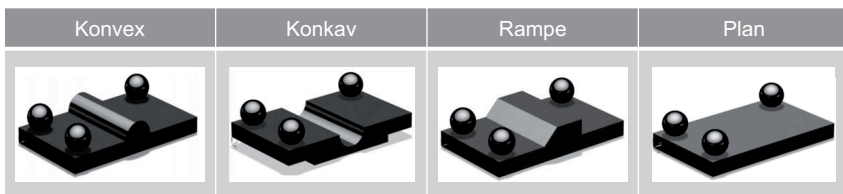


Abbildung 5-40: Geometrien für kalibrierte Werkstücke nach (A_Bartholmé 2015)

Bei der Dimensionierung der Werkstücke ist ein Kompromiss zwischen erforderlicher Größe und möglichst hoher Auflösung bei der Digitalisierung im CT erforderlich. Die Außenmaße der Werkstücke werden unter Berücksichtigung einer möglichst hohen CT-Auflösung auf $98 \times 60 \times 25,3 \text{ mm}^3$ ($L \times B \times H$) bei einer Voxelgröße von $76 \text{ }\mu\text{m}$ festgelegt (vgl. Abbildung 0-49 bis Abbildung 0-52 im Anhang) (A_Bartholmé 2015). Das optimale Trägermaterial wird über eine Voruntersuchung von sechs Materialproben ermittelt. Dabei sind die mechanische Bearbeitbarkeit, chemische Beständigkeit sowie Dichte wesentliche Kriterien (A_Bartholmé 2015). Um Artefakte durch das Trägermaterial zu vermeiden, soll für die Dichte ρ gelten: $\rho_{\text{Trägermaterial}} < \rho_{\text{textiles Halbzeug}}$. Vorversuche haben gezeigt, dass sich der Werkstoff Ureol (Dichte $\rho = 0,14 \text{ g/cm}^3$) gut für die Verwendung als Trägermaterial eignet (A_Bartholmé 2015). Als werkstückimmanentes Koordinatensystem werden drei Kunststoff-Kugeln verwendet (vgl. Abbildung 5-41). Die Kugeln haben keinen Einfluss auf die Ermittlung der Messunsicherheit. Sie dienen lediglich zur Durchführung eines Soll/Ist-Vergleiches. Um für die Messung mit dem LLS die Helligkeitsunterschiede zwischen Trägermaterial und dem textilen Halbzeug zu minimieren, wird das Trägermaterial geschwärzt (A_Bartholmé 2015). Die Fixierung des textilen Halbzeugs erfolgt mittels Sprühkleber, der auch zur Fertigung von Preforms eingesetzt wird.

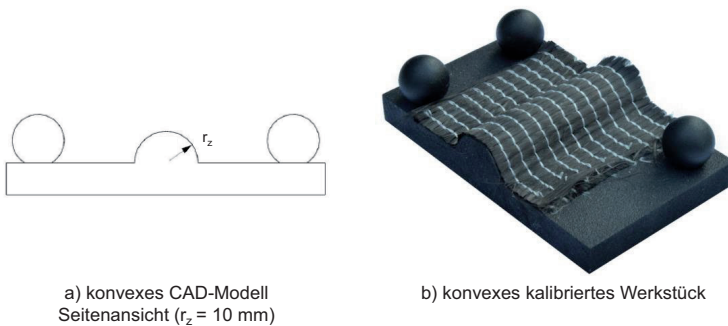


Abbildung 5-41: Kalibriertes Werkstücke nach (A_Bartholmé 2015)

Aufgrund der Erfahrungen aus der Parameteroptimierung (vgl. Kapitel 5.3) wird je Kombination von textilem Halbzeug und Faserorientierung ein separates kalibriertes Werkstück erstellt. Die geometrischen Merkmale werden auf-

grund des durch das CT limitierten Bauraums ebenfalls als separate Werkstücke ausgeführt (vgl. Abbildung 5-40; Abbildung 0-3, Abbildung 0-49 bis Abbildung 0-52 im Anhang).

5.4.2.3 Mess- und Auswertestrategie

Die experimentelle Bestimmung der Messunsicherheit beruht auf der Messung definierter geometrischer Elemente der kalibrierten Werkstücke. Als Merkmal wird der Radius eines Zylinders einer konvexen oder konkaven Zone, der vertikale Abstand zwischen zwei parallelen Ebenen oder der Winkel zwischen zwei Ebenen herangezogen (vgl. Abbildung 5-40). Für die hier im Folgenden exemplarisch betrachtete konvexe Zone wird der Radius r eines Zylinders ermittelt, welcher sich aus dem konvexen Segment ergibt.

Der Radius wird für die LLS- sowie die CT-Messung mittels der Software VG Studio MAX gemessen. Hierfür ist die Ermittlung des Geometrieelementes erforderlich. Dazu werden in der Software manuell mindestens 25 Antastpunkte gleichmäßig verteilt auf der Oberfläche gesetzt. Die Software bestimmt daraufhin automatisch bis zu 1000 weitere Antastpunkte. Bei der Antastung ist zu berücksichtigen, dass nur die Außenkontur angetastet wird, und nicht zwischen Faserrovings die darunter liegende Halbzeuglagen. Des Weiteren kann für die Antastung lediglich ein Segment von 160° genutzt werden, um keine Ungenauigkeiten aufgrund der Abformung in der Übergangszone von konvex zu plan zu erhalten (vgl. Abbildung 5-42). (A_Bartholmé 2015)

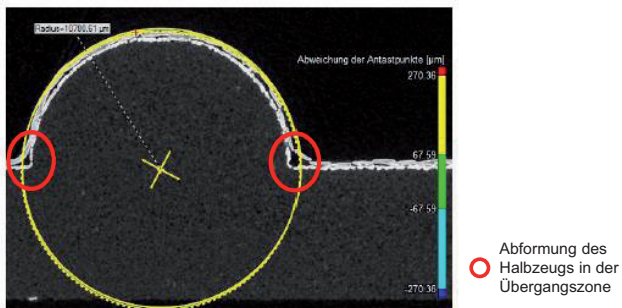


Abbildung 5-42: CT-Auswertung - Zylinder im Schnittbild nach (A_Bartholmé 2015)

Für die Messung in den CT-Daten erfolgt vorgeschaltet eine Oberflächenbestimmung (A_Bartholmé 2015). Diese ist für die Messung der LLS-Daten nicht erforderlich. Jedoch muss eine vorgeschaltete Konvertierung in das .STL-Format durchgeführt werden.

Die LLS-Messungen sind entlang der y-Achse des Werkstücks ausgeführt. Die Auswertungen der Referenzmessungen mittels KMG erfolgen durch Calypso.

5.4.2.4 Ermittelte Messwerte

Tabelle 5-7 zeigt die Messdaten der ermittelten Radien aus den KMG-, CT- und LLS-Messungen. Die Messungen sind exemplarisch für das konvexe Werkstück mit Radius $r = 20 \text{ mm}$ und dem Halbzeug Gelege unter 0° Faserorientierung durchgeführt. Die LLS-Messung wird wie erwähnt entlang der y-Achse des Werkstücks durchgeführt.

Tabelle 5-7: Messdaten konvexes Werkstück am Beispiel GL 0° 400g/m²

| | Messung der Trägergeometrie (HKv_U) | | Messung des Halbzeugs (HKv_GL_400_0) | |
|----------------------|--|----------------------|---|-------------------------------|
| | KMG-Auswertung | CT-Auswertung | CT-Auswertung | LLS-Auswertung (entlang Y) |
| Messdurchgang i: | r _{KMG} [mm] | r _{CT} [mm] | r _{CT (Hz)} [mm] | r _{LLS (Hz)} [mm] |
| 1 | 10,0979 | 10,1209 | 10,9472 | 10,9059 |
| 2 | 10,0962 | 10,1219 | 10,9629 | 10,6708 |
| 3 | 10,0950 | 10,1240 | 10,9989 | 10,7239 |
| 4 | 10,0940 | 10,1149 | 10,9057 | 10,6933 |
| 5 | 10,0929 | 10,1235 | 10,9632 | 10,7733 |
| 6 | 10,0921 | 10,1307 | 10,9605 | 10,8005 |
| 7 | 10,0913 | 10,1204 | 10,9047 | 10,7758 |
| 8 | 10,0908 | 10,1279 | 10,9950 | 10,7278 |
| 9 | 10,0903 | 10,1264 | 10,9770 | 10,7338 |
| 10 | 10,0899 | 10,1181 | 10,9927 | 10,8258 |
| 11 | 10,0897 | 10,1231 | 10,9329 | 10,7251 |
| 12 | 10,0892 | 10,1296 | 10,9789 | 10,8688 |
| 13 | 10,0887 | 10,1244 | 10,9883 | 10,6954 |
| 14 | 10,0884 | 10,1218 | 10,9386 | 10,7332 |
| 15 | 10,0880 | 10,1180 | 10,9194 | 10,8309 |
| 16 | 10,0877 | 10,1283 | 10,9694 | 10,8085 |
| 17 | 10,0873 | 10,1202 | 10,9757 | 10,8241 |
| 18 | 10,0868 | 10,1255 | 10,9264 | 10,8518 |
| 19 | 10,0865 | 10,1227 | 10,9590 | 10,6919 |
| 20 | 10,0862 | 10,1316 | 10,9744 | 10,6689 |
| 21 | 10,0859 | 10,1242 | 10,9788 | 10,7885 |
| 22 | 10,0857 | 10,1228 | 10,9387 | 10,9103 |
| 23 | 10,0855 | 10,1213 | 10,9350 | 10,7726 |
| 24 | 10,0852 | 10,1415 | 10,9791 | 10,7132 |
| 25 | 10,0849 | 10,1312 | 10,9733 | 10,6942 |
| Durchschnitt: | 10,0894 | 10,1246 | 10,9590 | 10,7683 |
| Max. Wert [mm]: | 10,0979 | 10,1415 | 10,9989 | 10,9103 |
| Min. Wert [mm]: | 10,0849 | 10,1149 | 10,9047 | 10,6689 |
| Spannweite [mm]: | 0,0130 | 0,0266 | 0,0942 | 0,2414 |

5.4.2.5 Ermittelte Messunsicherheit

Die Standardunsicherheit der Kalibrierung nach Formel 5-2 bis Formel 5-6 ergibt sich für das exemplarisch betrachtete konvexe kalibrierte Werkstück mit Gelege unter 0° Faserorientierung aus folgenden Teilen:

$$u_{CAL\ KMG\ (Werkstück)} = \sqrt{\frac{1}{25-1} \sum_{i=1}^{25} (y_{i\ KMG} - 10,0894)^2} = 0,0035\ mm$$

$$u_{EVR\ CT\ (Werkstück)} = \sqrt{\frac{1}{25-1} \sum_{i=1}^{25} (y_{i\ CT} - 10,1246)^2} = 0,0054\ mm$$

$$u_{BI\ CT/KMG\ (Werkstück)} = \frac{|10,1246\ mm - 10,0894\ mm|}{\sqrt{3}} = 0,0203\ mm$$

$$u_{Material\ CT} = \left| \sqrt{\frac{1}{25-1} \sum_{i=1}^{25} (y_{i\ CT} - 10,1246)^2} - \sqrt{\frac{1}{25-1} \sum_{i=1}^{25} (y_{i\ CT} - 10,9590)^2} \right|$$

$$= 0,0213\ mm$$

Somit beträgt die Standardunsicherheit der Kalibrierung

$$u_{CAL} = \sqrt{(0,0035\ mm)^2 + (0,0054\ mm)^2 + (0,0203\ mm)^2 + (0,0213\ mm)^2} = 0,0302\ mm.$$

Die Standardunsicherheit des LLS Messsystems beträgt nach Formel 5-7

$$u_{EVR} = \sqrt{\frac{1}{25-1} \sum_{i=1}^{25} (y_{i\ LLS} - 10,7683\ mm)^2} = 0,0699\ mm$$

Die systematische Abweichung beträgt nach Formel 5-8

$$u_{BI} = \frac{|10,9590\ mm - 10,7683\ mm|}{\sqrt{3}} = 0,1101\ mm.$$

Hieraus ergibt sich für die kombinierte Messunsicherheit des LLS nach Formel

$$5-1\ u_{MS} = \sqrt{(0,0302\ mm)^2 + (0,0699\ mm)^2 + (0,1101\ mm)^2} = 0,1339\ mm\ \text{für das betrachtete Gelege.}$$

Für die erweiterte Messunsicherheit U_{MS} gilt nach Formel 5-9

$$U_{MS} = 2 * 0,1339\ mm = 0,2678\ mm\ \text{bei einem Erweiterungsfaktor } k = 2.$$

5.4.2.6 Ermittlung der minimal möglichen Toleranz

Die minimal mögliche Toleranz des Messsystems $TOL_{MIN-UMS}$ nach Formel 5-10 ergibt sich für das betrachtete Material zu $TOL_{MIN-UMS} = \frac{2 \cdot 0,2678 \text{ mm}}{15 \%} * 100 \% = 3,5707 \text{ mm}$ bei einem angenommenen Eignungskennwert $Q_{MS,max} = 15\%$.

Prozessbedingt handelt es sich bei einem Preform um eine einseitige Tolerierung, da der Preform lagenweise auf einem Formwerkzeug aufgebaut wird. Für die exemplarisch gewählte Paarung aus Geometrie und textilem Halbzeug ergibt sich für die minimal mögliche Toleranz ein Wert von 3,5707 mm. Es ist folglich anzunehmen, dass für diese Paarung die Messtation Abweichungen eines Preforms, die über diesem Wert liegen, sicher detektieren kann. Somit bietet das System für die betrachtete Paarung die Möglichkeit beispielsweise Falten mit einer Höhe von 5 mm (vgl. Kapitel 3.2.1.3) zu erkennen.

Um eine vollständige Messunsicherheitsuntersuchung durchzuführen, müssten alle Geometrien aus Abbildung 5-40 untersucht werden. Neben den Geometrien müssten auch die betrachteten textilen Halbzeuge Gewebe und Gelege sowie die verschiedenen Faserorientierungen 0° , 45° und 90° kombiniert werden. Durch die sich hieraus ergebende Kombinatorik, die erforderliche Anzahl der Wiederholmessungen und die sehr lange Mess- und Auswertedauer der CT-Messungen ist ein sehr hoher Aufwand erforderlich. Folglich wurde im Rahmen der Arbeit eine Methode zur experimentellen Ermittlung der Messunsicherheit vorgestellt und exemplarisch an einer Paarung durchgeführt.

Die ermittelte Messunsicherheit liegt für die Detektion der betrachteten Defekte im erforderlichen Größenbereich. In Abhängigkeit vom gewählten Anwendungsfeld muss jedoch der Anwender, basierend auf der vorgestellten Methode, für weitere der oben angeführten Paarungen die Messunsicherheit ermitteln. Basierend auf den durchgeführten Messungen ist anzunehmen, dass man auch mit diesen Messungen im erforderlichen Größenbereich liegen wird.

6 Strategien zur Inline-Integration

Der Einsatz von CFK im automobilen Volumensegment erfordert die Integration von Methoden zur Qualitätssicherung in den Produktionsprozess (Eickenbusch & Krauss 2013). Kapitel 6 betrachtet verschiedene Ansätze zur Inline-Integration von Messtechnik für kohlenstofffaserverstärkte Preforms. Neben Integrationsmöglichkeiten der 3D-Messstation werden Konzepte zur Taktzeitreduktion des Messprozesses betrachtet sowie ein 2D-Prüfsystem für Preforms vorgestellt.

6.1 Integrationsmöglichkeiten der 3D-Messtechnik

Wie in Kapitel 2.4 aufgezeigt, bestehen in der Produktion verschiedene Möglichkeiten der Messtechnikintegration (Fertigungsfern, Fertigungsnah, Inline, Maschinenintegriert, In-Prozess (Schmitt & Damm 2008)). Welche der Strategien verfolgt wird, ist meist von den Rahmenbedingungen der Produktion (z. B. Bauteil-Geometrie, Stückzahl, Taktzeit) sowie von der Verfügbarkeit geeigneter Messtechnik abhängig.

Die in Kapitel 5 vorgestellte 3D-Messstation ist durch ihren robusten Aufbau für fertigungsnahen Messungen geeignet. Aufgrund des erforderlichen Preform-Transports hin zur Messstation, ist der Einsatz bspw. auf die Vorserienphase sowie kleine Stückzahlen und häufig wechselnde Geometrien begrenzt. Eine automatisierte Verkettung zwischen Preformingstation und Messstation würde das Einsatzfeld hin zu einer Inline-Messung erweitern. Die Verkettung ist dabei mittels Roboter-Handling des Preforms oder durch Übergabe des Preforms auf einem Werkstückträger denkbar. Die vorgestellte Strategie der vollflächigen Digitalisierung des Preforms führt jedoch, in Abhängigkeit von der Bauteilgröße (je größer desto länger), zu einer erhöhten Taktzeit im Messprozess. Daher ist, trotz möglicher Inline-Integration der Messstation, der Einsatz auf Stichproben begrenzt, da hier längere Taktzeiten potentiell möglich sind. Aufgrund der Kinematik, welche für die Überführung des LLS über das Bauteil erforderlich ist, würde eine Maschinenintegration des 3D-Messsystems in die Preformingstation eine erhöhte Komplexität verursachen. Des Weiteren ist eine Maschinenintegration nur sinnvoll, wenn hierdurch keine signifikante Erhöhung der Nebenzeit der Preformingstation entsteht und damit eine mögliche Taktzeiterhöhung.

6.2 Konzepte zur Taktzeitreduktion

Besonders in der Serienfertigung, aber auch bei der Prüfung großer Bauteile, ist eine schnelle Bewertung erforderlich. Daher müssen Qualitätssicherungsmethoden auf ein Maximum an Messgeschwindigkeit ausgelegt sein (Göttlinger, Weimer & Miene 2009). Im Folgenden werden verschiedene Ansätze zur Taktzeitreduktion des Messprozesses vorgestellt.

6.2.1 Beschleunigung der Digitalisierung

Die Beschleunigung der Preform-Digitalisierung kann primär durch eine Reduktion der Haupt- und Nebenzeit des Messprozesses erzielt werden. Als Hauptzeit kann die eigentliche Messung gesehen werden. Die Messung kann durch eine Erhöhung der Verfahrensgeschwindigkeit v_{portal} sowie durch eine Verbreiterung des Erfassungsbereiches beschleunigt werden. Für eine Erhöhung der v_{portal} muss berücksichtigt werden, dass durch evtl. auftretende Vibrationen oder Bewegungsunschärfe die Messunsicherheit des Systems negativ beeinflusst werden kann. Auch die erhöhte Datenübertragungsrate muss hierfür gewährleistet werden. Breitere Scanbahnen führen zu einer Reduktion der lateralen Auflösung, welche in Abhängigkeit vom Bauteil bzw. den zu detektierenden Defekten akzeptabel ist. Problematisch ist jedoch der Einfluss der Tiefschärfe des optischen Systems, welche bei einer breiteren Scanbahn in Abhängigkeit von der Preformgeometrie nicht mehr über die gesamte Breite im optimalen Bereich gehalten werden kann.

Ohne negativen Einfluss auf die Qualität der Digitalisierung ist die Reduktion der Nebenzeit durch Optimierung der Bahnführung. Durch eine mäanderförmige Bahnführung des Messkopfs über das Bauteil, wird jede Fahrt der Kinematik zur Digitalisierung genutzt. Diese Optimierung erfordert nach jeder Bahn eine Drehung des Messkopfs um 180° oder eine softwaretechnische Anpassung der Datenfusion.

6.2.2 Methoden zur Identifikation von ROI

Neben den in Kapitel 6.2.1 genannten Maßnahmen zur Beschleunigung der Digitalisierung führt eine Reduktion der zu erfassenden Preformfläche zu einer direkten Zeiteinsparung. Um die Fläche, die erfasst werden muss, einzugrenzen, ist eine Vorkenntnis über die Zonen erforderlich, welche ein erhöhtes Ri-

siko für das Auftreten von Defekten und Geometrieabweichungen aufweisen. Diese Zonen werden im Folgenden als Regions of Interest (ROI) bezeichnet. Zur Detektion der ROI können experimentelle Voruntersuchungen in der Anlaufphase, rechnergestützte Verfahren wie Geometrieanalysen und Drapiersimulationen sowie Informationen aus der Preformingstrategie eingesetzt werden. (Lanza & Brabandt 2012a; Lanza & Brabandt 2012c)

Die Anlaufphase eines neuen Bauteils bietet bei noch geringer Stückzahl die Möglichkeit einer 100 % vollflächigen 3D-Messung. Basierend auf einer empirischen Analyse der erfassten Daten können so Zonen identifiziert werden, die eine erhöhte Auftretenswahrscheinlichkeit für Defekte und Geometrieabweichungen aufweisen. Um bereits in der Planungsphase Kenntnis über potentiell kritische Zonen zu erlangen, eignet sich der Einsatz der Geometrieanalyse und Drapiersimulation basierend auf dem CAD-Modell des Preforms.

Die Erfahrung aus der Praxis zeigt, dass starke lokale Formänderungen der Geometrie zu Faltenbildung des textilen Halbzeugs führen können. An dieser Stelle ist die Krümmungsanalyse (Richtungsänderung pro Längeneinheit einer Kurve) zu nennen. Für jeden beliebigen Punkt können dabei die beiden Hauptkrümmungen der Fläche bestimmt werden (Bohne & Klix 1995). Für die Analyse der Krümmung stehen die Verfahren der mittleren Krümmung und Gauß'schen Krümmung zur Verfügung. Eine weitere Möglichkeit zur Analyse stellt die Neigungsanalyse dar. (Härtel et al. 2012; Ohlendorf & Rolbecki 2013; Fleischer & Wagner 2014; Wagner 2016)

Bei der Drapiersimulation wird die Geometrie des Bauteils mit den Eigenschaften des textilen Halbzeugs sowie der Faserorientierung überlagert, mit dem Ziel die Drapierbarkeit zu prüfen (AVK 2014). Durch die Simulation können u. a. mögliche Aufdickungen des Halbzeugs sowie die Ausbildung von Falten erkannt werden. Für die Simulation werden kinematische Ansätze eingesetzt, welche den kritischen Scherwinkel φ_{kr} des textilen Halbzeugs betrachten, wie auch detailliertere Verfahren mittels Finite Elemente Methode. (Girdauskaite, Haasemann & Krzywinski 2011; Leutz & Drechsler 2011)

Aus der Drapiersimulation ergeben sich ebenfalls Hinweise bezüglich der optimalen Preformingstrategie. Somit sind neben Defektzonen auch Zonen von Interesse, welche aufgrund eines Subpreform- oder Patch-Ansatzes die Überlappzone zweier Preforms darstellen. Die Überprüfung der Überlappzone kann

sicherstellen, dass die Überlappung in ausreichendem Maße vorliegt und keine Gefahr für eine Schwächung der mechanischen Eigenschaften des Bauteils besteht. Basierend auf den vorgestellten Ansätzen kann folglich von geometriebedingten und fertigungsbedingten ROI gesprochen werden.

Der ROI-Ansatz bietet die Möglichkeit von einer vollflächigen Erfassung des Preforms hin zu einer 100 %-Prüfung relevanter Merkmale und Zonen (ROI) zu gelangen und trägt somit zur Reduktion der Messzeit bei. Abhängig vom erforderlichen Detaillierungsgrad der Erfassung, ist ein weiterer möglicher Ansatz, die ROI mit möglichst hoher Auflösung zu messen und die restliche Bauteilfläche unter der Prämisse der Zeiteffizienz mit reduzierter Auflösung.

6.2.3 Messkonzept unter Verwendung von ROI

Die Methoden zur Identifikation von ROI sowie die Ansätze zur Beschleunigung der Digitalisierung der Preforms bilden die Grundlage für eine Methode zur Inline-Integration von Messtechnik (Lanza & Brabandt 2012a; Lanza & Brabandt 2012b). Diese ist in drei Phasen gegliedert. Ausgangsbasis ist in Phase 1 die vollflächige 3D-Erfassung des Preforms in einer Qualifizierungsphase über die in Kapitel 5 vorgestellte 3D-Messstation (vgl. Abbildung 6-1). In Phase 2 werden lediglich Bauteilzonen, welche im Vorfeld (Phase 1) als relevant identifiziert wurden, inline mittels 3D-Messstation erfasst. Dieses Vorgehen ist im Bereich der Vorserie denkbar. Um die Ziele hinsichtlich Taktzeit eines Großserienprozesses zu erreichen, ist eine maschinenintegrierte Messtechnik erforderlich, welche die Nebenzeit der Preformingstation nur geringfügig beeinflusst. Aufgrund des sequentiellen Messprozesses, ist der Einsatz der 3D-Messstation auch in Kombination mit dem ROI-Ansatz in der aktuellen Konfiguration hierfür nicht zielführend. Folglich ist in Phase 3 eine „one-shot“ Messung der ROI erforderlich, welche die 3D-Abweichungen detektiert, jedoch keinen sequentiellen Messprozess erfordert.

Wie in Kapitel 3 vorgestellt, existieren aktuell keine geeigneten 3D-Messverfahren, welche basierend auf einer statischen Position des Messsystems die Inline-Messung von 3D-Defekten ermöglichen. Daher ist es erforderlich ein 2D-System zu entwickeln, welches über die flächige 2D-Aufnahme einer bekannten ROI 3D-Defekte erfassen kann. Hierbei ist die Voraussetzung, dass das typischerweise vorliegende Fehlerbild sowie die ROI bereits aus

Phase 1 und 2 bekannt sind und das 2D-System hierauf gezielt abgestimmt werden kann. Die Abstimmung soll bereits in der Vorserienphase parallel zur eingesetzten 3D-Messtechnik stattfinden, um eine Einlernphase des 2D-Systems zu ermöglichen (Lanza, Brabandt & Bingemann 2013).

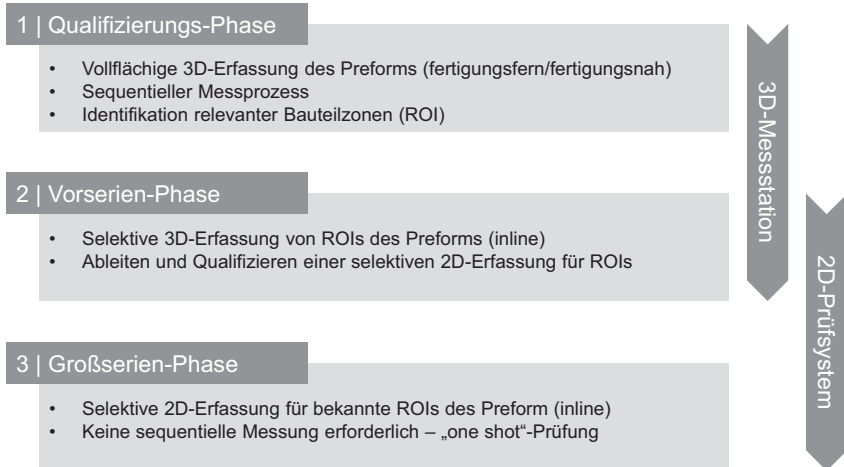


Abbildung 6-1: Messkonzept unter Verwendung von ROI

6.3 2D-Prüfung für Preforms

Abgeleitet aus Kapitel 6.2 ergibt sich der Bedarf zur Entwicklung eines 2D-Systems, welches unter der Vorkenntnis von ROI gezielt in bekannten Geometriezonen 3D-Defekte, welche sich in Form von Geometrieabweichungen ausbilden, detektieren kann.

6.3.1 Anforderungen und Konzeption

Wie in Kapitel 6.2.3 eingeführt, besteht für das 2D-System die Kernforderung die Oberfläche von Kohlenstofffaser-Preforms ohne sequentielle Messung auf 3D-Geometrieabweichungen zu prüfen. Die „one shot“ Aufnahme soll dabei einen zuvor definierten Bauteilbereich erfassen (ROI). Die Detektion von 3D-Defekten ist daher nur unter Vorkenntnis der ROI, der Art der Geometriezone und des potentiellen Defekts gefordert. Im Vergleich zu den Anforderungen aus Kapitel 5.1.1.1, ergeben sich Einschränkungen hinsichtlich der erforderlichen Auflösung des Systems sowie der vollflächigen Erfassung des Preforms.

Um den Einsatz in der Serienproduktion zu ermöglichen, muss eine Maschinenintegration prinzipiell möglich sein.

Die eingesetzte Datenauswertung muss, in Kombination mit dem gewählten Messprinzip, die Ableitung von 3D-Defekten aus 2D-Messdaten ermöglichen. Die Bewertung der Daten erfolgt über einen Abgleich mit der Soll-Geometrie der ROI. Ergebnis soll eine Prüfaussage bezüglich der Anwesenheit von 3D-Defekten in Form einer Geometrieabweichung sein. Abbildung 6-2 fasst die Anforderungen zusammen.

| Allgemeine Anforderungen (vgl. Kapitel 3.1) | Konkretisierung der Anforderungen bezüglich des 2D-Systems |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> Messung an trockenen textilen Kohlenstofffaser-Halbzeugen durchgeführt (ohne Vorbehandlung) | <ul style="list-style-type: none"> berührungsloses Verfahren keine weiteren Hilfsstoffe erforderlich |
| <ul style="list-style-type: none"> Prozessintegrationsgrad (Inline) | <ul style="list-style-type: none"> keine sequentielle Messung Maschinenintegration prinzipiell möglich |
| <ul style="list-style-type: none"> vollflächige Auswertung | |
| <ul style="list-style-type: none"> Erfassung von komplexen Geometrien | |
| <ul style="list-style-type: none"> Realbauteil als Demonstrator | |
| <ul style="list-style-type: none"> Bewertung der Messunsicherheit (Geometrie) | |
| <ul style="list-style-type: none"> Ansätze zur Taktzeitreduktion für großflächige Bauteile | <ul style="list-style-type: none"> 2D-System – Erfassung der Fläche einer ROI als „one shot“ Aufnahme Bewerten der 2D-Aufnahme durch Abgleich mit der Soll-Geometrie der ROI Ableitung von 3D-Defekten aus 2D-Messdaten basierend auf bekannter ROI und Defektart |

Abbildung 6-2: Anforderungen an 2D-System und Datenauswertung

Im Folgenden wird aus den Anforderungen ein Konzept für ein 2D-Prüfsystem sowie das Vorgehen für die Datenauswertung abgeleitet.

6.3.1.1 Konzeption Versuchsaufbau

Das Konzept des Versuchsaufbaus umfasst im Wesentlichen das eingesetzte Messprinzip sowie den Prozess der Datenverarbeitung.

Aus dem Stand der Technik sind 3D-Messverfahren bekannt, welche trotz statischer Position des Messaufbaus, eine flächenhafte Erfassung ermöglichen. Zu nennen sind Stereokamerasysteme, Streifenlichtsysteme, Shape from

Shading sowie Systeme basierend auf Time of flight. Die aufgeführten Systeme eignen sich jedoch, aufgrund der optischen Eigenschaften des Halbzeugs, nicht zur Erfassung von Kohlenstofffaser-Preforms (A_Klucha 2013). Des Weiteren weisen einzelne Systeme zwar eine statische Position auf, benötigen jedoch eine Sequenz von Aufnahmen, was die Messzeit verlängert.

Ansätze, welche basierend auf Auswertungsalgorithmen wie bspw. Pattern Matching arbeiten, nutzen meist zur Datengenerierung „einfache“ 2D-Flächenkameras. Hierbei wird das System anhand von mehreren Aufnahmen eines Gut-Bauteils eingelernt. Aufgrund der optischen Eigenschaften des Preforms, lassen sich mittels dieser Verfahren keine 3D-Defekte wie Geometrieabweichungen erfassen.

Die genannten Systeme und Ansätze eignen sich somit nicht, um die in Kapitel 6.3.1 angeführten Anforderungen zu erfüllen. Der im Folgenden beschriebene Ansatz nutzt daher gezielt eingesetzte Beleuchtung, um Formabweichungen sichtbar zu machen. Genutzt werden dabei die reflektiven Eigenschaften des textilen Halbzeugs.

Die Oberfläche eines Preforms aus Kohlenstofffasern weist z. T. eine starke Reflektivität auf. Diese ist abhängig vom Lichteinfall- und Betrachtungswinkel sowie der Geometrie. Ändert sich die Geometrie, z. B. durch eine Formabweichung, führt dies zu einer Veränderung der Reflexion. Um diese Veränderung von den normalen Reflexionen separieren zu können, wird in einem ersten Schritt, anhand eines Gut-Bauteils, eine ideale Aufnahme (= Soll-Aufnahme) erzeugt. Die darin auftretenden charakteristischen Reflexionen können im Folgenden als normal betrachtet werden. Wird nun im zweiten Schritt ein Bauteil mit Defekt mit seinen Reflexionen erfasst (= Ist-Aufnahme), werden die Reflexionen des Gut-Bauteils davon subtrahiert. Übrig bleiben die Reflexionen, welche durch den Defekt hervorgerufen werden. Diese können mittels Methoden der 2D-Bildverarbeitung ausgewertet werden. Von besonderer Bedeutung ist bei diesem Ansatz die Positionierung der Beleuchtung sowie der Kamera relativ zur betrachteten ROI. Sie muss individuell an die Geometriezone angepasst werden. Ziel ist es, eine Beleuchtung zu schaffen, welche auftretende Defekte hervorhebt. (Lanza, Brabandt & Bingemann 2013; A_Rupp 2015)

Die systematische Untersuchung der erforderlichen Winkel für die Beleuchtung β und die Kamera α relativ zur ROI des Prüfkörpers (vgl. Kapitel 7.1.2;

Abbildung 0-3 im Anhang) erfordert die definierte Positionierung des Bildverarbeitungssystems auf einer Kreisbahn (vgl. Abbildung 6-3). Für die Generierung der Soll- und Ist-Aufnahme müssen die Prüfkörper so ausgerichtet sein, dass die betrachtete Defekt-Zone möglichst im Zentrum der Kreisbahn positioniert ist. (A_Rupp 2015)

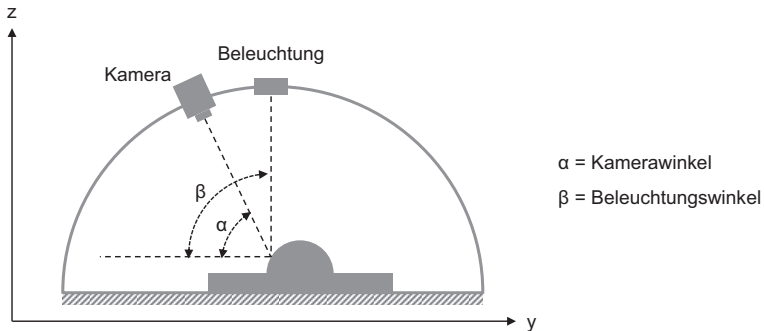


Abbildung 6-3: Versuchsaufbau – Prinzipskizze nach (A_Rupp 2015)

6.3.1.2 Konzeption Datenverarbeitung

Analog zu Kapitel 5.1.2.4 ist das Ziel der Datenverarbeitung die Detektion von geometrischen Abweichungen der Preform-Oberfläche (vgl. Abbildung 6-4). Aufgrund des gewählten 2D-Ansatzes ist es nicht möglich, einen Abgleich mittels CAD-Modell durchzuführen. Alternativ wird daher ein Abgleich mit der Aufnahme eines Gut-Bauteils (Soll) durchgeführt.

Basierend auf der Aufnahme des Gut-Bauteils, wird ein Template erstellt, welches die Zonen umschließt, in welchen Reflexionen unter normalen Bedingungen auftreten. Um die Reflexionen besser abgrenzen zu können, werden Verfahren der Bildverarbeitung auf das 2D-Grauwert-Bild angewandt. Kleinere Reflexe werden über eine Glättung reduziert. Anschließend erfolgt eine Binärisierung mittels Schwellwert. Über den Schwellwert wird festgelegt, welcher Intensitätswert des Grauwert-Bilds eine Reflexion repräsentiert. Um für die Auswertung eine zusammenhängende Fläche zu erzeugen, wird eine Segmentierung durchgeführt. Die vorliegende Fläche stellt die normale Reflexion des Gut-Bauteils dar und wird als Template abgespeichert. Für ein Ist-Bauteil, welches geprüft wird, werden nach der Bildaufnahme dieselben Bildverarbei-

tungsschritte durchlaufen. Nach der Segmentierung wird das Template des Gut-Bauteils vom Ist-Bauteil subtrahiert. Die neue Fläche repräsentiert den Defekt des Bauteils. Die Auswertung der betrachteten ROI erfolgt mittels der in Kapitel 5.1.2.4 erläuterten BLOB-Analyse. (Lanza, Brabandt & Bingemann 2013; A_Rupp 2015)

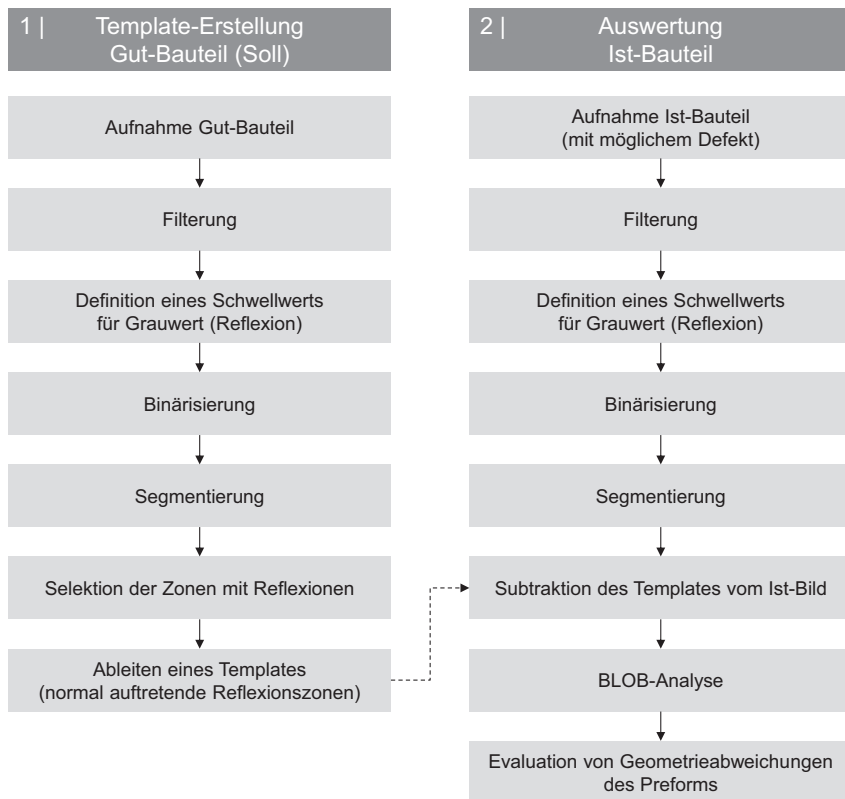


Abbildung 6-4: 2D-Datenverarbeitung

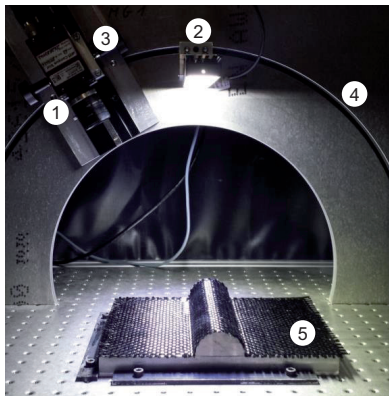
6.3.2 Realisierung

Im folgenden Kapitel werden die wesentlichen Komponenten des Versuchsaufbaus sowie die Realisierung der Datenauswertung vorgestellt.

6.3.2.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau besteht aus einem Vision-System, welches eine Graustufen-Flächenkamera mit einer Balken-LED-Beleuchtung kombiniert. Als Kamera wird die MANTA G-504B der Firma Allied Vision Technologies GmbH eingesetzt, welche einen CCD-Sensor der Auflösung 2452×2056 Pixel verwendet (Allied Vision Technologies 2016). Kombiniert wird die Kamera mit dem Objektiv 23FM16SP der Firma Tamron CO., Ltd (Tamron 2015). Als gerichtete Beleuchtung kommt die weiße High-Power LED-Balkenbeleuchtung LDL2-242/30-SW der Firma CCS Inc. zum Einsatz (Fläche: 242×30 mm²) (Stemmer Imaging GmbH 2015a).

Für den Versuchsaufbau sind Kamera und LED-Balkenbeleuchtung auf einem Kreissegment mit dem Radius $r = 300$ mm geführt (vgl. Abbildung 6-5). Die Position der Komponenten kann auf der Kreisbahn frei gewählt werden. Der minimal einstellbare Winkel zwischen Kamera und Beleuchtung beträgt 20° . Der Arbeitsabstand des Kamerasystems kann zusätzlich entlang seiner optischen Achse über einen Schlitzen eingestellt werden. (A_Rupp 2015)



1. Kamera
2. LED-Beleuchtung
3. Längsachse
4. Kreisbahn
5. Messobjekt

Abbildung 6-5: 2D-Versuchsaufbau zur 3D-Defektdetektion nach (A_Rupp 2015)

6.3.2.2 Datenverarbeitung

Das vorliegende Kapitel beschreibt die Datenverarbeitung des 2D-Prüfsystems. Die Implementierung erfolgte in MATLAB[®] (vgl. Abbildung 6-6).

Basierend auf der in Kapitel 6.3.1 erläuterten Konzeption, erfordert das Konzept der Fehlerdetektion neben der Datenverarbeitung der Ist-Daten eine vorherige Template-Erstellung mittels eines Gut-Bauteils oder Soll-Daten.

Neben den Haupt-Reflexionen, welche zur Bewertung herangezogen werden, treten aufgrund der optischen Eigenschaften des textilen Halbzeugs Reflexionen geringerer Intensität auf, die mittels einer Bildvorverarbeitung reduziert werden. Analog zum Ablauf in Kapitel 5.2.2.2 erfolgt eine materialspezifische Segmentierung. Das erzeugte Binärbild repräsentiert im Gut-Bild die Reflexionen, welche unter gegebener Einstellung immer auftreten. Die Geometrieabweichung, welche im Ist-Bild zusätzliche Reflexe verursacht, führt im Binärbild zu einer Vergrößerung der abgebildeten Fläche, relativ zum Gut-Bild. In Abhängigkeit von Material und Faserorientierung, ist das erzeugte Reflexionsbild keine geschlossene Fläche. Mittels morphologischer Operationen (Erosion und Dilatation) werden die Lücken geschlossen und die Außenkontur geglättet. (A_Rupp 2015)

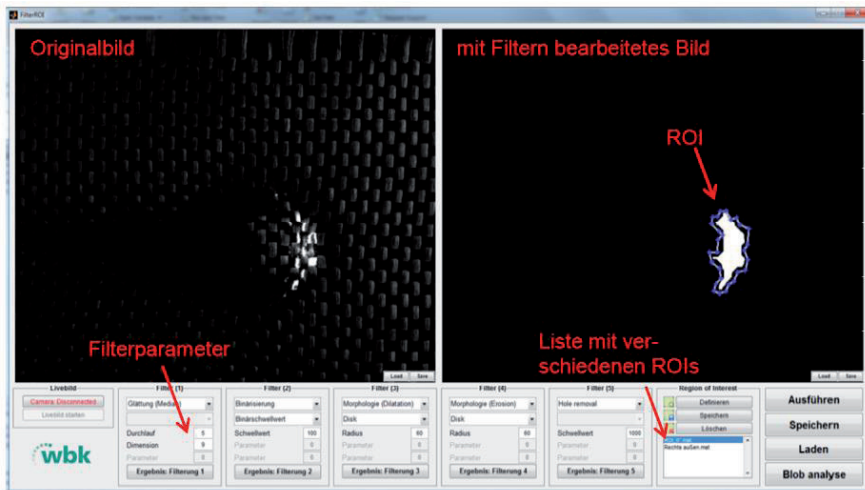


Abbildung 6-6: Matlab Tool zur Erstellung von Templates (A_Rupp 2015)

Im Gut-Bild erfolgt über eine Kantendetektion die Erfassung der Zone, welche die normalen Reflexionen darstellt. Die Zone wird als Template gespeichert. Vom Ist-Bild wird das Template des Gut-Bilds subtrahiert. Übrig bleiben die

Bereiche, welche, hervorgerufen durch eine Geometrieabweichung, Reflexionen verursachen. Diese Bereiche werden analog zum Vorgehen aus Kapitel 5.2.2.2 mittels einer BLOB-Analyse ausgewertet (vgl. Abbildung 6-7). (A_Rupp 2015)

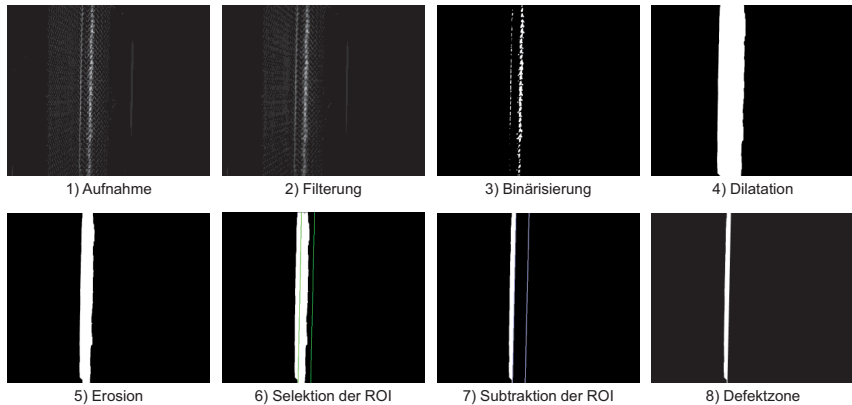


Abbildung 6-7: 2D-Bildauswertung nach (A_Rupp 2015)

6.3.3 Parameteroptimierung

Das folgende Kapitel stellt die Einflussgrößen auf die Prüfung, die Auswahl geeigneter Parameter und die Ergebnisse der Parametervariation vor.

6.3.3.1 Relevante Parameter

Wie die Messungen der 3D-Messstation, wird auch das 2D-Prüfsystem durch verschiedene Einflussgrößen beeinflusst. Neben dem textilen Halbzeug und der Orientierung der Fasern, sind es besonders die (Winkel-) Einstellungen der Kamera und der LED-Beleuchtung sowie die Parameter der erforderlichen Bildverarbeitung. Tabelle 6-1 gibt einen Überblick über relevante Parameter des Systems (A_Rupp 2015). Für die Durchführung der Versuche werden die in Tabelle 5-2 eingeführten textilen Halbzeuge verwendet.

Tabelle 6-1: Übersicht des Parameterfelds

| | Parameter | Einheit |
|-------------------------|--|---------------|
| Material | Textiles Halbzeug (Gewebe; Gelege) | - |
| | Orientierung relativ zur Laserlinie (0°, 45°, 90°) | ° |
| Versuchsaufbau | Kamera | |
| | • Blende k | - |
| | • Belichtungszeit t | μs |
| | • Fokuspunkt | - |
| | • Arbeitsabstand | mm |
| | Beleuchtung | |
| | • Helligkeit | % |
| | • Belichtungszeit | ms |
| | • Arbeitsabstand | mm |
| | Winkel | |
| • Kamera α | ° | |
| • Beleuchtung β | ° | |
| Bildverarbeitung | Glättungsfilter | - |
| | Binärisierungsschwelle | - |
| | Morphologische Filter | - |

6.3.3.2 Faktorauswahl

Aufgrund der großen Anzahl an Parametern muss für die Durchführung der Untersuchungen eine Einschränkung über eine Vorauswahl der Faktoren erfolgen. Für die Durchführung der Faktorauswahl des 2D-Systems ist prinzipbedingt der Abgleich zwischen einem Gut-Bild und einem Defekt-Bild erforderlich. Diese werden jeweils über Prüfkörper abgebildet (vgl. Kapitel 7.1.2).

Der variable Kameraabstand hat, neben der Größe des Sichtfelds, einen direkten Einfluss auf die Qualität der Abbildung der Defekte. Ein kleiner Arbeitsabstand bietet den Vorteil einer hohen Auflösung des betrachteten Objekts. Aufgrund der Auswertestrategie über Reflexionen, ist jedoch nicht zwingend eine möglichst hohe Auflösung erforderlich. Im Rahmen der Faktorauswahl werden Abstände zwischen 200 mm und 400 mm betrachtet. Dabei zeigt sich der Effekt, dass sich bei einem kleinen Arbeitsabstand und somit höherer Auflösung Schwierigkeiten bei der nachgeschalteten Auswahl der morphologischen Operationen ergeben, da die materialbedingten Lücken in der Reflexion größer werden. Daher wird im Folgenden ein Arbeitsabstand von 400 mm gewählt.

Für die Blende des Objektivs wird der für das System empfohlene Wert von $k = 5,6$ verwendet. Die Wahl der Belichtungszeit wird beeinflusst durch das Material sowie die Faserorientierung. Somit ergeben sich für die verschiedenen Kombinationen unterschiedliche Werte, welche jeweils einen Anhaltspunkt darstellen, um eine gute Qualität der Rohdaten zu erzielen (vgl. Tabelle 6-2). (A_Rupp 2015)

Tabelle 6-2: Übersicht der Startwerte für die Auswahl der Belichtungszeit

| Material | Faserorientierung | Belichtungszeit |
|-----------------|--------------------------|------------------------|
| Gelege | 0° | 6000 ms |
| Gelege | 45° | 6000 ms |
| Gelege | 90° | 2000 ms |
| Gewebe | 0° | 2000 ms |
| Gewebe | 45° | 10000 ms |

Die Filtereinstellungen haben einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis der Bewertung. Wie in Kapitel 6.3.1.2 aufgeführt, kommt zu Beginn ein Glättungsfilter zur Eliminierung kleiner Strukturen zum Einsatz. Hierbei hat eine quadratische Filtermaske der Dimension 9 mit drei Durchläufen die beste Rauschreduktion ergeben (A_Rupp 2015). Die nachfolgende Binärisierung hat das Ziel starke Reflexionen hervorzuheben. Die besten Ergebnisse werden dabei in einem Bereich zwischen den Grauwerten 140 bis 180 erzielt (A_Rupp 2015). Die abschließenden morphologischen Operationen zielen auf die Erzeugung zusammenhängender Flächen, die den Defekt abbilden. Abhängig vom Material und dessen Reflexion, muss der Radius der Filtermaske für Dilatation und Erosion angepasst werden (A_Rupp 2015).

Für die Bewertung der Daten werden zwei Kriterien eingeführt. Um zu bewerten, ob der Defekt über die gesamte Breite detektiert wird, wird aus der BLOB-Analyse das Breitenmaß der den Defekt umhüllenden Ellipse herangezogen. Als Ideal wird ein Wert von min. 2000 Pixel definiert (A_Rupp 2015). Wesentlich kleinere Werte weisen auf eine lückenhafte/unterbrochene Detektion hin. Zusätzlich zur Breite erfolgt eine Bewertung der Fläche des erkannten Defekts über die Anzahl der Pixel (A_Rupp 2015). Die Ausgabe als metrischer Wert ist nicht möglich, da im experimentellen Stadium nicht für jede Winkeleinstellung (Kamera/Beleuchtung) eine Kalibrierung des Systems durchgeführt wird. Daher handelt es sich bei dem betrachteten 2D-Verfahren um ein Prüfsystem.

Der Bereich, in welchem die Variation des Winkels von Kamera und Beleuchtung zu einer Reflexion führt, ist abhängig von der gewählten Geometriezone sowie der Position der Defektzone. Für den konvexen Prüfkörper (vgl. Abbildung 0-3 im Anhang), welcher für die Versuche exemplarisch gewählt wird, ist eine Untersuchung im Bereich $0^\circ - 100^\circ$ sinnvoll. (A_Rupp 2015)

Die Voruntersuchungen zeigen, dass das 2D-System sehr stark von verschiedenen Einflüssen abhängt. Die Empfehlung einer allgemeingültigen Einstellung ist daher nicht möglich. Die eingegrenzten Werte können je Winkeleinstellung als Startwerte herangezogen werden. Somit ist auch eine Anpassung des Templates zwischen verschiedenen Materialien erforderlich. (A_Rupp 2015)

6.3.3.3 Ergebnisse

Basierend auf der Parameterauswahl erfolgt die Untersuchung der Materialien Gelege 0° , 45° und 90° sowie Gewebe 0° und 45° am konvexen Prüfkörper. Es werden je Material für Kamera und Beleuchtung die Winkel von $0^\circ - 100^\circ$ in Schritten von 10° variiert. (A_Rupp 2015)

Ziel der Untersuchung ist es, je Material und Faserorientierung ein optimales Parameterset zu ermitteln, in welchem eine Defektdetektion basierend auf Reflexion möglich ist. Die Untersuchungen werden anhand eines Prüfkörpers mit konvexer Zone durchgeführt. Als Defekt wird exemplarisch eine Geometrieabweichung von 4 mm (Defekt D3) verwendet (vgl. Abbildung 6-8). Sie repräsentiert einen Bridging-Defekt.

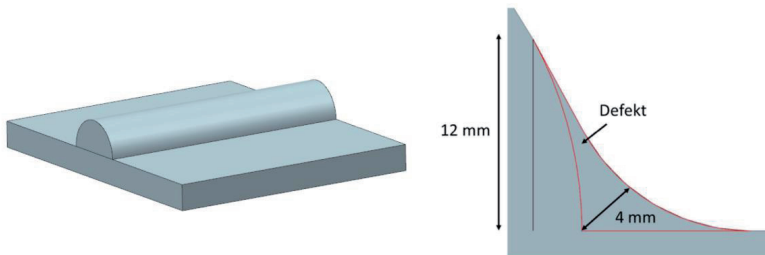


Abbildung 6-8: Konvexer Prüfkörper ($r = 25$ mm) mit eingebrachtem Defekt nach (A_Rupp 2015)

Für die Auswertung der Winkelkombinationen ist jeweils der in Abbildung 6-7 dargestellte Auswertungsablauf zu durchlaufen. Der aus der BLOB-Analyse

resultierende Wert für die Breite des Defekts wird anschließend in den Versuchsplan eingetragen, um für die Winkelkombinationen eine Karte potentieller Untersuchungswinkel zu erhalten (vgl. Abbildung 6-9). Hohe Messwerte erhalten dabei eine dunkelgrüne Färbung. Kombinationen, die nicht durchgeführt werden konnten, da die Reflexion des Defekts mit dem Bereich der normalen Reflexion zusammenfällt, werden rot dargestellt (N/A). (A_Rupp 2015)

Die Auswertung zeigt eine starke Abhängigkeit der Ergebnisse vom gewählten Material und der Faserorientierung. Die Materialkombination Gelege 90° weist die höchste Anzahl an Winkelkombinationen auf, welche die definierte Schwelle von 2000 Pixel für die Defektbreite überschreiten. Bei Gelege als auch bei Gewebe bildet die Faserorientierung 45° ein ähnliches Bild. Bei beiden Materialien kann eine große Anzahl von möglichen Kombinationen erfolgreich für die Defektdetektion eingesetzt werden. Bei der Kombination großer Winkel von Kamera und Beleuchtung weist das Gelege bei 45° eine größere Toleranz auf. Die Ergebnisse zeigen, dass eine reine Faserorientierung von 0°, wie sie bei Gelege vorliegt, am schlechtesten zu bewerten ist. Hier sind lediglich wenige Kombinationen im Bereich großer Kamerawinkel (> 70°) und kleiner Beleuchtungswinkel (< 20°) für die Detektion einzusetzen. Aufgrund der Tatsache, dass in Gewebe 0° ebenfalls zu gleichen Anteilen die Faserorientierung 90° vorliegt ist die Erfassung hier gut möglich, jedoch nicht in einem so breiten Korridor. Tabelle 6-3 fasst die Winkelsets zusammen, welche je Materialkombination den höchsten Wert hinsichtlich der detektierten Defektbreite bei der Untersuchung des 4 mm großen Defekts erzielt haben. Aufgrund des uneinheitlichen Bildes ist für die Verwendung des Systems eine umfangreiche Betrachtung anhand verschiedener Defekte erforderlich. (A_Rupp 2015)

Tabelle 6-3: Optimale Winkelsets nach Material und Faserorientierung für konvexen Prüfkörper (untersuchter Defekt: 4 mm) nach (A_Rupp 2015)

| Material | Faserorientierung [°] | Kamerawinkel [°] | Beleuchtungswinkel [°] | Breite [px] |
|----------|-----------------------|------------------|------------------------|-------------|
| Gelege | 0 | 90 | 0 | 2.106 |
| | 45 | 40 | 60 | 2.232 |
| | 90 | 0 | 50 | 2.390 |
| Gewebe | 0 | 0 | 70 | 2.345 |
| | 45 | 100 | 10 | 2.415 |

Gelege

GL 0°

| B_Winkel | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|----------|------|------|------|----|----|----|----|----|-----|----|-----|
| 0 | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 866 | 0 | 0 |
| 10 | x | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | x | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | 0 | 0 | x | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 40 | 0 | 0 | 0 | x | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | x | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 60 | 0 | 418 | 1085 | 0 | 0 | x | x | x | 0 | 0 | 0 |
| 70 | 1010 | 1168 | 1136 | 0 | 0 | 0 | x | x | x | 0 | 0 |
| 80 | 1509 | 1441 | 1085 | 0 | 0 | 0 | 0 | x | x | x | 0 |
| 90 | 2106 | 1405 | 1015 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | x | x | x |
| 100 | 1928 | 1669 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | x | x |

GL 45°

| B_Winkel | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|----------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | x | x | 0 | 0 | 416 | 1531 | 1959 | 1863 | 1814 | 1444 | 802 |
| 10 | x | x | x | 416 | 1566 | 1851 | 1826 | 1656 | 1777 | 1917 | 975 |
| 20 | 0 | x | x | x | 1833 | 1986 | 1783 | 1604 | 2011 | 1994 | 1204 |
| 30 | 0 | 0 | x | x | x | 1808 | 1841 | 1925 | 2015 | 1925 | 1988 |
| 40 | 0 | 985 | 1698 | x | x | x | 2232 | 1985 | 1970 | 2000 | 1148 |
| 50 | 553 | 1378 | 1935 | 1900 | x | x | x | 1933 | 2019 | 1115 | 492 |
| 60 | 1377 | 1594 | 2040 | 1843 | 1851 | x | x | x | 1244 | 577 | 435 |
| 70 | 1364 | 1725 | 1884 | 1818 | 2118 | 2178 | x | x | x | 347 | 0 |
| 80 | 11766 | 1892 | 1865 | 1731 | 2074 | 2052 | 1843 | x | x | x | 0 |
| 90 | 1866 | 1778 | 1909 | 1793 | 1927 | 1650 | 665 | 402 | x | x | x |
| 100 | 1753 | 1745 | 1906 | 1882 | 1346 | 422 | 0 | 0 | 0 | x | x |

GL 90°

| B_Winkel | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | x | x | 0 | 0 | 2234 | 2390 | 2373 | 2361 | 2150 | 2200 | 2312 |
| 10 | x | x | x | 0 | 2288 | 2384 | 2357 | 2230 | 2194 | 2294 | 2230 |
| 20 | 0 | x | x | x | 2371 | 2357 | 1736 | 2220 | 2290 | 2217 | 2262 |
| 30 | 0 | 0 | x | x | x | 1906 | 2265 | 2283 | 2210 | 2175 | 2237 |
| 40 | 0 | 2301 | 2306 | x | x | x | 2259 | 2173 | 2209 | 2257 | 2237 |
| 50 | 2301 | 2361 | 2349 | 2351 | x | x | x | 2236 | 2243 | 2287 | 2384 |
| 60 | 2347 | 2344 | 2353 | 2220 | 2273 | x | x | x | 2213 | 2210 | 2049 |
| 70 | 2325 | 2347 | 2342 | 2283 | 2227 | 2257 | x | x | x | N/A | N/A |
| 80 | 2345 | 2243 | 2169 | 2181 | 2248 | 2231 | 2241 | x | x | x | N/A |
| 90 | 2307 | 2353 | 2235 | 2195 | 2229 | 2244 | 2176 | N/A | x | x | x |
| 100 | 2325 | 2353 | 2263 | 2197 | 2232 | 2171 | 1068 | N/A | N/A | x | x |

Gewebe

GW 0°

| B_Winkel | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | x | x | 0 | 0 | 1677 | 305 | 2089 | 2345 | 408 | 338 | 1605 |
| 10 | x | x | x | 455 | 0 | 2012 | 2342 | 620 | 0 | 1571 | 1780 |
| 20 | 0 | x | x | x | 1674 | 2278 | 621 | 323 | 1526 | 1838 | 1611 |
| 30 | 0 | 517 | x | x | x | 150 | 335 | 1555 | 1828 | 709 | 170 |
| 40 | 1082 | 0 | 1731 | x | x | x | 1532 | 1847 | 646 | 216 | 1298 |
| 50 | 0 | 1583 | 2238 | 584 | x | x | x | 610 | 387 | 1285 | 1654 |
| 60 | 1761 | 2304 | 809 | 530 | 1392 | x | x | x | 1277 | 1188 | N/A |
| 70 | 2250 | 704 | 433 | 1414 | 1878 | 599 | x | x | x | N/A | N/A |
| 80 | 729 | 514 | 1414 | 1971 | 605 | 450 | 1225 | x | x | x | N/A |
| 90 | 607 | 1736 | 2147 | 913 | 465 | 1377 | 1121 | N/A | x | x | x |
| 100 | 1743 | 2219 | 1061 | 438 | 1360 | 853 | N/A | N/A | N/A | x | x |

GW 45°

| B_Winkel | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0 | x | x | 0 | 0 | 0 | 2025 | 2383 | 2328 | 2345 | 1608 | 1400 |
| 10 | x | x | x | 0 | 2220 | 2380 | 2286 | 2327 | 2378 | 841 | 681 |
| 20 | 0 | x | x | x | 2390 | 2239 | 2273 | 2366 | 2366 | 330 | 0 |
| 30 | 0 | 0 | x | x | x | 2273 | 2330 | 2308 | 2512 | 0 | 0 |
| 40 | 0 | 0 | 2236 | x | x | x | 2370 | 2384 | 651 | 0 | 0 |
| 50 | 0 | 1254 | 2293 | 2290 | x | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 60 | 1242 | 2309 | 2277 | 2337 | 2352 | x | x | x | 0 | 0 | 0 |
| 70 | 2236 | 2283 | 2224 | 2354 | 1098 | 2355 | x | x | x | 0 | 0 |
| 80 | 2232 | 2210 | 2363 | 2288 | 719 | 1542 | 0 | x | x | x | 0 |
| 90 | 2194 | 2348 | 2286 | 1099 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | x | x |
| 100 | 2298 | 2415 | 1905 | 626 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | x | x |

Abbildung 6-9: Auswertung der detektierten Defektbreite - konvexes Bauteil; Defekt 4 mm (Defekt D3) nach (A_Rupp 2015)

7 Validierung

Das vorliegende Kapitel befasst sich mit der Validierung der vorgestellten 3D-Messtation (Kapitel 5) und des 2D-Prüfsystems (Kapitel 6.3). Hierzu kommen verschiedene Prüfkörper zum Einsatz.

7.1 Prüfkörper

Für die Validierung der vorgestellten Mess- und Prüfsysteme ist es erforderlich, einen vergleichbaren Rahmen zu schaffen. Dabei sollen möglichst verschiedene typische Geometriezonen aus dem Automobilbau in Kombination mit der Oberfläche aus textilem Halbzeug betrachtet werden. Mittels Prüfkörper ist es möglich, Geometriezonen auf engem Raum abzubilden, ohne dass für die Untersuchungen ein komplettes Bauteil als Preform vorliegen muss (Systematik der Test-Pyramide). Um eine Aussage hinsichtlich der Detektierbarkeit von Defekten zu ermöglichen, werden im Folgenden neben einem Kontur-Prüfkörper auch zusätzlich Prüfkörper mit gezielt eingebrachten Defekten vorgestellt (vgl. Abbildung 0-3 im Anhang).

7.1.1 Kontur-Prüfkörper

Automobile Bauteile bieten einen großen Formenschatz an Geometrien. Die Schalenbauweise stellt dabei die am weitesten verbreitete Form des Karosseriebaus dar (vgl. Kapitel 2.1). Vergleichbar zu Blechgeometrien, weisen CFK-Bauteile ebenfalls schalenförmige Elemente auf und lassen sich daher im Wesentlichen auf die gleichen Formelemente aggregieren. In verschiedenen Untersuchungen wurden die Geometrien von Blechbauteilen in Geometrieelemente unterteilt und beispielsweise durch Krümmungsradien beschrieben (Sunil & Pande 2008; Kannan & Shunmugam 2009; Gupta & Gurumoorthy 2013).

Neben den Gebieten der Blechumformung und –konstruktion stellen für die Digitalisierung mittels Messtechnik im Besonderen auch Geometriezonen eine Relevanz dar, welche eine Herausforderung für den Preforming-Prozess darstellen (Ehinger 2012). Die hierbei betrachteten Geometrien lassen sich auf schalenförmige Strukturen verschiedener Grundgeometrien zusammenfassen (A_Hettich 2015).

Für die Validierung der 3D-Messtation wird aus den Grundgeometrien der angeführten Studien ein Prüfkörper abgeleitet, der ein schalenförmiges Bauteil repräsentiert. Wie in Abbildung 7-1 dargestellt, berücksichtigt der Kontur-Prüfkörper verschieden stark ausgeprägte konvexe und konkave Geometriezonen, Radien und Sattelflächen, welche in den genannten Studien ebenfalls berücksichtigt wurden (vgl. Abbildung 0-5 im Anhang). Der Kontur-Prüfkörper weist die Dimensionen $475 \times 240 \times 80 \text{ mm}^3$ ($L \times B \times H$) auf. Als Referenzmarker für die Durchführung eines Soll/Ist-Vergleichs werden drei Kugeln auf dem Prüfkörper angebracht. Aufgrund der kurzen Abstände zwischen den geometrischen Zonen sowie der Höhenunterschiede, eignet sich der Kontur-Prüfkörper für den Wirkungsnachweis der aktiven Höhenachführung der 3D-Messtation, sowie der Kompensation von Abschattungseffekten durch die Kombination von zwei LLS. (A_Hettich 2015)



a) Höhenprofil des Prüfkörpers



b) gefertigter Prüfkörper

Abbildung 7-1: Kontur-Prüfkörper nach (Brabandt, Lanza & Hettich 2015; A_Hettich 2015)

7.1.2 Grundgeometrie-Prüfkörper

Für die Bewertung der Detektierbarkeit von Defekten mittels der 3D-Messtation und 2D-Prüftechnik ist eine reproduzierbare Einbringung von Defekten in einen Preform erforderlich. Hierfür werden mit einer konvexen und einer konkaven Zone sowie einer Rampe drei relevante Geometriemerkmale als Prüfkörper gewählt (Ehinger 2012) (vgl. Abbildung 7-2; Abbildung 0-6 bis Abbildung 0-8 im Anhang). Der Radius der konvexen/konkaven Zone beträgt

25 mm. Die Steigung der Rampe beträgt 45° bei einem Höhenunterschied der parallelen Zonen von 40 mm (A_Hettich 2015; A_Rupp 2015).



a) konvex

b) konkav

c) Rampe

Abbildung 7-2: Grundgeometrie-Prüfkörper nach (A_Hettich 2015)

Für die reproduzierbare Einbringung von Defekten wird, neben dem Prüfkörper mit idealer Form, ein Prüfkörper gefertigt, welcher mittels Einsätzen in kritischen Zonen der Geometrien die gezielte Abbildung von Defekten ermöglicht. Die Defekte werden in Zonen eingebracht, welche schwer zu drapieren sind und somit anfällig für Geometrieabweichungen im Preform (z. B. Ausbildung von Bridging). Um eine Grenze für die Detektierbarkeit von Fehlergrößen zu ermitteln, werden Defekte verschiedener Größe als Einsätze gefertigt (vgl. Abbildung 7-3 und Abbildung 7-4). Wie beim Kontur-Prüfkörper werden auch für die Grundgeometrie-Prüfkörper Kugeln als Referenzmarker verwendet. (A_Rupp 2015)

Die Abmaße der Prüfkörper werden mit 200 mm x 240 mm so gewählt, dass in beiden Orientierungen der Prüfkörper mittels zweier Scanbahnen durch die 3D-Messstation vollständig digitalisiert werden kann.

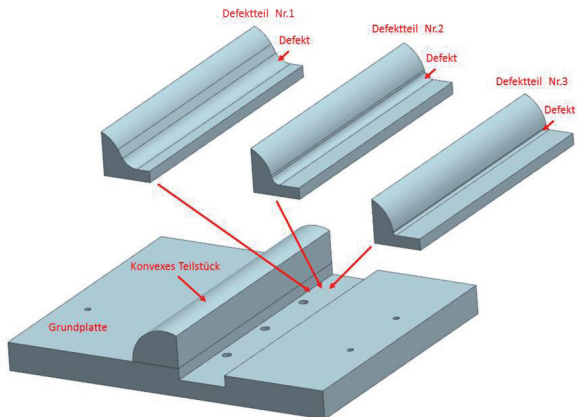


Abbildung 7-3: Grundgeometrie-Prüfkörper - Defektzonen konvexe nach (A_Rupp 2015)

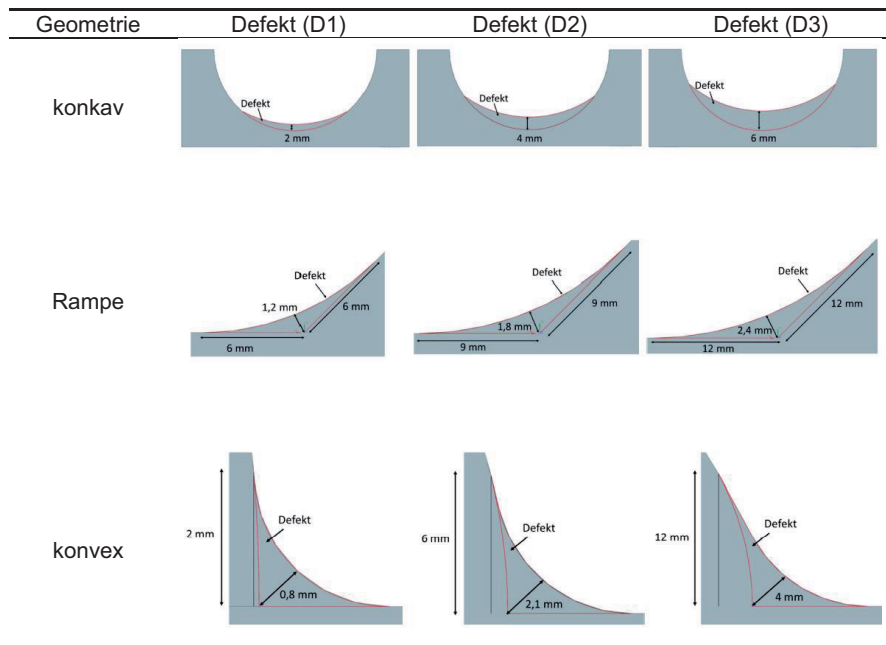


Abbildung 7-4: Größe der Defektzonen nach (A_Rupp 2015)

7.2 Material und Lagenaufbau

Für die Durchführung der Validierung werden die in Tabelle 5-2 (vgl. Kapitel 5.3.1) aufgeführten Referenzmaterialien verwendet. Das Gewebe wird dabei in zwei Faserorientierungen getestet ($0/90^\circ$; $\pm 45^\circ$), das Bidirektional-Gelege in drei Orientierungen (0° , 45° , 90°). Der Lagenaufbau wird jeweils einlagig ausgeführt. Dabei wird das drapierte textile Halbzeug mit Sprühkleber auf den Prüfkörpern fixiert. Um Reflexionen des Trägermaterials zu vermeiden, werden die metallischen Grundkörper matt schwarz lackiert.

7.3 Validierung 3D-Messstation

In der Parameteroptimierung (vgl. Kapitel 5.3.3) werden, in Abhängigkeit von Material und Faserorientierung, optimale Einstellungen für das LLS beschrieben. Hierauf basierend wird die Validierung anhand der vorgestellten Prüfkörper durchgeführt. Der Messablauf erfolgt entsprechend des vorgestellten Ablaufs aus Kapitel 5.2.1.3.

Um den Einfluss der Orientierung von Geometriezonen sowie der Höhennachführung auf das Erfassungsergebnis zu ermitteln, werden die Prüfkörper jeweils mit zwei verschiedenen Mess-Strategien gemessen. Bei Orientierung 1 (o1) ist das Konturprofil 0° / parallel zur Laserlinie orientiert. Bei Orientierung 2 (o2) ist das Konturprofil um 90° gedreht / orthogonal zur Laserlinie. Die Orientierungen werden für die Bahn-Planung im CAD-System berücksichtigt (vgl. Abbildung 7-5).

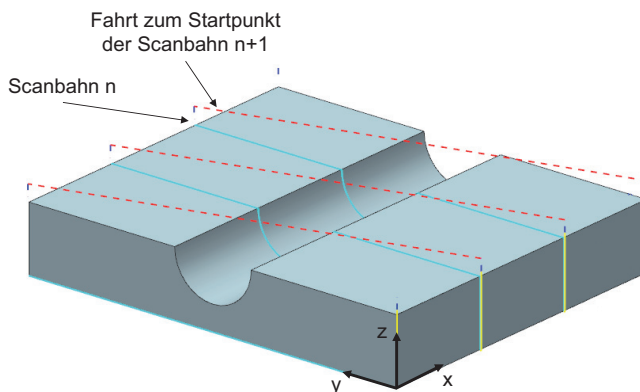


Abbildung 7-5: Bahn-Planung für Orientierung 1 (α_1) im CAD nach (A_Hettich 2015)

7.3.1 Auswertestrategie

Die generierten Daten werden analog zu Kapitel 5.2.2 verarbeitet. Für die Bewertung der Detektierbarkeit von Defekten der Grundgeometrie-Prüfkörper wird die BLOB-Analyse eingesetzt. Als Kriterien werden primär die Fläche des detektierten BLOB sowie visuelle Kriterien bezüglich der Defekterfassung bewertet. Je Material und Orientierung müssen für die BLOB-Analyse spezifische Filterparameter gewählt werden. Aufgrund der spezifischen Parameter ist die Vergleichbarkeit der ermittelten Größen zwischen den Materialkombinationen nicht auf Basis von Absolutwerten möglich.

Für die Bewertung des Konturprüfkörpers ist eine Bewertung mittels BLOB-Analyse nicht zielführend, da keine Defekte eingebracht sind, sondern die Untersuchung komplexer Geometrien im Vordergrund steht. Die Bewertung erfolgt daher mittels der Standardabweichung des Scans zur Soll-Geometrie, der Anzahl der verfügbaren Punkte für den Soll/Ist-Vergleich und statistischer Größen, welche die Aufdickung durch das textile Halbzeug beschreiben (Mittelwert, Modus, Median).

7.3.2 Kontur-Prüfkörper

Der Kontur-Prüfkörper (vgl. Abbildung 7-1) wird aufgrund seiner komplexen Form zur Untersuchung der Höhennachführung verwendet. Des Weiteren

werden die Auswirkungen von Abschattungseffekten betrachtet. Hierzu werden neben dem Scan längs des Konturprofils (σ_1 – Bahnanzahl 3 mit Bahnabstand 90 mm) unter Variation der Bahnbreite Scanstrategien quer zur Orientierung des Profils (σ_2) durchgeführt (Bahnanzahl 10 mit Bahnabstand 43 mm und Bahnanzahl 20 mit Bahnabstand 23 mm).

Vorgeschaltet zur quantitativen Bewertung erfolgt eine visuelle Bewertung des Scan-Ergebnisses. Die qualitative Auswertung der Scans zeigt eine verbesserte Abbildung der steilen Flanken bei der Scan-Orientierung 2 (vgl. Abbildung 7-6). Eine Halbierung der Bahnbreite bei σ_2 führt zu einer weiteren Verbesserung der flächigen Digitalisierung. Dem gegenüber steht eine wesentlich erhöhte Zeitdauer für die Erfassung des Bauteils. Die quantitative Auswertung der Daten aus dem Soll/Ist-Vergleich ist in Tabelle 7-1 zusammengefasst.

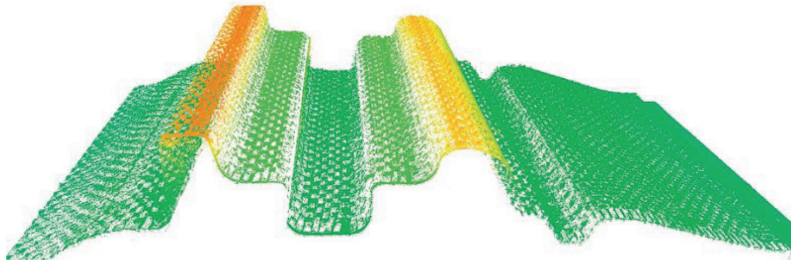


Abbildung 7-6: Scan des Kontur-Prüfkörpers (Brabant, Lanza & Hettich 2015)

Die Auswertung der Daten weist bei Gelege 0° und Gelege 90° die geringsten Werte für die Standardabweichung auf. Betrachtet man die Anzahl der bei der Auswertung erfassten Punkte, führt sowohl bei Gelege als auch bei Gewebe in der Orientierung 45° die Erfassung quer zum Profil (σ_2) zu einer signifikant höheren Punktedichte. Bei den Gelege-Orientierungen 0° und 90° sowie Gewebe 0° führt die Erfassung parallel zur Profilkontur (σ_1) zu einer höheren Punktedichte. Diese Effekte lassen sich, wie bereits diskutiert, primär auf die verschiedenen Reflexionseigenschaften der Materialien zurückführen. Bei einer Orientierung von 45° relativ zur Laserlinie bietet die Orientierung σ_2 Vorteile aufgrund der konstanten Höhe des Profil-Prüfkörpers in σ_2 .

Die Untersuchungen zur Höhennachführung (entlang des Profils (σ_1)) zeigen für alle Materialkombinationen eine Reduktion der Standardabweichung bei

aktiver Höhennachführung. Dies wird erzielt, in dem der Arbeitspunkt des LLS konstant im optimalen Tiefenschärfebereich zum Bauteil gehalten wird. Für die Anzahl der für den Soll/Ist-Vergleich zur Auswertung stehenden Punkte kann, mit Ausnahme der Materialprobe Gewebe 45°, eine Erhöhung der Punkteanzahl für die aktive Höhennachführung festgestellt werden. Die erhöhte Punktedichte wird durch die Reduktion von Abschattungseffekten durch die aktive Höhennachführung erzielt.

Tabelle 7-1: Auswertung Profil-Prüfkörper

| Material | Faserorientierung [°] | Bauteilorientierung | Höhennachführung | Bahnanzahl | Std. Abw. [mm] | Modus [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | Anzahl Punkte |
|----------|-----------------------|---------------------|------------------|------------|----------------|------------|-------------|-----------------|---------------|
| Gelege | 0 | o1 | ja | 3 | 0,9365 | 0,9785 | 1,2821 | 1,3957 | 11.123.600 |
| | | | nein | 3 | 1,1200 | 1,1716 | 1,3906 | 1,5217 | 10.330.200 |
| | | o2 | ja | 10 | 1,2274 | 1,0005 | 1,2382 | 1,4093 | 8.548.710 |
| | | | ja | 20 | 1,1091 | 0,9558 | 1,1945 | 1,3452 | 8.640.890 |
| | 45 | o1 | ja | 3 | 1,0437 | 1,0816 | 1,3162 | 1,4409 | 8.309.370 |
| | | | nein | 3 | 2,3130 | 1,1919 | 1,4412 | 1,9591 | 3.671.550 |
| | | o2 | ja | 10 | 2,0982 | 1,0638 | 1,2038 | 1,0809 | 11.652.600 |
| | | | ja | 20 | 1,0745 | 0,9923 | 1,1831 | 1,3349 | 11.152.300 |
| | 90 | o1 | ja | 3 | 0,9668 | 1,6033 | 1,4739 | 1,5224 | 6.161.500 |
| | | | nein | 3 | 1,1339 | 1,7604 | 1,6158 | 1,6606 | 5.909.610 |
| o2 | | ja | 10 | 1,1566 | 1,1168 | 1,2172 | 1,3664 | 4.543.600 | |
| | | ja | 20 | 1,0159 | 1,0220 | 1,1730 | 1,2999 | 4.536.610 | |
| Gewebe | 0 | o1 | ja | 3 | 1,1914 | 1,1074 | 1,1192 | 1,2824 | 2.158.430 |
| | | | nein | 3 | 1,3776 | 0,8384 | 1,2966 | 1,5213 | 2.034.900 |
| | | o2 | ja | 10 | 1,3298 | 0,6977 | 0,9431 | 1,1494 | 1.287.990 |
| | | | ja | 20 | 1,2165 | 0,7567 | 0,8891 | 1,0840 | 1.303.320 |
| | 45 | o1 | ja | 3 | 1,2530 | 0,9042 | 1,0879 | 1,2341 | 1.250.380 |
| | | | nein | 3 | 1,4861 | 1,0360 | 1,3355 | 1,5482 | 1.407.820 |
| | | o2 | ja | 10 | 1,2510 | 0,9972 | 1,0356 | 1,1706 | 2.121.800 |
| | | | ja | 20 | 1,1636 | 0,8934 | 1,0350 | 1,1629 | 2.085.450 |

Für eine weitere Bewertung der Erfassungsqualität kann der erfasste Wert der Materialdicke des textilen Halbzeugs herangezogen werden. Nachdem das CAD-Modell, welches für den Soll/Ist-Vergleich herangezogen wird, die Soll-Geometrie des Profil-Prüfkörpers darstellt, repräsentiert die gemessene Abweichung der Oberfläche die Dicke des Halbzeugs. Zur Bewertung werden für die erfassten Punkte je Materialkombination die statistischen Größen Median, Modus und Mittelwert berechnet. Als Vergleichswert wird mittels CT-

Messungen die Materialdicke ermittelt. Die Messungen ergeben für das verwendete Gelege eine Dicke von ca. 0,8 mm, für das Gewebe ca. 0,6 mm. Für Gewebe wie auch für Gelege weisen die gemessenen Werte höhere Werte auf, welche sich in Abhängigkeit von der Materialkombination sowie der Erfassungsstrategie unterscheiden. Für die Bewertung der Materialdicke erscheint der Lageparameter Modus am besten geeignet. Er ist entgegen des Medians und des Mittelwertes nicht durch Artefakte, welche sich in Ausreißern der Messwerte widerspiegeln, beeinflusst. Für das Gelege ergeben sich daher Werte zwischen 0,9558 mm (0°; o2 – 20 Bahnen; aktive Höhennachführung) und 1,7604 mm (90°; o1; keine Höhennachführung), was eine Abweichung zwischen 0,16 mm und 0,96 mm ergibt. Beim erfassten Gewebe liegen die Werte zwischen 0,6977 mm (0°; o2 – 10 Bahnen; aktive Höhennachführung) und 1,1074 (0°; o1; aktive Höhennachführung), was eine Abweichung zwischen 0,10 mm und 0,51 mm ergibt. Bei Gelege und bei Gewebe ergeben sich somit die besten Ergebnisse hinsichtlich der erfassten Materialdicke für Messungen bei 0° Faserorientierung, einer Erfassung in Orientierung 2 und aktiver Höhennachführung. Die hier beobachtete Streuung der ermittelten Materialdicken lässt auf einen signifikanten Einfluss der variierten Größen wie bspw. Material, Faserorientierung und Bauteilorientierung schließen. Zur Ermittlung einer Messunsicherheit für die hier betrachteten Kombinationen sind weiterführende Untersuchungen analog zum vorgestellten Ansatz in Kapitel 5.4 durchzuführen.

Die Untersuchungen am Konturprüfkörper zeigen, dass das 3D-Messsystem für die Erfassung komplexer Geometrien geeignet ist. Durch die aktive Höhennachführung in Kombination mit den zwei LLS können Abschattungseffekte vermieden und eine vollflächige Erfassung prinzipiell ermöglicht werden. Somit ist die Grundlage für die Detektion von Defekten auf Preforms gegeben.

7.3.3 Grundgeometrie-Prüfkörper

Die Betrachtung der Grundgeometrie-Prüfkörper (vgl. Abbildung 7-7) zielt auf die Untersuchung der Detektierbarkeit von Defekten ab. Hierzu werden gezielt in die Prüfkörper eingebrachte Geometrieabweichungen untersucht. Die Messungen werden mit aktiver Höhennachführung unter Orientierung o1 und o2 durchgeführt.

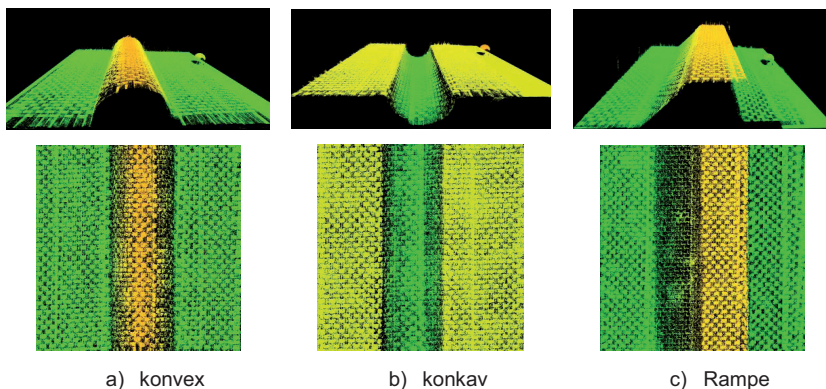


Abbildung 7-7: Scanergebnis Grundgeometrie-Prüfkörper ohne Defekt (A_Hettich 2015; Berger et al. 2017)

Orientierung o1 wird in 2 Bahnen mit Bahnabstand 90 mm gescannt. Für Orientierung o2 werden 5 Bahnen mit 50 mm Bahnabstand verwendet.

Der Fokus liegt auf der Bewertung der Detektierbarkeit von Defekten, welche in den kritischen Zonen den Geometrien überlagert werden (vgl. Kapitel 7.1.2). Für die Untersuchungen werden für den konvexen Prüfkörper Defekte in vier Abstufungen verwendet, für den konkaven Prüfkörper sowie die Rampe werden jeweils drei Defektstufen betrachtet (vgl. Abbildung 7-3, Abbildung 7-4; Abbildung 0-54, Abbildung 0-55 im Anhang). Basis für die Auswertung stellt wie beim Kontur-Prüfkörper ein Soll/Ist-Vergleich dar, auf welchem die BLOB-Analyse zur Defektdetektion aufbaut. Aufgrund der eingebrachten Defekte, ist die Auswertung hinsichtlich der Standardabweichung auf Basis der Grundgeometrie nicht zielführend. Für die Bewertung der Qualität der Defektdetektion stehen die bei der BLOB-Analyse erfassten Kennwerte sowie die visuelle Bewertung zur Wahl. Neben dem Flächeninhalt der detektierten Defektzone sind hier weitere Parameter wie Länge und Breite des Defekts sowie der Umfang und Schwerpunkt zu nennen. Abbildung 7-8 stellt exemplarisch die BLOB-Analyse mit den berechneten Kennwerten des konkaven Geometrie-Prüfkörpers für die Materialkombination Gelege 0° dar. Die gesamte Auswertung ist im Anhang abgebildet (vgl. Abbildung 0-56 bis Abbildung 0-70).

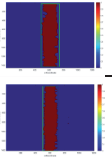
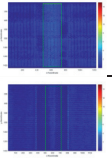
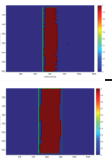
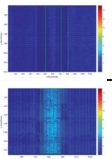
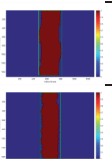
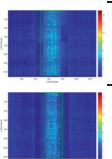
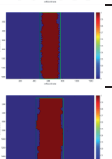
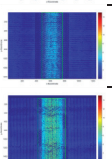
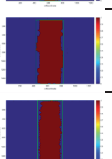
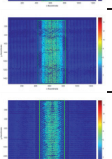
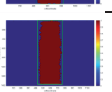
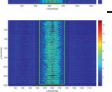
| Konkav | Defekt-Auswertung | Soll-/Ist-Darstellung mit Defekt | Flächeninhalt [px] | Schwerpunkt (X) [px] | Schwerpunkt (Y) [px] | Umfang [px] | Länge [px] | Breite [px] |
|-----------|---|---|--------------------|----------------------|----------------------|-------------|------------|-------------|
| GL0 | | | | | | | | |
| D1_GL0_o1 |  |  | 3.451.947 | 67.657 | 12.527 | 1.269.918 | 225.383 | 1.567.086 |
| D1_GL0_o2 |  |  | 3.152.974 | 72.258 | 13.713 | 2.182.734 | 194.081 | 1.528.903 |
| D2_GL0_o1 |  |  | 4.910.298 | 63.172 | 8.812 | 1.317.037 | 328.411 | 1.697.884 |
| D2_GL0_o2 |  |  | 4.261.429 | 64.167 | 9.268 | 2.105.027 | 272.570 | 1.635.897 |
| D3_GL0_o1 |  |  | 6.001.542 | 59.192 | 14.259 | 1.503.244 | 396.533 | 1.677.398 |
| D3_GL0_o2 |  |  | 5.172.363 | 61.613 | 9.804 | 2.332.058 | 321.707 | 1.542.342 |

Abbildung 7-8: Beispielhafte BLOB-Auswertung der 3D-Daten

Die Auswertung der erfassten Daten zeigt, dass der Flächeninhalt, gemessen in Pixel, sehr gut die Größe des Defekts repräsentiert (vgl. Tabelle 7-2 und Tabelle 7-3). So ist bei fast allen Defekten eine Zunahme des Flächeninhalts bei der Detektion größerer Defekte zu beobachten. Die Auswertung des Umfangs der Fläche stellt hingegen kein zuverlässiges Kriterium für die Bewertung der Größe von Defekten dar, da sie stark von Unregelmäßigkeiten der Kontur beeinflusst wird, was dazu führen kann, dass auch bereits flächenmäßig kleine Defekte einen großen Umfang aufweisen. Einen prinzipiell wichtigen Wert stellt die x/y-Position des Schwerpunkts des BLOBs dar. Sie ermöglicht die Korrelation eines Defekts zur Position auf der analysierten Geometrie. In Bezug auf die durchgeführten Untersuchungen an den vorgestellten Geometrie-Prüfkörpern, stellt die Position des Defekts kein zu bewertendes Kriterium dar, da die Defekte immer an derselben Stelle über die gesamte Breite des Prüfkörpers eingebracht sind. Die Bewertung der BLOBs über ihre Länge und Breite stellt bei unbekanntem Defekt eine Möglichkeit zur Klassifikation dar. So kann sich eine nicht ausreichende Kompaktierung durch eine geringe Höhenabweichung über eine große Fläche äußern, welche sowohl in Länge und Breite ausgedehnt ist. Da sich in der realen Produktion die Form eines Defekts

meist zufällig ausgebildet und nicht wie hier betrachtet spezifisch festgelegt ist, wird zur Verallgemeinerung die Länge und Breite einer Ellipse, welche in den Defekt eingepasst wird, berechnet. Die ausgegebene Länge und Breite kann daher von den eigentlichen Abmaßen bspw. eines umhüllenden Rechtecks stark abweichen. Da im betrachteten Fall die eingebrachten Defekte immer über die gesamte Breite des Prüfkörpers rechteckig ausgeprägt sind, können Länge und Breite nur als relativer Anhaltspunkt herangezogen werden (vgl. Tabelle 7-2 und Tabelle 7-3). Die Bewertung mittels Kenngrößen einer Ellipse wie bspw. die Exzentrizität kann für die Klassifikation von Defekten ein nützliches Mittel darstellen.

Die Übersicht aller ausgewerteten Daten für Flächeninhalt, Länge, Breite und eine visuelle Auswertung findet sich zusammengefasst in Tabelle 7-2 und Tabelle 7-3. Die visuelle Auswertung hinsichtlich der Güte der vollflächigen Detektion (homogene Flächenerfassung) des Defektes (Abstufung: gut; mittel; schlecht), sowie ob der Defekt über die gesamte Breite erkannt wurde (Abstufung: ja; nein) ist erforderlich, da bezüglich dieser Kriterien im System keine automatisierte Auswertung implementiert ist. Sie stellen für die Bewertung der Detektierbarkeit von Defekten anhand der Geometrie-Prüfkörper das wesentliche Kriterium dar.

Tabelle 7-2: 3D-Auswertung Geometrie-Prüfkörper - Gelege

| Geometrie Defekt Bauteil-Nr. | orientierung | GL 0° | | | GL 45° | | | GL 90° | | | | | | | | |
|------------------------------|--------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------|----------|-------------------|-----------------|----------------------|-----------|
| | | Fläche ¹ [px] | Breite ¹ [px] | Länge [px] | Fläche ¹ [px] | Breite ¹ [px] | Länge [px] | Fläche ¹ [px] | Breite ¹ [px] | Länge [px] | | | | | | |
| Konvex | o1 | - | (1,431) | (4,622) | (38,213) | schlecht | nein | 54,694 (364,941) | 43,815 (28,504) | 253,635 (1,750238) | schlecht | nein | 46,862 269,711 | 8,968 14,750 | 478,183 1,095,882 | |
| | o2 | schlecht | nein | 7,137 | 671,181 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| D2 | o1 | schlecht | nein | 29,994 | 22,039 | 338,293 | schlecht | nein | 115,925 | 34,450 | 556,598 | schlecht | ja | 201,717 | 15,900 | 1,033,873 |
| | o2 | schlecht | nein | 37,097 | 7,200 | 674,768 | gut | ja | 494,475 | 40,415 | 1,581,634 | gut | ja | 355,146 | 18,921 | 1,116,786 |
| D3 | o1 | mittel | ja | 434,973 | 57,087 | 1,503,369 | gut | ja | 888,515 | 66,113 | 1,544,981 | gut | ja | 972,343 | 50,470 | 1,027,444 |
| | o2 | gut | ja | 300,035 | 24,369 | 1,448,116 | gut | ja | 1,182,317 | 85,400 | 1,698,583 | gut | ja | 840,358 | 38,202 | 1,084,540 |
| D4 | o1 | mittel | ja | 1,147,996 | 102,674 | 1,503,633 | gut | ja | 1,811,433 | 121,873 | 1,554,097 | gut | ja | 1,748,253 | 90,974 | 1,111,740 |
| | o2 | gut | ja | 726,866 | 50,543 | 1,528,613 | gut | ja | 1,908,440 | 130,550 | 1,654,131 | gut | ja | 1,606,664 | 74,131 | 1,086,394 |
| Konkav | o1 | gut | ja | 3,451,947 | 225,383 | 1,567,086 | mittel | ja | 2,889,390 | 200,030 | 1,561,428 | mittel | nein | 2,023,876 | 170,018 | 894,688 |
| | o2 | gut | ja | 3,152,974 | 194,081 | 1,528,903 | gut | ja | 3,379,903 | 235,941 | 1,725,617 | schlecht | nein | 414,606 | 88,527 | 350,606 |
| D2 | o1 | gut | ja | 4,910,288 | 328,411 | 1,697,884 | mittel | ja | 4,161,259 | 275,533 | 1,643,177 | gut | ja | 4,982,314 | 220,663 | 1,150,449 |
| | o2 | gut | ja | 4,261,429 | 272,570 | 1,635,897 | gut | ja | 4,619,938 | 326,105 | 1,778,292 | mittel | ja | 2,780,827 | 123,201 | 978,376 |
| D3 | o1 | gut | ja | 6,001,542 | 386,533 | 1,677,398 | gut | ja | 5,171,962 | 347,499 | 1,663,720 | gut | ja | 5,664,035 | 252,149 | 1,176,871 |
| | o2 | gut | ja | 5,172,363 | 321,707 | 1,542,342 | gut | ja | 5,862,420 | 403,041 | 1,732,117 | gut | ja | 4,711,897 | 197,617 | 1,019,744 |
| Rampe | o1 | gut | ja | 5,19,557 | 36,275 | 1,799,232 | mittel | ja | 527,467 | 37,564 | 1,454,378 | gut | ja | 445,435 | 19,666 | 1,044,970 |
| | o2 | mittel | nein | 101,814 | 22,188 | 760,416 | schlecht | nein | 211,822 | 35,856 | 963,977 | gut | ja | 477,829 | 22,417 | 1,076,988 |
| D2 | o1 | gut | ja | 1,015,990 | 70,558 | 1,703,150 | gut | ja | 942,840 | 59,206 | 1,536,385 | gut | ja | 1,055,236 | 46,257 | 1,079,655 |
| | o2 | gut | ja | 984,413 | 62,893 | 1,576,570 | gut | ja | 1,018,521 | 73,522 | 1,785,122 | mittel | ja | 990,492 | 44,708 | 1,060,662 |
| D3 | o1 | gut | ja | 1,596,587 | 109,019 | 1,751,321 | gut | ja | 1,623,328 | 98,344 | 1,518,057 | gut | ja | 1,628,254 | 68,651 | 1,057,752 |
| | o2 | gut | ja | 1,658,022 | 106,795 | 1,624,176 | gut | ja | 1,858,002 | 113,160 | 1,673,330 | gut | ja | 1,484,749 | 62,816 | 1,077,418 |

¹ weitestgehend zusammenhängende Fläche (visuelle Auswertung)
² Defekt über ganze Breite des Prüfkörpers (visuelle Auswertung)
 () Wert stellt nicht die Defektzone dar (visuelle Auswertung)
 ■ Vergleich o1 vs. o2 bezüglich Erfassungsqualität
 ■ Defekt vollflächig (1 = gut) und über die gesamte Breite (2 = ja) erkannt

Tabelle 7-3: 3D-Auswertung Geometrie-Prüfkörper - Gewebe

| Geometrie Defekt Nr. | Bauteil-orientierung | GW 0° | | | | GW 45° | | | | | |
|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------|-----------|
| | | Fläche ¹ | Breite ² | Flächen-inhalt [px] | Länge [px] | Breite [px] | Fläche ¹ | Breite ² | Flächen-inhalt [px] | Länge [px] | |
| Konvex | o1 | - | - | (40.745) | (7.158) | (146.904) | - | - | (3.436) | (1.155) | (45.033) |
| | | - | - | (191.390) | (6.832) | (450.913) | - | - | (301.697) | (8.103) | (613.722) |
| | o2 | - | - | (40.745) | (7.158) | (146.904) | mittel | ja | 127.549 | 7.000 | 481.021 |
| | | - | - | (154.025) | (7.570) | (449.454) | - | - | (302.776) | (8.792) | (637.692) |
| | o1 | - | - | (46.662) | (8.762) | (188.705) | mittel | ja | 103.200 | 7.123 | 425.632 |
| | | - | - | (194.669) | (6.781) | (582.960) | - | - | (276.867) | (8744) | (649.394) |
| o2 | gut | ja | 1.087.629 | 34.248 | 685.644 | gut | nein | 831.892 | 34.373 | 445.683 | |
| | - | - | (146.257) | (5.172) | (575.949) | gut | ja | 1.219.651 | 35.176 | 621.043 | |
| Konkav | o1 | gut | ja | 3.662.857 | 107.386 | 697.729 | mittel | ja | 3.198.334 | 93.972 | 692.734 |
| | | schlecht | ja | 1.572.163 | 61.476 | 590.139 | schlecht | ja | 1.790.104 | 96.913 | 701.485 |
| | o2 | gut | ja | 4.769.589 | 129.749 | 680.587 | gut | ja | 4.283.661 | 118.558 | 657.048 |
| | | mittel | ja | 2.846.919 | 86.940 | 663.393 | gut | ja | 4.598.491 | 138.950 | 711.024 |
| | o1 | gut | ja | 4.900.825 | 131.323 | 681.776 | gut | ja | 5.391.157 | 154.646 | 710.383 |
| | | mittel | ja | 3.497.126 | 103.166 | 687.978 | gut | ja | 4.582.060 | 139.071 | 714.640 |
| o2 | mittel | ja | 529.196 | 18.215 | 717.049 | mittel | ja | 382.401 | 11.883 | 531.951 | |
| | - | - | (73.460) | (9.529) | (588.382) | schlecht | ja | 352.318 | 20.179 | 673.871 | |
| o1 | mittel | ja | 984.517 | 29.848 | 677.228 | mittel | ja | 370.806 | 12.012 | 566.172 | |
| | schlecht | ja | 411.604 | 17.012 | 537.019 | schlecht | ja | 352.318 | 20.179 | 673.871 | |
| o2 | mittel | ja | 1.762.400 | 53.731 | 682.108 | mittel | ja | 1.223.402 | 31.031 | 616.027 | |
| | - | - | (83.065) | (11.744) | (561.131) | gut | ja | 1.637.037 | 46.710 | 690.507 | |

¹ weitestgehend zusammenhängende Fläche (visuelle Auswertung)

² Defekt über ganze Breite des Prüfkörpers (visuelle Auswertung)

() Wert stellt nicht die Defektzone dar (visuelle Auswertung)

() Vergleich o1 vs. o2 bezüglich Erfassungsqualität

■ Defekt vollflächig (1 = gut) und über die gesamte Breite (2 = ja) erkannt

Ziel ist, dass sowohl der Defekt vollflächig (¹ = gut) und über die gesamte Breite (² = ja) erkannt wird. Zutreffende Kombinationen sind in Tabelle 7-2 und Tabelle 7-3 dunkelgrau hervorgehoben.

Das betrachtete 3D-Messsystem bietet für die Materialkombinationen Gelege 0°, 45°, 90° eine sehr gute Erfassung für einen Großteil der betrachteten Geometrien sowie Defektgrößen. Lediglich die kleinsten Defekte D1 (GL 0°, 45°, 90°) und D2 (GL 0°) in der konvexen Zone können nicht erkannt werden. Innerhalb der Materialklasse Gelege liegen Unterschiede hinsichtlich der optima-

len Scanorientierung vor. Gelege 0° und 90° weisen entgegen Orientierung 45° vorwiegend für Orientierung o1 die Detektion eines höheren Flächeninhalts auf.

Tabelle 7-4: Übersicht Detektierbarkeit von Defekten (nach Scan-Orientierung) (3D-System)

| Geometrie | Defekt | GL 0° | GL 45° | GL 90° | GW 0° | GW 45° |
|-----------|--------|---------|---------|---------|-------|---------|
| Konvex | 1 | - | - | - | - | - |
| | 2 | - | o2 | o2 | - | - |
| | 3 | o2 | o1 / o2 | o1 / o2 | - | - |
| | 4 | o2 | o1 / o2 | o1 / o2 | o1 | o2 |
| Konkav | 1 | o1 / o2 | o2 | - | o1 | - |
| | 2 | o1 / o2 | o2 | o1 | o1 | o1 / o2 |
| | 3 | o1 / o2 | o1 / o2 | o1 / o2 | o1 | o1 / o2 |
| Rampe | 1 | - | - | o1 / o2 | - | - |
| | 2 | o1 / o2 | o1 / o2 | o2 | - | - |
| | 3 | o1 / o2 | o1 / o2 | o1 / o2 | - | o2 |

Die Erfassung der betrachteten Defektgrößen ist für die Materialkombination Gewebe 0° und 45° nur bedingt möglich. Lediglich für die konkave Geometrie können, mit Ausnahme von D1 GW 45°, sowie für konvex D4 GW 0° und GW 45° und D3 GW 45° die Defekte erkannt werden. Für Gewebe 45° stellt die Orientierung o1 hierbei die Vorzugsrichtung dar. Die im Vergleich zu Gelege schlechtere Detektionsgüte ist auf das gleichzeitige Vorliegen von zwei Faserorientierungen zurückzuführen. Das LLS liefert daher in größerer Anzahl Fehlreflexionen bzw. NaN-Stellen. Besonders die NaN-Stellen, die meist in der orthogonal zur Laserorientierung vorliegenden Faserorientierung entstehen, führen zu einer schlechteren Güte der flächigen Erfassung der Defekte, was sich im Besonderen bei der Detektion von kleinen Defekten (konvex: D1, D2; Rampe: D1, D2) negativ auswirkt. Durch das Ausbleiben eines verwertbaren Messsignals (NaN-Stellen) können kleine Defekte somit durch die Breite des Rovings überlagert werden. Das in den Untersuchungen eingesetzte 12K Gewebe kann mit seiner Rovingbreite von ca. 4 mm daher einen direkten Einfluss auf die schlechte Erfassung der betrachteten kleinen Defekte haben.

Tabelle 7-4 gibt eine Übersicht, ab welcher Defektgröße die Defekte bei den betrachteten Materialkombinationen mittels des 3D-Messsystems detektiert werden können.

Die durchgeführten Untersuchungen an den Geometrieprüfkörpern zeigen, dass es prinzipiell möglich ist Defekte in Form von Geometrieabweichungen in Preforms zu detektieren. Die minimal detektierbare Defektgröße ist dabei abhängig von der betrachteten Geometriezone, der Bindung des textilen Halbzeugs und der vorliegenden Faserorientierung relativ zur Scanrichtung.

7.4 Validierung 2D-Prüfstation

In der Parameteroptimierung (vgl. Kapitel 6.3.3) wurde das Vorgehen zur Ermittlung einer optimalen Parameterkombination für das 2D-Prüfsystem anhand des konvexen Prüfkörpers mit Defektzone D3 (Geometrieabweichung 4 mm) beschrieben. Aufgrund des Verfahrens ist es erforderlich, dass im Folgenden je verbleibender Kombination aus Material und Faserorientierung jeweils eine komplette Parametervariation bezüglich der geometrischen Einstellungen von Kamera und Beleuchtung vorgenommen wird. Der Prozess erfolgt entsprechend des vorgestellten Ablaufs aus Kapitel 6.3.1.2.

7.4.1 Auswertestrategie

Die generierten Daten werden analog zu Kapitel 6.3.2.2 verarbeitet. Für die Bewertung der Detektierbarkeit von Defekten der Grundgeometrie-Prüfkörper wird die BLOB-Analyse eingesetzt. Als Kriterium wird primär die Breite des detektierten BLOBs bewertet. Je Material und Orientierung müssen für die BLOB-Analyse spezifische Filterparameter gewählt werden. Aufgrund der spezifischen Parameter ist die Vergleichbarkeit der ermittelten Größen zwischen den Materialkombinationen nicht auf Basis von Absolutwerten möglich.

7.4.2 Grundgeometrie-Prüfkörper

Analog zu Kapitel 7.3.3 wird für das 2D-Prüfsystem die Detektierbarkeit von gezielt eingebrachten Defekten betrachtet. Je Materialkombination, Geometrie sowie eingebrachtem Defekt wird eine vollfaktorielle Untersuchung der Winkelkombinationen von Kamera und Beleuchtung durchgeführt. Betrachtet werden für die Geometrieprüfkörper der Bereich $0^\circ - 100^\circ$ für den konvexen, $30^\circ - 150^\circ$ für den konkaven Prüfkörper und $0^\circ - 130^\circ$ für den Prüfkörper Rampe. Wie in Kapitel 6.3.3.3 werden die Materialkombinationen Gelege 0° , 45° und 90° sowie Gewebe 0° und 45° an den vorgestellten Geometrie-Prüfkörpern betrachtet. (A_Rupp 2015)

Basis der Auswertung ist der in Kapitel 6.3.2.2 erläuterte Ablauf mittels BLOB-Auswertung. Abbildung 6-9 stellt exemplarisch die Auswertung anhand der Breite des detektierten BLOBs, in Abhängigkeit von der gewählten Winkelkombination zwischen Beleuchtung und Kamera, für den konvexen Geometrie-Prüfkörper und Defektgröße D3 dar. Die gesamte Auswertung für alle Geometrie-Prüfkörper und Materialpaarungen ist im Anhang abgebildet (vgl. Abbildung 0-71 bis Abbildung 0-79).

Tabelle 7-5 fasst je Material-/Geometriepaarung die Kombination aus Kamera- und Beleuchtungswinkel zusammen, für welche in der Untersuchung der höchste Breiten-Wert ermittelt wurde. Für die Bewertung einer erfolgreichen Defekt-Detektion, wird der in Kapitel 6.3.3.2 definierte Schwellwert für die erfasste Breite von 2000 Pixel herangezogen (in Tabelle 7-5 hervorgehobene Paarungen). (A_Rupp 2015)

Die Auswertung zeigt, dass eine große Anzahl der betrachteten Defekte gut erfasst werden kann. Für die Materialpaarungen Gelege 90°, Gewebe 0° und 45° können für alle betrachteten Geometriezonen die Defekte detektiert werden. Eine Ausnahme stellen die kleinsten Defekte D1 für Gelege 90° und Gewebe 0° beim konvexen Prüfkörper dar. Bei den Materialkombinationen Gelege 0° und 45° können bei der konkaven Geometrie alle Defekte erkannt werden. Eine Erfassung von Defekten in der konvexen Zone sowie der Rampe stellt für Gelege eine große Herausforderung dar. Lediglich der größte Defekt D3 kann bei beiden Faserorientierungen in der konvexen Zone erfasst werden. Für Defekte, welche der Rampe überlagert sind, ist lediglich D3 für Gelege 0° oberhalb des definierten Schwellwerts.

Tabelle 7-5: 2D-Auswertung Geometrie-Prüfkörper

| Geometrie Defekt Nr. | GL 0° | | GL 45° | | GL 90° | | GW 0° | | GW 45° | | | | | | |
|----------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----|-------|-----|----|-------|
| | Kamera- winkel [°] | Beleuchtungs- Breite [px] | Kamera- winkel [°] | Beleuchtungs- Breite [px] | Kamera- winkel [°] | Beleuchtungs- Breite [px] | Kamera- winkel [°] | Beleuchtungs- Breite [px] | Kamera- winkel [°] | Beleuchtungs- Breite [px] | | | | | |
| Konvex | D1 | 70 | 0 | 165 | 0 | 80 | 1.000 | 0 | 1.696 | 0 | 50 | 1.795 | 80 | 20 | 2.297 |
| | D2 | - | - | 40 | - | 60 | 1.773 | 10 | 2.272 | 80 | 30 | 2.294 | 90 | 10 | 2.440 |
| | D3 | 90 | 0 | 2.106 | 40 | 60 | 2.232 | 0 | 2.390 | 0 | 70 | 2.345 | 100 | 10 | 2.415 |
| Konkav | D1 | 140 | 50 | 2.007 | 120 | 90 | 2.261 | 140 | 2.402 | 90 | 70 | 2.431 | 130 | 30 | 2.331 |
| | D2 | 140 | 50 | 2.300 | 130 | 90 | 2.144 | 80 | 2.400 | 150 | 60 | 2.603 | 120 | 70 | 2.640 |
| | D3 | 120 | 50 | 2.381 | 120 | 80 | 2.307 | 130 | 2.398 | 100 | 70 | 2.539 | 100 | 80 | 2.871 |
| Rampe | D1 | 90 | 0 | 1.578 | 90 | 50 | 1.813 | 90 | 2.272 | 30 | 110 | 2.367 | 110 | 10 | 2.648 |
| | D2 | 100 | 0 | 1.992 | 50 | 80 | 1.699 | 90 | 2.363 | 60 | 90 | 2.369 | 60 | 40 | 2.627 |
| | D3 | 90 | 0 | 2.275 | 100 | 40 | 1.977 | 50 | 2.477 | 100 | 30 | 2.490 | 110 | 20 | 2.788 |

Wie in Tabelle 7-5 ersichtlich, liegen die meisten erfassten Breiten-Werte, welche nicht den definierten Schwellwert von 2000 Pixel überschritten haben, nur geringfügig darunter und können mit Einschränkungen auch den eingebrachten Defekt detektieren. Folglich kann das 2D-Prüfsystem in einem großen Umfang zur Erfassung von Defekten eingesetzt werden. Die Betrachtung der gesamten Auswertung bezüglich Kamera-/Beleuchtungskombinationen (siehe Abbildung 0-71 bis Abbildung 0-79 im Anhang) zeigt, dass neben den in Tabelle 7-5 aufgeführten Kombinationen meist eine große Anzahl weiterer Paarungen für die Defektdetektion eingesetzt werden kann. Je größer der betrachtete Defekt, desto mehr Kombinationen bieten die Möglichkeit zur Detektion. (A_Rupp 2015)

Tabelle 7-6: Übersicht Detektierbarkeit von Defekten (2D-System)

| Geometrie | Defekt | GL 0° | GL 45° | GL 90° | GW 0° | GW 45° |
|-----------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|
| Konvex | 1 | - | - | - | - | x |
| | 2 | - | - | x | x | x |
| | 3 | x | x | x | x | x |
| Konkav | 1 | x | x | x | x | x |
| | 2 | x | x | x | x | x |
| | 3 | x | x | x | x | x |
| Rampe | 1 | - | - | x | x | x |
| | 2 | - | - | x | x | x |
| | 3 | x | - | x | x | x |

Tabelle 7-6 gibt eine Übersicht, welche Defekte bei den betrachteten Materialkombinationen mittels des 2D-Prüfsystems bei einem angenommen Grenzwert von 2000 px für den Kennwert Breite detektiert werden können.

Die Auswertungen zeigen, dass mittels des 2D-Prüfsystems eine weitreichende Detektion der abgebildeten Defekte möglich ist. Analog zu den Untersuchungen mit dem 3D-Messsystem besteht eine Material- und Geometrieabhängigkeit, welche die Detektion von Geometrieabweichungen beeinflussen.

8 Diskussion und Ausblick

Das vorliegende Kapitel diskutiert den Erfüllungsgrad des vorgestellten Ansatzes hinsichtlich der in Kapitel 1.2 genannten Forschungsfragen. Des Weiteren wird aus den in Kapitel 5, 6 und 7 generierten Beobachtungen und Erkenntnissen ein Ausblick auf zukünftige Handlungsbedarfe im Themenfeld abgeleitet.

8.1 Diskussion

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Vorgehen zur Inline-Qualitätssicherung von Kohlenstofffaser-Preforms vorgestellt. Hierzu wurde eine 3D-Messstation basierend auf der Datenfusion zweier Laser-Lichtschnittsysteme entwickelt und realisiert. Durch den gezielten Einsatz zweier Messsysteme sowie einer aktiven Höhennachführung über ein Portal, konnten geometrie- und messprinzipbedingte Abschattungseffekte reduziert und somit das Ziel einer flächigen Erfassung komplexer Geometrien erreicht werden.

Zur Bewertung der Güte der generierten Messung wurde für das optische 3D-Messsystem ein Ansatz zur Ermittlung der Messunsicherheit vorgestellt. Basierend auf einem neu entwickelten, exemplarisch gewählten, kalibrierten Werkstück sowie einer CT-Referenzmessung, ist es möglich, eine Bewertung der Messunsicherheit einer Laser-Lichtschnittmessung von Preforms aus biegeschlaffen und stark reflektiven Kohlenstofffaser-Halbzeugen vorzunehmen.

Für die Integration geeigneter Messtechnik in die Prozesskette der Preformfertigung, wurde ein mehrstufiges Vorgehen vorgestellt. Kern des Vorgehens stellen dabei Konzepte zur Messzeitreduktion dar. Neben Strategien zur Reduktion der Messzeit des 3D-Messsystems durch Optimierung des Scanprozesses, stellt die Selektion von kritischen Bauteilzonen (Region Of Interest - ROI) ein wesentliches Element dar. Aufbauend auf der Selektion von ROI, welche mittels der 3D-Messstation oder Formen der Simulation möglich ist, wurde ein 2D-System entwickelt, welches gezielt über die Detektion von Reflexionseigenschaften von Kohlenstofffaser-Preforms Defekte basierend auf zuvor eingelernten Gut-Bauteilen erkennt. Aufgrund der hohen Sensitivität des Verfahrens bezüglich der betrachteten geometrischen Zone, ist jeweils eine Feinabstimmung erforderlich. Aufgrund der indirekten Erfassung von Defekten

mittels Reflexion kann das 2D-Verfahren lediglich zur Prüfung jedoch nicht zur metrischen Bewertung von Defekten eingesetzt werden.

Sowohl für die Analyse der 3D-Messdaten sowie der 2D-Prüfdaten wurde eine softwaretechnische Auswertung implementiert, welche auf Basis eines Soll/Ist-Vergleichs eines 3D-CAD-Modells bzw. eines Gut-Bauteils sowie einer BLOB-Auswertung die Detektion von Geometrieabweichungen ermöglicht.

Die Validierung der vorgestellten Systeme erfolgte mittels Geometrie-Prüfkörper, welche basierend auf Analysen aus der Literatur abgeleitet wurden. Zur Abbildung von Defekten wurden gezielt eingebrachte Geometrieabweichungen betrachtet.

Alle für die 3D-Messstation sowie für die 2D-Prüfstation durchgeführten Versuche sowie die abgeleiteten Parameter beziehen sich auf die beiden exemplarisch gewählten Materialien der Klasse Gewebe und Gelege, welche unter den Faserorientierungen 0° , 45° bzw. 0° , 45° , 90° betrachtet wurden.

Die Untersuchungen der Prüfkörper weisen eine starke Abhängigkeit von Material bzw. Faserorientierung auf. Es zeigte sich, dass sich weder bei der 3D-Messstation noch bei der 2D-Prüfstation alle eingebrachten Defekte in Abhängigkeit von der vorliegenden Geometrie und Faserorientierung in derselben Qualität erfassen lassen (vgl. Tabelle 8-1).

Tabelle 8-1: Übersicht Detektierbarkeit von Defekten
(Vergleich 3D-System zu 2D-System)

| Geometrie | Defekt | GL 0° | | GL 45° | | GL 90° | | GW 0° | | GW 45° | |
|-----------|--------|--------------|-----|---------------|-----|---------------|-----|--------------|-----|---------------|-----|
| | | 3D | 2D | 3D | 2D | 3D | 2D | 3D | 2D | 3D | 2D |
| Konvex | 1 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | x |
| | 2 | - | - | x | - | x | x | - | x | - | x |
| | 3 | x | x | x | x | x | x | - | x | - | x |
| | 4 | x | N/A | x | N/A | x | N/A | x | N/A | x | N/A |
| Konkav | 1 | x | x | x | x | - | x | x | x | - | x |
| | 2 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | 3 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| Rampe | 1 | - | - | - | - | x | x | - | x | - | x |
| | 2 | x | - | x | - | x | x | - | x | - | x |
| | 3 | x | x | x | - | x | x | - | x | x | x |

Diese Einschränkung lässt sich durch die optischen Eigenschaften des textilen Halbzeugs mit seiner stark reflektiven Oberfläche begründen. Die zum Teil besseren Resultate des 2D-Prüfsystems bezüglich der Detektierbarkeit von eingebrachten Defekten sind auf die gezielte Abstimmung der Winkeleinstellungen von Kamera sowie Beleuchtung mittels vollfaktoriellem Vorgehen zurückzuführen. Dem gegenüber steht bei der 3D-Messstation das Bestreben einer möglichst geometrieunabhängigen Einstellung des Systems.

Beide im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgestellten Systeme sowie die ermittelten Parameter bieten daher Einstellungen, welche den Grundstein für den Einsatz in spezifischen Anwendungen darstellen.

8.2 Zukünftiger Handlungsbedarf

Der zukünftige Handlungsbedarf richtet sich primär an die Weiterentwicklung der betrachteten Mess- und Prüfsysteme sowie einer automatisierten Datenauswertung. Fokus muss dabei die Inline-Integration, sowie die Optimierung der Systeme hinsichtlich der Erfassung des textilen Halbzeugs mit seinen stark reflektiven Eigenschaften, sein.

Im Rahmen der Untersuchungen mit der vorgestellten 3D-Messstation konnte eine Abhängigkeit der Erfassungsqualität relativ zur Faserorientierung festgestellt werden. Basierend auf Beobachtungen mit Polarisationsfiltern ist eine weitere Verbesserung der Erfassungsqualität durch den Einsatz eines polarisierten Lasers möglich. Aufgrund der sich laufend weiterentwickelnden Lasertechnik ist ebenfalls die Wahl einer anderen Wellenlänge der Laserprojektoren in Erwägung zu ziehen. Bezüglich der Messunsicherheitsbetrachtung ist die Standardisierung eines Vorgehens zur Bewertung reflektiver Oberflächen wünschenswert. Hierbei stellt die Weiterentwicklung des vorgestellten kalibrierten Werkstücks sowie die Betrachtung weiterer Material- und Geometrie- paarungen ein mögliches Forschungsfeld dar.

Einen wesentlichen Beitrag zur Taktzeitreduktion und somit zur Inline-Integration kann des Weiteren eine optimierte Erfassungsstrategie darstellen. So ist es denkbar, basierend auf den im Rahmen der vorliegenden Arbeit generierten Erkenntnissen über die Erfassungsqualität des textilen Halbzeugs in Abhängigkeit von der Faserorientierung eine Datenbank aufzubauen, welche eine Prognose der Erfassungsqualität für verschiedene Paarungen aus Mate-

rialien und Faserorientierungen beinhaltet und ermöglicht, diese mit der Geometrie eines zu untersuchenden Bauteils zu kombinieren. Hierauf basierend kann dann für die Erfassung eine optimierte Bahnplanung mit angepasster Scan-Richtung realisiert werden.

Das vorgestellte Verfahren zur 2D-Prüfung bietet das Potential über eine Roboterintegration für den Einsatz in der Produktion flexibilisiert zu werden. Wie bei der 3D-Messtation ist der Aufbau einer Datenbank aus Prozessdaten in Kombination mit geometrischen Merkmalen sinnvoll, um eine schnelle Adaption des Prüfprozesses auf die Geometrie neuer Bauteile zu ermöglichen.

Für den Serieneinsatz der Systeme ist des Weiteren die Durchgängigkeit der Datenauswertung zu optimieren. Möglicher Handlungsbedarf stellt im Bereich der Datenauswertung die Weiterentwicklung der automatisierten Bewertung und Klassifikation von Geometrieabweichungen dar, um eine effektive Qualitätssicherung von Kohlenstofffaserverstärkten-Kunststoffen in der Produktion zu ermöglichen.

9 Zusammenfassung

Dem großflächigen Einsatz kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe in der automobilen Serienproduktion stehen aktuell die hohen Herstellungskosten entgegen. Hierbei stellt der Preforming-Prozess, in welchem die Formgebung der Bauteile stattfindet, eine wesentliche Herausforderung dar. Zur Steigerung der Effizienz des Fertigungsprozesses ist daher u. a. der Einsatz von Inline-Messtechnik erforderlich.

Aufgrund der biegeschlaffen sowie der stark reflektiven Eigenschaften der textilen Halbzeuge, stehen für den Preforming-Prozess aktuell kaum messtechnische Lösungen zur Wahl.

Zur Behebung des angeführten Defizits wurden im Rahmen der Arbeit mögliche Defekte im Preforming-Prozess identifiziert. Hierauf basierend wurde die Geometrieabweichung als wesentliches Prüfmerkmal zur Bewertung von Preforms ausgewählt. Für die Geometrieerfassung von Preforms wurde nach einer systematischen Analyse geeigneter Messprinzipien eine 3D-Messstation basierend auf dem Laser-Lichtschnittprinzip entwickelt und realisiert. Für die Bewertung der Messunsicherheit bei der Erfassung von Preformoberflächen mittels der 3D-Messstation, wurde in der Arbeit eine Methodik basierend auf neu entwickelten kalibrierten Werkstücken erarbeitet. Für den Inline-Einsatz der Messtechnik wurden Strategien aufgezeigt. Neben der Taktzeitreduktion durch Systemoptimierung, wurde ein mehrstufiges Vorgehen über die Auswahl von Regions of Interest sowie die Entwicklung eines 2D-Prüfsystems vorgestellt. Abschließend konnte die Eignung der 3D-Messstation sowie der 2D-Prüfstation über eine Validierung anhand von Prüfkörpern mit eingebrachten Geometrieabweichungen nachgewiesen werden. Somit konnten die zu Beginn angeführten Defizite reduziert werden. Dabei ist zu beachten, dass die durchgeführten Untersuchungen eine starke Abhängigkeit vom vorliegenden Material bzw. der Faserorientierung zeigen, was dazu führt, dass weder bei der 3D-Messstation noch bei der 2D-Prüfstation alle eingebrachten Defekte in derselben Qualität erfasst werden können.

Die entwickelten Verfahren bilden einen weiteren Baustein auf dem Weg zu einem großflächigen Einsatz kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe und damit zu einer nachhaltigen Mobilität durch die Nutzung von Leichtbaumaterialien.

Literaturverzeichnis

A_Barthold, P. (2013), *Inbetriebnahme und Evaluation eines Laserlichtschnittsystems*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Bartholmé, J. (2015), *Ausarbeitung eines Konzeptes zur Bestimmung der Messunsicherheit eines Lasertriangulationsportals mittels Computertomographie und Koordinatenmesstechnik*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Hettich, S. (2015), *Konzeption und Bewertung eines Prüfkörpers zur Optimierung eines Laserlichtschnittsystems*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Hornung, T. (2015), *Parameteroptimierung eines Laserlichtschnittsystems zur Erfassung von Kohlenstofffaser-Oberflächen*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Klucha, A. (2013), *Qualitätssicherung von textilen Halbzeugen für die FVK-Fertigung mittels optischer 3D Messtechnik*. Diplomarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Öppling, D. (2014), *Untersuchungen zur Parameteroptimierung eines Laserlichtschnittsystems*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Pernel, F. (2015), *Untersuchungen zur Bewertung der Parametereinflüsse und Parameteroptimierung eines Lasertriangulationssystems*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

A_Rupp, T. (2015), *Kamerabasierte Defektanalyse für die prozessintegrierte Qualitätssicherung von CFK-Preforms*. Diplomarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

AIAG (2010), *Measurement systems analysis (MSA). Reference Manual - Fourth Edition*, Automotive Industry Action Group, Southfield, MI. ISBN: 978-1-60-534211-5.

Allied Vision Technologies (2016), *Manta G-504. Beschreibung*. <http://www.alliedvisiontec.com/de/produkte/kameras/gigabit-ethernet/manta/g-504bc.html> [27.04.2016].

Apodius GmbH (2015a), *Apodius Vision System – AVS 3D. Vollständige 3D-Messung von Bauteil und lokaler Faserorientierung*, Apodius GmbH. <http://apodius.de/wp-content/uploads/2015/07/AVS-3D-de.pdf> [28.04.2016].

Apodius GmbH (2015b), *Measuring fiber orientation for composite parts. The new innovative AVS 3D vision system is able to measure both part geometry and fiber orientation*, Apodius GmbH. http://apodius.de/wp-content/uploads/2015/07/Flyer_AVS-3D.pdf [28.04.2016].

Apodius GmbH (2015c), *Pressemitteilung*, Apodius GmbH. <http://apodius.de/wp-content/uploads/2015/07/Pressemitteilung.pdf> [28.04.2016].

Aqsense (2013), *Linear metric pattern. Technische Zeichnung*, AQSENSE, SL, Girona.

AT - Automation Technology GmbH (2014), *Hardware reference manual. C4-2040-GigE Camera. Rev 1.8*, AT - Automation Technology GmbH. http://www.stemmer-imaging.com/media/uploads/cameras/12/122200-Automation_Technology_User_Manual_C4-2040.pdf [16.12.2016].

AVK (2014), *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites*, Springer Fachmedien, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-02754-4.

Balvers, J. M.; Gubernatis, S. & Margossian, A. (2012), *Abschlussbericht - Verbundprojekt FACT (Fortschrittliche und automatisierte CFK-Fertigungstechnologie). Teilprojekt Vi-TECH*, Förderkennzeichen: 20W0804H.

Basler AG (2014), *Inline quality assurance in lightweight fiber composite construction using basler pilot GigE cameras*, WZL RWTH Aachen.

Batchelor, B. G. (2012), *Machine Vision Handbook*, Springer, London. ISBN: 978-1-84996-168-4.

Benteler Maschinenbau GmbH (2007), „Berührungsloses schnelles Messsystem. Für dreidimensionale Strukturen“, *VDI-Z 1/2*, Bd. 149, Nr. 5, S. 30–31.

- Benteler Maschinenbau GmbH (2013a), *Produktbeschreibung BentelerLaserGauge*®. http://www.benteler-trading.com/uploads/media/Produktbeschreibung_BentelerLaserGauge.pdf [23.05.2013].
- Benteler Maschinenbau GmbH (2013b), *Robuste und hochpräzise optische Inline Messtechnik – BentelerLaserGauge*. http://www.benteler-trading.com/uploads/media/Produktbeschreibung_BentelerOpticalGauge.pdf [23.05.2013].
- Berger, D.; Brabandt, D.; Bakir, C.; Hornung, T.; Lanza, G.; Summa, J.; Schwarz, M.; Herrmann, H.-G.; Pohl, M. & Stommel, M. (2017), „Effects of defects in series production of hybrid CFRP lightweight components - Detection and evaluation of quality critical characteristics“, *Measurement*, Nr. 95, S. 389–394.
- Beyerer, J.; Puente León, F. & Frese, C. (2012), *Automatische Sichtprüfung*, Springer, Berlin. ISBN: 978-3-642-23965-6.
- Bichmann, S.; Emonts, M.; Glasmacher, L.; Groll, K. & Kordt, M. (2005), „Automatisierte Reparaturzelle „OptoRep“. Komplettbearbeitungszelle für den Werkzeug- und Formenbau“, *wt Werkstattstechnik online*, Bd. 95, Nr. 11/12, S. 831–838.
- Bloom, L. D.; Wang, J. & Potter, K. D. (2013), „Damage progression and defect sensitivity. An experimental study of representative wrinkles in tension“, *Composites Part B: Engineering*, Bd. 45, Nr. 1, S. 449–458.
- BMUB (2009), *Die EU-Verordnung zur Verminderung der CO2-Emissionen von Personenkraftwagen*. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/eu_verordnung_co2_emissionen_pkw.pdf [19.12.2017].
- Bohne, E. & Klix, W. D. (1995), *Geometrie: Grundlagen für Anwendungen*, Fachbuchverlag, Leipzig, Köln. ISBN: 978-3-446-00887-8.
- Boisse, P.; Hamila, N.; Vidal-Sallé, E. & Dumont, F. (2011), „Simulation of wrinkling during textile composite reinforcement forming. Influence of tensile, in-plane shear and bending stiffnesses“, *Composites Science and Technology*, Bd. 71, Nr. 5, S. 683–692.
- Brabandt, D. & Lanza, G. (2015), „Data Processing for an Inline Measurement of Preforms in the CFRP-Production“, *Procedia CIRP*, Bd. 33, S. 269–274.

- Brabandt, D.; Lanza, G. & Hettich, S. (2015), „Messtechnik für die Qualitätssicherung von Carbonfaser-Preforms“, *lightweight design*, Bd. 8, Nr. 6, S. 20–25.
- Braess, H.-H. & Seiffert, U. (2013), *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-01690-6.
- Castellani, U. & Bartoli, A. (2012), „3D Shape Registration“ in *3D Imaging, Analysis and Applications*, Hrsg. N. Pears, Y. Liu & P. Bunting, Springer, London, S. 221–264.
- Cherif, C. (Hrsg.) (2011), *Textile Werkstoffe für den Leichtbau. Techniken - Verfahren - Materialien - Eigenschaften*, Springer, Berlin [u.a.]. ISBN: 978-3-642-17991-4.
- Christ, M.; Miene, A. & Moerschel, U. (2012), *Characterization of the drapability of reinforcement fabrics by means of an automated tester*, Troy, MI. http://www.speautomotive.com/SPEA_CD/SPEA2012/pdf/PF/PF4.pdf [22.09.2014].
- Conrad, S. (2014), „Eine kurze Geschichte der Messsystemanalyse“, *TEQ - Training und Consulting*, Bd. 20, Nr. 47, S. 62–63.
- Demant, C.; Streicher-Abel, B. & Springhoff, A. (2011), *Industrielle Bildverarbeitung*, Springer, Berlin [u.a.]. ISBN: 978-3-642-13096-0.
- Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V. (Hrsg.) (2009), *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2009. Luft- und Raumfahrt - bewegte Geschichte, große Zukunft*, Bonn.
- Dietrich, E. (2002), *Leitfaden zum "Fähigkeitsnachweis von Messsystemen"*, Q-DAS GmbH, Birkenau. http://www.q-das.com/fileadmin/files2/qdasguidelinemsa/Leitfaden_v21_me.pdf [11.12.2012].
- Dietrich, E. (2011), „Wo liegen die Unterschiede - Vergleich von MSA und VDA Band 5“, *QZ*, Bd. 56, Nr. 6, S. 30–34.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (1969), *Textilien - Grundbegriffe*, Beuth Verlag, Berlin, Nr. 60000.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (1975), *Koordinatenachsen und Bewegungsrichtungen für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen*, Beuth Verlag, Berlin, Nr. 66217.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (1983), *Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen*, Beuth Verlag, Berlin, Nr. 66025 Teil 1.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (1985), *Tex-System - Grundlagen*, Beuth Verlag, Berlin, Nr. 60905 Teil 1.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (1988), *Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik - Begriffe der Qualitätsprüfungsarten*, Beuth Verlag, Berlin, Nr. 55 350 Teil 17.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (1995), *Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe*, Beuth Verlag, Berlin, Nr. 1319-1.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (1996), *Grundlagen der Meßtechnik - Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße; Meßunsicherheit*, Beuth Verlag, Berlin, Nr. 1319-3.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (1999), *Luft und Raumfahrt - Faserverstärkte Kunststoffe - Garn-, Gewebe- und Prepregfehler - Definitionen*, Beuth Verlag, Berlin, Nr. 65673.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (1999), *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen*, Beuth Verlag, Berlin, Nr. 13005.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2001), *Spezifikation für Multiaxialgelege - Teil 1: Bezeichnungen*, Beuth Verlag, Berlin, Nr. 13473-1.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2003), *Geometrische Produktspezifikation (GPS) Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG) Teil 1: Begriffe*, Beuth Verlag, Berlin, Nr. 10360-1.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2012), *Geometrische Produktspezifikation und -prüfung (GPS) - Verfahren zur Ermittlung der Messunsicherheit von Koordinatenmessgeräten (KMG) - Teil 3: Anwendung von kalibrierten Werkstücken oder Normalen*, Beuth Verlag, Berlin, Nr. 15530-3.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2013), *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) – Prüfung von Werkstücken und Meßgeräten durch Messen – Teil 1: Entscheidungsregeln für den Nachweis von Konformität oder Nichtkonformität mit Spezifikationen*, Beuth Verlag, Berlin, Nr. 14253-1.

Do, T. T. & Lee, D. J. (2011), „Degradation in Tensile Properties with Overlapped and Discontinuous Fabric Preforms.“, *Advanced Composite Materials*, Bd. 20, Nr. 5, S. 443–462.

Drechsler, K. (2010), *CFK-Technologie im Automobilbau: Was man von anderen Märkten lernen kann*, Technische Universität München, C.C.e.V. Automotive Symposium, Neckarsulm. http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/gruppen/12/08/29/02_v_af_05_1.pdf [27.11.2012].

Ehinger, C. A. (2012), *Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorformlingen*. Dissertation, TU München, München, Fakultät für Maschinenwesen.

Ehrenstein, G. W. (2006), *Faserverbund-Kunststoffe – Werkstoffe-Verarbeitung-Eigenschaften*, Carl Hanser Verlag, München. ISBN: 978-3-446-22716-3.

Eickenbusch, H. & Krauss, O. (2013), *Kurzanalyse Nr. 3: Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau - Ressourceneffizienz und Technologien*, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE), Berlin.

Eickenbusch, H. & Krauss, O. (2014), *Werkstoffinnovationen für nachhaltige Mobilität und Energieversorgung*, VDI-Gesellschaft Materials Engineering, Düsseldorf. <http://www.vdi.de/technik/fachthemen/materials-engineering/artikel/werkstoffinnovationen-fuer-nachhaltige-mobilitaet-und-energieversorgung/> [22.09.2014].

Eitzinger, C. (2013), *Überwachung der Produktion von Faserverbundbauteilen mit Sensoren zur Faserwinkelmessung*, Profactor GmbH. http://fibremap.eu/wp-content/uploads/2013/05/20131017_Profactor_Composites_Kongress.pdf [24.08.2017].

Erb, T. (2004), *Methodik zur Bewertung von Fehlern in Strukturbauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbunden im Automobilbau*, Shaker Verlag, Aachen. ISBN: 3-8322-2483-1.

Erfling, C.; Lübbers, R.; Rostek, W. & Finke, T. (2009), *Apparatus and method for measuring structural parts*, US 7,605,929 B2.

Erhardt, A. (2008), *Einführung in die Digitale Bildverarbeitung. Grundlagen, Systeme und Anwendungen*, Vieweg + Teubner, Wiesbaden. ISBN: 978-3-519-00478-3.

Ermanni, P. (2007), *Composites Technologien. Skript zur ETH-Vorlesung*, ETH Zürich, Zürich.

Europäische Union (2009), *Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen*, Europäische Union. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ%3AL%3A2009%3A140%3A0001%3A0015%3ADE%3APDF> [19.12.2017].

Faidi, W.; Waas, A. M.; Advani, S. G.; Laird, G. W. & Norris, B. (2011), *Wind Turbine Manufacturing Process Monitoring*, General Electric Global Research Center, Niskayuna, NY.

Falkenrich, M. (2012), *Benteler Optische Messsysteme*, Benteler Maschinenbau GmbH.

Favre-Bulle, B. (2004), *Automatisierung komplexer Industrieprozesse. Systeme, Verfahren und Informationsmanagement*, Springer, Wien. ISBN: 3-211-21194-2.

Finke, T. (2006), „Bauteilqualität sichern ohne Zeitverlust. Optische Prüfsysteme“, *BLECH InForm*, Nr. 5, S. 80–82.

Finke, T.; Erling, C.; Lübbers, R. & Klasfauseweh, U. (2006), „Fehler in 90 Sekunden entdecken. Automatisierte 3D-Konturvermessung von Blechbauteilen“, *QZ – Qualität und Zuverlässigkeit*, Bd. 51, Nr. 4, S. 2–4.

Fleischer, J. & Wagner, H. (2014), „Technologieplanung zur automatisierten Fertigung von Preforms für CFK-Halbzeuge“ in *Leichtbau-Technologien im Automobilbau*, Hrsg. W. Siebenpfeiffer, Springer Fachmedien, Wiesbaden, S. 11–16.

Flemming, M. & Roth, S. (Hrsg.) (2003), *Faserverbundbauweisen – Eigenschaften*, Springer, Berlin [u.a.]. ISBN: 3-540-00636-2.

Flemming, M.; Ziegmann, G. & Roth, S. (1999), *Faserverbundbauweisen. Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix*, Springer, Berlin [u.a.]. ISBN: 3-540-61659-4.

Forest, J. (2011), *Dedicated Software Algorithms for 3D Clouds of Points*, Aqsense, 3D-Technologietag, Fürstenfeld. http://spectronet.de/story_docs/

vortraege_2011/110225_3d_technologietag/110224_forest_aqsense.pdf [26.04.2016].

Forest, J. (2016), *3D Machine Vision course: Overview and Laser Triangulation*, AQSENSE, SL. <http://www.aqsense.com/docs/theory3D.pdf> [27.04.2016].

Fraunhofer FhG (2002), *Leitfaden zu praktischen Anwendungen der Bildverarbeitung. Vision 5*, Erlangen. ISBN: 3-8167-6094-5.

Fraunhofer FhG (2003), *Leitfaden zur Grundlagen und Anwendungen der optischen 3D-Messtechnik. Vision 6*, Erlangen. ISBN: 3-8167-6297-2.

Frey, J.-H.; Herrmann, H.-G.; Valeske, B. & Boller, C. (2012), „Zerstörungsfreie Prüfung und Charakterisierung von Leichtbausystemen“, *lightweight design*, Bd. 5, Nr. 3, S. 14–19.

Friedrich, H. E. (Hrsg.) (2013), *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*, Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 978-3-8348-1467-8.

Gerngross, T.; Schmidt, T. & Krebs, F. (2011), *Herausforderung für die Automation von robusten Produktionsprozessen für Faserverbundstrukturen*, DLR, 1. Augsburger Produktionstechnik-Kolloquium, Augsburg. http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/bilder/portal/augsburg/Herausforderung_fuer_die_Automation_von_robusten_Produktionsprozessen.pdf [04.06.2013].

Gevatter, H.-J. (Hrsg.) (2006), *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*, Springer, Berlin [u.a.]. ISBN: 978-3-540-21207-2.

Girdauskaite, L.; Haasemann, G. & Krzywinski, S. (2011), „Modellierung und Simulation“ in *Textile Werkstoffe für den Leichtbau*, Hrsg. C. Cherif, Springer, Berlin, Heidelberg, S. 573–636.

GOM - Gesellschaft für Optische Messtechnik mbH (2016), *ATOS ScanBox - Das optische 3D-Messgerät*. <http://www.gom.com/de/messsysteme/systemuebersicht/atos-scanbox.html> [14.04.2016].

Göttinger, M.; Weimer, C. & Miene, A. (2009), „Inline-Preformprozesskontrolle in der CFK-Fertigung“ in *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2009. Luft- und Raumfahrt - bewegte Geschichte, große Zukunft*, Hrsg. Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V., Bonn.

- Grosch, T. (2009), *Reflexion. 3. Vorlesung Photorealistische Computergrafik*. Vorlesungsfolien, Universität Magdeburg, Magdeburg, Institut für Simulation und Graphik.
- Günnewig, O. (2010), *Prevention and Failure Analysis on highly stressed CFRP-Components of High-End Racing Yachts*, SGS Institut Fresenius GmbH, CFK-Valley State Convention, Stade.
- Gupta, R. K. & Gurumoorthy, B. (2013), „Classification, representation, and automatic extraction of deformation features in sheet metal parts“, *Computer-Aided Design*, Bd. 45, Nr. 11, S. 1469–1484.
- Härtel, F.; Wagner, H.; Middendorf, P. & Fleischer, J. (2012), „Draping strategies and automation solutions for complex CFRP components“ in *Advanced composites. Design & Process for Sustainability*, Hrsg. SAMPE Europe Conference Management, Riehen, S. 161–166.
- Hayman, B.; Berggreen, C. & Pettersson, R. (2007), „The Effect of Face Sheet Wrinkle Defects on the Strength of FRP Sandwich Structures“, *Journal of Sandwich Structures and Materials*, Bd. 9, Nr. 4, S. 377–404.
- Henning, F. & Moeller, E. (2011), *Handbuch Leichtbau. Methoden, Werkstoffe, Fertigung*, Carl Hanser Verlag, München. ISBN: 978-3-446-42891-1.
- Henning, K.; Gries, T. & Flachskampf, P. (2008), *AutoPreforms – Wirtschaftliche Herstellung von Faserverbundbauteilen mit Hilfe automatisiert hergestellter textiler Preforms. Gemeinsamer Abschlussbericht*. AiF, Aachen.
- Heuer, H. (2016), *3D Freiformscanner für bildgebendes Abrastern*, Fraunhofer-Institut für keramische Technologien und Systeme - Institutsteil Material Diagnostik IKTS-MD, Dresden. <http://www.ikts.fraunhofer.de> [27.04.2016].
- Heuer, H.; Schulze, M.; Pooch, M.; Gäbler, S.; Nocke, A.; Bardl, G.; Cherif, C.; Klein, M.; Kupke, R.; Vetter, R.; Lenz, F.; Kliem, M.; Bülow, C.; Goyvaerts, J.; Mayer, T. & Petrenz, S. (2015), „Review on quality assurance along the CFRP value chain – Non-destructive testing of fabrics, preforms and CFRP by HF radio wave techniques“, *Composites Part B: Engineering*, Bd. 77, S. 494–501.
- Heuss, R.; Müller, N.; van Sintern, W.; Starke, A. & Tschiesner, A. (2012), *Lightweight, heavy impact. How carbon fiber and other lightweight materials will develop across industries and specifically in automotive*, McKinsey & Company.

http://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/dotcom/client_service/automotive%20and%20assembly/pdfs/lightweight_heavy_impact.ashx [20.11.2012].

Horoschenkoff, A. (2010), „Statt Stahl und Aluminium. Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff“, *Kunststoffe*, Nr. 5, S. 50–54.

HP-Textiles GmbH (2010), *Technisches Datenblatt - Gewebe (HP-P400C)*, Schapen. www.hp-textiles.de [27.04.2016].

HP-Textiles GmbH (2013), *Technisches Datenblatt - Gelege (HP-B412C)*, Schapen. www.hp-textiles.de [27.04.2016].

Hufenbach, W. (Hrsg.) (2007), *Textile Verbundbauweisen und Fertigungstechnologien für Leichtbaustrukturen des Maschinen- und Fahrzeugbaus. SPP 1123*, Progressmedia, Dresden. ISBN: 978-3-000-22109-5.

Industrielle Steuerungstechnik GmbH (2013), *Programmieranleitung. Software-Version: ab 2.5.3*, Stuttgart.

Jähne, B. (2012), *Digitale Bildverarbeitung*, Springer, Berlin [u.a.]. ISBN: 978-3-642-04951-4.

Jeschke, S.; Gries, T.; Schmitt, R.; Hees, F. & Reuter, S. (2014), *Wirtschaftliche Serienfertigung textiler Preforms mittels Umflechtverfahren durch Integration automatisierter Handlingsmethoden und online Qualitätssicherung*, Institut für Unternehmenskybernetik e. V. an der RWTH Aachen, Aachen.

Joint Committee for Guides in Metrology (2008), *International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM)*, JCGM 2008, Nr. 200:2008.

Kaiser, H. & Karbhari, V. M. (2001), *Quality and monitoring of structural rehabilitation measures. Part 1: Description of potential defects*. Report submitted to the Oregon Department of Transportation under contract number 18347 Version 1.2, USCD.

Kannan, T. R. & Shunmugam, M. S. (2009), „Processing of 3D sheet metal components in STEP AP-203 format. Part I. Feature recognition system“, *International Journal of Production Research*, Bd. 47, Nr. 4, S. 941–964.

Keferstein, C. P. & Marxer, M. (2015), *Fertigungsmesstechnik. Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren*, Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 978-3-8348-2583-4.

Khan, B.; Potter, K. D. & Wisnom, M. R. (2006), „Simulation of process induced defects in resin transfer moulded woven carbon fibre laminated and their effect on mechanical behaviour“ in *The 8th International Conference on Flow Processes in Composite Materials*, Hrsg. FPCM8, Douai, S. 261–270.

Koch, A. W. (1998), *Optische Messtechnik an technischen Oberflächen. Praxisorientierte lasergestützte Verfahren zur Untersuchung technischer Objekte hinsichtlich Form, Oberflächenstruktur und Beschichtung*, Expert-Verlag, Renningen-Malmsheim. ISBN: 3-8169-1372-5.

Kochan, A. (2011), *Untersuchungen zur zerstörungsfreien Prüfung von CFK-Bauteilen für die fertigungsbegleitende Qualitätssicherung im Automobilbau*. Dissertation, TU Dresden, Dresden, Fakultät für Maschinenwesen.

Kosse, P.; Fürtjes, T. & Schmitt, R. (2014), „Digitalisierung dreidimensionaler CFK-Halbzeuge zur Fehlstellenklassifizierung am Beispiel der Faserwelligkeit“ in *Forum Bildverarbeitung 2014*, Hrsg. F. Puente León, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, S. 141–151.

Lanza, G. & Brabandt, D. (2012a), „A concept for inline quality assurance in the automated production of carbon-fiber-reinforced plastics (CFRP)“ in *Quality-Access to Success. 2nd International Conference on Quality and Innovation in Engineering and Management*, Hrsg. S. Popescu, S. Brad & D. Popescu, Technical University of Cluj-Napoca, Cluj-Napoca, S. 187–192.

Lanza, G. & Brabandt, D. (2012b), „Messtechnik für die FVK-Qualitätssicherung. Beschädigungen an Faserverbundkunststoffen mithilfe geeigneter Inline-Messtechnik vermeiden“, *wt Werkstattstechnik online*, Bd. 102, Nr. 11/12, S. 783–788.

Lanza, G. & Brabandt, D. (2012c), „Sustainable Automated Production of Fiber Reinforced Plastics (FRP) through Inline Quality Assurance“ in *Towards implementing sustainable manufacturing. Proceedings*, Hrsg. G. Seliger & S. E. Kiliç, CIRP, Istanbul, S. 123–127.

- Lanza, G. & Brabandt, D. (2013), „Design of a measurement machine for quality assurance of preforms in the CFRP process chain“ in *ISMTII 2013. 11th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments; Metrology, Master global challenges July 1st - July 5th, 2013, RWTH, Aachen, Germany*, Hrsg. R. Schmitt, Apprimus Verlag, Aachen, S. 255–256.
- Lanza, G.; Brabandt, D. & Bingemann, P. (2013), „Timesaving quality assurance for preforming in the automotive serial production of CFRP“ in *Composite Materials: The Great Advance*, Hrsg. S. Van Hoa & P. Hubert, Electronic Publishing BytePress.com, S. 8309–8317.
- Lässig, R.; Eisenhut, M.; Mathias, A.; Schulte, R. T.; Peters, F.; Kühmann, T.; Waldmann, T. & Begemann, W. (2012), *Serienproduktion von hochfesten Faser-verbundbauteilen. Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau*. http://www.rolandberger.de/media/pdf/Roland_Berger_Serienproduktion_hochfester_Faserverbundbauteile_20120926.pdf [27.11.2012].
- Leohold, J. (2011), *Chancen und Grenzen für einen nachhaltigen FVK-Einsatz im Automobil*, Volkswagen AG, CCeV Automotive Forum 2011, Ingolstadt.
- Leutz, D. & Drechsler, K. (2011), *Draping Simulation: Modelling different Materials and Processes*, Technische Universität München, CCeV - Engineering.
- Lightfoot, J. S.; Wisnom, M. R. & Potter, K. D. (2013a), „A new mechanism for the formation of ply wrinkles due to shear between plies“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Bd. 49, S. 139–147.
- Lightfoot, J. S.; Wisnom, M. R. & Potter, K. D. (2013b), „Defects in woven preforms. Formation mechanisms and the effects of laminate design and layup protocol“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Bd. 51, S. 99–107.
- Lightfoot, J. S.; Wisnom, M. R. & Potter, K. D. (2013c), „Examination of drape-induced defects using computer x-ray tomography“ in *The 19th International Conference on Composite Materials*, Hrsg. ICCM 19, Montreal, S. 7108–7116.
- Matthews, F. L. (1999), „Damage in Fibre-Reinforced Plastics; Its Nature, Consequences and Detection“, *Key Engineering Materials*, Bd. 167-168, S. 1–16.
- Mersmann, C. (2012), *Industrialisierende Machine-Vision-Integration im Faser-verbundleichtbau*, Apprimus Verlag, Aachen. ISBN: 978-3-86359-062-8.

Miene, A. (2010), *Bildanalytische Qualitätssicherung in der Preformfertigung*, Faserinstitut Bremen e.V., 5. Sitzung der Arbeitsgruppe "Werkstoff- und Bauteilprüfung", Augsburg. http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon-composites.eu/files/anhaenge/gruppen/12/08/30/02_ag_mpwbp_050310_qualitaetssicherung_14062011.pdf [22.09.2014].

Miene, A. (2011), *Die digitale Bildanalyse zur Qualitätssicherung und Fehlerbewertung in der Prozesskette*, Faserinstitut Bremen e.V. http://www.fib-bremen.de/download/presentation_fibre_miene.pdf [22.09.2014].

Miesen, N.; Groves, R. M.; Sinke, J.; Benedictus, R.; Lynch, J. P.; Yun, C.-B. & Wang, K.-W. (2013), „Laser displacement sensor to monitor the layup process of composite laminate production“ in *SPIE Smart Structures and Materials + Non-destructive Evaluation and Health Monitoring*, SPIE, San Diego, Bd. 8692, S. 86922T-1 - 86922T-8.

Miesen, N.; Sinke, J.; Groves, R. M. & Benedictus, R. (2015), „Simulation and detection of flaws in pre-cured CFRP using laser displacement sensing“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Bd. 82, Nr. 1-4, S. 341–349.

Moeslund, T. B. (2012), *Introduction to Video and Image Processing*, Springer, London. ISBN: 978-1-4471-2502-0.

Mohammed, U.; Lekakou, C. & Bader, M. G. (2000), „Experimental studies and analysis of the draping of woven fabrics“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Bd. 31, Nr. 12, S. 1409–1420.

Neitzel, M.; Mitschang, P. & Breuer, U. (2014), *Handbuch Verbundwerkstoffe. Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*, Carl Hanser Verlag, München. ISBN: 978-3-446-43696-1.

Neubauer, W. & Rudow, B. (2012), *Trends in der Automobilindustrie. Entwicklungstendenzen - Betriebsratsarbeit - Steuer- und Fördertechnik - Gießereitechnik - Informationstechnologie und -systeme*, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München. ISBN: 978-3-486-71527-9.

Ohlendorf, J.-H. & Rolbecki, M. (2013), „Innovationen in der Handhabungs- und textiltechnik zur Rotorblattfertigung“, *lightweight design*, Nr. 5, S. 50–51.

Orth, A. (2008), *Entwicklung eines Bildverarbeitungssystems zur automatisierten Herstellung faserverstärkter Kunststoffstrukturen*, Shaker Verlag, Aachen. ISBN: 978-3-8322-6983-8.

Oster, R. (2012), *Herausforderungen an die ZfP bei Ihrer Anwendung an Faser-verbundbauteilen*, Eurocopter Deutschland GmbH, DACH-Jahrestagung 2012, Graz. <http://jt2012.dgzfp.de/> [06.08.2015].

Pfeifer, T. & Schmitt, R. (2010), *Fertigungsmesstechnik*, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München. ISBN: 978-3-486-59202-3.

Pooch, M.; Heuer, H.; Meyendorf, N. & Schulze, M. H. (2013), *Industrialisierung der bildgebenden Wirbelstrommethode zur Prüfung von kohlenstofffaserbasierten Werkstoffen*, DGZfP-Jahrestagung 2013.

Potter, K. D. (2009), „Understanding the origins of defects and variability in composites manufacture“ in *ICCM17 Edinburgh*, Hrsg. International Committee on Composite Materials.

Potter, K. D.; Khan, B.; Wisnom, M. R.; Bell, T. & Stevens, J. (2008), „Variability, fibre waviness and misalignment in the determination of the properties of composite materials and structures“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Bd. 39, Nr. 9, S. 1343–1354.

Preußler, S. (2007), *Technischer Abschlussbericht für das Verbundprojekt PRO-CFK. Förderkennzeichen 20W0303H*, Hightex Verstärkungsstrukturen GmbH Dresden, Klipphausen.

RAMPF (2014a), *Konstruktionsdokumentation 3-Achs-Portal. Berechnungen und Komponentenauswahl*, RAMPF Machine Systems GmbH & Co. KG, Wangen bei Göppingen.

RAMPF (2014b), *3-Achs-Portal. Produkthandbuch V1.2*, RAMPF Machine Systems GmbH & Co. KG, Wangen bei Göppingen.

Roberz, J. & Leutner, A. (2015), „Measuring fibre orientation in composite parts“, *JEC COMPOSITES MAGAZINE*, Bd. 52, Nr. 98, S. 54–55.

Sackewitz, M. (Hrsg.) (2010), *Leitfaden zur industriellen Röntgentechnik. Zerstörungsfreie Prüfung mit Bildverarbeitung*. Vision Leitfaden 11, Fraunhofer Verlag, Stuttgart. ISBN: 978-3-8396-0118-1.

- Sackewitz, M. (Hrsg.) (2014), *Leitfaden zur optischen 3D-Messtechnik*, Fraunhofer Verlag, Stuttgart. ISBN: 978-3-8396-0761-9.
- Sackewitz, M. & Lerchenmüller, H. (2010), *Marktstudie 3-D-Messtechnik in der deutschen Automobil- und Zuliefererindustrie*, Fraunhofer Verlag, Stuttgart. ISBN: 978-3-8396-0087-0.
- Schmidt, T. & Dutta, S. (2013), *Produktionsintegrierte Qualitätssicherung in der Faserverbundfertigung*, DLR, 2. Augsburger Produktionstechnik-Kolloquium 2013, Augsburg.
- Schmitt, R. (2016), *Quality Inspection for CFRP Structures with a 3D Machine Vision System*, RWTH Aachen, CIRP Winter Meeting 2016, Paris.
- Schmitt, R. & Damm, B. E. (2008), „Prüfen und Messen im Takt. Wie sie mit In-line-Messtechnik ihre Wertschöpfung maximieren“, *QZ – Qualität und Zuverlässigkeit*, Bd. 53, Nr. 9, S. 57–59.
- Schmitt, R.; Gries, T. & Herrmann, A. S. (2008), *FALCON-Fiber Automatic Live Control*. <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb09/602237203.pdf> [20.11.2012].
- Schmitt, R. & Isenberg, C. (2014), „Computertomografie für industrielle dimensionale Messtechnik“, *tm - Technisches Messen*, Bd. 81, Nr. 5, S. 201–208.
- Schmitt, R.; Niggemann, C. & Mersmann, C. (2008), „Contour scanning of textile preforms using a light-section sensor for the automated manufacturing of fibre-reinforced plastics“ in *Photonics Europe*, Hrsg. F. Berghmans, A. G. Mignani, A. Cutolo, P. P. Meyrueis & T. P. Pearsall, SPIE, Bd. 7003, S. 1–12.
- Schmitt, R.; Niggemann, C. & Mersmann, C. (2009), *Laser light-section sensor automating the production of textile-reinforced composites*. <http://144.206.159.178/ft/CONF/16432857/16432875.pdf> [20.11.2012].
- Schmitt, R.; Orth, A. & Nachtmann, F. (2006), „Das Wesentliche im Kamerabild. Prüfmerkmale faserverstärkter Kunststoffe sichtbar machen“, *QZ – Qualität und Zuverlässigkeit*, Bd. 51, Nr. 11, S. 60–64.
- Schmitt, R.; Orth, A. & Niggemann, C. (2007), *A method for edge detection of textile preforms using a light section sensor for the automated manufacturing of*

fibre reinforced plastics. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.88.8517&rep=rep1&type=pdf> [20.11.2012].

Schmitt, R.; Pfeifer, T.; Mersmann, C. & Orth, A. (2008), „A method for the automated positioning and alignment of fibre-reinforced plastic structures based on machine vision“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Bd. 57, Nr. 1, S. 501–504.

Schmitt, R.; Pfeifer, T. & Orth, A. (2006), *Feasible Production of Fibre-Reinforced Composites through Inline Inspection with Machine Vision*. <http://www.imeko.org/publications/wc-2006/PWC-2006-TC2-003u.pdf> [20.11.2012].

Schmitt, R.; Schönberg, A.; Mersmann, C. & Damm, B. (2009), „Messtechnik in der automatisierten FVK-Fertigung“, *wt Werkstattstechnik online*, Bd. 99, Nr. 3, S. 157–162.

Schulz, M.; Pooch, M.; Joneit, D.; Vetter, R.; Gäbler, S. & Heuer, H. (2016), *Quality assurance along the value added chain. Non-destructive testing of fabrics, preforms and CFRPs by eddy current imaging*, Fraunhofer-Institut für keramische Technologien und Systeme IKTS, Dresden.

Schulze, M.; Küttner, M.; Heuer, H. & Meyendorf, N. (2009), „Mehrfrequenz-Wirbelstromprüfverfahren zur Qualitätskontrolle bei der Produktion von Kohlefaser-Multiaxialgelegen“ in *ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung. DGZfP-Jahrestagung 2009 Zerstörungsfreie Materialprüfung*, Hrsg. DGZfP, Berlin, S. 1–7. ISBN: 978-3-9402-8316-9.

Schulze, M. H.; Heuer, H.; Küttner, M. & Meyendorf, N. (2010), „High-resolution eddy current sensor system for quality assessment of carbon fiber materials“, *Microsystem Technologies*, Bd. 16, Nr. 5, S. 791–797.

Smith, W. A. P. (2012), „Representing, Storing and Visualizing 3D Data“ in *3D Imaging, Analysis and Applications*, Hrsg. N. Pears, Y. Liu & P. Bunting, Springer, London, S. 139–182.

Steinmüller, J. (2008), *Bildanalyse. Von der Bildverarbeitung zur räumlichen Interpretation von Bildern*, Springer, Berlin [u.a.]. ISBN: 978-3-540-79742-5.

Stemmer Imaging GmbH (2015a), *Bar Lights - LDL2 series*. <https://www.stemmer-imaging.de/media/uploads/illumination/12/121415-CCS-LDL2-series.pdf> [19.12.2017].

Stemmer Imaging GmbH (2015b), *Fujinon HF25SA-1 | Datenblatt*. <https://www.stemmer-imaging.de/media/uploads/optics/93/93814-Fujinon-HF25SA-1.pdf> [24.08.2017].

Stemmer Imaging GmbH (2015c), *Z-Laser ZM18-Serie | Datenblatt*. <https://www.stemmer-imaging.de/media/uploads/websites/documents/products/illumination/Z-Laser/de-Z-Laser-ZM18-BZLAS3-201402.pdf> [24.08.2017].

Sunil, V. B. & Pande, S. S. (2008), „Automatic recognition of features from freeform surface CAD models“, *Computer-Aided Design*, Bd. 40, Nr. 4, S. 502–517.

Suragus GmbH (2014), *Carbon Fiber Testing EddyCus CF rob Fraunhofer IKTS-MD und SURAGUS GmbH*. <https://www.youtube.com/watch?v=wNng6CIM1CM> [30.08.2016].

Suragus GmbH (2016), *EddyCus® CF rob (in Kooperation mit dem Fraunhofer IKTS)*. <https://suragus.com/produkte/karbonfaser-pruefung/struktur-und-defekte/cf-rob/> [30.08.2016].

Tamron (2015), *Mega-Pixel Machine Vision Lens - 23FM16SP*, Köln. http://www.tamron.eu/fileadmin/user_upload/CCTV/Download/Data_Sheets_Machine_Vision/23FM16SP.pdf [19.12.2017].

Tönnies, K. D. (2005), *Grundlagen der Bildverarbeitung*, Pearson Studium, München [u.a.]. ISBN: 3-8273-7155-4.

Vanclooster, K.; Lomov, S. V. & Verpoest, I. (2009), „On the formability of multi-layered fabric composites“ in *ICCM17 Edinburgh*, Hrsg. International Committee on Composite Materials.

VDA (2011), *VDA Band 5 - Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie. Prüfprozesseignung*. Eignung von Messsystemen; Eignung von Mess- und Prüfprozessen; Erweiterte Messunsicherheit; Konformitätsbewertung, Henrich Druck + Medien, Frankfurt. ISBN: 0943-9412.

VDA (2012), *VDA Band 5.1 - Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie. Rückführbare Inline-Messtechnik im Karosseriebau*. Ergänzungsband zum VDA Band 5, Prüfprozesseignung, Henrich Druck + Medien, Frankfurt. ISBN: 0943-9412.

Verein Deutscher Ingenieure e.V (2010), *Industrielle Bildverarbeitung - Grundlagen und Begriffe*, Beuth Verlag, Berlin, Nr. 2632 Blatt 1.

Wagner, H. (2016), *Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen*, Shaker Verlag, Aachen. ISBN: 978-3-8440-4603-8.

Wagner, H.; Brabandt, D.; Lanza, G. & Fleischer, J. (2013), „Preforming von CFK-Halbzeugen im Spannungsfeld der Stückzahl - Effiziente Herstellung von Preforms mit endkonturnaher Geometrie“, *VDI-Z Integrierte Produktion*, Nr. 6, S. 64–66.

Walton, S. R. (2007), *System and methode for identifying a feature of a workpiece*, US 2007/0271064 A1.

Walton, S. R. (2009), *Apparatus and methods for two-dimensional and three-dimensional inspection of a workpiece*, US 7,495,758 B2.

Walton, S. R. (2010), *System and method for identifying a feature of a workpiece*, EU EP 1 995 553 B1.

Walton, S. R. (2011), *System and method for identifying a feature of a workpiece*, US 8,050,486 B2.

Walton, S. R. (2013), *Methode and system for two-dimensional and three-dimensional inspection of a workpiece*, EU EP 2 032 972 B1.

Weckenmann, A. & Gawande, B. (Hrsg.) (2012), *Koordinatenmesstechnik. Flexible Messstrategien für Maß, Form und Lage*, Carl Hanser Verlag, München. ISBN: 978-3-446-40739-8.

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1-1: Vergleich Bauteilgewicht zu Bauteilkosten nach (Heuss et al. 2012) | 2 |
| Abbildung 1-2: Aufbau der Arbeit | 5 |
| Abbildung 2-1: Aufbau Gewebe und Gelege nach (AVK 2014) | 8 |
| Abbildung 2-2: Definition der Faserorientierung am Beispiel Gelege nach (DIN EN 13473-1) | 9 |
| Abbildung 2-3: Konfokale Aufnahme eines vernähten Biaxial-Geleges | 10 |
| Abbildung 2-4: Resin Transfer Molding Prozesskette nach (Neitzel, Mitschang & Breuer 2014) | 12 |
| Abbildung 2-5: Defekte im Preform | 15 |
| Abbildung 2-6: 2D-Laser-Lichtschnittprinzip nach (Fraunhofer FhG 2002) | 19 |
| Abbildung 2-7: Typische Geometrieanordnungen zur Triangulation (Scanrichtung entlang der y-Achse) nach (AT - Automation Technology GmbH 2014) | 19 |
| Abbildung 2-8: Berechnung der Höhendifferenz beim Triangulationsverfahren nach (Koch 1998) | 20 |
| Abbildung 2-9: Abschattungseffekte bei 2D-Laser-Lichtschnittsystemen nach (Brabandt & Lanza 2015) | 21 |
| Abbildung 2-10: Struktur eines Bildverarbeitungssystems nach (VDI/VDE 2632 Blatt 1) | 25 |
| Abbildung 2-11: Darstellung eines 2D-Digitalbildes nach (Jähne 2012) | 26 |
| Abbildung 2-12: Morphologische Operationen nach (Tönnies 2005; Jähne 2012) | 27 |
| Abbildung 2-13: Messunsicherheit nach (DIN EN ISO 14253-1) | 30 |
| Abbildung 3-1: Anforderungen an einen Messtechnikeinsatz | 35 |
| Abbildung 3-2: FALCON-Prüfsystem nach (Schmitt, Gries & Herrmann 2008) | 36 |
| Abbildung 3-3: Laboraufbau nach (Göttinger, Weimer & Miene 2009) | 38 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 3-4: Drapetester nach (Christ, Miene & Moerschel 2012) | 39 |
| Abbildung 3-5: 3D-Scan eines Spanten mit Soll/Ist-Vergleich nach (Schmitt, Niggemann & Mersmann 2009) | 41 |
| Abbildung 3-6: Fiber Measurement System (FMS) nach (Basler AG 2014) | 43 |
| Abbildung 3-7: CT-Scan einer Demogeometrie nach (Lightfoot, Wisnom & Potter 2013c) | 45 |
| Abbildung 3-8: 3D-Scan eines Demonstrators nach (Schulz et al. 2016; Suragus GmbH 2014) | 46 |
| Abbildung 3-9: Messstation BentelerLaserGauge® (Falkenrich 2012) | 48 |
| Abbildung 3-10: Robotergeführtes Messsystem (Falkenrich 2012) | 49 |
| Abbildung 3-11: Bewertung existierender Ansätze zur messtechnischen Erfassung von Kohlenstofffaser-Preforms | 51 |
| Abbildung 4-1: Vorgehen zur Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels optischer Fertigungsmesstechnik | 53 |
| Abbildung 5-1: Anforderungen an das Messprinzip | 56 |
| Abbildung 5-2: Vergleich und Bewertung verschiedener Messprinzipien | 57 |
| Abbildung 5-3: Verkippung der Laser-Lichtschnittsysteme (Verfahrriichtung entlang der y-Achse) nach (Brabandt & Lanza 2015) | 59 |
| Abbildung 5-4: Höhennachführung des LLS zur Sicherstellung der Tiefenschärfe nach (Brabandt & Lanza 2015) | 60 |
| Abbildung 5-5: Scan mit alternierender Triggerung nach (A_Hornung 2015) | 61 |
| Abbildung 5-6: Segmentierung der Preform-Geometrie in Scan-Bahnen nach (Brabandt & Lanza 2015) | 61 |
| Abbildung 5-7: Anforderungen an die Kinematik | 63 |
| Abbildung 5-8: Vergleich und Bewertung verschiedener Kinematiken | 64 |
| Abbildung 5-9: Anforderungen an die Datenverarbeitung | 66 |
| Abbildung 5-10: 3D-Datengenerierung nach (Brabandt & Lanza 2015) | 67 |
| Abbildung 5-11: z-Wert Korrektur der COP nach (Brabandt & Lanza 2015) | 68 |
| Abbildung 5-12: 3D-Datenaufbereitung nach (Brabandt & Lanza 2015) | 69 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 5-13: 3D-Datenauswertung | 70 |
| Abbildung 5-14: 3D-Messstation nach (Brabandt, Lanza & Hettich 2015) | 71 |
| Abbildung 5-15: Anordnung der Laser-Lichtschnittsysteme nach (A_Hornung 2015) | 72 |
| Abbildung 5-16: Tiefenschärfenbereich nach (A_Hornung 2015) | 73 |
| Abbildung 5-17: Ansteuerung 3D-Messstation | 75 |
| Abbildung 5-18: Kalibrierung nach (A_Hornung 2015) | 76 |
| Abbildung 5-19: Gesamtsystem Datenverarbeitung nach (A_Hettich 2015; A_Hornung 2015) | 78 |
| Abbildung 5-20: z-Wert Korrektur der COP nach (A_Hornung 2015) | 79 |
| Abbildung 5-21: Fusion $COP_{1/Bahn\ n}$ und $COP_{2/Bahn\ n}$ nach (A_Hornung 2015) | 80 |
| Abbildung 5-22: Korrektur des x-Offsets nach (A_Hornung 2015) | 80 |
| Abbildung 5-23: Matlab Tool - Datenfusion | 81 |
| Abbildung 5-24: Soll/Ist-Vergleich | 82 |
| Abbildung 5-25: Extraktion von geometrischem Merkmal aus Punktwolke nach (A_Hornung 2015) | 82 |
| Abbildung 5-26: Soll/Ist-Vergleich nach (A_Hornung 2015) | 83 |
| Abbildung 5-27: Defektdetektion mittels BLOB-Analyse (Schritt 10) | 84 |
| Abbildung 5-28: Güte der Kalibrierung in Abhängigkeit von der seitlichen Verkippung nach (A_Hornung 2015) | 88 |
| Abbildung 5-29: Auswertungsbereiche des Prüfkörpers nach (A_Hornung 2015) | 91 |
| Abbildung 5-30: Beziehung zwischen den Zielgrößen | 92 |
| Abbildung 5-31: Versuchsergebnisse gesamt (A_Hornung 2015) | 92 |
| Abbildung 5-32: NaN-Stellen für GL45 – je Belichtungszeit erfolgt eine schrittweise Erhöhung des Thresholds (A_Hornung 2015) | 93 |
| Abbildung 5-33: Standardabweichung konvexer Bereich für GL45 – je Belichtungszeit erfolgt eine schrittweise Erhöhung des Thresholds (A_Hornung 2015) | 94 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 5-34: Vermeidung von Abschattung durch Datenfusion nach (A_Hornung 2015) | 95 |
| Abbildung 5-35: Erfassung Gelege nach (A_Hornung 2015) | 96 |
| Abbildung 5-36: Erfassung Gewebe nach (A_Hornung 2015) | 96 |
| Abbildung 5-37: Anforderungen an das Referenzmesssystem | 99 |
| Abbildung 5-38: Auswahl des Referenzmesssystems | 100 |
| Abbildung 5-39: Anforderungen an ein kalibriertes Werkstück für Preforms nach (A_Bartholmé 2015) | 101 |
| Abbildung 5-40: Geometrien für kalibrierte Werkstücke nach (A_Bartholmé 2015) | 104 |
| Abbildung 5-41: Kalibriertes Werkstücke nach (A_Bartholmé 2015) | 105 |
| Abbildung 5-42: CT-Auswertung - Zylinder im Schnittbild nach (A_Bartholmé 2015) | 106 |
| Abbildung 6-1: Messkonzept unter Verwendung von ROI | 115 |
| Abbildung 6-2: Anforderungen an 2D-System und Datenauswertung | 116 |
| Abbildung 6-3: Versuchsaufbau – Prinzipskizze nach (A_Rupp 2015) | 118 |
| Abbildung 6-4: 2D-Datenverarbeitung | 119 |
| Abbildung 6-5: 2D-Versuchsaufbau zur 3D-Defektdetektion nach (A_Rupp 2015) | 120 |
| Abbildung 6-6: Matlab Tool zur Erstellung von Templates (A_Rupp 2015) | 121 |
| Abbildung 6-7: 2D-Bildauswertung nach (A_Rupp 2015) | 122 |
| Abbildung 6-8: Konvexer Prüfkörper ($r = 25 \text{ mm}$) mit eingebrachtem Defekt nach (A_Rupp 2015) | 125 |
| Abbildung 6-9: Auswertung der detektierten Defektbreite - konvexes Bauteil; Defekt 4 mm (Defekt D3) nach (A_Rupp 2015) | 127 |
| Abbildung 7-1: Kontur-Prüfkörper nach (Brabandt, Lanza & Hettich 2015; A_Hettich 2015) | 129 |
| Abbildung 7-2: Grundgeometrie-Prüfkörper nach (A_Hettich 2015) | 130 |

| | |
|---|---------|
| Abbildung 7-3: Grundgeometrie-Prüfkörper - Defektzonen konvexe nach (A_Rupp 2015) | 131 |
| Abbildung 7-4: Größe der Defektzonen nach (A_Rupp 2015) | 131 |
| Abbildung 7-5: Bahn-Planung für Orientierung 1 (σ_1) im CAD nach (A_Hettich 2015) | 133 |
| Abbildung 7-6: Scan des Kontur-Prüfkörpers (Brabandt, Lanza & Hettich 2015) | 134 |
| Abbildung 7-7: Scanergebnis Grundgeometrie-Prüfkörper ohne Defekt (A_Hettich 2015; Berger et al. 2017) | 137 |
| Abbildung 7-8: Beispielhafte BLOB-Auswertung der 3D-Daten | 138 |
| Abbildung 0-1: Konfokale Aufnahme eines Gewebes | XXIX |
| Abbildung 0-2: 3D-Messstation nach (Brabandt, Lanza & Hettich 2015) | XXX |
| Abbildung 0-3: Übersicht der verwendeten Kalibrier- und Prüfkörper (A_Bartholmé 2015; A_Hettich 2015; Brabandt, Lanza & Hettich 2015) | XXXI |
| Abbildung 0-4: Kalibrierkörper - CAD-Modell (Aqsense 2013) | XXXII |
| Abbildung 0-5: Kontur-Prüfkörper - CAD-Modell (A_Hettich 2015) | XXXIII |
| Abbildung 0-6: Grundgeometrie-Prüfkörper konvex - CAD-Modell (A_Hettich 2015) | XXXIV |
| Abbildung 0-7: Grundgeometrie-Prüfkörper konkav - CAD-Modell (A_Hettich 2015) | XXXIV |
| Abbildung 0-8: Grundgeometrie-Prüfkörper Rampe - CAD-Modell (A_Hettich 2015) | XXXV |
| Abbildung 0-9: Parametervariation Gelege 0° (A_Hornung 2015) | XXXVI |
| Abbildung 0-10: Parametervariation Gelege 45° (A_Hornung 2015) | XXXVI |
| Abbildung 0-11: Parametervariation Gelege 90° (A_Hornung 2015) | XXXVII |
| Abbildung 0-12: Parametervariation Gewebe 0° (A_Hornung 2015) | XXXVII |
| Abbildung 0-13: Parametervariation Gewebe 45° (A_Hornung 2015) | XXXVIII |
| Abbildung 0-14: Messwerte Gelege 0° SW0 (A_Hornung 2015) | XXXIX |
| Abbildung 0-15: Messwerte Gelege 0° SW5 (A_Hornung 2015) | XL |

| | |
|--|--------|
| Abbildung 0-16: Messwerte Gelege 0° SW10 (A_Hornung 2015) | XLI |
| Abbildung 0-17: Messwerte Gelege 45° SW0 (A_Hornung 2015) | XLII |
| Abbildung 0-18: Messwerte Gelege 45° SW5 (A_Hornung 2015) | XLIII |
| Abbildung 0-19: Messwerte Gelege 45° SW10 (A_Hornung 2015) | XLIV |
| Abbildung 0-20: Messwerte Gelege 90° SW0 (A_Hornung 2015) | XLV |
| Abbildung 0-21: Messwerte Gelege 90° SW5 (A_Hornung 2015) | XLVI |
| Abbildung 0-22: Messwerte Gelege 90° SW10 (A_Hornung 2015) | XLVII |
| Abbildung 0-23: Messwerte Gewebe 0° SW0 (A_Hornung 2015) | XLVIII |
| Abbildung 0-24: Messwerte Gewebe 0° SW5 (A_Hornung 2015) | XLIX |
| Abbildung 0-25: Messwerte Gewebe 0° SW10 (A_Hornung 2015) | L |
| Abbildung 0-26: Messwerte Gewebe 45° SW0 (A_Hornung 2015) | LI |
| Abbildung 0-27: Messwerte Gewebe 45° SW5 (A_Hornung 2015) | LII |
| Abbildung 0-28: Messwerte Gewebe 45° SW10 (A_Hornung 2015) | LIII |
| Abbildung 0-29: NaN-Stellen für GL0 – je Belichtungszeit erfolgt eine Schrittweise Erhöhung des Thresholds (A_Hornung 2015) | LIV |
| Abbildung 0-30: NaN-Stellen für GL45 – je Belichtungszeit erfolgt eine Schrittweise Erhöhung des Thresholds (A_Hornung 2015) | LIV |
| Abbildung 0-31: NaN-Stellen für GL90 – je Belichtungszeit erfolgt eine Schrittweise Erhöhung des Thresholds (A_Hornung 2015) | LV |
| Abbildung 0-32: NaN-Stellen für GW0 – je Belichtungszeit erfolgt eine Schrittweise Erhöhung des Thresholds (A_Hornung 2015) | LV |
| Abbildung 0-33: NaN-Stellen für GW45 – je Belichtungszeit erfolgt eine Schrittweise Erhöhung des Thresholds (A_Hornung 2015) | LVI |
| Abbildung 0-34: Standardabweichung konvexer Bereich für GL0 – je Belichtungszeit erfolgt eine Schrittweise Erhöhung des Thresholds (A_Hornung 2015) | LVII |
| Abbildung 0-35: Standardabweichung konvexer Bereich für GL45 – je Belichtungszeit erfolgt eine Schrittweise Erhöhung des Thresholds (A_Hornung 2015) | LVIII |

| | |
|--|--------|
| Abbildung 0-36: Standardabweichung konvexer Bereich für GL90 – je Belichtungszeit erfolgt eine Schrittweise Erhöhung des Thresholds (A_Hornung 2015) | LIX |
| Abbildung 0-37: Standardabweichung konvexer Bereich für GW0 – je Belichtungszeit erfolgt eine Schrittweise Erhöhung des Thresholds (A_Hornung 2015) | LX |
| Abbildung 0-38: Standardabweichung konvexer Bereich für GW45 – je Belichtungszeit erfolgt eine Schrittweise Erhöhung des Thresholds (A_Hornung 2015) | LXI |
| Abbildung 0-39: Parametervariation Gelege 0 eben (A_Hornung 2015) | LXII |
| Abbildung 0-40: Parametervariation GL0 konvex (A_Hornung 2015) | LXIII |
| Abbildung 0-41: Parametervariation GL45 eben (A_Hornung 2015) | LXIV |
| Abbildung 0-42: Parametervariation GL45 konvex (A_Hornung 2015) | LXV |
| Abbildung 0-43: Parametervariation GL90 eben (A_Hornung 2015) | LXVI |
| Abbildung 0-44: Parametervariation GL90 konvex (A_Hornung 2015) | LXVII |
| Abbildung 0-45: Parametervariation GW0 eben (A_Hornung 2015) | LXVIII |
| Abbildung 0-46: Parametervariation GW0 konvex (A_Hornung 2015) | LXIX |
| Abbildung 0-47: Parametervariation GW45 eben (A_Hornung 2015) | LXX |
| Abbildung 0-48: Parametervariation GW45 konvex (A_Hornung 2015) | LXXI |
| Abbildung 0-49: kalibriertes Werkstück konvex - CAD-Modell (A_Bartholmé 2015) | LXXII |
| Abbildung 0-50: kalibriertes Werkstück konkav - CAD-Modell (A_Bartholmé 2015) | LXXII |
| Abbildung 0-51: kalibriertes Werkstück Rampe - CAD-Modell (A_Bartholmé 2015) | LXXIII |
| Abbildung 0-52: kalibriertes Werkstück plan - CAD-Modell (A_Bartholmé 2015) | LXXIII |
| Abbildung 0-53: CT-Messung - kalibrierte Werkstücke (A_Bartholmé 2015) | LXXIV |

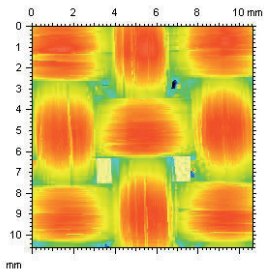
| | |
|---|----------|
| Abbildung 0-54: Grundgeometrie-Prüfkörper - Defektzonen konkav nach (A_Rupp 2015) | LXXIV |
| Abbildung 0-55: Grundgeometrie-Prüfkörper - Defektzonen Rampe nach (A_Rupp 2015) | LXXV |
| Abbildung 0-56: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - konvex GL0 | LXXVI |
| Abbildung 0-57: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - konvex GL45 | LXXVII |
| Abbildung 0-58: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - konvex GL90 | LXXVIII |
| Abbildung 0-59: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - konvex GW0 | LXXIX |
| Abbildung 0-60: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - konvex GW45 | LXXX |
| Abbildung 0-61: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - konkav GL0 | LXXXI |
| Abbildung 0-62: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - konkav GL45 | LXXXI |
| Abbildung 0-63: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - konkav GL90 | LXXXII |
| Abbildung 0-64: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - konkav GW0 | LXXXII |
| Abbildung 0-65: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - konkav GW45 | LXXXIII |
| Abbildung 0-66: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - Rampe GL0 | LXXXIII |
| Abbildung 0-67: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - Rampe GL45 | LXXXIV |
| Abbildung 0-68: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - Rampe GL90 | LXXXIV |
| Abbildung 0-69: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - Rampe GW0 | LXXXV |
| Abbildung 0-70: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - Rampe GW45 | LXXXV |
| Abbildung 0-71: Auswertung der detektierten Defektbreite - konvex; Defekt D1 nach (A_Rupp 2015) | LXXXVI |
| Abbildung 0-72: Auswertung der detektierten Defektbreite - konvex; Defekt D2 nach (A_Rupp 2015) | LXXXVII |
| Abbildung 0-73: Auswertung der detektierten Defektbreite - konvex; Defekt D3 nach (A_Rupp 2015) | LXXXVIII |
| Abbildung 0-74: Auswertung der detektierten Defektbreite - konkav; Defekt D1 nach (A_Rupp 2015) | LXXXIX |

| | |
|---|-------|
| Abbildung 0-75: Auswertung der detektierten Defektbreite - konkav; Defekt D2 nach (A_Rupp 2015) | XC |
| Abbildung 0-76: Auswertung der detektierten Defektbreite - konkav; Defekt D3 nach (A_Rupp 2015) | XCI |
| Abbildung 0-77: Auswertung der detektierten Defektbreite - Rampe; Defekt D1 nach (A_Rupp 2015) | XCII |
| Abbildung 0-78: Auswertung der detektierten Defektbreite - Rampe; Defekt D2 nach (A_Rupp 2015) | XCIII |
| Abbildung 0-79: Auswertung der detektierten Defektbreite - Rampe; Defekt D3 nach (A_Rupp 2015) | XCIV |

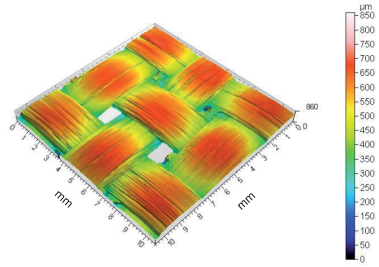
Tabellenverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Tabelle 5-1: Übersicht des Parameterfelds | 85 |
| Tabelle 5-2: Referenzmaterial | 86 |
| Tabelle 5-3: Versuchsplan je seitlicher Verkippung und Materialkombination nach (A_Hornung 2015) | 90 |
| Tabelle 5-4: Abkürzungen in Versuchsdurchführung nach (A_Hornung 2015) | 90 |
| Tabelle 5-5: Bereich der optimalen Parameter | 97 |
| Tabelle 5-6: Optimale Parametersets nach Material | 97 |
| Tabelle 5-7: Messdaten konvexes Werkstück am Beispiel GL 0° 400g/m ² | 108 |
| Tabelle 6-1: Übersicht des Parameterfelds | 123 |
| Tabelle 6-2: Übersicht der Startwerte für die Auswahl der Belichtungszeit | 124 |
| Tabelle 6-3: Optimale Winkelsets nach Material und Faserorientierung für konvexen Prüfkörper (untersuchter Defekt: 4 mm) nach (A_Rupp 2015) | 126 |
| Tabelle 7-1: Auswertung Profil-Prüfkörper | 135 |
| Tabelle 7-2: 3D-Auswertung Geometrie-Prüfkörper - Gelege | 140 |
| Tabelle 7-3: 3D-Auswertung Geometrie-Prüfkörper - Gewebe | 141 |
| Tabelle 7-4: Übersicht Detektierbarkeit von Defekten (nach Scan-Orientierung) (3D-System) | 142 |
| Tabelle 7-5: 2D-Auswertung Geometrie-Prüfkörper | 145 |
| Tabelle 7-6: Übersicht Detektierbarkeit von Defekten (2D-System) | 146 |
| Tabelle 8-1: Übersicht Detektierbarkeit von Defekten (Vergleich 3D-System zu 2D-System) | 148 |

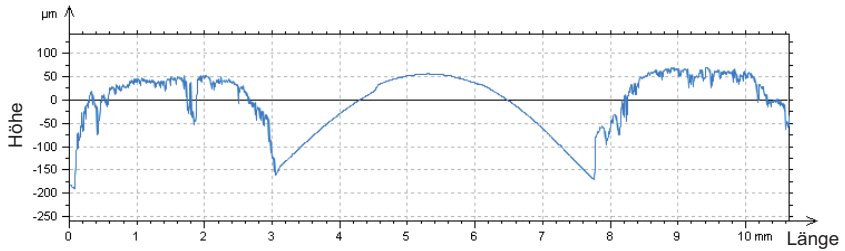
Anhang



a) Draufsicht



b) Isometrische-
Ansicht

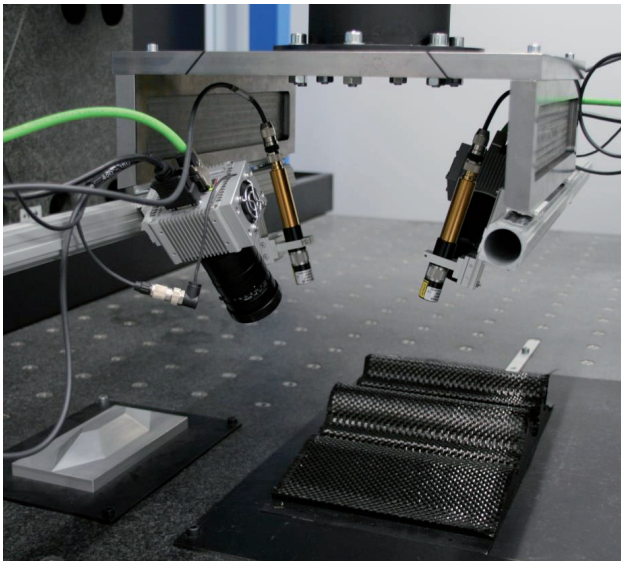


c) Schnitt-Ansicht

Abbildung 0-1: Konfokale Aufnahme eines Gewebes



a) Portal-Messaufbau



b) Optisches Messkopfsystem

Abbildung 0-2: 3D-Messstation nach (Brabandt, Lanza & Hettich 2015)

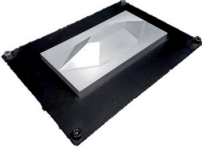
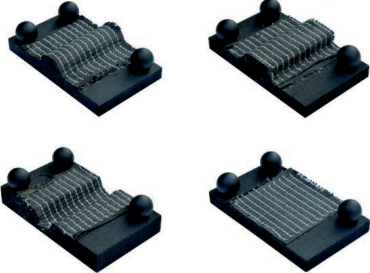


| Objekt | Anwendung | Abbildung |
|--|--|--|
| Kalibrierkörper | Kalibrierung des 3D-Systems |  |
| Kalibriertes Werkstück | <p>Messunsicherheitsermittlung des 3D-Systems</p> <p>Trägermaterial und Größe für CT-Messung gewählt</p> |  |
| Kontur-Prüfkörper | <p>Validierung des 3D-Systems</p> <p>Geometrie abgeleitet aus typischen Formelementen des Automobilbaus, zur Untersuchung der aktiven Höhennachführung und Kompensation von Abschattungseffekten</p> |  |
| Grundgeometrie-Prüfkörper mit Defekten | <p>Validierung des 2D- und 3D-Systems</p> <p>Prüfkörper mit Wechselsätzen zur Abbildung verschieden großer Geometrieabweichungen zur Untersuchung der Defekterkennung</p> |  |

Abbildung 0-3: Übersicht der verwendeten Kalibrier- und Prüfkörper (A_Bartholmé 2015; A_Hettich 2015; Brabandt, Lanza & Hettich 2015)

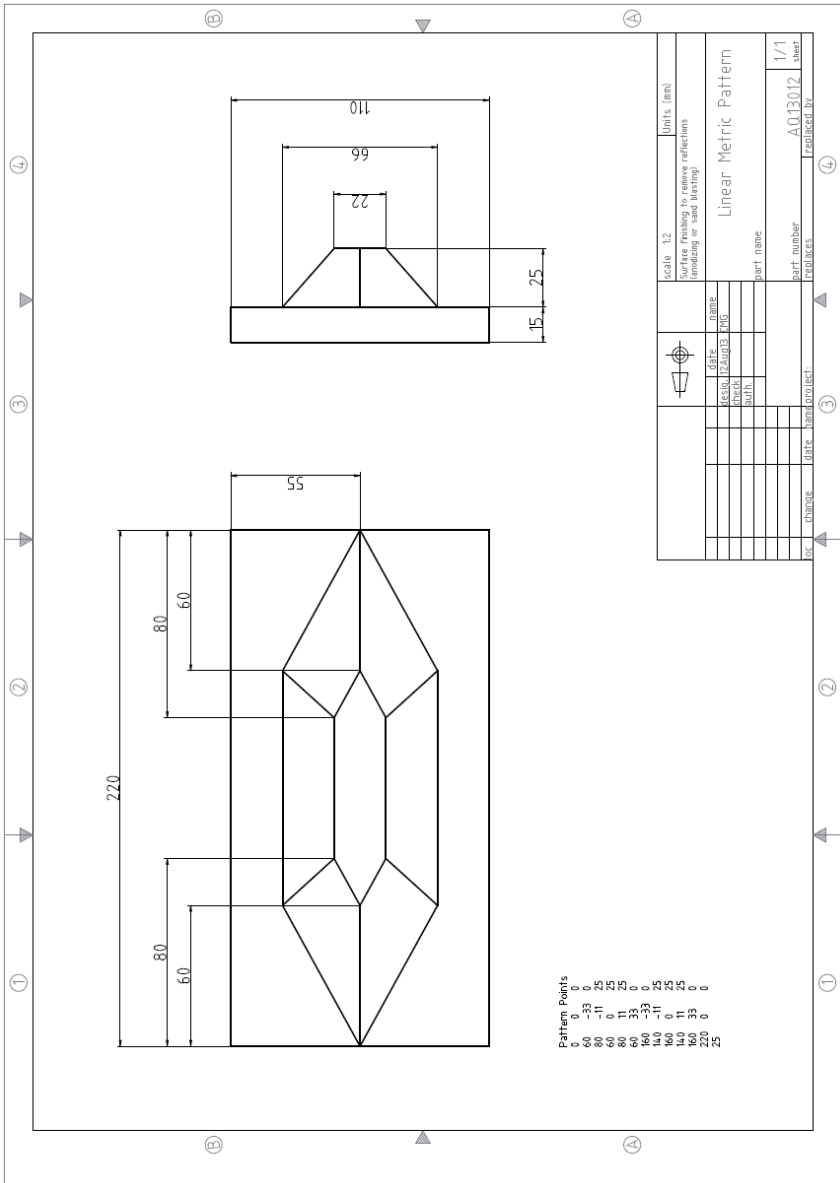


Abbildung 0-4: Kalibrierkörper - CAD-Modell (Aqsense 2013)

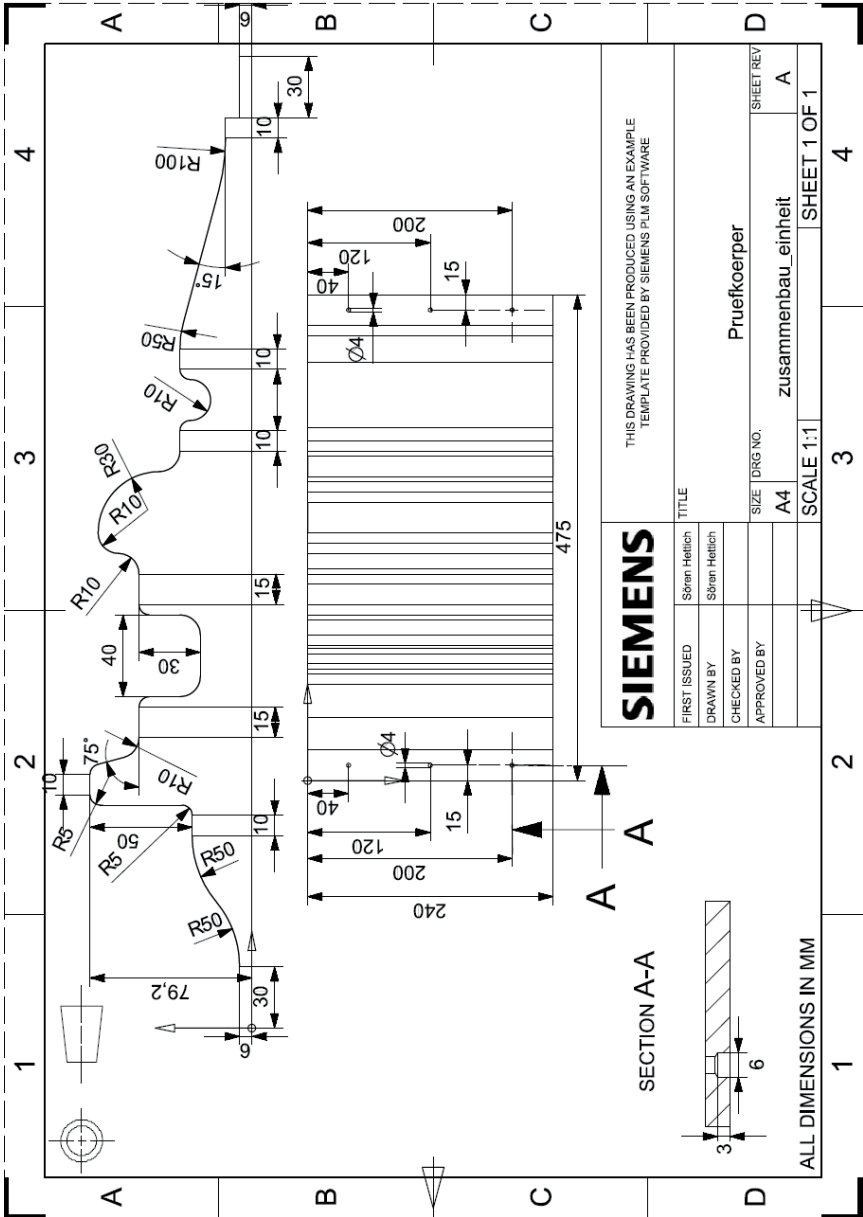


Abbildung 0-5: Kontur-Prüfkörper - CAD-Modell (A_Hettich 2015)

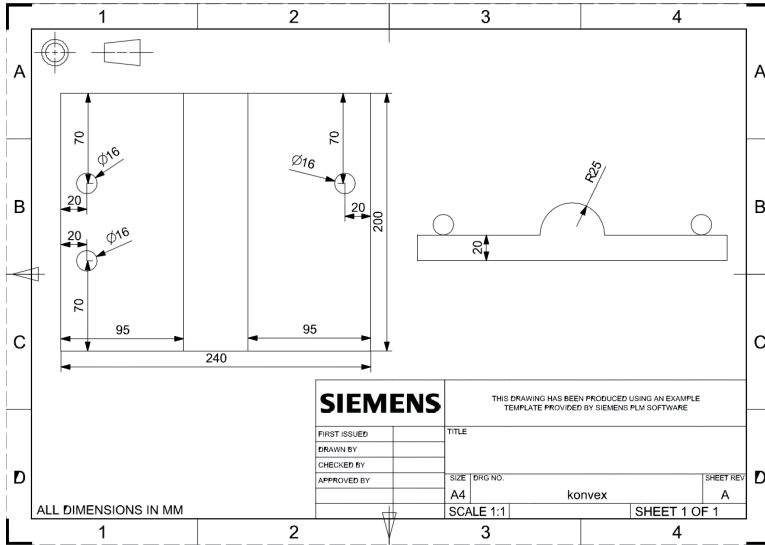


Abbildung 0-6: Grundgeometrie-Prüfkörper konvex - CAD-Modell (A_Hettich 2015)

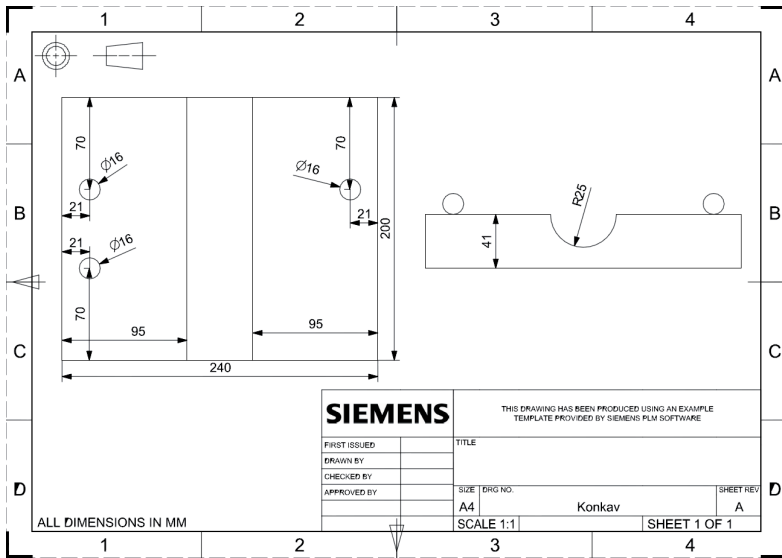


Abbildung 0-7: Grundgeometrie-Prüfkörper konkav - CAD-Modell (A_Hettich 2015)

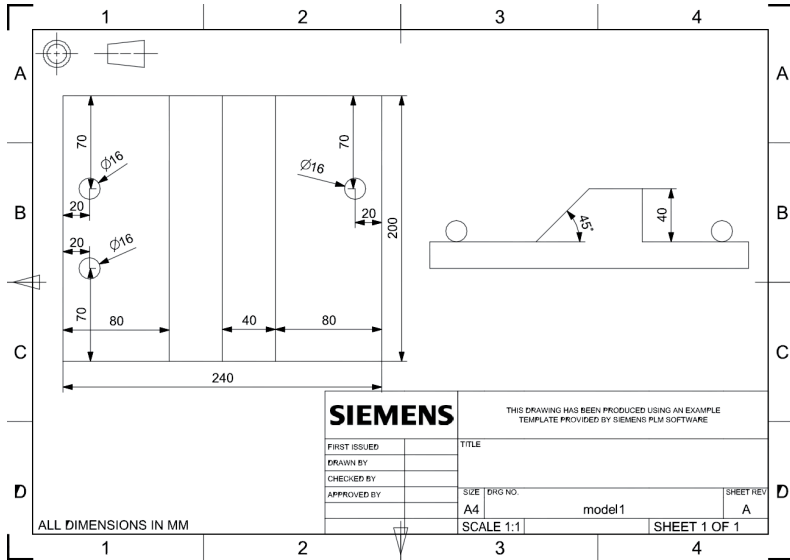


Abbildung 0-8: Grundgeometrie-Prüfkörper Rampe - CAD-Modell (A_Hettich 2015)

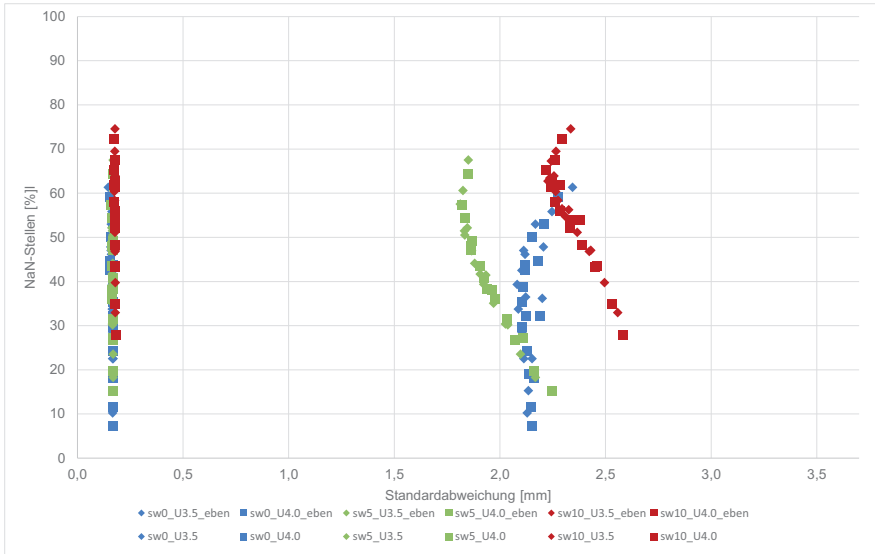


Abbildung 0-9: Parametervariation Gelege 0° (A_Hornung 2015)

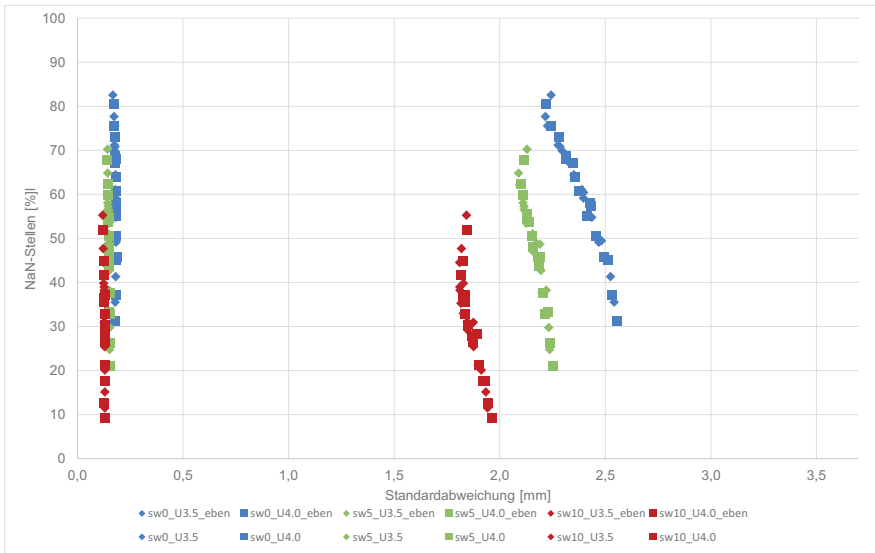


Abbildung 0-10: Parametervariation Gelege 45° (A_Hornung 2015)

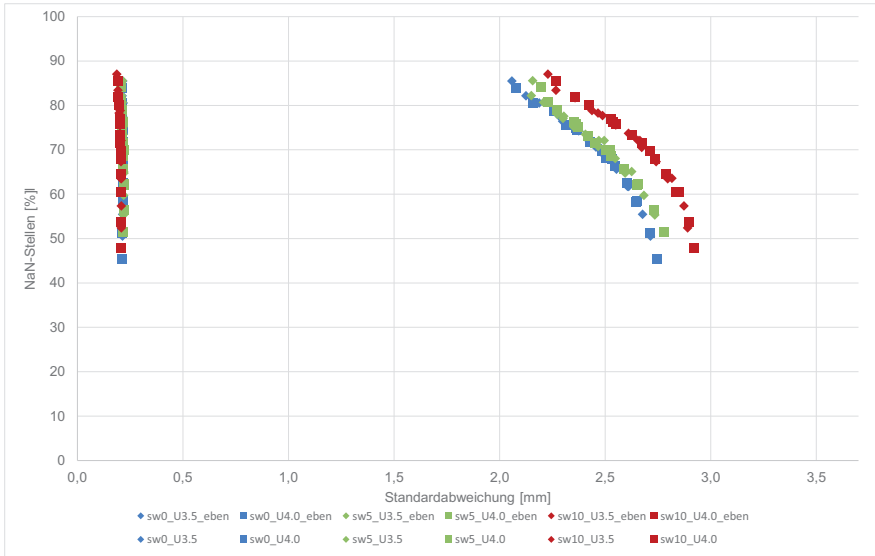


Abbildung 0-11: Parametervariation Gelege 90° (A_Hornung 2015)

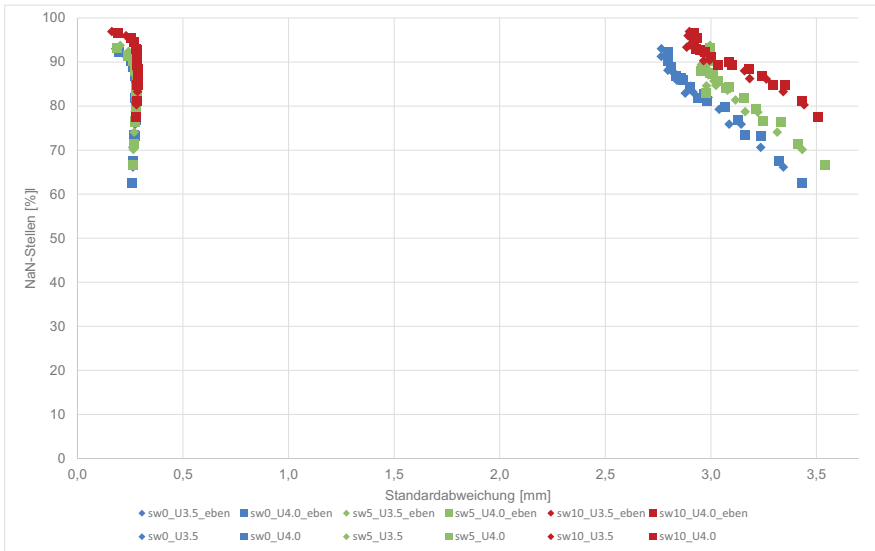


Abbildung 0-12: Parametervariation Gewebe 0° (A_Hornung 2015)

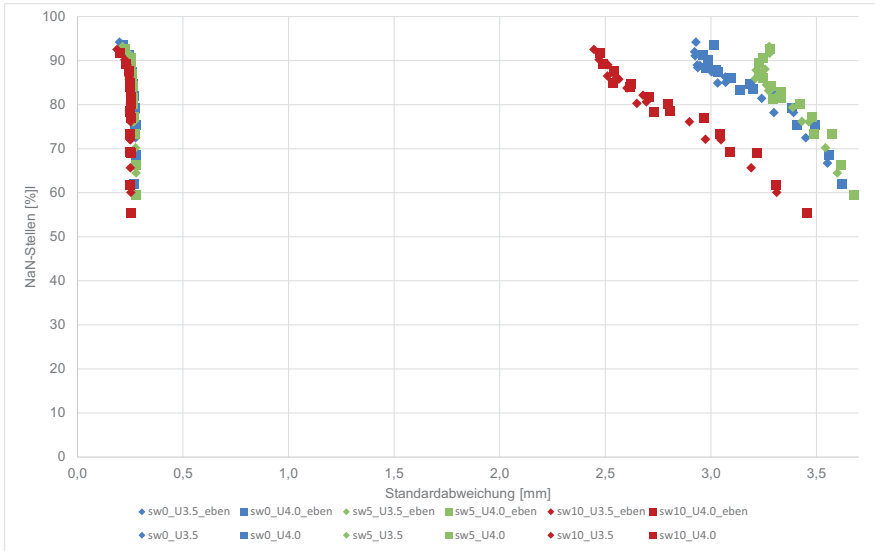


Abbildung 0-13: Parametervariation Gewebe 45° (A_Hornung 2015)

| GL0 | eben | | | konvex | | | NaN- Stellen [%] | |
|---------------|---------------|----------------|--------------------|---------------|----------------|--------------------|------------------------|-------|
| | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | | |
| sw0 U3.5 t300 | Th150 | 0,168857 | 0,972765 | 0,968343 | 2,200710 | 0,998701 | 0,997710 | 36,17 |
| | Th250 | 0,158419 | 0,963520 | 0,954783 | 2,206000 | 0,989196 | 0,983519 | 47,83 |
| | Th400 | 0,163802 | 1,001300 | 0,996875 | 2,246930 | 1,026400 | 1,027990 | 55,81 |
| | Th600 | 0,146409 | 1,060380 | 1,049190 | 2,344160 | 1,083450 | 1,077420 | 61,31 |
| t600 | Th150 | 0,166866 | 0,966454 | 0,958486 | 2,152120 | 0,991879 | 0,983058 | 22,51 |
| | Th250 | 0,162928 | 0,978253 | 0,969231 | 2,121950 | 1,003060 | 0,998268 | 36,47 |
| | Th400 | 0,161168 | 0,974409 | 0,966482 | 2,119010 | 0,999759 | 0,997410 | 46,15 |
| | Th600 | 0,160740 | 0,980653 | 0,973678 | 2,168150 | 1,006230 | 1,004040 | 52,98 |
| t900 | Th150 | 0,168567 | 0,969041 | 0,959164 | 2,135360 | 0,994624 | 0,986232 | 15,25 |
| | Th250 | 0,167553 | 0,969127 | 0,960994 | 2,104990 | 0,994669 | 0,987771 | 28,45 |
| | Th400 | 0,165409 | 0,987738 | 0,979680 | 2,081600 | 1,012570 | 1,009590 | 39,30 |
| | Th600 | 0,159920 | 0,986075 | 0,975281 | 2,113070 | 1,010890 | 1,003720 | 47,02 |
| t1200 | Th150 | 0,167094 | 0,975689 | 0,962798 | 2,129380 | 1,000990 | 0,992898 | 10,22 |
| | Th250 | 0,169072 | 0,972096 | 0,963790 | 2,113620 | 0,997670 | 0,990048 | 22,50 |
| | Th400 | 0,165732 | 0,979016 | 0,970242 | 2,087700 | 1,003970 | 0,996365 | 33,73 |
| | Th600 | 0,170869 | 0,989297 | 0,985873 | 2,104080 | 1,015050 | 1,015310 | 42,49 |
| U4.0 t300 | Th150 | 0,170083 | 0,985824 | 0,981352 | 2,191440 | 1,011560 | 1,009180 | 32,11 |
| | Th250 | 0,153213 | 0,982786 | 0,970698 | 2,179300 | 1,007880 | 1,003480 | 44,71 |
| | Th400 | 0,167314 | 1,004140 | 1,000940 | 2,207330 | 1,029820 | 1,032300 | 53,04 |
| | Th600 | 0,155357 | 1,046500 | 1,038280 | 2,277790 | 1,070220 | 1,069190 | 59,24 |
| t600 | Th150 | 0,169482 | 0,968905 | 0,961050 | 2,159500 | 0,995053 | 0,988206 | 18,18 |
| | Th250 | 0,169622 | 0,988697 | 0,983318 | 2,125110 | 1,014120 | 1,012530 | 32,25 |
| | Th400 | 0,154464 | 0,969135 | 0,957128 | 2,118940 | 0,994486 | 0,984806 | 42,71 |
| | Th600 | 0,158474 | 0,982762 | 0,973700 | 2,149850 | 1,008080 | 1,001900 | 50,00 |
| t900 | Th150 | 0,169210 | 0,975821 | 0,965157 | 2,145020 | 1,001450 | 0,993356 | 11,50 |
| | Th250 | 0,170752 | 0,975973 | 0,969329 | 2,126510 | 1,001680 | 0,995770 | 24,22 |
| | Th400 | 0,168330 | 0,989116 | 0,983012 | 2,102700 | 1,014170 | 1,008880 | 35,39 |
| | Th600 | 0,170722 | 0,977583 | 0,974066 | 2,119660 | 1,003820 | 1,001390 | 43,73 |
| t1200 | Th150 | 0,171372 | 0,980172 | 0,968845 | 2,150200 | 1,005760 | 1,002510 | 7,31 |
| | Th250 | 0,169689 | 0,976202 | 0,967333 | 2,139900 | 1,001610 | 0,993101 | 18,96 |
| | Th400 | 0,167894 | 0,984830 | 0,976163 | 2,106590 | 1,009570 | 1,001510 | 29,56 |
| | Th600 | 0,170106 | 0,987917 | 0,982897 | 2,107570 | 1,013310 | 1,009220 | 38,75 |

Abbildung 0-14: Messwerte Gelege 0° SW0 (A_Hornung 2015)

| GL0 | eben | | | konvex | | | NaN- Stellen [%] | |
|---------------|---------------|----------------|--------------------|---------------|----------------|--------------------|------------------------|-------|
| | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | | |
| sw5 U3.5 t300 | Th150 | 0,167464 | 0,957902 | 0,952687 | 1,933520 | 0,985054 | 0,982682 | 41,45 |
| | Th250 | 0,162783 | 0,956189 | 0,951170 | 1,845920 | 0,983073 | 0,978867 | 52,14 |
| | Th400 | 0,171235 | 0,962140 | 0,962399 | 1,825250 | 0,988976 | 0,989154 | 60,59 |
| | Th600 | 0,169004 | 0,987368 | 0,991027 | 1,851080 | 1,013000 | 1,014120 | 67,52 |
| t600 | Th150 | 0,166486 | 0,962657 | 0,953461 | 2,026570 | 0,988896 | 0,980845 | 30,37 |
| | Th250 | 0,164698 | 0,956015 | 0,948659 | 1,907070 | 0,982922 | 0,976215 | 41,67 |
| | Th400 | 0,167475 | 0,954022 | 0,950354 | 1,833940 | 0,981178 | 0,977475 | 50,50 |
| | Th600 | 0,162052 | 0,951162 | 0,946848 | 1,813050 | 0,978062 | 0,971192 | 57,53 |
| t900 | Th150 | 0,169644 | 0,964130 | 0,954398 | 2,097740 | 0,990893 | 0,985089 | 23,54 |
| | Th250 | 0,166977 | 0,962076 | 0,953930 | 1,969960 | 0,988613 | 0,981618 | 35,08 |
| | Th400 | 0,167650 | 0,959823 | 0,954297 | 1,880830 | 0,986594 | 0,980601 | 44,09 |
| | Th600 | 0,165897 | 0,960358 | 0,956112 | 1,832580 | 0,986988 | 0,979858 | 51,47 |
| t1200 | Th150 | 0,169320 | 0,970295 | 0,958258 | 2,167930 | 0,996944 | 0,987671 | 18,28 |
| | Th250 | 0,166659 | 0,964047 | 0,953955 | 2,037520 | 0,990324 | 0,979115 | 30,17 |
| | Th400 | 0,167111 | 0,962927 | 0,955811 | 1,923200 | 0,989315 | 0,981049 | 39,36 |
| | Th600 | 0,165300 | 0,959119 | 0,952822 | 1,866220 | 0,985621 | 0,976874 | 46,93 |
| U4.0 t300 | Th150 | 0,165591 | 0,958779 | 0,951810 | 1,963990 | 0,985514 | 0,980771 | 38,15 |
| | Th250 | 0,170449 | 0,958359 | 0,956317 | 1,868900 | 0,985400 | 0,983782 | 49,13 |
| | Th400 | 0,161549 | 0,956900 | 0,953178 | 1,822800 | 0,983727 | 0,979380 | 57,43 |
| | Th600 | 0,170605 | 0,984603 | 0,986534 | 1,848330 | 1,010350 | 1,011810 | 64,34 |
| t600 | Th150 | 0,166644 | 0,964310 | 0,954299 | 2,071700 | 0,990773 | 0,982960 | 26,70 |
| | Th250 | 0,167310 | 0,963479 | 0,956455 | 1,940680 | 0,990023 | 0,983522 | 38,24 |
| | Th400 | 0,167266 | 0,957341 | 0,952618 | 1,865780 | 0,984339 | 0,978250 | 47,22 |
| | Th600 | 0,164125 | 0,959792 | 0,954683 | 1,835000 | 0,986212 | 0,977993 | 54,33 |
| t900 | Th150 | 0,169016 | 0,971753 | 0,960111 | 2,162180 | 0,998256 | 0,989925 | 19,63 |
| | Th250 | 0,167471 | 0,966305 | 0,956837 | 2,032990 | 0,992605 | 0,981497 | 31,58 |
| | Th400 | 0,166818 | 0,962219 | 0,955143 | 1,924990 | 0,988796 | 0,980265 | 40,68 |
| | Th600 | 0,164447 | 0,959327 | 0,953160 | 1,866110 | 0,985944 | 0,977844 | 48,12 |
| t1200 | Th150 | 0,168167 | 0,967242 | 0,953165 | 2,246740 | 0,994225 | 0,983300 | 15,23 |
| | Th250 | 0,167537 | 0,965989 | 0,954802 | 2,108040 | 0,992507 | 0,979725 | 27,14 |
| | Th400 | 0,165497 | 0,964881 | 0,955300 | 1,978980 | 0,991022 | 0,979126 | 35,93 |
| | Th600 | 0,165843 | 0,963020 | 0,956341 | 1,903550 | 0,989481 | 0,978939 | 43,58 |

Abbildung 0-15: Messwerte Gelege 0° SW5 (A_Hornung 2015)

| GL0 | eben | | | konvex | | | NaN-Stellen [%] | |
|----------------|---------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-----------------|-----------------|-------|
| | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | | |
| sw10 U3.5 t300 | Th150 | 0,176944 | 0,926086 | 0,919161 | 2,326000 | 0,945907 | 0,931733 | 56,23 |
| | Th250 | 0,178726 | 0,914077 | 0,909778 | 2,255810 | 0,935008 | 0,930064 | 63,90 |
| | Th400 | 0,177707 | 0,922569 | 0,919870 | 2,265770 | 0,942320 | 0,935093 | 69,49 |
| | Th600 | 0,177760 | 0,936578 | 0,937721 | 2,335470 | 0,954533 | 0,946867 | 74,55 |
| t600 | Th150 | 0,178719 | 0,940468 | 0,931538 | 2,430770 | 0,959516 | 0,938831 | 47,04 |
| | Th250 | 0,176199 | 0,932423 | 0,924717 | 2,293880 | 0,952910 | 0,939711 | 56,46 |
| | Th400 | 0,178682 | 0,926826 | 0,921812 | 2,227850 | 0,947556 | 0,941335 | 62,72 |
| | Th600 | 0,174632 | 0,928512 | 0,923790 | 2,243750 | 0,949042 | 0,938652 | 67,28 |
| t900 | Th150 | 0,179364 | 0,953554 | 0,942657 | 2,495660 | 0,972131 | 0,947976 | 39,75 |
| | Th250 | 0,178124 | 0,943728 | 0,934371 | 2,366160 | 0,963158 | 0,941918 | 51,10 |
| | Th400 | 0,176126 | 0,936424 | 0,928664 | 2,274920 | 0,956784 | 0,942640 | 58,35 |
| | Th600 | 0,179130 | 0,931620 | 0,925422 | 2,236670 | 0,952182 | 0,944550 | 63,41 |
| t1200 | Th150 | 0,179855 | 0,953113 | 0,940779 | 2,557890 | 0,971873 | 0,940339 | 32,95 |
| | Th250 | 0,179215 | 0,947265 | 0,937834 | 2,423010 | 0,966330 | 0,941255 | 46,79 |
| | Th400 | 0,176796 | 0,943775 | 0,934646 | 2,309920 | 0,963642 | 0,943505 | 54,72 |
| | Th600 | 0,174985 | 0,936162 | 0,927286 | 2,264420 | 0,956623 | 0,943536 | 60,38 |
| U4.0 t300 | Th150 | 0,179568 | 0,939066 | 0,931555 | 2,379850 | 0,959770 | 0,946094 | 53,87 |
| | Th250 | 0,175069 | 0,929893 | 0,921811 | 2,286800 | 0,951156 | 0,942891 | 61,88 |
| | Th400 | 0,177654 | 0,926079 | 0,922103 | 2,259360 | 0,947315 | 0,939795 | 67,40 |
| | Th600 | 0,175172 | 0,950637 | 0,946295 | 2,292900 | 0,969253 | 0,959133 | 72,16 |
| t600 | Th150 | 0,178684 | 0,950889 | 0,939795 | 2,460980 | 0,970252 | 0,945123 | 43,45 |
| | Th250 | 0,176313 | 0,942043 | 0,931570 | 2,329440 | 0,962320 | 0,943313 | 53,95 |
| | Th400 | 0,176463 | 0,930123 | 0,921457 | 2,244980 | 0,951213 | 0,939427 | 62,72 |
| | Th600 | 0,174647 | 0,927412 | 0,920007 | 2,220400 | 0,948437 | 0,937698 | 65,34 |
| t900 | Th150 | 0,179363 | 0,954532 | 0,942353 | 2,530220 | 0,973900 | 0,945336 | 34,96 |
| | Th250 | 0,179417 | 0,942776 | 0,933312 | 2,387380 | 0,962761 | 0,940495 | 48,34 |
| | Th400 | 0,178227 | 0,942621 | 0,933679 | 2,284150 | 0,963076 | 0,945943 | 55,89 |
| | Th600 | 0,176947 | 0,932020 | 0,924114 | 2,241420 | 0,953173 | 0,939192 | 61,29 |
| t1200 | Th150 | 0,181739 | 0,957413 | 0,944319 | 2,583580 | 0,976626 | 0,943220 | 27,98 |
| | Th250 | 0,178900 | 0,950937 | 0,939718 | 2,448520 | 0,970421 | 0,939375 | 43,17 |
| | Th400 | 0,177327 | 0,940602 | 0,930619 | 2,333870 | 0,960797 | 0,934256 | 52,00 |
| | Th600 | 0,176124 | 0,936160 | 0,927118 | 2,263590 | 0,956929 | 0,941219 | 58,06 |

Abbildung 0-16: Messwerte Gelege 0° SW10 (A_Hornung 2015)

| GL45 | | | | eben | | | konvex | | | NaN- Stellen [%] |
|-------|------|------|-------|---------------|----------------|--------------------|---------------|----------------|--------------------|------------------------|
| | | | | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | |
| sw0 | U3.5 | t300 | Th150 | 0,180792 | 0,926112 | 0,913078 | 2,397760 | 0,991295 | 0,968775 | 60,43 |
| | | | Th250 | 0,175785 | 0,935231 | 0,920166 | 2,276870 | 0,994675 | 0,950225 | 71,19 |
| | | | Th400 | 0,173415 | 0,947337 | 0,932924 | 2,216280 | 1,002500 | 0,943782 | 77,66 |
| | | | Th600 | 0,168391 | 0,969169 | 0,953842 | 2,243420 | 1,020250 | 0,945416 | 82,53 |
| t600 | | | Th150 | 0,181642 | 0,911303 | 0,900005 | 2,482210 | 0,981069 | 0,981942 | 49,47 |
| | | | Th250 | 0,180818 | 0,923934 | 0,910873 | 2,388230 | 0,989687 | 0,968566 | 61,07 |
| | | | Th400 | 0,176459 | 0,937085 | 0,922228 | 2,295730 | 0,997459 | 0,957862 | 69,90 |
| | | | Th600 | 0,177369 | 0,942864 | 0,929351 | 2,227080 | 0,999729 | 0,946470 | 75,53 |
| t900 | | | Th150 | 0,181306 | 0,909475 | 0,899773 | 2,525180 | 0,980597 | 0,994892 | 41,30 |
| | | | Th250 | 0,181896 | 0,918114 | 0,906407 | 2,436470 | 0,986982 | 0,979888 | 54,76 |
| | | | Th400 | 0,180832 | 0,935292 | 0,921942 | 2,351510 | 0,999415 | 0,974475 | 64,43 |
| | | | Th600 | 0,178816 | 0,948812 | 0,935049 | 2,286170 | 1,008280 | 0,968450 | 70,79 |
| t1200 | | | Th150 | 0,178909 | 0,913145 | 0,902945 | 2,542200 | 0,983116 | 1,002580 | 35,53 |
| | | | Th250 | 0,182851 | 0,914801 | 0,904418 | 2,469180 | 0,985552 | 0,986776 | 49,13 |
| | | | Th400 | 0,181814 | 0,925239 | 0,912554 | 2,397240 | 0,992112 | 0,974019 | 59,14 |
| | | | Th600 | 0,179488 | 0,940687 | 0,926685 | 2,332350 | 1,002670 | 0,967623 | 67,03 |
| U4.0 | t300 | | Th150 | 0,180862 | 0,927799 | 0,914529 | 2,434120 | 0,994086 | 0,979644 | 57,31 |
| | | | Th250 | 0,179940 | 0,940367 | 0,926730 | 2,313640 | 1,001670 | 0,964425 | 68,60 |
| | | | Th400 | 0,173189 | 0,940510 | 0,924885 | 2,243210 | 0,996425 | 0,941993 | 75,49 |
| | | | Th600 | 0,171062 | 0,965047 | 0,949807 | 2,219960 | 1,016940 | 0,946834 | 80,41 |
| t600 | | | Th150 | 0,180464 | 0,909090 | 0,898116 | 2,514830 | 0,979727 | 0,987203 | 45,07 |
| | | | Th250 | 0,183344 | 0,927889 | 0,915860 | 2,429870 | 0,995170 | 0,984759 | 57,94 |
| | | | Th400 | 0,179501 | 0,934461 | 0,920727 | 2,346030 | 0,997335 | 0,965786 | 67,15 |
| | | | Th600 | 0,176358 | 0,942978 | 0,928063 | 2,279150 | 1,001580 | 0,952476 | 73,01 |
| t900 | | | Th150 | 0,182132 | 0,913026 | 0,904020 | 2,534200 | 0,984496 | 1,003860 | 37,14 |
| | | | Th250 | 0,184254 | 0,915574 | 0,905262 | 2,455250 | 0,986599 | 0,986040 | 50,64 |
| | | | Th400 | 0,181522 | 0,931644 | 0,918603 | 2,375920 | 0,998629 | 0,981894 | 60,65 |
| | | | Th600 | 0,180916 | 0,937176 | 0,923885 | 2,312660 | 1,000560 | 0,964965 | 67,96 |
| t1200 | | | Th150 | 0,178584 | 0,922266 | 0,912397 | 2,557270 | 0,991752 | 1,017680 | 31,27 |
| | | | Th250 | 0,185559 | 0,913565 | 0,904507 | 2,492290 | 0,985721 | 0,992616 | 45,67 |
| | | | Th400 | 0,183291 | 0,920919 | 0,909118 | 2,413600 | 0,990433 | 0,980869 | 55,14 |
| | | | Th600 | 0,183648 | 0,939767 | 0,927805 | 2,355540 | 1,005510 | 0,981144 | 64,00 |

Abbildung 0-17: Messwerte Gelege 45° SW0 (A_Hornung 2015)

| GL45 | | | | eben | | | konvex | | | NaN- Stellen [%] |
|-------|------|------|-------|---------------|----------------|--------------------|---------------|----------------|--------------------|------------------------|
| | | | | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | |
| sw5 | U3.5 | t300 | Th150 | 0,149140 | 0,928222 | 0,923420 | 2,190280 | 0,975704 | 0,986094 | 48,67 |
| | | | Th250 | 0,143976 | 0,920059 | 0,914940 | 2,110530 | 0,968682 | 0,971809 | 58,05 |
| | | | Th400 | 0,143954 | 0,920559 | 0,917534 | 2,089640 | 0,970625 | 0,972938 | 64,81 |
| | | | Th600 | 0,143130 | 0,937649 | 0,937135 | 2,129460 | 0,989547 | 0,991972 | 70,22 |
| t600 | | | Th150 | 0,151170 | 0,925412 | 0,918867 | 2,220810 | 0,971364 | 0,988858 | 38,25 |
| | | | Th250 | 0,149973 | 0,931370 | 0,926110 | 2,173120 | 0,978244 | 0,987379 | 48,92 |
| | | | Th400 | 0,144653 | 0,924078 | 0,918358 | 2,115160 | 0,972016 | 0,975891 | 56,52 |
| | | | Th600 | 0,143578 | 0,922596 | 0,918190 | 2,094170 | 0,971622 | 0,967850 | 62,25 |
| t900 | | | Th150 | 0,153668 | 0,932753 | 0,925878 | 2,232720 | 0,977839 | 0,995825 | 29,74 |
| | | | Th250 | 0,152644 | 0,931807 | 0,926192 | 2,195400 | 0,978232 | 0,994332 | 42,70 |
| | | | Th400 | 0,148283 | 0,927784 | 0,922012 | 2,156060 | 0,974978 | 0,982164 | 51,03 |
| | | | Th600 | 0,145892 | 0,929341 | 0,924675 | 2,115670 | 0,977571 | 0,979098 | 57,30 |
| t1200 | | | Th150 | 0,152130 | 0,934810 | 0,926233 | 2,236340 | 0,978720 | 0,996503 | 24,74 |
| | | | Th250 | 0,151881 | 0,927896 | 0,921491 | 2,199530 | 0,973859 | 0,991122 | 37,73 |
| | | | Th400 | 0,148888 | 0,930486 | 0,924103 | 2,163270 | 0,976897 | 0,987021 | 46,79 |
| | | | Th600 | 0,148554 | 0,932327 | 0,927673 | 2,127400 | 0,979876 | 0,986486 | 53,45 |
| U4.0 | t300 | | Th150 | 0,147851 | 0,929462 | 0,924093 | 2,191760 | 0,976257 | 0,990235 | 45,79 |
| | | | Th250 | 0,145288 | 0,930118 | 0,925481 | 2,129420 | 0,978339 | 0,985041 | 55,49 |
| | | | Th400 | 0,145720 | 0,926825 | 0,923969 | 2,099390 | 0,976304 | 0,977121 | 62,36 |
| | | | Th600 | 0,142347 | 0,928294 | 0,926390 | 2,113600 | 0,978897 | 0,982378 | 67,77 |
| t600 | | | Th150 | 0,150557 | 0,930311 | 0,923432 | 2,228400 | 0,975623 | 0,993800 | 33,15 |
| | | | Th250 | 0,148393 | 0,929469 | 0,923430 | 2,182140 | 0,975807 | 0,986305 | 45,78 |
| | | | Th400 | 0,145242 | 0,930555 | 0,925223 | 2,141000 | 0,978231 | 0,982397 | 53,77 |
| | | | Th600 | 0,143906 | 0,926751 | 0,922345 | 2,108600 | 0,975440 | 0,975117 | 59,74 |
| t900 | | | Th150 | 0,153802 | 0,935624 | 0,928681 | 2,236700 | 0,980558 | 0,997953 | 26,22 |
| | | | Th250 | 0,152755 | 0,930172 | 0,924554 | 2,205680 | 0,976443 | 0,993561 | 37,60 |
| | | | Th400 | 0,148681 | 0,935596 | 0,930023 | 2,159630 | 0,982456 | 0,993305 | 48,06 |
| | | | Th600 | 0,148149 | 0,932564 | 0,928356 | 2,130460 | 0,980474 | 0,984979 | 54,61 |
| t1200 | | | Th150 | 0,154485 | 0,934566 | 0,926972 | 2,251260 | 0,978929 | 0,995581 | 21,07 |
| | | | Th250 | 0,154276 | 0,933068 | 0,927040 | 2,214820 | 0,978922 | 0,997749 | 32,80 |
| | | | Th400 | 0,150162 | 0,933051 | 0,926887 | 2,186770 | 0,979321 | 0,991581 | 43,61 |
| | | | Th600 | 0,150173 | 0,932617 | 0,928127 | 2,151300 | 0,979992 | 0,989357 | 50,62 |

Abbildung 0-18: Messwerte Gelege 45° SW5 (A_Hornung 2015)

| GL45 | eben | | | konvex | | | NaN- Stellen [%] | |
|----------------|---------------|----------------|--------------------|---------------|----------------|--------------------|------------------------|-------|
| | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | | |
| sw10 U3.5 t300 | Th150 | 0,127304 | 0,933756 | 0,929042 | 1,875650 | 0,957896 | 0,963525 | 30,93 |
| | Th250 | 0,124982 | 0,933345 | 0,928673 | 1,828680 | 0,957327 | 0,965503 | 39,78 |
| | Th400 | 0,122444 | 0,941945 | 0,937298 | 1,819340 | 0,965721 | 0,980221 | 47,67 |
| | Th600 | 0,119604 | 0,956260 | 0,951763 | 1,842580 | 0,979834 | 1,003850 | 55,26 |
| t600 | Th150 | 0,129953 | 0,934403 | 0,929417 | 1,913260 | 0,959176 | 0,957602 | 20,09 |
| | Th250 | 0,128422 | 0,935512 | 0,930807 | 1,846000 | 0,959880 | 0,963435 | 30,99 |
| | Th400 | 0,127312 | 0,936404 | 0,932188 | 1,812110 | 0,960638 | 0,966588 | 38,22 |
| | Th600 | 0,125056 | 0,937450 | 0,933126 | 1,810330 | 0,961675 | 0,972882 | 44,54 |
| t900 | Th150 | 0,130314 | 0,931132 | 0,925445 | 1,934210 | 0,956430 | 0,949505 | 15,12 |
| | Th250 | 0,129498 | 0,937158 | 0,931892 | 1,876950 | 0,961592 | 0,962195 | 25,39 |
| | Th400 | 0,128351 | 0,936284 | 0,931773 | 1,827720 | 0,960660 | 0,964548 | 32,92 |
| | Th600 | 0,127009 | 0,937265 | 0,932616 | 1,811220 | 0,961207 | 0,968491 | 38,98 |
| t1200 | Th150 | 0,130121 | 0,939943 | 0,933237 | 1,942550 | 0,965096 | 0,954136 | 11,50 |
| | Th250 | 0,130368 | 0,932534 | 0,927218 | 1,898050 | 0,957519 | 0,955082 | 21,31 |
| | Th400 | 0,130776 | 0,937684 | 0,932958 | 1,846980 | 0,962081 | 0,964737 | 29,25 |
| | Th600 | 0,129148 | 0,936235 | 0,932059 | 1,817120 | 0,960760 | 0,966735 | 35,25 |
| U4.0 t300 | Th150 | 0,129746 | 0,936381 | 0,931418 | 1,892370 | 0,961130 | 0,966955 | 28,41 |
| | Th250 | 0,129424 | 0,937671 | 0,933606 | 1,838430 | 0,962387 | 0,970432 | 37,18 |
| | Th400 | 0,125544 | 0,938041 | 0,933646 | 1,827260 | 0,962523 | 0,975778 | 44,82 |
| | Th600 | 0,122835 | 0,953870 | 0,949279 | 1,845840 | 0,978062 | 0,997808 | 51,97 |
| t600 | Th150 | 0,130736 | 0,934871 | 0,929177 | 1,932650 | 0,959936 | 0,955974 | 17,64 |
| | Th250 | 0,130186 | 0,937459 | 0,932598 | 1,869670 | 0,962186 | 0,966900 | 27,73 |
| | Th400 | 0,128655 | 0,938200 | 0,933468 | 1,834010 | 0,962637 | 0,967454 | 35,60 |
| | Th600 | 0,126705 | 0,939025 | 0,934364 | 1,817130 | 0,963320 | 0,972109 | 41,72 |
| t900 | Th150 | 0,128706 | 0,951024 | 0,943191 | 1,947460 | 0,975598 | 0,966262 | 12,68 |
| | Th250 | 0,131305 | 0,936550 | 0,931643 | 1,902260 | 0,961749 | 0,959628 | 21,16 |
| | Th400 | 0,129553 | 0,938804 | 0,933938 | 1,849070 | 0,963509 | 0,967245 | 30,33 |
| | Th600 | 0,129018 | 0,938927 | 0,934605 | 1,824370 | 0,963534 | 0,967995 | 36,34 |
| t1200 | Th150 | 0,130404 | 0,947659 | 0,940131 | 1,966410 | 0,973163 | 0,960705 | 9,30 |
| | Th250 | 0,131358 | 0,934293 | 0,928760 | 1,921350 | 0,959834 | 0,956324 | 17,53 |
| | Th400 | 0,130819 | 0,936117 | 0,931090 | 1,876170 | 0,960983 | 0,961959 | 26,59 |
| | Th600 | 0,129651 | 0,940560 | 0,936000 | 1,833840 | 0,965211 | 0,968876 | 32,72 |

Abbildung 0-19: Messwerte Gelege 45° SW10 (A_Hornung 2015)

| GL90 | | | | eben | | | konvex | | | NaN- Stellen [%] |
|-------|------|------|-------|---------------|----------------|--------------------|---------------|----------------|--------------------|------------------------|
| | | | | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | |
| sw0 | U3.5 | t300 | Th150 | 0,216254 | 0,921233 | -0,021924 | 2,479830 | 0,978720 | 0,921336 | 70,35 |
| | | | Th250 | 0,214631 | 0,939574 | -0,022584 | 2,284050 | 0,992313 | 0,930760 | 77,52 |
| | | | Th400 | 0,212319 | 0,954390 | 0,073877 | 2,124940 | 1,002550 | 0,932752 | 82,16 |
| | | | Th600 | 0,214720 | 0,994705 | -0,025120 | 2,058670 | 1,036810 | 0,960854 | 85,47 |
| t600 | | | Th150 | 0,218175 | 0,917584 | -0,113244 | 2,611130 | 0,975951 | 0,922893 | 61,73 |
| | | | Th250 | 0,214738 | 0,933606 | -0,010993 | 2,456530 | 0,990080 | 0,933051 | 70,61 |
| | | | Th400 | 0,214324 | 0,947186 | 0,034014 | 2,299030 | 0,999956 | 0,942016 | 76,42 |
| | | | Th600 | 0,217022 | 0,960612 | -0,000061 | 2,187850 | 1,008830 | 0,940611 | 80,55 |
| t900 | | | Th150 | 0,215183 | 0,906624 | -2,175060 | 2,677250 | 0,966718 | 0,914484 | 55,44 |
| | | | Th250 | 0,215279 | 0,923962 | -0,005325 | 2,553120 | 0,981441 | 0,924884 | 65,62 |
| | | | Th400 | 0,214928 | 0,936450 | -0,003000 | 2,417870 | 0,991649 | 0,930944 | 72,31 |
| | | | Th600 | 0,216101 | 0,948632 | 0,027301 | 2,298710 | 1,000710 | 0,940905 | 77,02 |
| t1200 | | | Th150 | 0,214598 | 0,908142 | -2,187940 | 2,714590 | 0,968567 | 0,924017 | 50,54 |
| | | | Th250 | 0,217104 | 0,921313 | -0,119737 | 2,605700 | 0,978747 | 0,919623 | 61,76 |
| | | | Th400 | 0,216376 | 0,933589 | -1,825740 | 2,490640 | 0,989398 | 0,928446 | 69,01 |
| | | | Th600 | 0,215762 | 0,944025 | -0,009481 | 2,374610 | 0,997921 | 0,937826 | 74,28 |
| U4.0 | t300 | | Th150 | 0,217078 | 0,921252 | -0,018831 | 2,530690 | 0,980506 | 0,925487 | 67,79 |
| | | | Th250 | 0,214907 | 0,937878 | -0,011577 | 2,316190 | 0,993178 | 0,938287 | 75,52 |
| | | | Th400 | 0,213529 | 0,953799 | 0,063609 | 2,160000 | 1,004630 | 0,940087 | 80,61 |
| | | | Th600 | 0,213795 | 0,982505 | 0,072419 | 2,076880 | 1,028300 | 0,957956 | 83,98 |
| t600 | | | Th150 | 0,215330 | 0,914849 | -2,157220 | 2,652320 | 0,975731 | 0,923610 | 58,48 |
| | | | Th250 | 0,216129 | 0,929862 | -1,831610 | 2,504310 | 0,987952 | 0,929567 | 68,14 |
| | | | Th400 | 0,215018 | 0,946906 | -0,021744 | 2,366900 | 1,002030 | 0,941428 | 74,36 |
| | | | Th600 | 0,214486 | 0,960428 | 0,015141 | 2,255910 | 1,012340 | 0,948220 | 78,71 |
| t900 | | | Th150 | 0,213513 | 0,916162 | -2,772280 | 2,712710 | 0,977592 | 0,930344 | 51,22 |
| | | | Th250 | 0,216939 | 0,923120 | -2,203560 | 2,603910 | 0,981955 | 0,922316 | 62,54 |
| | | | Th400 | 0,214678 | 0,940076 | -2,208950 | 2,484500 | 0,997245 | 0,935078 | 69,82 |
| | | | Th600 | 0,215569 | 0,950726 | -0,009827 | 2,361590 | 1,005600 | 0,942731 | 74,97 |
| t1200 | | | Th150 | 0,210284 | 0,916579 | -2,178610 | 2,745850 | 0,978704 | 0,937967 | 45,41 |
| | | | Th250 | 0,214619 | 0,921709 | -2,188220 | 2,646280 | 0,981384 | 0,922960 | 58,27 |
| | | | Th400 | 0,215382 | 0,934577 | -2,210570 | 2,545260 | 0,992283 | 0,928296 | 66,25 |
| | | | Th600 | 0,214825 | 0,942206 | -0,009196 | 2,427440 | 0,998988 | 0,936211 | 71,85 |

Abbildung 0-20: Messwerte Gelege 90° SW0 (A_Hornung 2015)

| GL90 | | | | eben | | | konvex | | | NaN- Stellen [%] |
|-------|------|------|-------|---------------|----------------|--------------------|---------------|----------------|--------------------|------------------------|
| | | | | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | |
| sw5 | U3.5 | t300 | Th150 | 0,215642 | 0,956959 | 0,922510 | 2,495360 | 0,956594 | 0,862799 | 72,09 |
| | | | Th250 | 0,213069 | 0,984829 | 0,945504 | 2,273340 | 0,977029 | 0,880121 | 77,99 |
| | | | Th400 | 0,209796 | 1,015260 | 0,973453 | 2,150320 | 1,000510 | 0,895991 | 82,20 |
| | | | Th600 | 0,214301 | 1,041260 | 1,003830 | 2,156460 | 1,024650 | 0,918561 | 85,56 |
| t600 | | | Th150 | 0,219912 | 0,941742 | 0,914237 | 2,625810 | 0,951710 | 0,859891 | 65,08 |
| | | | Th250 | 0,217198 | 0,961626 | 0,927811 | 2,469910 | 0,963050 | 0,872103 | 72,07 |
| | | | Th400 | 0,213845 | 0,977097 | 0,940021 | 2,300500 | 0,972675 | 0,879871 | 77,06 |
| | | | Th600 | 0,214320 | 0,999241 | 0,962128 | 2,208520 | 0,990761 | 0,889644 | 80,69 |
| t900 | | | Th150 | 0,219772 | 0,933348 | 0,912426 | 2,683390 | 0,950042 | 0,864736 | 59,71 |
| | | | Th250 | 0,218355 | 0,955698 | 0,926280 | 2,548010 | 0,962970 | 0,873418 | 68,02 |
| | | | Th400 | 0,217583 | 0,973280 | 0,940125 | 2,406280 | 0,974277 | 0,881102 | 73,47 |
| | | | Th600 | 0,213019 | 0,983083 | 0,945080 | 2,304400 | 0,978457 | 0,878494 | 77,55 |
| t1200 | | | Th150 | 0,219093 | 0,930352 | 0,911648 | 2,735330 | 0,950156 | 0,868952 | 55,32 |
| | | | Th250 | 0,221014 | 0,947462 | 0,923034 | 2,595080 | 0,959881 | 0,870888 | 64,73 |
| | | | Th400 | 0,216579 | 0,962867 | 0,931014 | 2,466940 | 0,967217 | 0,875629 | 70,74 |
| | | | Th600 | 0,215745 | 0,980050 | 0,943790 | 2,352660 | 0,978040 | 0,882494 | 75,11 |
| U4.0 | t300 | | Th150 | 0,220494 | 0,964759 | 0,932748 | 2,522370 | 0,970386 | 0,878669 | 70,00 |
| | | | Th250 | 0,216081 | 0,986787 | 0,949345 | 2,352230 | 0,983839 | 0,892551 | 76,28 |
| | | | Th400 | 0,209539 | 1,014260 | 0,972560 | 2,231250 | 1,003920 | 0,900188 | 80,68 |
| | | | Th600 | 0,209426 | 1,040090 | 0,998491 | 2,197000 | 1,024740 | 0,912634 | 84,07 |
| t600 | | | Th150 | 0,221495 | 0,944954 | 0,922532 | 2,654520 | 0,960195 | 0,871215 | 62,21 |
| | | | Th250 | 0,217848 | 0,964192 | 0,932760 | 2,502820 | 0,969901 | 0,878980 | 70,03 |
| | | | Th400 | 0,210402 | 0,981205 | 0,942229 | 2,371220 | 0,978405 | 0,881666 | 75,19 |
| | | | Th600 | 0,213128 | 0,996399 | 0,958429 | 2,269920 | 0,990449 | 0,887916 | 79,02 |
| t900 | | | Th150 | 0,220407 | 0,932149 | 0,913666 | 2,729510 | 0,952343 | 0,869848 | 56,43 |
| | | | Th250 | 0,217822 | 0,951135 | 0,922969 | 2,590010 | 0,961451 | 0,869521 | 65,71 |
| | | | Th400 | 0,216359 | 0,960150 | 0,926914 | 2,451770 | 0,963897 | 0,870475 | 71,50 |
| | | | Th600 | 0,213553 | 0,985568 | 0,948131 | 2,363050 | 0,982952 | 0,887301 | 75,73 |
| t1200 | | | Th150 | 0,218282 | 0,927972 | 0,910697 | 2,777930 | 0,950273 | 0,870817 | 51,48 |
| | | | Th250 | 0,220847 | 0,944282 | 0,922268 | 2,650520 | 0,959891 | 0,869144 | 62,13 |
| | | | Th400 | 0,218343 | 0,962161 | 0,932571 | 2,525460 | 0,969875 | 0,876546 | 68,49 |
| | | | Th600 | 0,214145 | 0,973482 | 0,938505 | 2,417880 | 0,974765 | 0,878463 | 73,17 |

Abbildung 0-21: Messwerte Gelege 90° SW5 (A_Hornung 2015)

| GL90 | eben | | | konvex | | | NaN- Stellen [%] | |
|----------------|---------------|----------------|--------------------|---------------|----------------|--------------------|------------------------|-------|
| | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | | |
| sw10 U3.5 t300 | Th150 | 0,206706 | 1,001520 | 0,962515 | 2,664450 | 1,021910 | 0,948466 | 72,08 |
| | Th250 | 0,202887 | 1,014530 | 0,978670 | 2,437840 | 1,030750 | 0,956571 | 78,83 |
| | Th400 | 0,192671 | 1,031960 | 0,995973 | 2,266880 | 1,041710 | 0,960245 | 83,42 |
| | Th600 | 0,187312 | 1,056980 | 1,021780 | 2,228800 | 1,062140 | 0,970512 | 87,04 |
| t600 | Th150 | 0,208625 | 0,993453 | 0,954920 | 2,815810 | 1,019490 | 0,949597 | 63,56 |
| | Th250 | 0,204416 | 1,009380 | 0,970228 | 2,655380 | 1,029810 | 0,957613 | 72,10 |
| | Th400 | 0,201212 | 1,015960 | 0,978955 | 2,487870 | 1,032910 | 0,957309 | 77,71 |
| | Th600 | 0,194751 | 1,031170 | 0,994149 | 2,357150 | 1,043280 | 0,961666 | 81,69 |
| t900 | Th150 | 0,208565 | 0,980648 | 0,943889 | 2,873150 | 1,009900 | 0,942988 | 57,33 |
| | Th250 | 0,207134 | 0,998309 | 0,959336 | 2,741730 | 1,022490 | 0,950587 | 67,33 |
| | Th400 | 0,202653 | 1,010810 | 0,971848 | 2,610770 | 1,030170 | 0,954439 | 73,70 |
| | Th600 | 0,198465 | 1,017130 | 0,979349 | 2,466220 | 1,033050 | 0,956314 | 78,26 |
| t1200 | Th150 | 0,208893 | 0,970254 | 0,935959 | 2,890620 | 1,001980 | 0,941826 | 52,40 |
| | Th250 | 0,208215 | 0,989322 | 0,951346 | 2,796370 | 1,016020 | 0,942723 | 63,46 |
| | Th400 | 0,205095 | 1,002850 | 0,963481 | 2,673180 | 1,024440 | 0,947871 | 70,52 |
| | Th600 | 0,202284 | 1,014410 | 0,975974 | 2,550160 | 1,032660 | 0,958179 | 75,58 |
| U4.0 t300 | Th150 | 0,207306 | 1,005570 | 0,966563 | 2,714830 | 1,028650 | 0,957622 | 69,75 |
| | Th250 | 0,201294 | 1,017780 | 0,979605 | 2,526200 | 1,035530 | 0,959861 | 76,94 |
| | Th400 | 0,194681 | 1,031610 | 0,994652 | 2,357180 | 1,044510 | 0,960301 | 81,81 |
| | Th600 | 0,191380 | 1,053850 | 1,018120 | 2,268860 | 1,062490 | 0,973358 | 85,41 |
| t600 | Th150 | 0,209606 | 0,989214 | 0,951724 | 2,850290 | 1,017690 | 0,948922 | 60,51 |
| | Th250 | 0,206820 | 1,009530 | 0,970816 | 2,711810 | 1,032490 | 0,957874 | 69,72 |
| | Th400 | 0,201216 | 1,016830 | 0,978383 | 2,551280 | 1,035650 | 0,961045 | 75,76 |
| | Th600 | 0,196289 | 1,023210 | 0,985607 | 2,421740 | 1,038120 | 0,957911 | 79,96 |
| t900 | Th150 | 0,208228 | 0,978327 | 0,942999 | 2,896310 | 1,009690 | 0,947827 | 53,68 |
| | Th250 | 0,208031 | 0,996930 | 0,958325 | 2,786580 | 1,023280 | 0,950650 | 64,58 |
| | Th400 | 0,203701 | 1,009270 | 0,969363 | 2,674280 | 1,030590 | 0,950216 | 71,46 |
| | Th600 | 0,200560 | 1,015670 | 0,977071 | 2,539190 | 1,034380 | 0,955581 | 76,36 |
| t1200 | Th150 | 0,207944 | 0,976544 | 0,942784 | 2,921190 | 1,009270 | 0,955172 | 47,74 |
| | Th250 | 0,208651 | 0,987872 | 0,950529 | 2,835660 | 1,016520 | 0,945489 | 60,37 |
| | Th400 | 0,206778 | 1,003540 | 0,964376 | 2,736510 | 1,027530 | 0,946517 | 67,98 |
| | Th600 | 0,202659 | 1,013560 | 0,974505 | 2,627340 | 1,033950 | 0,954942 | 73,36 |

Abbildung 0-22: Messwerte Gelege 90° SW10 (A_Hornung 2015)

| GW0 | eben | | | konvex | | | NaN-Stellen [%] | |
|---------------|---------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-----------------|-----------------|-------|
| | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | | |
| sw0 U3.5 t300 | Th150 | 0,273263 | 0,668048 | 0,584202 | 2,878790 | 0,738879 | 0,574805 | 82,91 |
| | Th250 | 0,265252 | 0,664822 | 0,589785 | 2,796450 | 0,726754 | 0,536919 | 88,13 |
| | Th400 | 0,231158 | 0,735068 | 0,693569 | 2,765340 | 0,783179 | 0,597672 | 91,27 |
| | Th600 | 0,181913 | 0,781163 | 0,761807 | 2,765850 | 0,822608 | 0,632872 | 93,02 |
| t600 | Th150 | 0,273263 | 0,664527 | 0,587087 | 3,086950 | 0,741119 | 0,648581 | 75,88 |
| | Th250 | 0,277799 | 0,663775 | 0,578969 | 2,916020 | 0,742212 | 0,573628 | 83,15 |
| | Th400 | 0,275433 | 0,678006 | 0,601989 | 2,829140 | 0,743904 | 0,556465 | 87,38 |
| | Th600 | 0,252774 | 0,710382 | 0,657359 | 2,796190 | 0,764245 | 0,573009 | 90,16 |
| t900 | Th150 | 0,262796 | 0,675178 | 0,599161 | 3,236490 | 0,752322 | 0,713738 | 70,62 |
| | Th250 | 0,277579 | 0,667553 | 0,584926 | 3,039330 | 0,745620 | 0,612316 | 79,23 |
| | Th400 | 0,282032 | 0,663187 | 0,579328 | 2,903120 | 0,736842 | 0,559326 | 84,48 |
| | Th600 | 0,274034 | 0,681377 | 0,607912 | 2,815400 | 0,746291 | 0,557684 | 87,89 |
| t1200 | Th150 | 0,262731 | 0,682182 | 0,614497 | 3,344060 | 0,760973 | 0,766419 | 66,14 |
| | Th250 | 0,272867 | 0,669474 | 0,586433 | 3,143520 | 0,747453 | 0,645182 | 75,86 |
| | Th400 | 0,279349 | 0,665926 | 0,577780 | 2,987030 | 0,742522 | 0,576859 | 81,94 |
| | Th600 | 0,276341 | 0,665700 | 0,580491 | 2,839080 | 0,733345 | 0,549194 | 85,83 |
| U4.0 t300 | Th150 | 0,272943 | 0,676511 | 0,593009 | 2,941680 | 0,749572 | 0,601719 | 81,81 |
| | Th250 | 0,271184 | 0,680595 | 0,601894 | 2,833910 | 0,742248 | 0,557939 | 86,72 |
| | Th400 | 0,256231 | 0,696164 | 0,648892 | 2,796950 | 0,748374 | 0,565512 | 90,18 |
| | Th600 | 0,197992 | 0,768000 | 0,735292 | 2,796140 | 0,807272 | 0,607358 | 92,33 |
| t600 | Th150 | 0,269530 | 0,672242 | 0,595778 | 3,163520 | 0,746469 | 0,684463 | 73,40 |
| | Th250 | 0,278267 | 0,670561 | 0,586676 | 2,980980 | 0,744372 | 0,598040 | 81,20 |
| | Th400 | 0,277135 | 0,673347 | 0,590333 | 2,868540 | 0,739718 | 0,554081 | 85,82 |
| | Th600 | 0,265358 | 0,692810 | 0,625075 | 2,809340 | 0,748537 | 0,548592 | 88,88 |
| t900 | Th150 | 0,261392 | 0,695666 | 0,623948 | 3,320930 | 0,770947 | 0,768879 | 67,43 |
| | Th250 | 0,278101 | 0,665115 | 0,586544 | 3,128100 | 0,743308 | 0,642788 | 76,86 |
| | Th400 | 0,283806 | 0,664620 | 0,580262 | 2,968610 | 0,739602 | 0,573266 | 82,62 |
| | Th600 | 0,277359 | 0,674136 | 0,591614 | 2,858470 | 0,739480 | 0,544724 | 86,38 |
| t1200 | Th150 | 0,257865 | 0,690924 | 0,626260 | 3,431130 | 0,767393 | 0,807314 | 62,52 |
| | Th250 | 0,275061 | 0,667873 | 0,591427 | 3,237800 | 0,746438 | 0,683191 | 73,13 |
| | Th400 | 0,279441 | 0,668011 | 0,582615 | 3,067750 | 0,745857 | 0,598046 | 79,80 |
| | Th600 | 0,279045 | 0,672086 | 0,583556 | 2,903330 | 0,743237 | 0,555018 | 84,21 |

Abbildung 0-23: Messwerte Gewebe 0° SW0 (A_Hornung 2015)

| GW0 | eben | | | konvex | | | NaN- Stellen [%] | |
|---------------|---------------|----------------|--------------------|---------------|----------------|--------------------|------------------------|-------|
| | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | | |
| sw5 U3.5 t300 | Th150 | 0,278225 | 0,673044 | 0,579775 | 2,979030 | 0,746420 | 0,498690 | 84,58 |
| | Th250 | 0,273998 | 0,687587 | 0,607329 | 2,954670 | 0,750979 | 0,456705 | 89,38 |
| | Th400 | 0,242498 | 0,710844 | 0,668301 | 2,980410 | 0,763470 | 0,455635 | 92,38 |
| | Th600 | 0,202894 | 0,764865 | 0,757940 | 2,996170 | 0,812614 | 0,510260 | 93,75 |
| t600 | Th150 | 0,273912 | 0,679005 | 0,592522 | 3,162950 | 0,758544 | 0,603608 | 78,70 |
| | Th250 | 0,280270 | 0,676633 | 0,582348 | 3,024560 | 0,751249 | 0,496921 | 84,65 |
| | Th400 | 0,279317 | 0,686168 | 0,600425 | 2,980270 | 0,752280 | 0,451205 | 88,51 |
| | Th600 | 0,257442 | 0,709176 | 0,647074 | 2,977720 | 0,765401 | 0,444796 | 91,37 |
| t900 | Th150 | 0,269600 | 0,690656 | 0,610531 | 3,314430 | 0,772317 | 0,681548 | 74,05 |
| | Th250 | 0,278359 | 0,679412 | 0,588910 | 3,116870 | 0,759468 | 0,555041 | 81,36 |
| | Th400 | 0,282606 | 0,677508 | 0,583093 | 3,015180 | 0,751320 | 0,474585 | 85,70 |
| | Th600 | 0,277684 | 0,693351 | 0,609240 | 2,973550 | 0,757718 | 0,453761 | 88,99 |
| t1200 | Th150 | 0,265688 | 0,697507 | 0,622898 | 3,432650 | 0,780476 | 0,742234 | 70,10 |
| | Th250 | 0,276462 | 0,681199 | 0,593480 | 3,222800 | 0,763308 | 0,604013 | 78,60 |
| | Th400 | 0,282958 | 0,678014 | 0,584428 | 3,079300 | 0,756270 | 0,507766 | 83,55 |
| | Th600 | 0,281256 | 0,684115 | 0,591393 | 2,988340 | 0,754984 | 0,459578 | 87,08 |
| U4.0 t300 | Th150 | 0,279220 | 0,670608 | 0,578395 | 2,978400 | 0,744499 | 0,497711 | 82,99 |
| | Th250 | 0,272709 | 0,688984 | 0,608001 | 2,956000 | 0,752269 | 0,457081 | 87,92 |
| | Th400 | 0,239225 | 0,718918 | 0,673421 | 2,983320 | 0,770804 | 0,459743 | 91,38 |
| | Th600 | 0,187028 | 0,774572 | 0,755758 | 2,998530 | 0,820645 | 0,506875 | 93,21 |
| t600 | Th150 | 0,273515 | 0,687228 | 0,604635 | 3,248450 | 0,767567 | 0,645065 | 76,50 |
| | Th250 | 0,279381 | 0,679587 | 0,586473 | 3,073150 | 0,756862 | 0,525011 | 84,03 |
| | Th400 | 0,282046 | 0,683696 | 0,592046 | 3,012200 | 0,754872 | 0,460156 | 87,17 |
| | Th600 | 0,263461 | 0,709481 | 0,625035 | 2,995160 | 0,768497 | 0,441992 | 90,21 |
| t900 | Th150 | 0,267865 | 0,698014 | 0,621522 | 3,414180 | 0,779995 | 0,730320 | 71,37 |
| | Th250 | 0,277237 | 0,681411 | 0,592162 | 3,211650 | 0,762691 | 0,588952 | 79,40 |
| | Th400 | 0,283070 | 0,678587 | 0,584331 | 3,084220 | 0,755997 | 0,501625 | 84,26 |
| | Th600 | 0,281107 | 0,685202 | 0,593603 | 2,996120 | 0,755025 | 0,449979 | 87,58 |
| t1200 | Th150 | 0,262064 | 0,704418 | 0,632722 | 3,540670 | 0,787064 | 0,790723 | 66,67 |
| | Th250 | 0,275086 | 0,689092 | 0,604790 | 3,330010 | 0,771905 | 0,651872 | 76,35 |
| | Th400 | 0,281822 | 0,679874 | 0,588442 | 3,155470 | 0,761350 | 0,547420 | 81,84 |
| | Th600 | 0,282385 | 0,683846 | 0,588001 | 3,033660 | 0,758752 | 0,480632 | 85,63 |

Abbildung 0-24: Messwerte Gewebe 0° SW5 (A_Hornung 2015)

| GW0 | eben | | | konvex | | | NaN- Stellen [%] | |
|----------------|---------------|----------------|--------------------|---------------|----------------|--------------------|------------------------|-------|
| | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | | |
| sw10 U3.5 t300 | Th150 | 0,280743 | 0,599570 | 0,494953 | 2,965920 | 0,687737 | 0,405462 | 90,27 |
| | Th250 | 0,271625 | 0,625768 | 0,530371 | 2,900440 | 0,690521 | 0,345554 | 93,88 |
| | Th400 | 0,230935 | 0,673817 | 0,617914 | 2,892630 | 0,720816 | 0,346321 | 95,97 |
| | Th600 | 0,163577 | 0,724862 | 0,701908 | 2,898930 | 0,767805 | 0,380703 | 96,90 |
| t600 | Th150 | 0,283775 | 0,621408 | 0,520902 | 3,184150 | 0,722004 | 0,527709 | 86,22 |
| | Th250 | 0,280931 | 0,603486 | 0,498861 | 2,994340 | 0,695883 | 0,402179 | 90,36 |
| | Th400 | 0,277403 | 0,618061 | 0,519359 | 2,886120 | 0,690361 | 0,355414 | 93,34 |
| | Th600 | 0,255030 | 0,665067 | 0,589430 | 2,908730 | 0,717072 | 0,342167 | 95,37 |
| t900 | Th150 | 0,284851 | 0,639620 | 0,544199 | 3,343080 | 0,740565 | 0,616942 | 83,25 |
| | Th250 | 0,283488 | 0,609234 | 0,507220 | 3,159470 | 0,712579 | 0,467534 | 88,01 |
| | Th400 | 0,282030 | 0,605173 | 0,501957 | 2,995710 | 0,695866 | 0,385616 | 91,23 |
| | Th600 | 0,273876 | 0,627442 | 0,529494 | 2,909490 | 0,696739 | 0,347936 | 93,70 |
| t1200 | Th150 | 0,280769 | 0,657879 | 0,566088 | 3,441290 | 0,754960 | 0,678579 | 80,26 |
| | Th250 | 0,286294 | 0,618598 | 0,520179 | 3,263060 | 0,727129 | 0,532354 | 86,12 |
| | Th400 | 0,283986 | 0,602360 | 0,501895 | 3,090980 | 0,704593 | 0,423173 | 89,57 |
| | Th600 | 0,278523 | 0,609791 | 0,505753 | 2,953240 | 0,692149 | 0,362538 | 92,22 |
| U4.0 t300 | Th150 | 0,281539 | 0,611646 | 0,509192 | 3,032950 | 0,706085 | 0,450901 | 89,23 |
| | Th250 | 0,276552 | 0,617922 | 0,518083 | 2,929420 | 0,692761 | 0,358842 | 92,93 |
| | Th400 | 0,253355 | 0,674065 | 0,601898 | 2,933870 | 0,727884 | 0,354692 | 95,42 |
| | Th600 | 0,193238 | 0,709992 | 0,671801 | 2,920410 | 0,755646 | 0,364925 | 96,60 |
| t600 | Th150 | 0,282773 | 0,632413 | 0,533149 | 3,292000 | 0,734190 | 0,577982 | 84,79 |
| | Th250 | 0,284067 | 0,609650 | 0,507999 | 3,099450 | 0,708839 | 0,442261 | 89,23 |
| | Th400 | 0,281759 | 0,614174 | 0,514018 | 2,974190 | 0,697517 | 0,370444 | 92,31 |
| | Th600 | 0,266587 | 0,649485 | 0,559267 | 2,920940 | 0,710220 | 0,339757 | 94,61 |
| t900 | Th150 | 0,280547 | 0,656759 | 0,563895 | 3,431170 | 0,755252 | 0,669229 | 81,11 |
| | Th250 | 0,285155 | 0,616302 | 0,515521 | 3,244080 | 0,724387 | 0,522326 | 86,75 |
| | Th400 | 0,284702 | 0,603001 | 0,502214 | 3,087980 | 0,703943 | 0,413399 | 90,10 |
| | Th600 | 0,280009 | 0,618725 | 0,517470 | 2,948690 | 0,697572 | 0,357220 | 92,66 |
| t1200 | Th150 | 0,277064 | 0,681177 | 0,594285 | 3,508700 | 0,773491 | 0,733007 | 77,51 |
| | Th250 | 0,286970 | 0,636484 | 0,537491 | 3,352330 | 0,742452 | 0,583331 | 84,70 |
| | Th400 | 0,285224 | 0,605267 | 0,505416 | 3,181610 | 0,715361 | 0,460284 | 88,37 |
| | Th600 | 0,282195 | 0,607347 | 0,504420 | 3,002390 | 0,699627 | 0,384313 | 91,13 |

Abbildung 0-25: Messwerte Gewebe 0° SW10 (A_Hornung 2015)

| GW45 | eben | | | konvex | | | NaN-Stellen [%] | |
|---------------|---------------|-------------|-----------------|---------------|-------------|-----------------|-----------------|-------|
| | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | | |
| sw0 U3.5 t300 | Th150 | 0,259134 | 0,580145 | 0,497996 | 3,032200 | 0,636807 | 0,305563 | 84,88 |
| | Th250 | 0,252018 | 0,566372 | 0,485819 | 2,935870 | 0,628431 | 0,287296 | 88,97 |
| | Th400 | 0,235206 | 0,593282 | 0,522632 | 2,922860 | 0,651560 | 0,297121 | 92,00 |
| | Th600 | 0,200040 | 0,649662 | 0,597280 | 2,929820 | 0,701808 | 0,325561 | 94,17 |
| t600 | Th150 | 0,268913 | 0,619777 | 0,545386 | 3,298450 | 0,670151 | 0,380861 | 78,19 |
| | Th250 | 0,260527 | 0,585999 | 0,500910 | 3,070020 | 0,644659 | 0,298265 | 85,06 |
| | Th400 | 0,254547 | 0,577093 | 0,493875 | 2,938180 | 0,640403 | 0,297077 | 88,37 |
| | Th600 | 0,244794 | 0,579742 | 0,504421 | 2,925960 | 0,641813 | 0,286307 | 91,07 |
| t900 | Th150 | 0,275863 | 0,645923 | 0,579439 | 3,449510 | 0,692494 | 0,438219 | 72,45 |
| | Th250 | 0,265626 | 0,607773 | 0,527544 | 3,240530 | 0,663582 | 0,340673 | 81,40 |
| | Th400 | 0,260748 | 0,583940 | 0,501534 | 3,068640 | 0,647365 | 0,293707 | 86,24 |
| | Th600 | 0,253838 | 0,576060 | 0,495766 | 2,948840 | 0,641198 | 0,287268 | 88,87 |
| t1200 | Th150 | 0,280014 | 0,656155 | 0,594439 | 3,552290 | 0,700595 | 0,490975 | 66,70 |
| | Th250 | 0,274517 | 0,621869 | 0,547901 | 3,391850 | 0,673176 | 0,369516 | 78,20 |
| | Th400 | 0,264451 | 0,594629 | 0,514521 | 3,187060 | 0,654876 | 0,304739 | 84,10 |
| | Th600 | 0,256514 | 0,581259 | 0,496971 | 3,003910 | 0,644574 | 0,283540 | 87,43 |
| U4.0 t300 | Th150 | 0,260723 | 0,595560 | 0,513783 | 3,137420 | 0,652799 | 0,319201 | 83,37 |
| | Th250 | 0,253689 | 0,579333 | 0,496245 | 2,977900 | 0,642137 | 0,297083 | 88,21 |
| | Th400 | 0,242258 | 0,590351 | 0,513139 | 2,965240 | 0,651616 | 0,297434 | 91,13 |
| | Th600 | 0,215577 | 0,641564 | 0,581969 | 3,013160 | 0,697039 | 0,312407 | 93,46 |
| t600 | Th150 | 0,273242 | 0,630920 | 0,560989 | 3,410410 | 0,680610 | 0,408450 | 75,45 |
| | Th250 | 0,264635 | 0,597696 | 0,517353 | 3,198790 | 0,656770 | 0,315852 | 83,50 |
| | Th400 | 0,258777 | 0,577793 | 0,498356 | 3,035210 | 0,643201 | 0,287134 | 87,47 |
| | Th600 | 0,250283 | 0,592949 | 0,512621 | 2,988080 | 0,656774 | 0,299628 | 90,03 |
| t900 | Th150 | 0,279583 | 0,654940 | 0,591171 | 3,557740 | 0,700718 | 0,474562 | 68,44 |
| | Th250 | 0,272185 | 0,618543 | 0,542545 | 3,385330 | 0,671943 | 0,357190 | 79,18 |
| | Th400 | 0,262216 | 0,589654 | 0,506855 | 3,186660 | 0,650753 | 0,289911 | 84,70 |
| | Th600 | 0,255225 | 0,586777 | 0,501030 | 3,025520 | 0,649976 | 0,280366 | 87,87 |
| t1200 | Th150 | 0,270075 | 0,667355 | 0,607233 | 3,619550 | 0,711388 | 0,532007 | 61,95 |
| | Th250 | 0,279434 | 0,634013 | 0,565745 | 3,494310 | 0,683834 | 0,395653 | 75,34 |
| | Th400 | 0,267035 | 0,602409 | 0,522804 | 3,303720 | 0,659687 | 0,315656 | 81,90 |
| | Th600 | 0,258200 | 0,580522 | 0,494249 | 3,093920 | 0,641730 | 0,267598 | 86,03 |

Abbildung 0-26: Messwerte Gewebe 45° SW0 (A_Hornung 2015)

| GW45 | eben | | | konvex | | | NaN- Stellen [%] | |
|---------------|---------------|----------------|--------------------|---------------|----------------|--------------------|------------------------|-------|
| | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | | |
| sw5 U3.5 t300 | Th150 | 0,261072 | 0,598731 | 0,535464 | 3,273530 | 0,644660 | 0,272912 | 83,15 |
| | Th250 | 0,256143 | 0,608688 | 0,546472 | 3,256930 | 0,654434 | 0,264912 | 88,03 |
| | Th400 | 0,242855 | 0,638888 | 0,592715 | 3,278160 | 0,683387 | 0,274058 | 91,63 |
| | Th600 | 0,213985 | 0,685193 | 0,663826 | 3,276800 | 0,730299 | 0,316155 | 93,21 |
| t600 | Th150 | 0,267527 | 0,633257 | 0,573404 | 3,431560 | 0,679193 | 0,376553 | 76,16 |
| | Th250 | 0,260295 | 0,614102 | 0,549012 | 3,282100 | 0,661166 | 0,289715 | 83,28 |
| | Th400 | 0,257761 | 0,616084 | 0,551261 | 3,229970 | 0,663253 | 0,277188 | 87,35 |
| | Th600 | 0,250906 | 0,633712 | 0,581806 | 3,249770 | 0,680659 | 0,275211 | 90,51 |
| t900 | Th150 | 0,275624 | 0,662897 | 0,608545 | 3,543190 | 0,706004 | 0,456604 | 70,19 |
| | Th250 | 0,262067 | 0,625944 | 0,562243 | 3,388210 | 0,673701 | 0,334455 | 79,35 |
| | Th400 | 0,260593 | 0,614575 | 0,549156 | 3,262840 | 0,662863 | 0,279060 | 84,48 |
| | Th600 | 0,258033 | 0,617700 | 0,556557 | 3,214630 | 0,665937 | 0,281487 | 87,81 |
| t1200 | Th150 | 0,277646 | 0,686697 | 0,635256 | 3,598710 | 0,727388 | 0,515689 | 64,47 |
| | Th250 | 0,266369 | 0,642620 | 0,581187 | 3,464540 | 0,689446 | 0,378640 | 76,06 |
| | Th400 | 0,262752 | 0,619308 | 0,554669 | 3,313030 | 0,668220 | 0,301410 | 82,03 |
| | Th600 | 0,260041 | 0,613046 | 0,547172 | 3,211190 | 0,661018 | 0,278282 | 85,93 |
| U4.0 t300 | Th150 | 0,260395 | 0,618966 | 0,553859 | 3,296400 | 0,666321 | 0,313083 | 81,32 |
| | Th250 | 0,257260 | 0,613142 | 0,547430 | 3,228910 | 0,659836 | 0,272484 | 86,84 |
| | Th400 | 0,251593 | 0,624066 | 0,573681 | 3,245820 | 0,671797 | 0,276598 | 90,61 |
| | Th600 | 0,224445 | 0,676675 | 0,642792 | 3,279260 | 0,721666 | 0,300866 | 92,59 |
| t600 | Th150 | 0,267605 | 0,652216 | 0,593600 | 3,488710 | 0,697861 | 0,420844 | 73,41 |
| | Th250 | 0,261653 | 0,622613 | 0,557755 | 3,333970 | 0,670933 | 0,308696 | 81,40 |
| | Th400 | 0,258011 | 0,617483 | 0,550037 | 3,247410 | 0,664807 | 0,280102 | 86,04 |
| | Th600 | 0,255712 | 0,623940 | 0,566543 | 3,226680 | 0,671639 | 0,279677 | 89,40 |
| t900 | Th150 | 0,277403 | 0,680850 | 0,627362 | 3,614510 | 0,723453 | 0,503128 | 66,23 |
| | Th250 | 0,265846 | 0,640703 | 0,578639 | 3,478220 | 0,689194 | 0,366347 | 77,12 |
| | Th400 | 0,260680 | 0,619075 | 0,552057 | 3,331380 | 0,668604 | 0,299683 | 82,83 |
| | Th600 | 0,257150 | 0,618628 | 0,549240 | 3,239130 | 0,665727 | 0,275713 | 86,53 |
| t1200 | Th150 | 0,275611 | 0,697670 | 0,646374 | 3,680620 | 0,737948 | 0,556405 | 59,51 |
| | Th250 | 0,274534 | 0,658337 | 0,600176 | 3,573660 | 0,705043 | 0,417879 | 73,21 |
| | Th400 | 0,264817 | 0,626450 | 0,562207 | 3,422490 | 0,676758 | 0,325534 | 80,08 |
| | Th600 | 0,261398 | 0,614503 | 0,549921 | 3,285490 | 0,665506 | 0,291567 | 84,30 |

Abbildung 0-27: Messwerte Gewebe 45° SW5 (A_Hornung 2015)

| GW45 | eben | | | konvex | | | NaN- Stellen [%] | |
|----------------|---------------|----------------|--------------------|---------------|----------------|--------------------|------------------------|-------|
| | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | σ [mm] | Median [mm] | Mittelwert [mm] | | |
| sw10 U3.5 t300 | Th150 | 0,251401 | 0,643812 | 0,582672 | 2,649980 | 0,687564 | 0,526857 | 80,27 |
| | Th250 | 0,245191 | 0,636572 | 0,576557 | 2,510340 | 0,680646 | 0,517713 | 86,47 |
| | Th400 | 0,225361 | 0,650370 | 0,608655 | 2,471520 | 0,693975 | 0,538052 | 90,21 |
| | Th600 | 0,188239 | 0,683684 | 0,663499 | 2,446750 | 0,726226 | 0,566704 | 92,50 |
| t600 | Th150 | 0,247640 | 0,653956 | 0,599133 | 2,974320 | 0,699177 | 0,574137 | 72,14 |
| | Th250 | 0,251044 | 0,647199 | 0,584051 | 2,695180 | 0,692457 | 0,521856 | 80,61 |
| | Th400 | 0,245633 | 0,644391 | 0,579764 | 2,564050 | 0,688681 | 0,513533 | 85,76 |
| | Th600 | 0,235338 | 0,651892 | 0,599635 | 2,512130 | 0,695556 | 0,526404 | 89,04 |
| t900 | Th150 | 0,251523 | 0,660320 | 0,612778 | 3,191210 | 0,707696 | 0,626119 | 65,65 |
| | Th250 | 0,251657 | 0,657092 | 0,597505 | 2,898350 | 0,701715 | 0,548965 | 76,09 |
| | Th400 | 0,250863 | 0,648354 | 0,583759 | 2,678870 | 0,692401 | 0,513765 | 82,11 |
| | Th600 | 0,245486 | 0,643939 | 0,580626 | 2,553070 | 0,687972 | 0,514179 | 86,26 |
| t1200 | Th150 | 0,253367 | 0,669651 | 0,626459 | 3,312420 | 0,717928 | 0,664355 | 60,07 |
| | Th250 | 0,252090 | 0,656498 | 0,601951 | 3,048000 | 0,702286 | 0,574347 | 72,02 |
| | Th400 | 0,252882 | 0,654776 | 0,592030 | 2,799530 | 0,698573 | 0,525646 | 79,24 |
| | Th600 | 0,250327 | 0,647268 | 0,582592 | 2,603090 | 0,691134 | 0,513307 | 83,74 |
| U4.0 t300 | Th150 | 0,250398 | 0,654820 | 0,594095 | 2,729100 | 0,698542 | 0,544480 | 78,41 |
| | Th250 | 0,247547 | 0,645486 | 0,582904 | 2,538280 | 0,688964 | 0,528885 | 84,97 |
| | Th400 | 0,231890 | 0,652766 | 0,599763 | 2,491960 | 0,695574 | 0,529577 | 89,13 |
| | Th600 | 0,202142 | 0,675345 | 0,641955 | 2,475260 | 0,717738 | 0,551570 | 91,79 |
| t600 | Th150 | 0,250067 | 0,659138 | 0,608176 | 3,090700 | 0,705859 | 0,602932 | 69,13 |
| | Th250 | 0,251216 | 0,655337 | 0,593842 | 2,807440 | 0,699533 | 0,538102 | 78,52 |
| | Th400 | 0,248699 | 0,645796 | 0,580832 | 2,619180 | 0,689679 | 0,511604 | 83,90 |
| | Th600 | 0,242944 | 0,648923 | 0,591356 | 2,540270 | 0,692942 | 0,524166 | 87,70 |
| t900 | Th150 | 0,250458 | 0,662932 | 0,617956 | 3,307430 | 0,712452 | 0,652698 | 61,75 |
| | Th250 | 0,250977 | 0,655510 | 0,599648 | 3,045930 | 0,701522 | 0,566129 | 73,27 |
| | Th400 | 0,251715 | 0,649482 | 0,585278 | 2,798650 | 0,694195 | 0,517266 | 80,05 |
| | Th600 | 0,248426 | 0,646462 | 0,580005 | 2,620390 | 0,690876 | 0,509037 | 84,56 |
| t1200 | Th150 | 0,253291 | 0,671062 | 0,630437 | 3,457050 | 0,721477 | 0,687155 | 55,44 |
| | Th250 | 0,253261 | 0,659666 | 0,608866 | 3,220760 | 0,707110 | 0,600123 | 68,96 |
| | Th400 | 0,253976 | 0,651837 | 0,592094 | 2,969040 | 0,697310 | 0,536018 | 76,87 |
| | Th600 | 0,251768 | 0,646290 | 0,582607 | 2,707290 | 0,690872 | 0,513527 | 81,84 |

Abbildung 0-28: Messwerte Gewebe 45° SW10 (A_Hornung 2015)

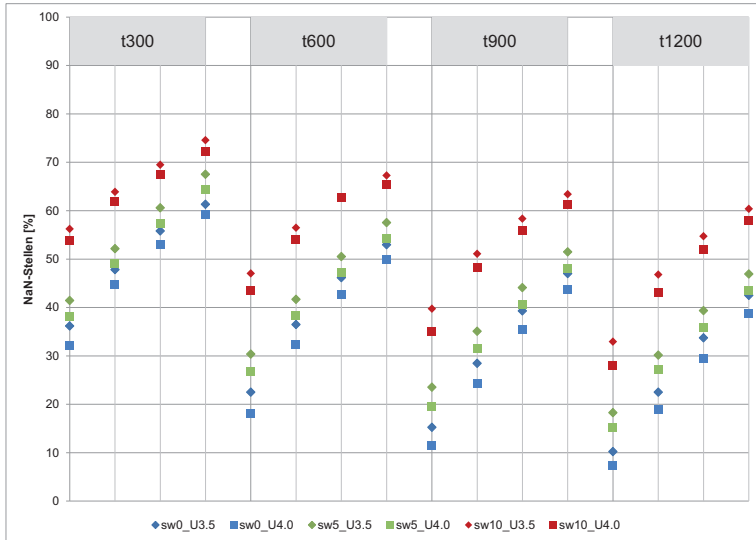


Abbildung 0-29: NaN-Stellen für GL0 – je Belichtungszeit erfolgt eine Schrittweise Erhöhung des Thresholds (A_Hornung 2015)

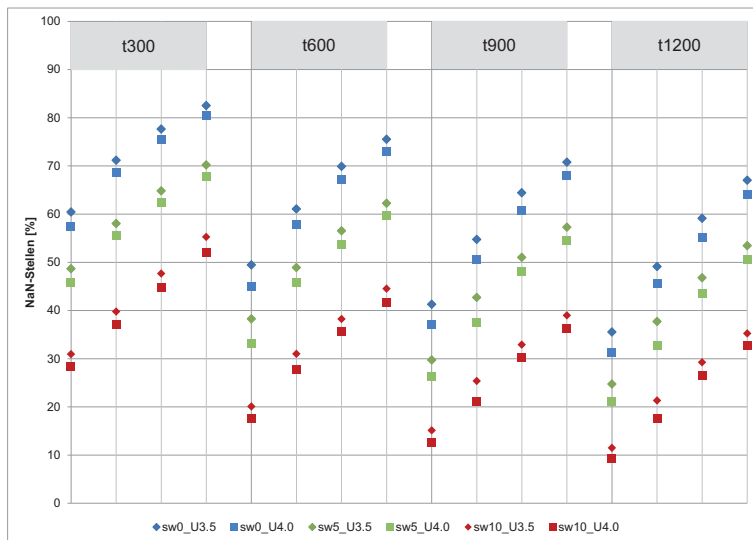


Abbildung 0-30: NaN-Stellen für GL45 – je Belichtungszeit erfolgt eine Schrittweise Erhöhung des Thresholds (A_Hornung 2015)

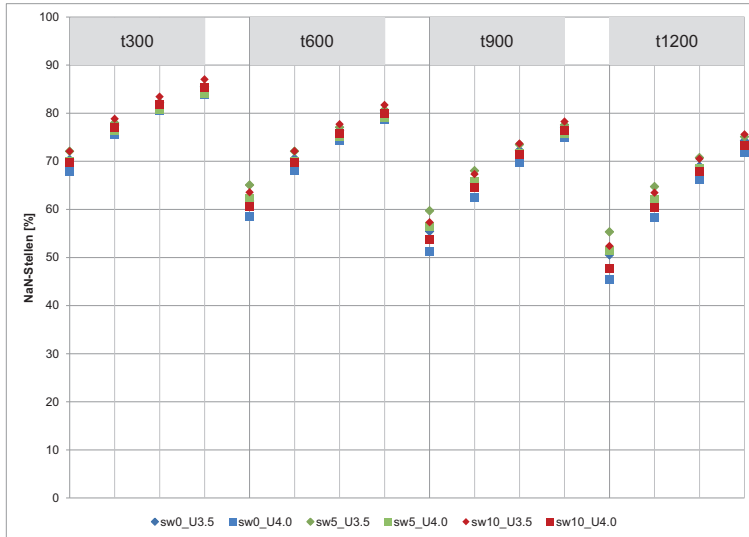


Abbildung 0-31: NaN-Stellen für GL90 – je Belichtungszeit erfolgt eine Schrittweise Erhöhung des Thresholds (A_Hornung 2015)

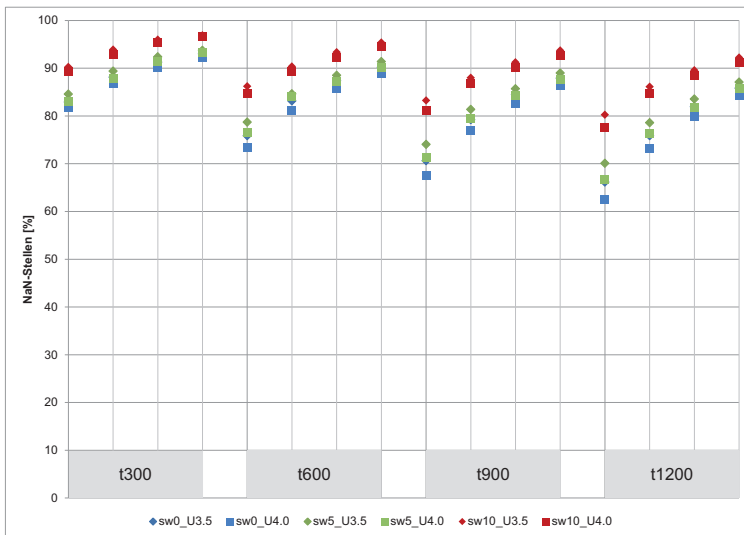


Abbildung 0-32: NaN-Stellen für GW0 – je Belichtungszeit erfolgt eine Schrittweise Erhöhung des Thresholds (A_Hornung 2015)

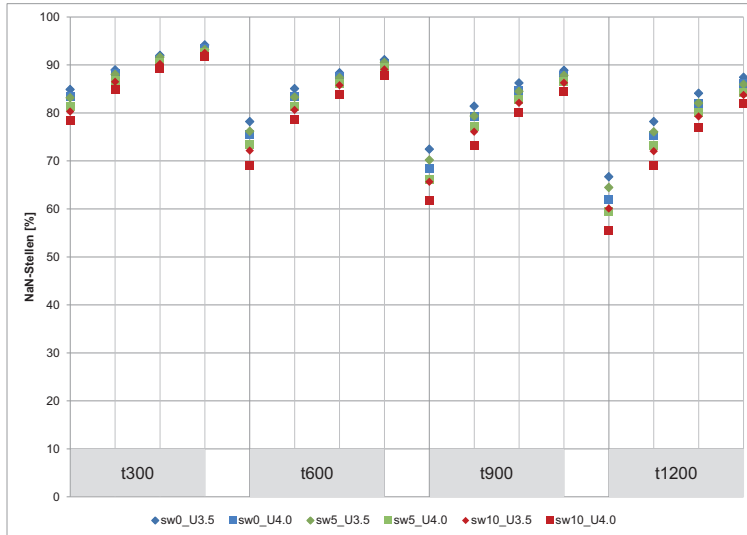


Abbildung 0-33: NaN-Stellen für GW45 – je Belichtungszeit erfolgt eine Schrittweise Erhöhung des Thresholds (A_Hornung 2015)

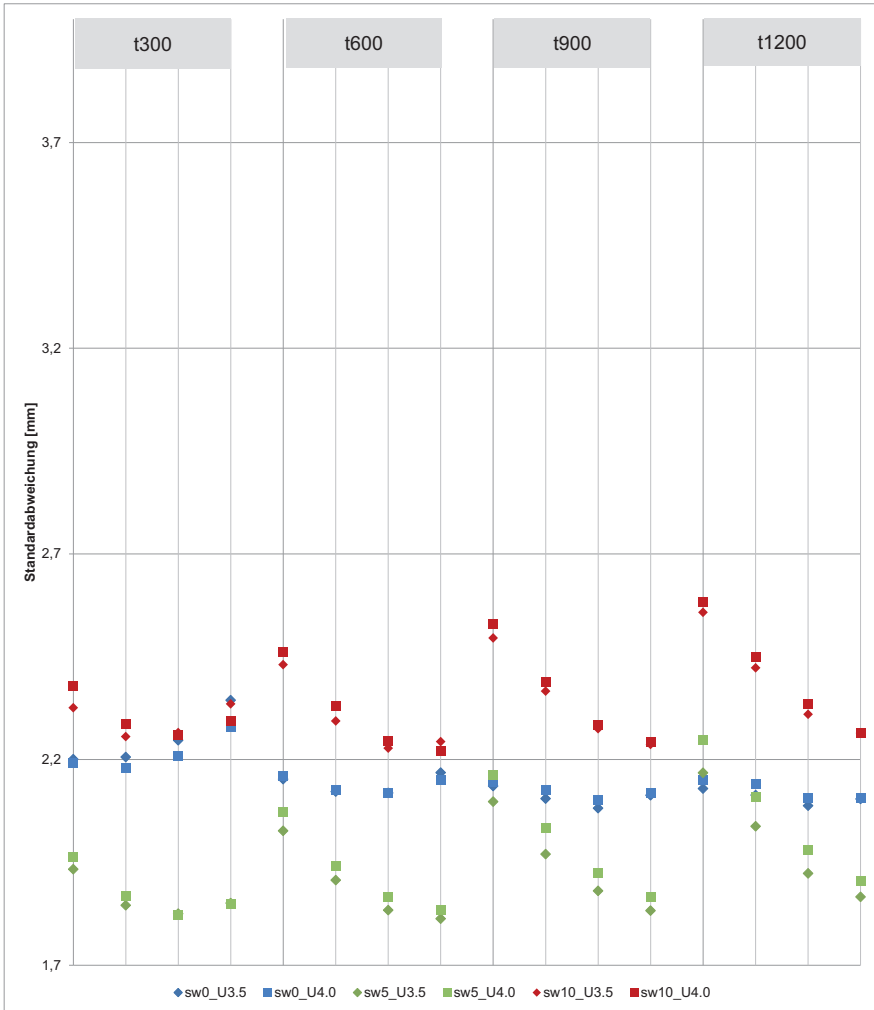


Abbildung 0-34: Standardabweichung konvexer Bereich für GL0 – je Belichtungszeit erfolgt eine Schrittweise Erhöhung des Thresholds (A_Hornung 2015)

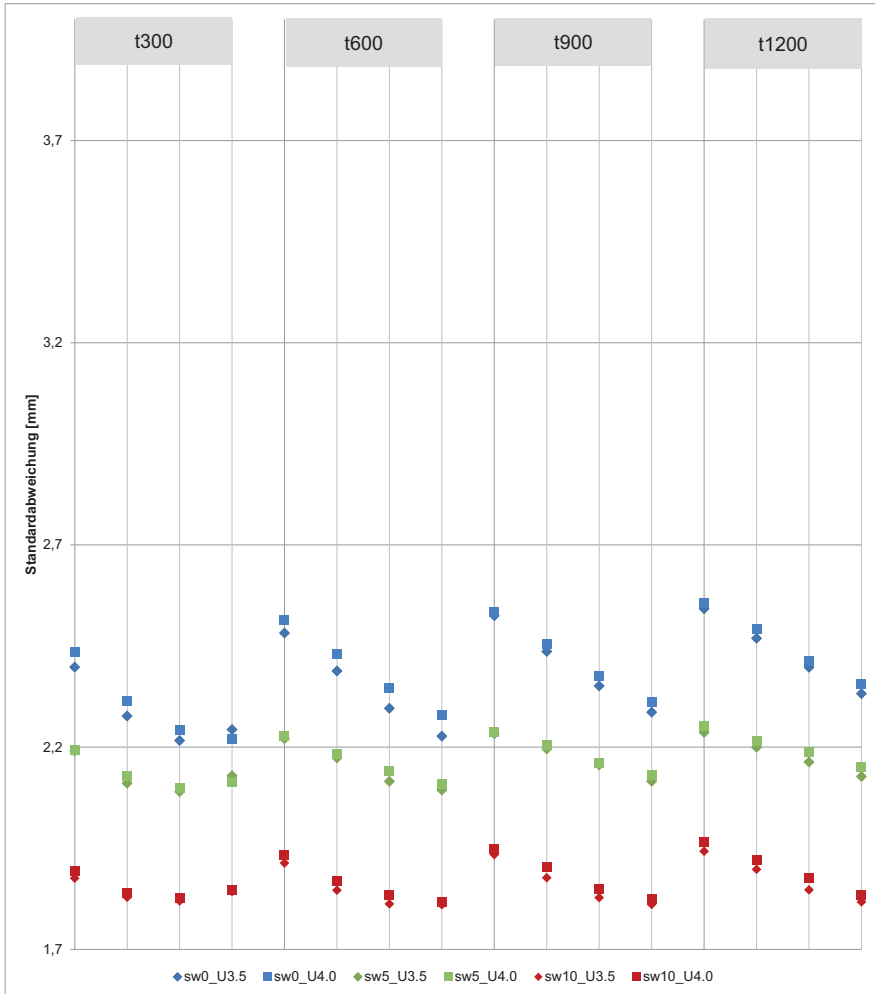


Abbildung 0-35: Standardabweichung konvexer Bereich für GL45 – je Belichtungszeit erfolgt eine Schrittweise Erhöhung des Thresholds (A_Hornung 2015)

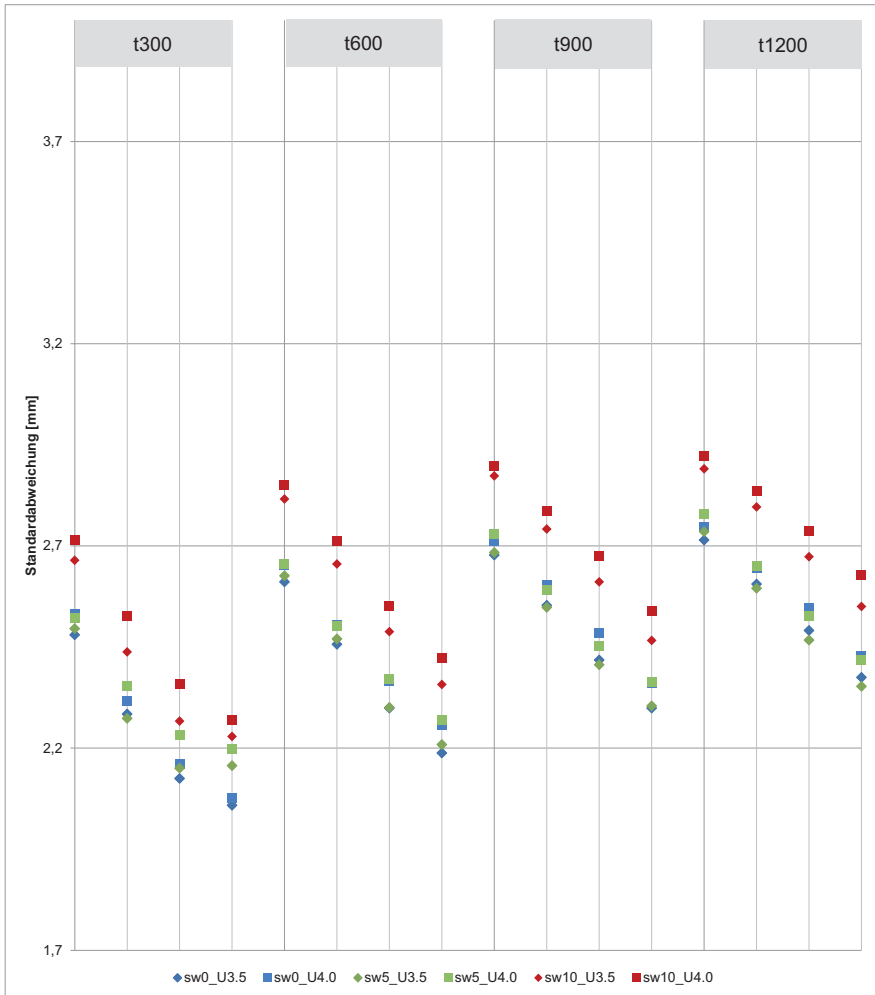


Abbildung 0-36: Standardabweichung konvexer Bereich für GL90 – je Belichtungszeit erfolgt eine Schrittweise Erhöhung des Thresholds (A_Hornung 2015)

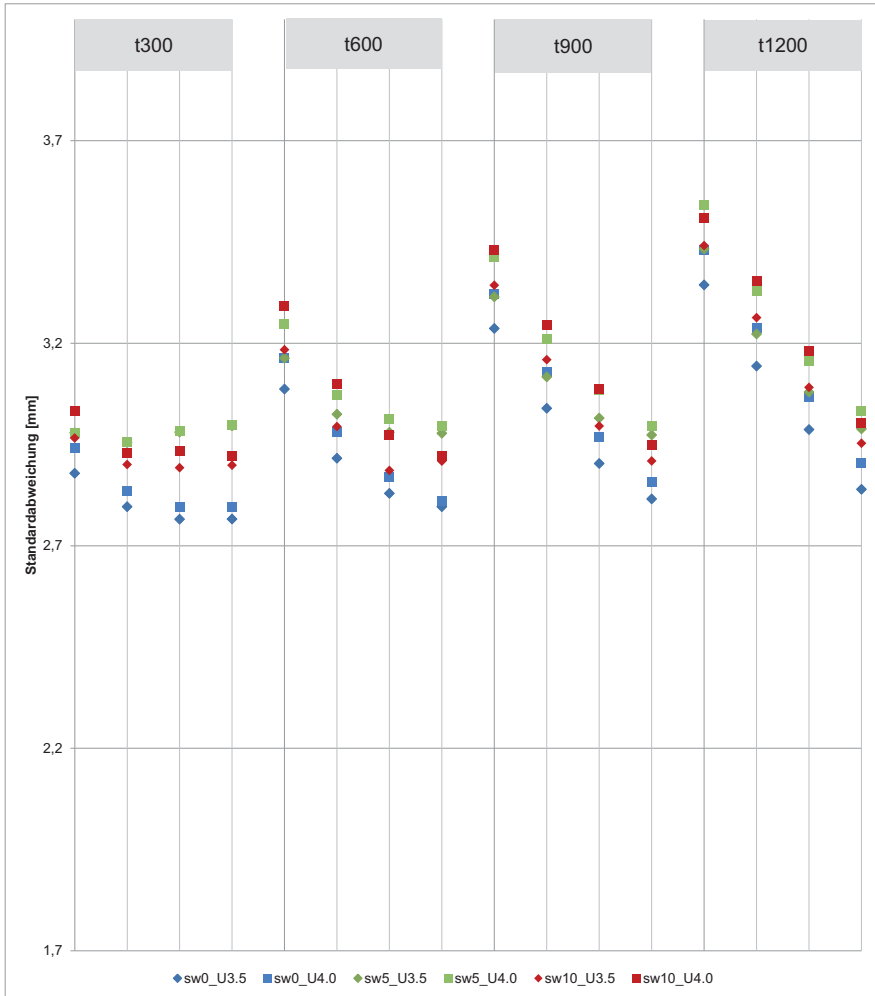


Abbildung 0-37: Standardabweichung konvexer Bereich für GW0 – je Belichtungszeit erfolgt eine Schrittweise Erhöhung des Thresholds (A_Hornung 2015)

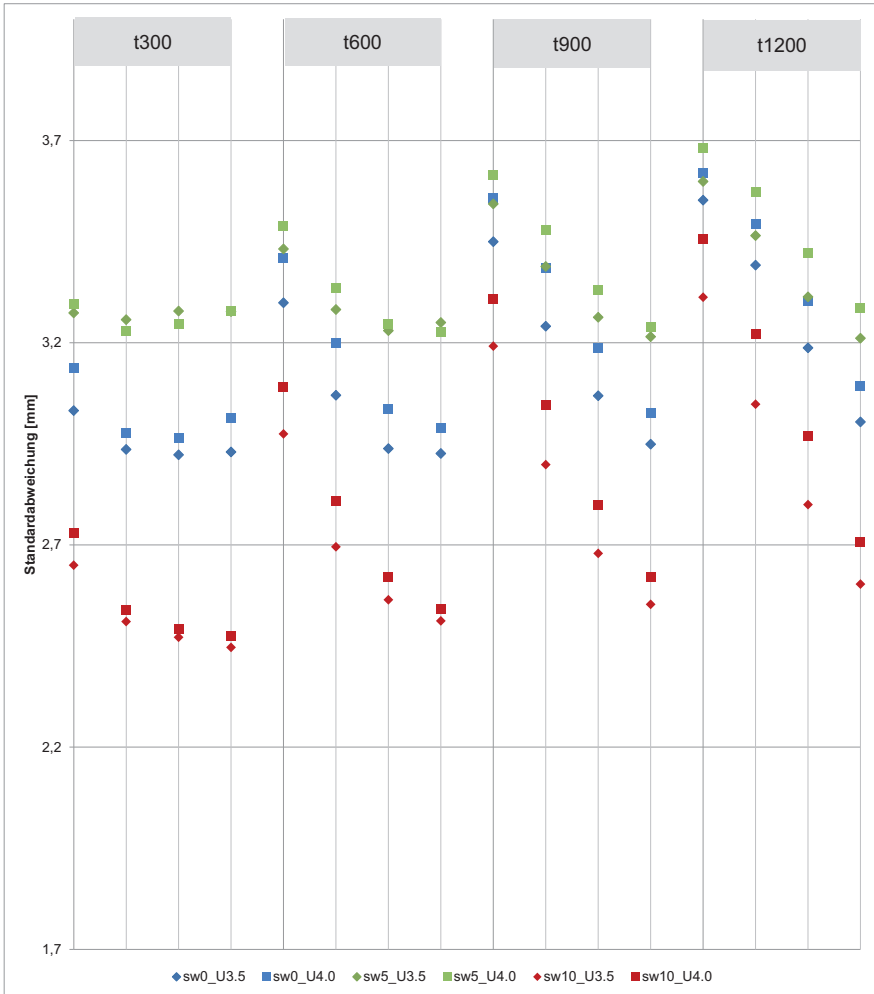


Abbildung 0-38: Standardabweichung konvexer Bereich für GW45 – je Belichtungszeit erfolgt eine Schrittweise Erhöhung des Thresholds (A_Horning 2015)

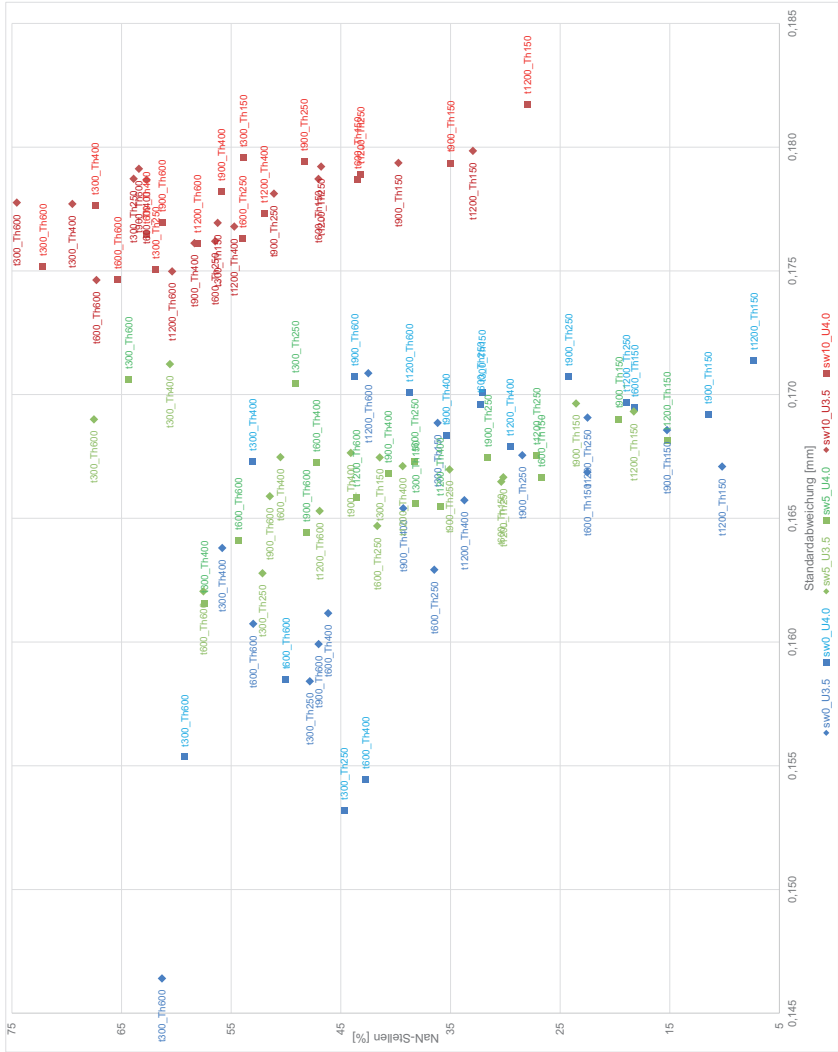


Abbildung 0-39: Parametervariation GL0 eben (A_Hornung 2015)

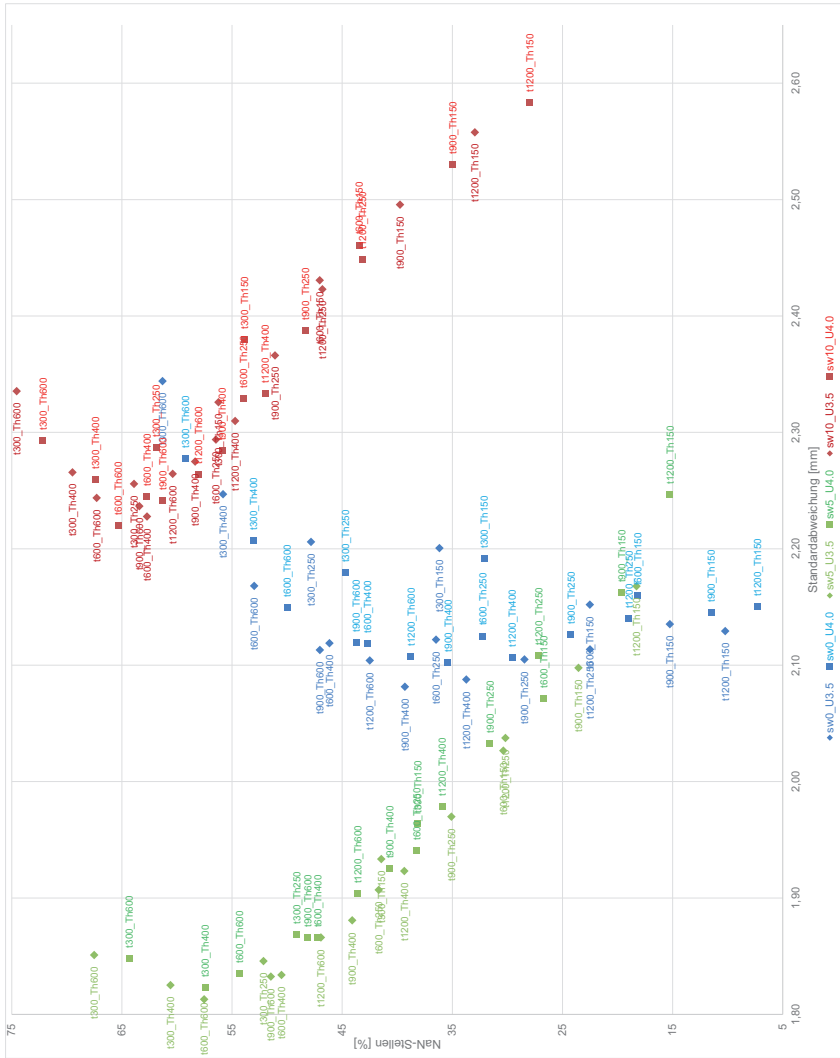


Abbildung 0-40: Parametervariation GL0 konvex (A_Hornung 2015)

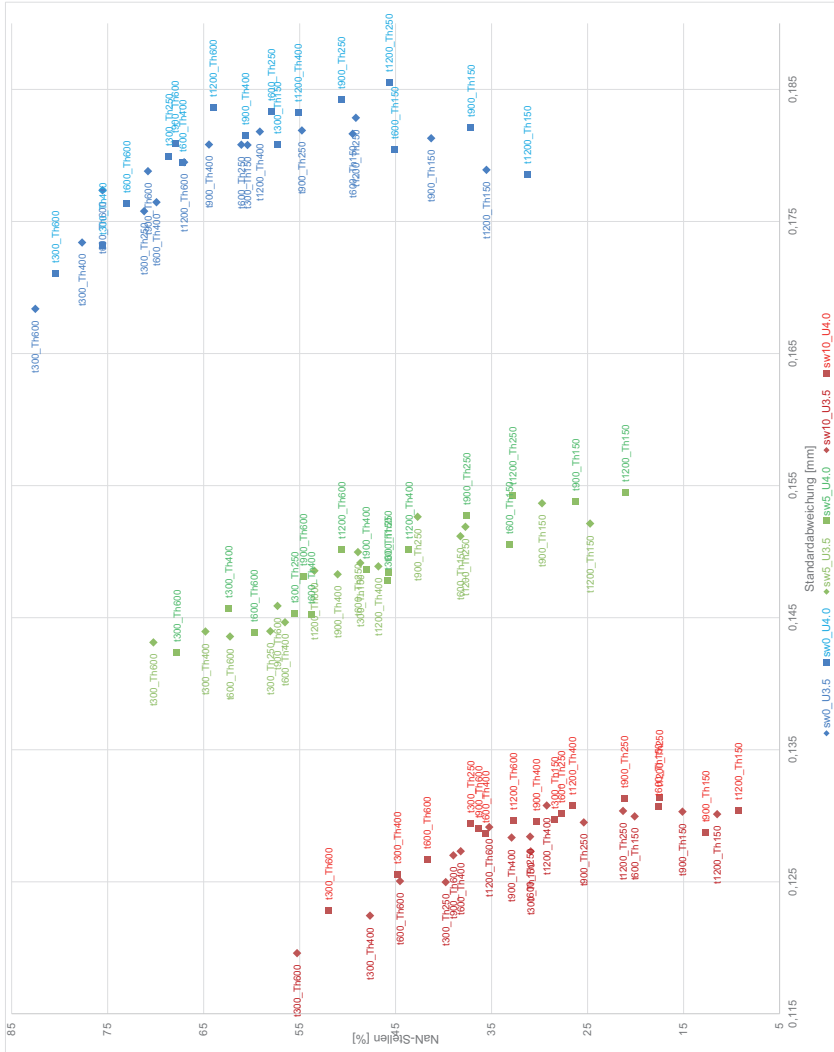


Abbildung 0-41: Parametervariation GL45 eben (A_Hornung 2015)

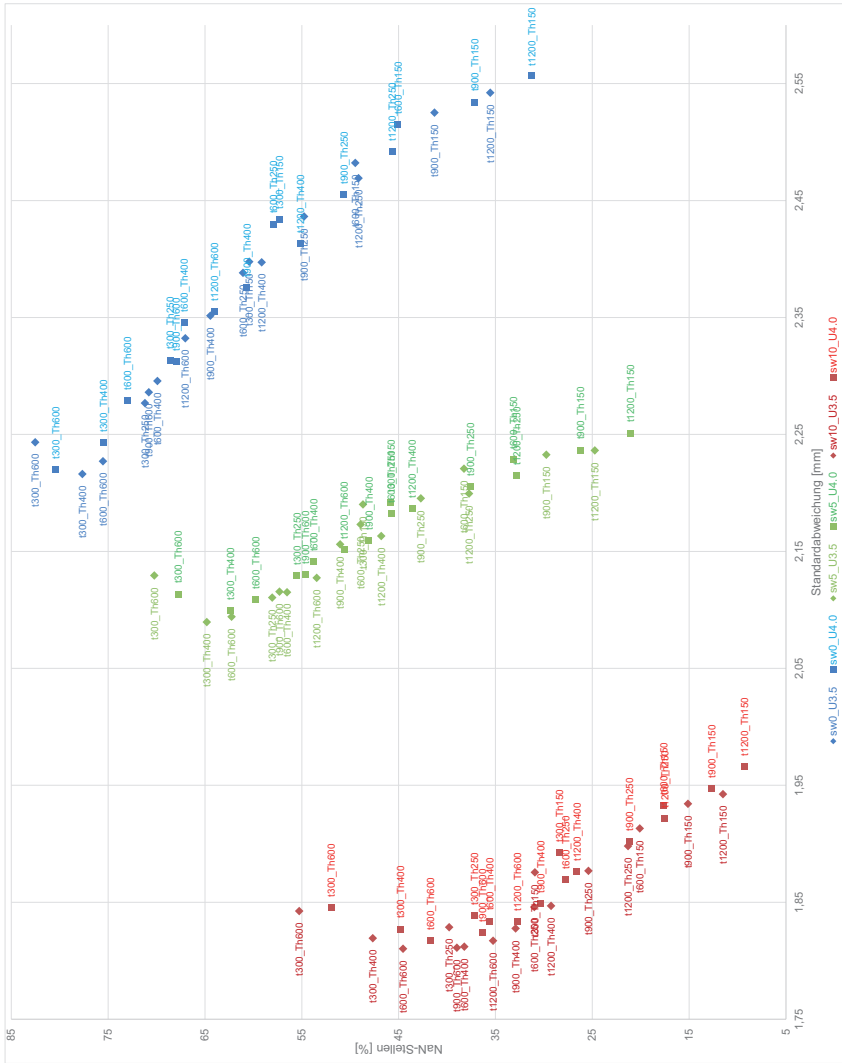


Abbildung 0-42: Parametervariation GL45 konvex (A_Hornung 2015)

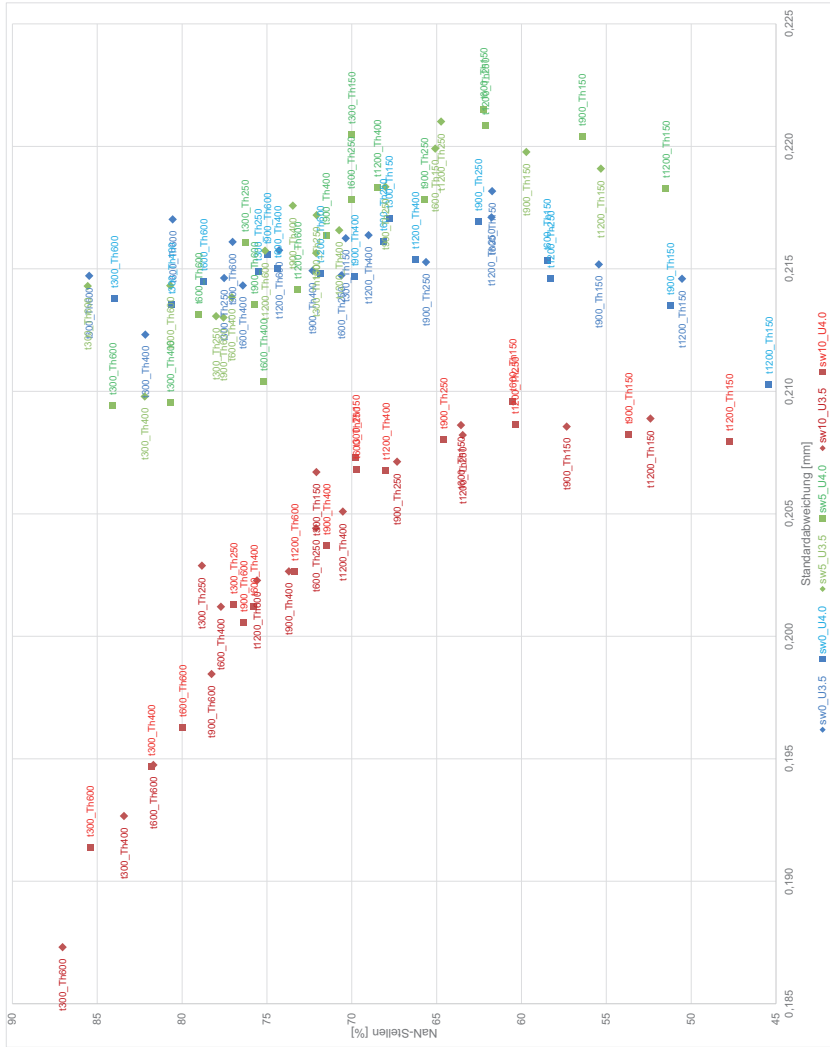


Abbildung 0-43: Parametervariation GL90 eben (A_Horning 2015)

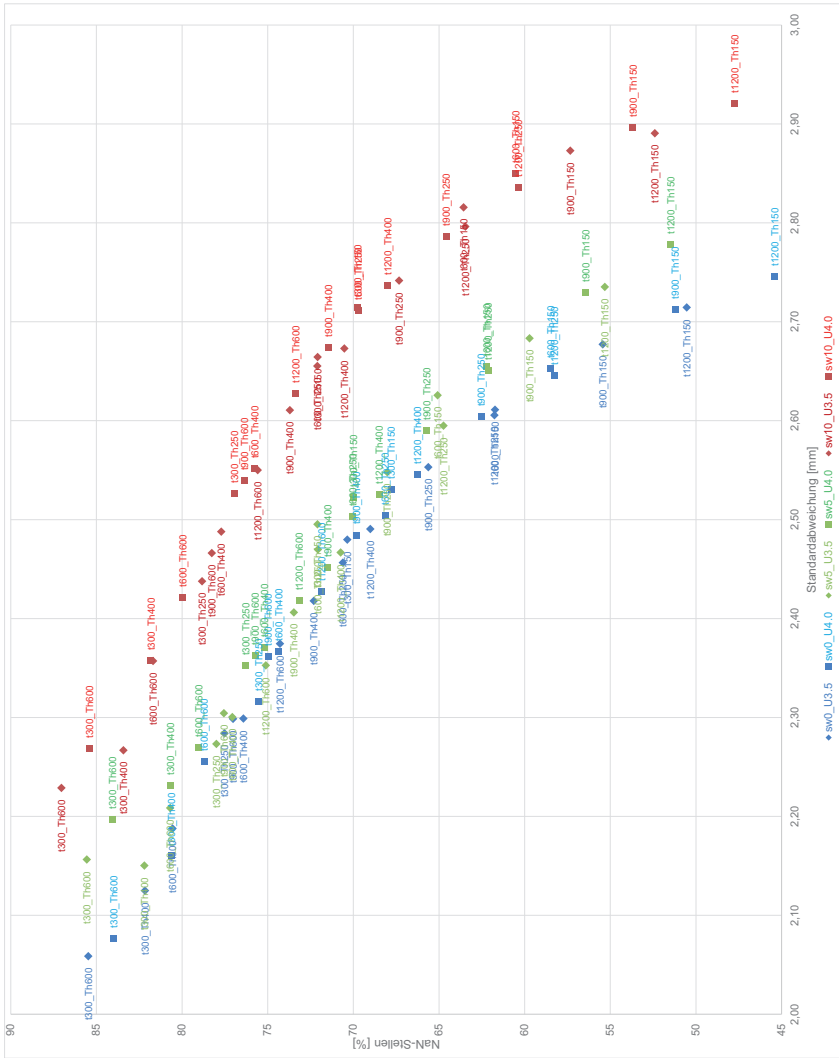


Abbildung 0-44: Parametervariation GL90 konvex (A_Hornung 2015)

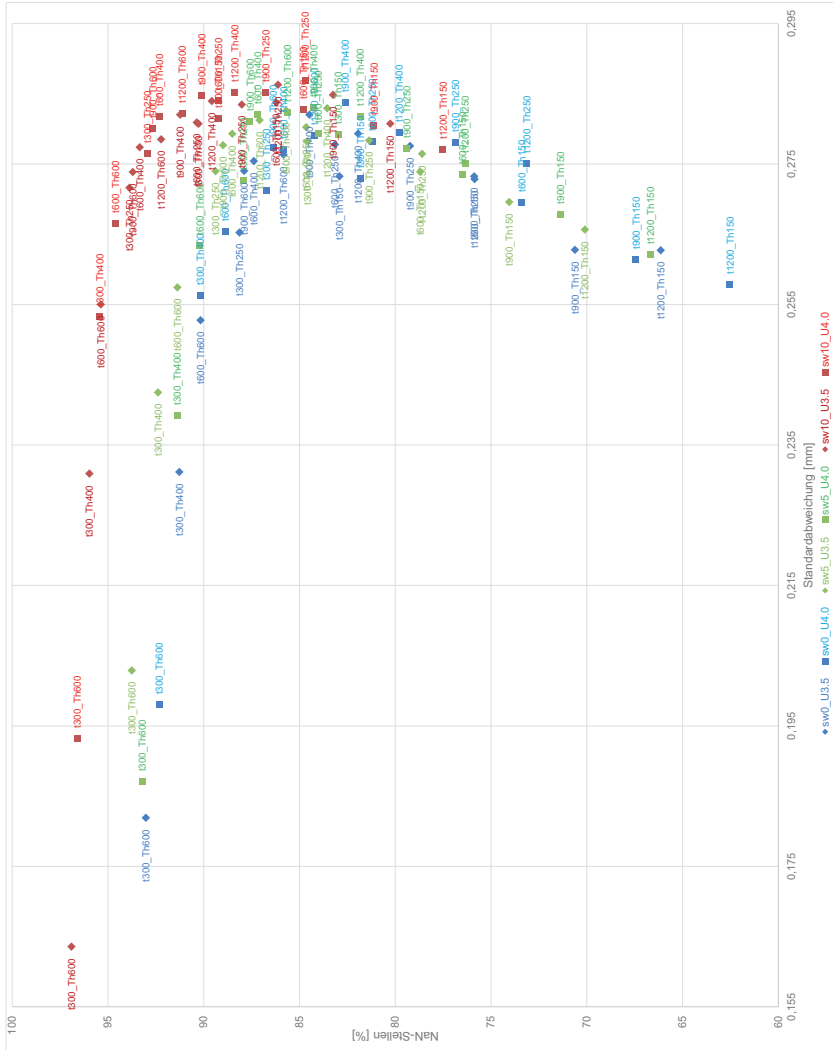


Abbildung 0-45: Parametervariation GW0 eben (A_Hornung 2015)

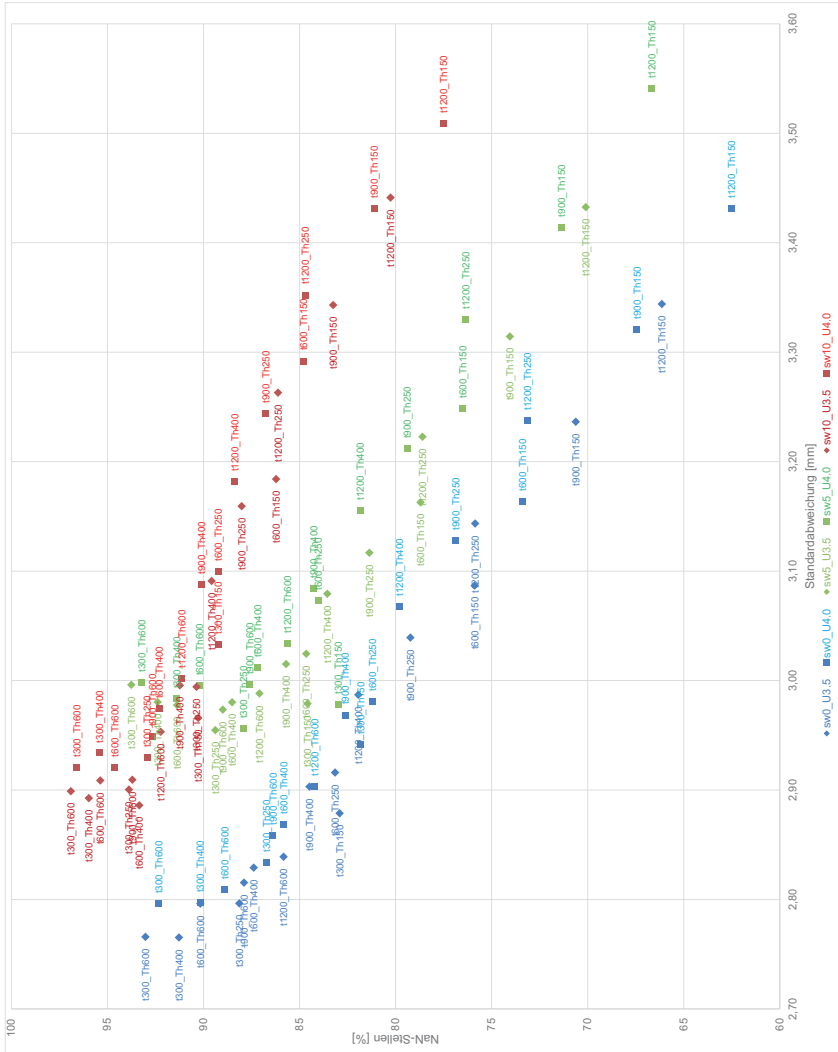


Abbildung 0-46: Parametervariation GW0 konvex (A_Hornung 2015)

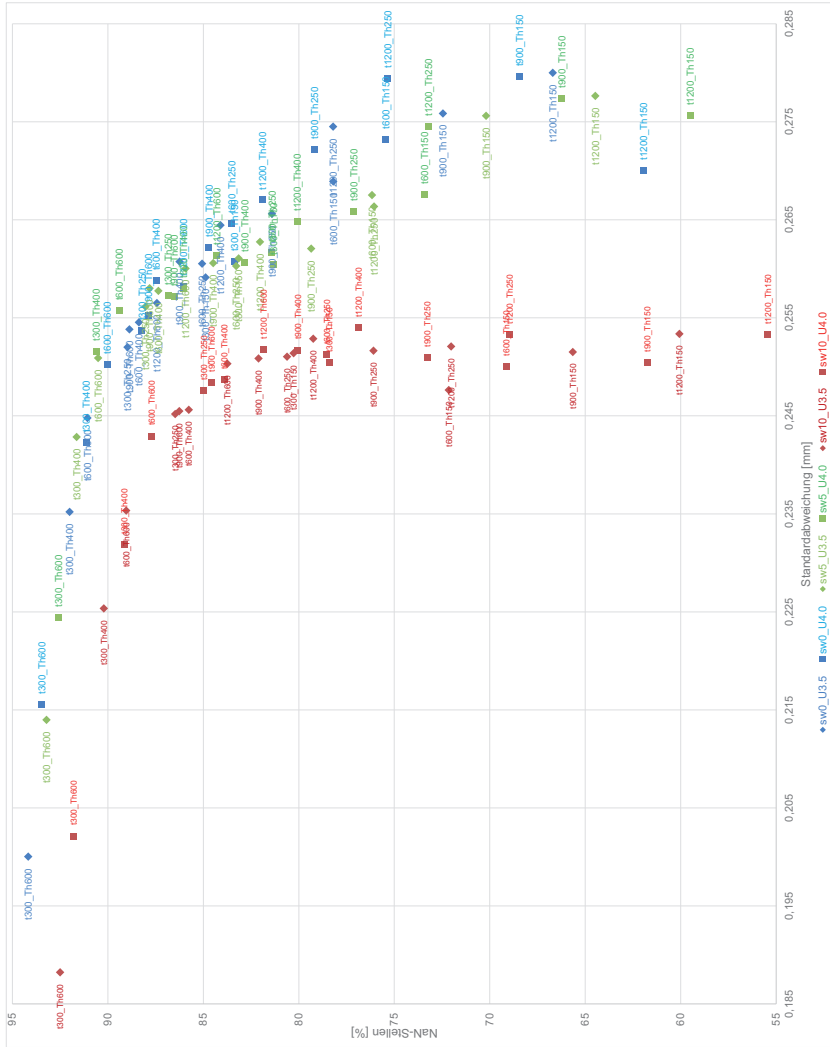


Abbildung 0-47: Parametervariation GW45 eben (A_Hornig 2015)

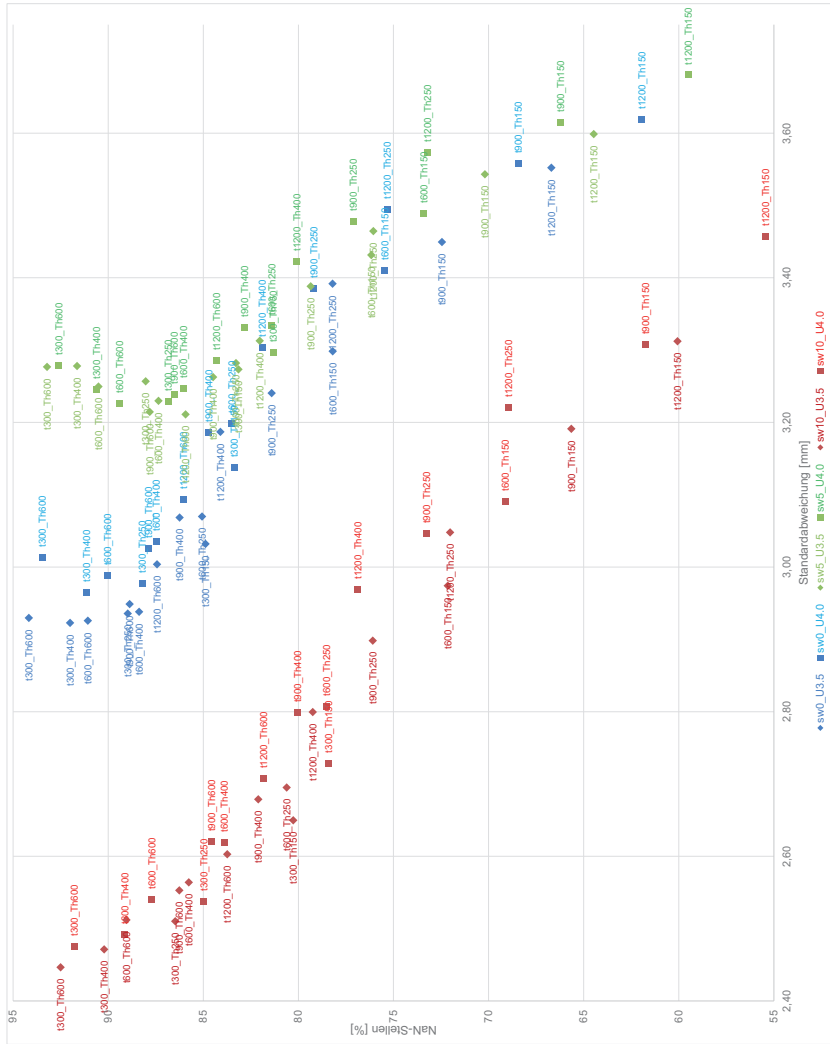
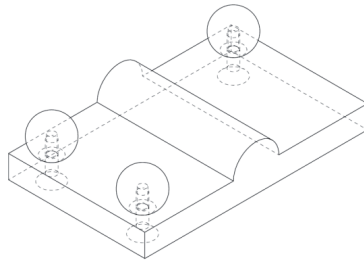


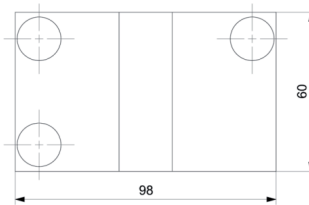
Abbildung 0-48: Parametervariation GW45 konvex (A_Hornung 2015)



a) Isometrische-Ansicht

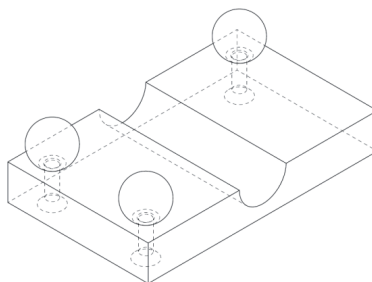


b) Seitenansicht



c) Draufsicht

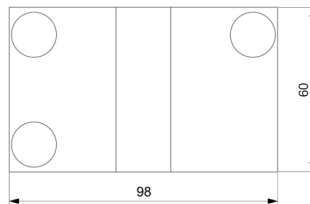
Abbildung 0-49: kalibriertes Werkstück konvex - CAD-Modell (A_Bartholmé 2015)



a) Isometrische-Ansicht

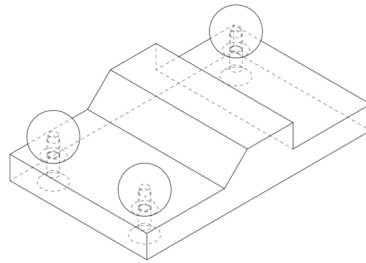


b) Seitenansicht



c) Draufsicht

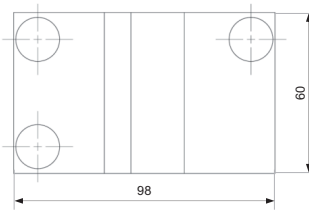
Abbildung 0-50: kalibriertes Werkstück konkav - CAD-Modell (A_Bartholmé 2015)



a) Isometrische-Ansicht

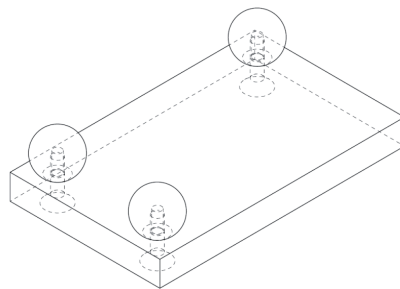


b) Seitenansicht



c) Draufsicht

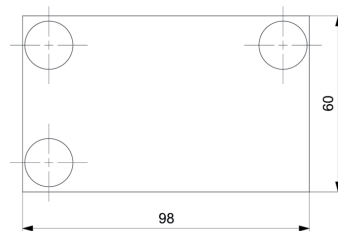
Abbildung 0-51: kalibriertes Werkstück Rampe - CAD-Modell (A_Bartholmé 2015)



a) Isometrische-Ansicht



b) Seitenansicht



c) Draufsicht

Abbildung 0-52: kalibriertes Werkstück plan - CAD-Modell (A_Bartholmé 2015)

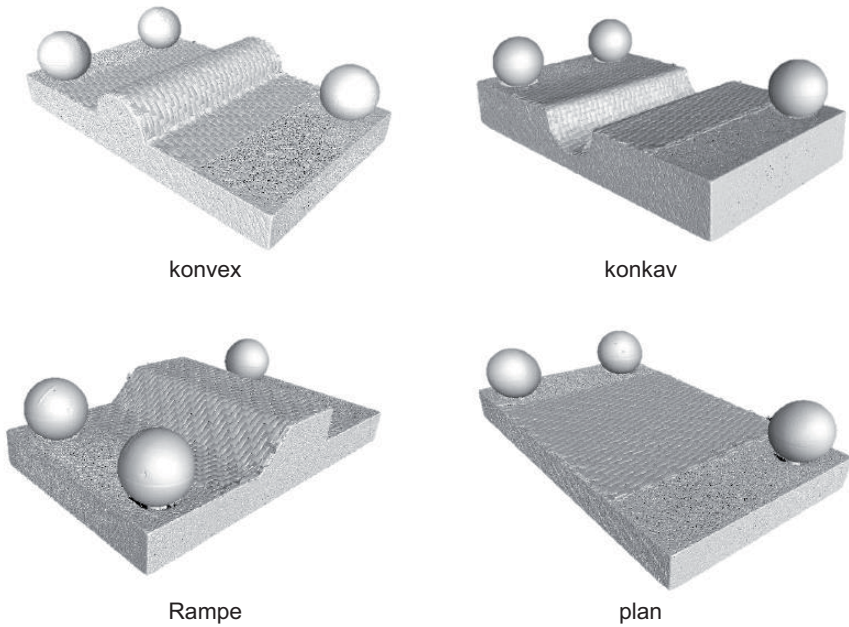


Abbildung 0-53: CT-Messung - kalibrierte Werkstücke (A_Bartholmé 2015)

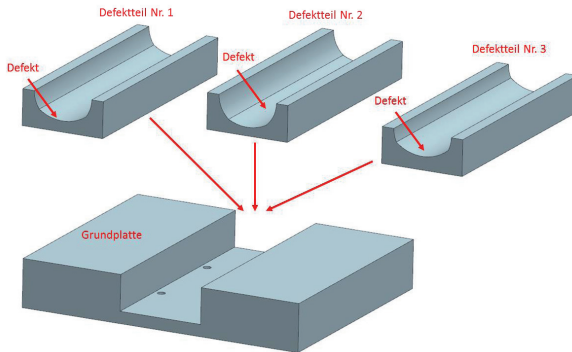


Abbildung 0-54: Grundgeometrie-Prüfkörper - Defektzonen konkav nach (A_Rupp 2015)

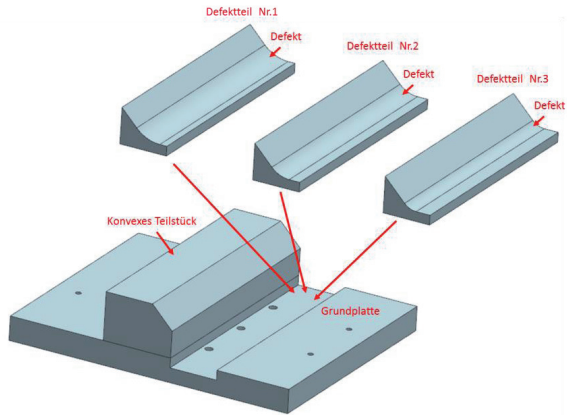


Abbildung 0-55: Grundgeometrie-Prüfkörper - Defektzonen Rampe nach (A_Rupp 2015)

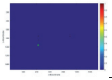
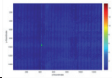
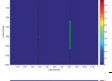
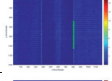
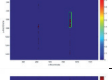
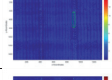
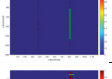
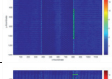
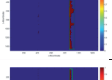
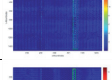
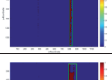
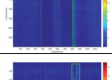
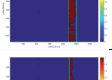
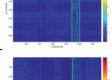
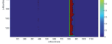
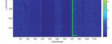
| Konvex | Defekt-Auswertung | Soll-/Ist-Darstellung mit Defekt | Flächeninhalt [px] | Schwerpunkt (X) [px] | Schwerpunkt (Y) [px] | Umfang [px] | Länge [px] | Breite [px] |
|-----------|---|---|--------------------|----------------------|----------------------|-------------|------------|-------------|
| GL0 | | | | | | | | |
| D1_GL0_o1 |  |  | 1.431 | 51.638 | 86.701 | 10.435 | 4.622 | 38.213 |
| D1_GL0_o2 |  |  | 35.541 | 112.304 | 51.473 | 124.916 | 7.137 | 671.181 |
| D2_GL0_o1 |  |  | 29.994 | 109.121 | 42.300 | 671.546 | 22.039 | 338.293 |
| D2_GL0_o2 |  |  | 37.097 | 112.430 | 48.248 | 205.401 | 7.200 | 674.768 |
| D3_GL0_o1 |  |  | 434.973 | 110.393 | 16.967 | 1.401.554 | 57.087 | 1.503.369 |
| D3_GL0_o2 |  |  | 300.035 | 111.902 | 12.035 | 422.995 | 24.369 | 1.448.116 |
| D4_GL0_o1 |  |  | 1.147.996 | 108.783 | 11.790 | 1.793.083 | 102.674 | 1.503.633 |
| D4_GL0_o2 |  |  | 726.866 | 109.826 | 9.590 | 1.402.664 | 50.543 | 1.528.613 |

Abbildung 0-56: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - konvex GL0

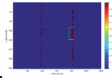
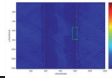
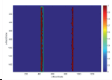
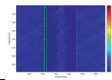
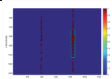
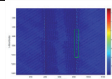
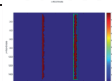
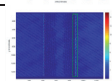
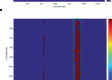
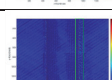
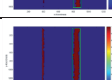
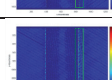

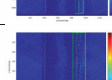
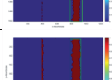
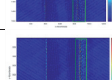
| Konvex | Defekt-Auswertung | Soll-/Ist-Darstellung mit Defekt | Flächeninhalt [px] | Schwerpunkt (X) [px] | Schwerpunkt (Y) [px] | Umfang [px] | Länge [px] | Breite [px] |
|-------------|---|---|--------------------|----------------------|----------------------|-------------|------------|-------------|
| GL45 | | | | | | | | |
| D1_GL45_o1 |  |  | 54.694 | 105.686 | 54.408 | 361.497 | 43.815 | 253.635 |
| D1_GL45_o2 |  |  | 364.941 | 51.780 | 11.847 | 2.423.654 | 28.504 | 1.750.238 |
| D2_GL45_o1 |  |  | 115.925 | 108.333 | 47.908 | 489.163 | 34.450 | 556.598 |
| D2_GL45_o2 |  |  | 494.475 | 110.729 | 11.633 | 1.480.673 | 40.415 | 1.581.634 |
| D3_GL45_o1 |  |  | 888.515 | 106.428 | 9.727 | 1.721.243 | 66.113 | 1.544.981 |
| D3_GL45_o2 |  |  | 1.182.317 | 109.518 | 11.992 | 1.355.248 | 85.400 | 1.698.583 |
| D4_GL45_o1 |  |  | 1.811.433 | 103.392 | 9.352 | 2.279.934 | 121.873 | 1.554.097 |
| D4_GL45_o2 |  |  | 1.908.440 | 106.848 | 11.372 | 3.029.869 | 130.550 | 1.654.131 |

Abbildung 0-57: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - konvex GL45

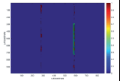
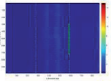
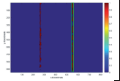
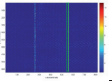
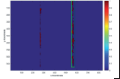
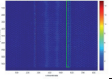
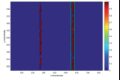
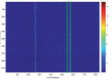
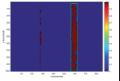
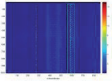
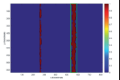
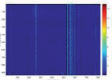
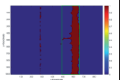
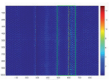
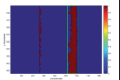
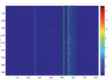
| Konvex | Defekt-Auswertung | Soll-/Ist-Darstellung mit Defekt | Flächeninhalt [px] | Schwerpunkt (X) [px] | Schwerpunkt (Y) [px] | Umfang [px] | Länge [px] | Breite [px] |
|------------|---|---|--------------------|----------------------|----------------------|-------------|------------|-------------|
| GL90 | | | | | | | | |
| D1_GL90_o1 |  |  | 46.862 | 108.312 | 46.909 | 190.080 | 8.968 | 478.183 |
| D1_GL90_o2 |  |  | 269.711 | 108.202 | 14.408 | 677.977 | 14.750 | 1.095.882 |
| D2_GL90_o1 |  |  | 201.717 | 111.279 | 13.999 | 901.085 | 15.900 | 1.033.873 |
| D2_GL90_o2 |  |  | 355.146 | 106.681 | 13.449 | 316.309 | 18.921 | 1.116.786 |
| D3_GL90_o1 |  |  | 972.343 | 108.767 | 17.056 | 882.497 | 50.470 | 1.027.444 |
| D3_GL90_o2 |  |  | 840.358 | 105.841 | 13.607 | 333.596 | 38.202 | 1.084.540 |
| D4_GL90_o1 |  |  | 1.748.253 | 92.898 | 13.004 | 1.339.374 | 90.974 | 1.111.740 |
| D4_GL90_o2 |  |  | 1.606.664 | 102.318 | 14.849 | 2.193.222 | 74.131 | 1.086.394 |

Abbildung 0-58: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - konvex GL90

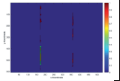
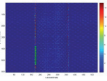
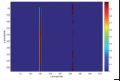
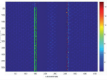
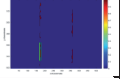
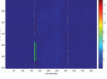
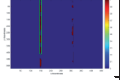
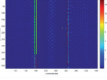
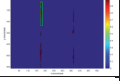
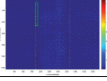
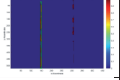
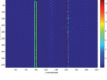
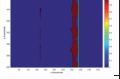
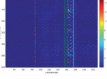
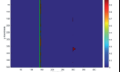
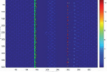
| Konvex | Defekt-Auswertung | Soll-/Ist-Darstellung mit Defekt | Flächeninhalt [px] | Schwerpunkt (X) [px] | Schwerpunkt (Y) [px] | Umfang [px] | Länge [px] | Breite [px] |
|------------|---|---|--------------------|----------------------|----------------------|-------------|------------|-------------|
| GW0 | | | | | | | | |
| D1_GW0_o1 |  |  | 40.745 | 51.544 | 93.746 | 118.913 | 7.158 | 146.904 |
| D1_GW0_o2 |  |  | 191.390 | 51.026 | 36.476 | 689.949 | 6.832 | 450.913 |
| D2_GW0_o1 |  |  | 40.745 | 51.544 | 93.746 | 118.913 | 7.158 | 146.904 |
| D2_GW0_o2 |  |  | 154.025 | 51.490 | 19.375 | 337.683 | 7.570 | 449.454 |
| D3_GW0_o1 |  |  | 46.662 | 51.388 | 12.561 | 260.288 | 8.762 | 188.705 |
| D3_GW0_o2 |  |  | 194.699 | 51.398 | 30.234 | 384.280 | 6.781 | 582.960 |
| D4_GW0_o1 |  |  | 1.087.629 | 105.505 | 21.717 | 591.604 | 34.248 | 685.644 |
| D4_GW0_o2 |  |  | 146.257 | 51.322 | 29.500 | 938.492 | 5.172 | 575.949 |

Abbildung 0-59: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - konvex GW0

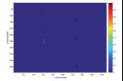
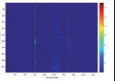
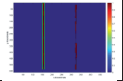
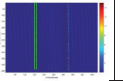
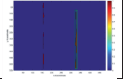
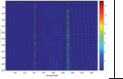
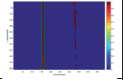
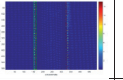
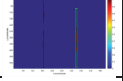
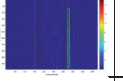
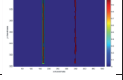
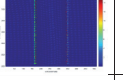
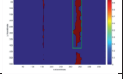
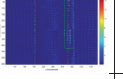
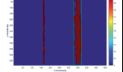
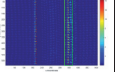
| Konvex | Defekt-Auswertung | Soll-/Ist-Darstellung mit Defekt | Flächeninhalt [px] | Schwerpunkt (X) [px] | Schwerpunkt (Y) [px] | Umfang [px] | Länge [px] | Breite [px] |
|-------------|---|---|--------------------|----------------------|----------------------|-------------|------------|-------------|
| GW45 | | | | | | | | |
| D1_GW45_o1 |  |  | 3.436 | 52.339 | 75.183 | 19.741 | 1.155 | 45.033 |
| D1_GW45_o2 |  |  | 301.697 | 52.513 | 23.202 | 520.376 | 8.103 | 613.722 |
| D2_GW45_o1 |  |  | 127.549 | 108.150 | 39.934 | 522.390 | 7.000 | 481.021 |
| D2_GW45_o2 |  |  | 302.776 | 51.018 | 25.085 | 615.049 | 8.792 | 637.682 |
| D3_GW45_o1 |  |  | 103.200 | 108.392 | 38.514 | 345.939 | 7.123 | 425.632 |
| D3_GW45_o2 |  |  | 276.867 | 52.700 | 22.707 | 282.336 | 8.744 | 649.394 |
| D4_GW45_o1 |  |  | 831.892 | 105.738 | 16.895 | 637.568 | 34.373 | 445.683 |
| D4_GW45_o2 |  |  | 1.219.651 | 106.852 | 23.207 | 331.470 | 35.176 | 621.043 |

Abbildung 0-60: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - konvex GW45

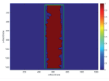
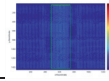
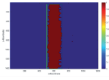
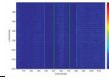
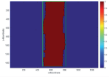
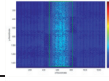
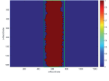
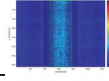
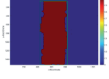
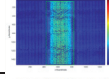
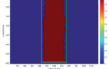
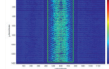
| Konkav | Defekt-Auswertung | Soll-/Ist-Darstellung mit Defekt | Flächeninhalt [px] | Schwerpunkt (X) [px] | Schwerpunkt (Y) [px] | Umfang [px] | Länge [px] | Breite [px] |
|------------|---|---|--------------------|----------------------|----------------------|-------------|------------|-------------|
| GL0 | | | | | | | | |
| D1_GL0_o1 |  |  | 3.451.947 | 67.657 | 12.527 | 1.269.918 | 225.383 | 1.567.086 |
| D1_GL0_o2 |  |  | 3.152.974 | 72.258 | 13.713 | 2.182.734 | 194.081 | 1.528.903 |
| D2_GL0_o1 |  |  | 4.910.298 | 63.172 | 8.812 | 1.317.037 | 328.411 | 1.697.884 |
| D2_GL0_o2 |  |  | 4.261.429 | 64.167 | 9.268 | 2.105.027 | 272.570 | 1.635.897 |
| D3_GL0_o1 |  |  | 6.001.542 | 59.192 | 14.259 | 1.503.244 | 396.533 | 1.677.398 |
| D3_GL0_o2 |  |  | 5.172.363 | 61.613 | 9.804 | 2.332.058 | 321.707 | 1.542.342 |

Abbildung 0-61: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - konkav GL0

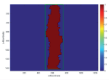
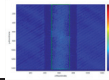
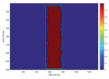
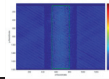
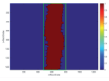
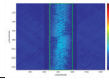
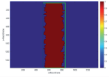
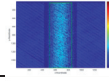
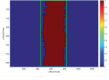
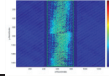
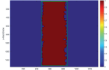
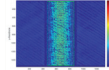
| Konkav | Defekt-Auswertung | Soll-/Ist-Darstellung mit Defekt | Flächeninhalt [px] | Schwerpunkt (X) [px] | Schwerpunkt (Y) [px] | Umfang [px] | Länge [px] | Breite [px] |
|-------------|---|---|--------------------|----------------------|----------------------|-------------|------------|-------------|
| GL45 | | | | | | | | |
| D1_GL45_o1 |  |  | 2.889.390 | 67.451 | 9.410 | 1.436.841 | 200.030 | 1.561.428 |
| D1_GL45_o2 |  |  | 3.379.903 | 70.028 | 13.722 | 1.819.440 | 235.941 | 1.725.617 |
| D2_GL45_o1 |  |  | 4.161.259 | 63.443 | 8.984 | 1.925.526 | 275.533 | 1.643.177 |
| D2_GL45_o2 |  |  | 4.619.938 | 63.316 | 11.221 | 906.141 | 326.105 | 1.778.292 |
| D3_GL45_o1 |  |  | 5.171.962 | 59.054 | 8.798 | 1.966.221 | 347.499 | 1.663.720 |
| D3_GL45_o2 |  |  | 5.862.420 | 60.578 | 10.405 | 1.465.548 | 403.041 | 1.732.117 |

Abbildung 0-62: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - konkav GL45

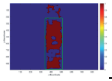
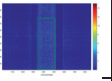
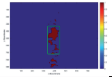
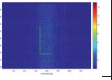
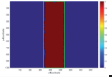
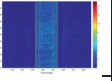
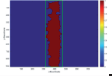
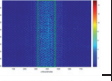
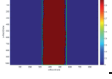
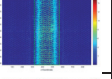
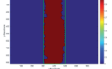
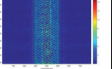
| Konkav | Defekt-Auswertung | Soll-/Ist-Darstellung mit Defekt | Flächeninhalt [px] | Schwerpunkt (X) [px] | Schwerpunkt (Y) [px] | Umfang [px] | Länge [px] | Breite [px] |
|-------------|---|---|--------------------|----------------------|----------------------|-------------|------------|-------------|
| GL90 | | | | | | | | |
| D1_GL90_o1 |  |  | 2.023.876 | 67.173 | 41.062 | 944.883 | 170.018 | 834.688 |
| D1_GL90_o2 |  |  | 414.606 | 71.998 | 55.041 | 429.956 | 88.527 | 350.606 |
| D2_GL90_o1 |  |  | 4.932.314 | 63.920 | 13.079 | 981.567 | 220.663 | 1.150.449 |
| D2_GL90_o2 |  |  | 2.780.827 | 67.598 | 15.233 | 1.377.452 | 123.201 | 978.376 |
| D3_GL90_o1 |  |  | 5.664.035 | 62.124 | 13.184 | 2.238.133 | 252.149 | 1.176.871 |
| D3_GL90_o2 |  |  | 4.711.897 | 63.999 | 14.741 | 846.448 | 197.617 | 1.019.744 |

Abbildung 0-63: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - konkav GL90

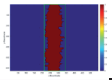
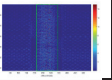
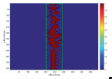
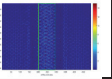
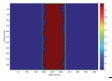
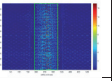
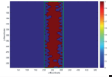
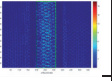
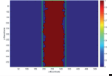
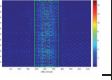
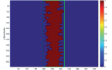
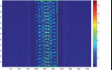
| Konkav | Defekt-Auswertung | Soll-/Ist-Darstellung mit Defekt | Flächeninhalt [px] | Schwerpunkt (X) [px] | Schwerpunkt (Y) [px] | Umfang [px] | Länge [px] | Breite [px] |
|------------|---|---|--------------------|----------------------|----------------------|-------------|------------|-------------|
| GW0 | | | | | | | | |
| D1_GW0_o1 |  |  | 3.662.857 | 66.434 | 20.999 | 1.121.725 | 107.386 | 697.729 |
| D1_GW0_o2 |  |  | 1.572.163 | 69.787 | 23.574 | 1.402.247 | 61.476 | 590.138 |
| D2_GW0_o1 |  |  | 4.769.589 | 63.560 | 22.328 | 1.392.926 | 129.749 | 680.587 |
| D2_GW0_o2 |  |  | 2.846.919 | 66.972 | 21.584 | 1.036.150 | 86.940 | 663.393 |
| D3_GW0_o1 |  |  | 4.900.825 | 63.747 | 22.166 | 1.101.426 | 131.323 | 681.776 |
| D3_GW0_o2 |  |  | 3.497.126 | 65.049 | 21.233 | 994.191 | 103.166 | 687.978 |

Abbildung 0-64: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - konkav GW0

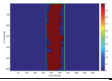
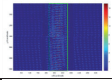
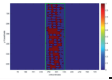
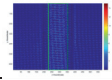
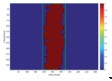
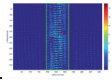
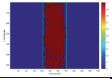
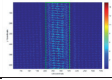
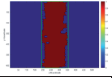
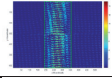
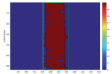
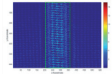
| Konkav | Defekt-Auswertung | Soll-/Ist-Darstellung mit Defekt | Flächeninhalt [px] | Schwerpunkt (X) [px] | Schwerpunkt (Y) [px] | Umfang [px] | Länge [px] | Breite [px] |
|-------------|---|---|--------------------|----------------------|----------------------|-------------|------------|-------------|
| GW45 | | | | | | | | |
| D1_GW45_o1 |  |  | 3.198.334 | 68.625 | 21.340 | 901.587 | 93.972 | 692.734 |
| D1_GW45_o2 |  |  | 1.790.104 | 66.997 | 20.822 | 2.129.127 | 96.913 | 701.485 |
| D2_GW45_o1 |  |  | 4.283.661 | 64.712 | 22.204 | 1.126.052 | 118.558 | 657.048 |
| D2_GW45_o2 |  |  | 4.598.491 | 63.709 | 20.380 | 1.539.613 | 138.950 | 711.024 |
| D3_GW45_o1 |  |  | 5.391.157 | 61.903 | 21.040 | 1.128.873 | 154.646 | 710.393 |
| D3_GW45_o2 |  |  | 4.582.060 | 63.709 | 20.513 | 1.449.194 | 139.071 | 714.640 |

Abbildung 0-65: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - konkav GW45

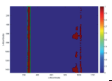
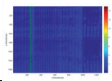
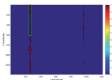
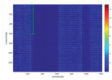
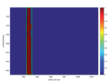
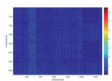
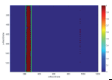
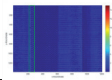
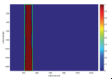
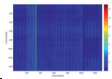
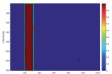
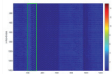
| Rampe | Defekt-Auswertung | Soll-/Ist-Darstellung mit Defekt | Flächeninhalt [px] | Schwerpunkt (X) [px] | Schwerpunkt (Y) [px] | Umfang [px] | Länge [px] | Breite [px] |
|------------|---|---|--------------------|----------------------|----------------------|-------------|------------|-------------|
| GL0 | | | | | | | | |
| D1_GL0_o1 |  |  | 519.557 | 31.905 | 9.286 | 999.611 | 36.275 | 1.739.232 |
| D1_GL0_o2 |  |  | 101.814 | 31.955 | 3.667 | 197.546 | 22.188 | 760.416 |
| D2_GL0_o1 |  |  | 1.015.990 | 30.089 | 9.347 | 2.941.047 | 70.558 | 1.703.150 |
| D2_GL0_o2 |  |  | 984.413 | 29.567 | 9.810 | 2.116.688 | 62.893 | 1.576.570 |
| D3_GL0_o1 |  |  | 1.596.587 | 27.186 | 9.209 | 2.977.245 | 109.019 | 1.751.321 |
| D3_GL0_o2 |  |  | 1.658.022 | 26.201 | 9.305 | 2.262.625 | 106.795 | 1.624.176 |

Abbildung 0-66: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - Rampe GL0

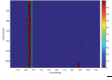
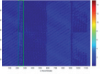
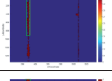
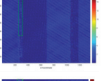
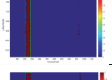
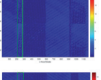
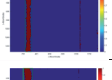
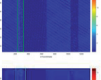
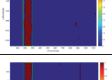
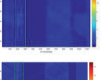
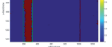
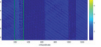
| Rampe | Defekt-Auswertung | Soll-/Ist-Darstellung mit Defekt | Flächeninhalt [px] | Schwerpunkt (X) [px] | Schwerpunkt (Y) [px] | Umfang [px] | Länge [px] | Breite [px] |
|-------------|---|---|--------------------|----------------------|----------------------|-------------|------------|-------------|
| GL45 | | | | | | | | |
| D1_GL45_o1 |  |  | 527.467 | 30.513 | 9.811 | 1.128.965 | 37.564 | 1.454.378 |
| D1_GL45_o2 |  |  | 211.822 | 30.833 | 4.997 | 1.264.400 | 35.856 | 963.977 |
| D2_GL45_o1 |  |  | 942.840 | 29.526 | 10.375 | 1.678.611 | 59.206 | 1.536.385 |
| D2_GL45_o2 |  |  | 1.018.521 | 28.536 | 8.610 | 3.139.925 | 73.522 | 1.765.122 |
| D3_GL45_o1 |  |  | 1.623.328 | 25.901 | 10.182 | 1.923.758 | 98.344 | 1.518.057 |
| D3_GL45_o2 |  |  | 1.658.002 | 25.067 | 8.849 | 1.827.877 | 113.160 | 1.673.330 |

Abbildung 0-67: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - Rampe GL45

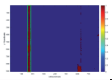
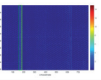
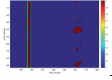
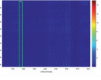
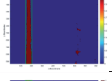
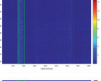
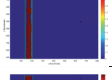
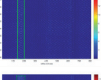
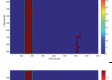
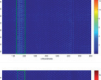


| Rampe | Defekt-Auswertung | Soll-/Ist-Darstellung mit Defekt | Flächeninhalt [px] | Schwerpunkt (X) [px] | Schwerpunkt (Y) [px] | Umfang [px] | Länge [px] | Breite [px] |
|-------------|---|---|--------------------|----------------------|----------------------|-------------|------------|-------------|
| GL90 | | | | | | | | |
| D1_GL90_o1 |  |  | 445.435 | 32.001 | 15.435 | 1.192.979 | 19.666 | 1.044.970 |
| D1_GL90_o2 |  |  | 477.829 | 31.609 | 15.674 | 598.145 | 22.417 | 1.076.998 |
| D2_GL90_o1 |  |  | 1.055.236 | 29.493 | 14.958 | 1.560.991 | 46.257 | 1.079.655 |
| D2_GL90_o2 |  |  | 990.492 | 28.732 | 14.830 | 345.890 | 44.708 | 1.060.682 |
| D3_GL90_o1 |  |  | 1.628.254 | 27.386 | 17.167 | 1.466.149 | 68.651 | 1.057.752 |
| D3_GL90_o2 |  |  | 1.484.749 | 28.004 | 14.711 | 1.880.329 | 62.816 | 1.077.418 |

Abbildung 0-68: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - Rampe GL90

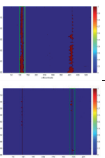
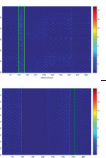
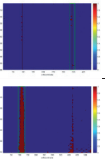
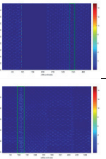
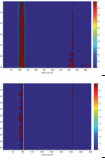
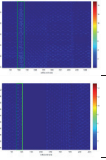
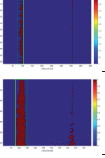
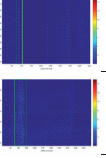
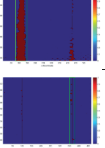
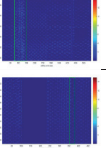
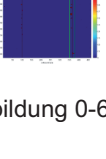

| Rampe | Defekt-Auswertung | Soll-/Ist-Darstellung mit Defekt | Flächeninhalt [px] | Schwerpunkt (X) [px] | Schwerpunkt (Y) [px] | Umfang [px] | Länge [px] | Breite [px] |
|------------|---|---|--------------------|----------------------|----------------------|-------------|------------|-------------|
| GW0 | | | | | | | | |
| D1_GW0_o1 |  |  | 529.196 | 30.859 | 24.220 | 1.001.327 | 18.215 | 717.042 |
| D1_GW0_o2 |  |  | 73.460 | 123.251 | 24.648 | 307.966 | 9.529 | 588.382 |
| D2_GW0_o1 |  |  | 984.517 | 28.848 | 23.702 | 1.197.925 | 29.848 | 677.226 |
| D2_GW0_o2 |  |  | 411.604 | 28.518 | 25.756 | 867.740 | 17.012 | 537.019 |
| D3_GW0_o1 |  |  | 1.762.400 | 25.160 | 23.583 | 1.515.808 | 53.731 | 692.108 |
| D3_GW0_o2 |  |  | 83.065 | 123.040 | 22.377 | 335.552 | 11.744 | 581.131 |

Abbildung 0-69: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - Rampe GW0

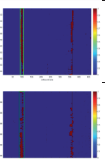
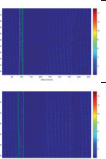
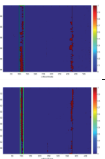
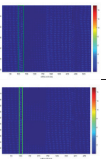
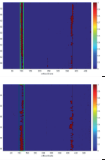
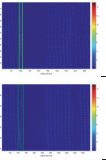
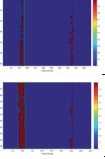
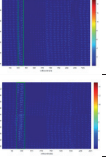
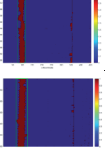
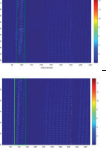
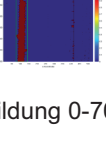
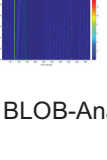
| Rampe | Defekt-Auswertung | Soll-/Ist-Darstellung mit Defekt | Flächeninhalt [px] | Schwerpunkt (X) [px] | Schwerpunkt (Y) [px] | Umfang [px] | Länge [px] | Breite [px] |
|-------------|---|---|--------------------|----------------------|----------------------|-------------|------------|-------------|
| GW45 | | | | | | | | |
| D1_GW45_o1 |  |  | 382.401 | 31.931 | 22.392 | 520.757 | 11.883 | 531.951 |
| D1_GW45_o2 |  |  | 352.318 | 30.418 | 26.732 | 892.696 | 20.179 | 673.871 |
| D2_GW45_o1 |  |  | 370.806 | 32.078 | 21.716 | 336.646 | 12.012 | 566.172 |
| D2_GW45_o2 |  |  | 352.318 | 30.418 | 26.732 | 892.696 | 20.179 | 673.871 |
| D3_GW45_o1 |  |  | 1.223.402 | 28.912 | 25.506 | 457.112 | 31.031 | 616.027 |
| D3_GW45_o2 |  |  | 1.637.037 | 25.141 | 22.247 | 1.140.501 | 46.710 | 690.507 |

Abbildung 0-70: BLOB-Analyse Geometrie-Prüfkörper - Rampe GW45

Gelege

GL 0°

| K_Winkel | B_Winkel | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|----------|----------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| 0 | | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | | x | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | | 0 | x | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | | 0 | 0 | x | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 40 | | 0 | 0 | 0 | x | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 50 | | 0 | 0 | 0 | 0 | x | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 60 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | x | x | x | 0 | 0 | 0 |
| 70 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | x | x | x | 0 | 0 |
| 80 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | x | x | x | 0 |
| 90 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | x | x | x |
| 100 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | x | x |

GL 45°

| K_Winkel | B_Winkel | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|----------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|
| 0 | | x | x | 0 | 150 | 183 | 0 | 516 | 0 | 1000 | 422 | 0 |
| 10 | | x | x | x | 614 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | | 0 | x | x | x | 273 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | | 311 | 455 | x | x | x | 156 | 144 | 0 | 204 | 0 | 0 |
| 40 | | 302 | 100 | 0 | x | x | x | 154 | 0 | 207 | 0 | 0 |
| 50 | | 0 | 0 | 0 | 212 | x | x | x | 230 | 203 | 239 | 0 |
| 60 | | 0 | 0 | 0 | 190 | 397 | x | x | x | 222 | 0 | N/A |
| 70 | | 0 | 0 | 0 | 715 | 194 | 397 | x | x | x | N/A | N/A |
| 80 | | 0 | 0 | 96 | 430 | 278 | 351 | 286 | x | x | x | N/A |
| 90 | | 0 | 0 | 113 | 250 | 141 | 0 | 244 | N/A | x | x | x |
| 100 | | 336 | 0 | 100 | 156 | 160 | 370 | N/A | N/A | N/A | x | x |

GL 90°

| K_Winkel | B_Winkel | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|----------|----------|------|-----|-----|-----|------|------|------|-----|-----|-----|-----|
| 0 | | x | x | 339 | 255 | 172 | 1599 | 1696 | 299 | 97 | 0 | 0 |
| 10 | | x | x | x | 820 | 1566 | 592 | 495 | 371 | 93 | 0 | 0 |
| 20 | | 131 | x | x | x | 581 | 345 | 475 | 454 | 168 | 0 | 0 |
| 30 | | -417 | 0 | x | x | x | 535 | 136 | 164 | 0 | 137 | 0 |
| 40 | | 0 | 0 | 0 | x | x | x | 164 | 0 | 0 | 158 | 0 |
| 50 | | 0 | 0 | 0 | 0 | x | x | x | 0 | 102 | 178 | 486 |
| 60 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | x | x | x | 92 | 0 | 272 |
| 70 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 380 | x | x | x | 0 | N/A |
| 80 | | 0 | 0 | 0 | 129 | 399 | 0 | 0 | x | x | x | N/A |
| 90 | | 0 | 207 | 0 | 310 | 162 | 0 | 318 | 0 | x | x | x |
| 100 | | 181 | 353 | 589 | 339 | 162 | 0 | 0 | N/A | N/A | x | x |

Gewebe

GW 0°

| K_Winkel | B_Winkel | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|----------|----------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|
| 0 | | x | x | 0 | 308 | 1491 | 1795 | 2763 | 311 | 0 | 526 | 118 |
| 10 | | x | x | x | 1678 | 1752 | 1473 | 447 | 0 | 0 | 16 | 8 |
| 20 | | 0 | x | x | x | 515 | 324 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 |
| 30 | | 0 | 1781 | x | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 | 19 |
| 40 | | 1414 | 1995 | 893 | x | x | x | 0 | 0 | 11 | 22 | 276 |
| 50 | | 1369 | 787 | 120 | 97 | x | x | x | 0 | 30 | 122 | 265 |
| 60 | | 451 | 122 | 0 | 91 | 124 | x | x | x | 0 | 268 | N/A |
| 70 | | 0 | 54 | 237 | 525 | 0 | 15 | x | x | x | N/A | N/A |
| 80 | | 0 | 124 | 116 | 1319 | 15 | 18 | 0 | x | x | x | N/A |
| 90 | | 0 | 62 | 1010 | 287 | 619 | 129 | 325 | N/A | x | x | x |
| 100 | | 0 | 0 | 330 | 936 | 541 | 860 | N/A | N/A | N/A | x | x |

GW 45°

| K_Winkel | B_Winkel | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|----------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| 0 | | x | x | 0 | 0 | 0 | 1563 | 1448 | 1540 | 1516 | 164 | 0 |
| 10 | | x | x | x | 0 | 1634 | 1459 | 1386 | 1470 | 1924 | 96 | 0 |
| 20 | | 50 | x | x | x | 1403 | 1368 | 1536 | 1893 | 1521 | 92 | N/A |
| 30 | | 0 | 0 | x | x | x | 1549 | 1893 | 736 | 840 | 203 | N/A |
| 40 | | 0 | 0 | 1243 | x | x | x | 1822 | 742 | 458 | N/A | N/A |
| 50 | | 0 | 997 | 1246 | 1535 | x | x | x | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 60 | | 1009 | 1185 | 1488 | 1838 | 750 | x | x | x | N/A | N/A | N/A |
| 70 | | 1131 | 1467 | 1847 | 1784 | 739 | 476 | x | x | x | N/A | N/A |
| 80 | | 1391 | 1828 | 2297 | 798 | 414 | 472 | N/A | x | x | x | N/A |
| 90 | | 1799 | 1806 | 1483 | 369 | 213 | 296 | N/A | N/A | x | x | x |
| 100 | | 1618 | 1504 | 1148 | 635 | 115 | N/A | N/A | N/A | N/A | x | x |

Abbildung 0-71: Auswertung der detektierten Defektbreite - konvex; Defekt D1 nach (A_Rupp 2015)

Gelege

GL 0°

| | B_Winkel | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|----------|----------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| K_Winkel | | | | | | | | | | | | |
| 0 | | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | | x | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | | 0 | x | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | | 0 | 0 | x | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 40 | | 0 | 0 | 0 | x | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 50 | | 0 | 0 | 0 | 0 | x | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 60 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | x | x | x | 0 | 0 | 0 |
| 70 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | x | x | x | 0 | 0 |
| 80 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | x | x | x | 0 |
| 90 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | x | x | x |
| 100 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | x | x |

GL 45°

| | B_Winkel | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|----------|----------|-----|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|
| K_Winkel | | | | | | | | | | | | |
| 0 | | x | x | 0 | 0 | 860 | 940 | 1199 | 830 | 472 | 324 | 0 |
| 10 | | x | x | x | 1211 | 1211 | 1146 | 1465 | 656 | 425 | 598 | 0 |
| 20 | | 0 | x | x | x | 1547 | 1588 | 1168 | 351 | 578 | 446 | 0 |
| 30 | | 0 | 739 | x | x | x | 1263 | 1154 | 451 | 562 | 422 | 148 |
| 40 | | 554 | 517 | 1103 | x | x | x | 1773 | 496 | 602 | 485 | 0 |
| 50 | | 460 | 965 | 1465 | 1426 | x | x | x | 609 | 498 | 480 | 0 |
| 60 | | 480 | 296 | 1522 | 1488 | 1262 | x | x | x | 517 | 0 | 0 |
| 70 | | 474 | 777 | 1580 | 1506 | 1735 | 1208 | x | x | x | 0 | 0 |
| 80 | | 324 | 1084 | 1251 | 1347 | 1082 | 742 | 362 | x | x | x | 0 |
| 90 | | 330 | 312 | 1370 | 1356 | 354 | 0 | 0 | 0 | 0 | x | x |
| 100 | | 320 | 111 | 0 | 1311 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | x |

GL 90°

| | B_Winkel | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|----------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| K_Winkel | | | | | | | | | | | | |
| 0 | | x | x | 1493 | 2142 | 1949 | 1793 | 1630 | 1272 | 1310 | 789 | 745 |
| 10 | | x | x | x | 2185 | 2272 | 1625 | 1261 | 1606 | 1388 | 918 | 408 |
| 20 | | 853 | x | x | x | 1619 | 1241 | 1598 | 1513 | 1345 | 816 | 585 |
| 30 | | 2112 | 2226 | x | x | x | 1652 | 1914 | 1317 | 799 | 986 | 1381 |
| 40 | | 2147 | 1694 | 1613 | x | x | x | 1514 | 982 | 1466 | 1696 | 1330 |
| 50 | | 1674 | 1499 | 1466 | 1504 | x | x | x | 1516 | 1709 | 1731 | 1977 |
| 60 | | 1590 | 1206 | 1812 | 1288 | 1786 | x | x | x | 1603 | 1631 | 1269 |
| 70 | | 1193 | 1564 | 1664 | 1358 | 1905 | 2000 | x | x | x | N/A | N/A |
| 80 | | 1550 | 1708 | 2124 | 1527 | 1964 | 1419 | 1612 | x | x | x | N/A |
| 90 | | 1409 | 1853 | 1273 | 1793 | 1265 | 1584 | 1594 | N/A | x | x | x |
| 100 | | 1887 | 1920 | 1908 | 1719 | 1949 | 1500 | 798 | N/A | N/A | x | x |

Gewebe

GW 0°

| | B_Winkel | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|----------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| K_Winkel | | | | | | | | | | | | |
| 0 | | x | x | 0 | 0 | 398 | 1819 | 1505 | 202 | 156 | 331 | 243 |
| 10 | | x | x | x | 600 | 1818 | 1600 | 226 | 156 | 198 | 192 | 198 |
| 20 | | 0 | x | x | x | 1428 | 209 | 160 | 209 | 200 | 310 | 1395 |
| 30 | | 0 | 362 | x | x | x | 173 | 200 | 219 | 345 | 1414 | 1833 |
| 40 | | 370 | 1657 | 1528 | x | x | x | 218 | 378 | 1875 | 1887 | 1475 |
| 50 | | 1700 | 1391 | 241 | 165 | x | x | x | 1486 | 1865 | 1671 | 1529 |
| 60 | | 1373 | 146 | 205 | 167 | 226 | x | x | x | 1671 | 1469 | N/A |
| 70 | | 163 | 219 | 332 | 383 | 903 | 1904 | x | x | x | N/A | N/A |
| 80 | | 229 | 332 | 420 | 2294 | 1665 | 1665 | 1535 | x | x | x | N/A |
| 90 | | 467 | 240 | 2218 | 2025 | 1756 | 1619 | 1080 | N/A | x | x | x |
| 100 | | 140 | 1076 | 2069 | 2091 | 1765 | 1074 | N/A | N/A | N/A | x | x |

GW 45°

| | B_Winkel | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|----------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| K_Winkel | | | | | | | | | | | | |
| 0 | | x | x | 0 | 0 | 1025 | 2201 | 2374 | 2177 | 2395 | 711 | 650 |
| 10 | | x | x | x | 0 | 2345 | 2348 | 2369 | 2372 | 2390 | 1400 | 114 |
| 20 | | 0 | x | x | x | 2237 | 2359 | 2377 | 1501 | 1655 | 210 | 141 |
| 30 | | 0 | 0 | x | x | x | 2389 | 2388 | 255 | N/A | 1033 | N/A |
| 40 | | 0 | 0 | 1666 | x | x | x | 2039 | 255 | N/A | N/A | N/A |
| 50 | | 0 | 626 | 1977 | 2358 | x | x | x | N/A | N/A | N/A | N/A |
| 60 | | 965 | 1981 | 2330 | 2360 | 0 | x | x | x | N/A | N/A | N/A |
| 70 | | 2068 | 2308 | 2366 | 761 | 0 | N/A | x | x | x | N/A | N/A |
| 80 | | 2100 | 2366 | 2408 | 0 | N/A | N/A | N/A | x | x | x | N/A |
| 90 | | 1642 | 2440 | 1371 | 82 | N/A | N/A | N/A | N/A | x | x | x |
| 100 | | 193 | 2151 | 553 | 539 | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | x | x |

Abbildung 0-72: Auswertung der detektierten Defektbreite - konvex; Defekt D2 nach (A_Rupp 2015)

Gelege

GL 0°

| | B_Winkel | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|----------|----------|------|------|------|----|----|----|----|----|-----|----|-----|
| K_Winkel | | | | | | | | | | | | |
| 0 | | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 866 | 0 | 0 |
| 10 | | x | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | | 0 | x | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | | 0 | 0 | x | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 40 | | 0 | 0 | 0 | x | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 50 | | 0 | 0 | 0 | 0 | x | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 60 | | 0 | 418 | 1085 | 0 | 0 | x | x | x | 0 | 0 | 0 |
| 70 | | 1010 | 1168 | 1136 | 0 | 0 | 0 | x | x | x | 0 | 0 |
| 80 | | 1509 | 1441 | 1085 | 0 | 0 | 0 | 0 | x | x | x | 0 |
| 90 | | 2106 | 1405 | 1015 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | x | x | x |
| 100 | | 2928 | 1669 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | x | x |

GL 45°

| | B_Winkel | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|----------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| K_Winkel | | | | | | | | | | | | |
| 0 | | x | x | 0 | 0 | 416 | 1531 | 1959 | 1863 | 1814 | 1444 | 802 |
| 10 | | x | x | x | x | 416 | 1566 | 1851 | 1826 | 1656 | 1777 | 1917 |
| 20 | | 0 | x | x | x | x | 1833 | 1986 | 1783 | 1604 | 2011 | 1894 |
| 30 | | 0 | 0 | x | x | x | x | 1868 | 1841 | 1925 | 2015 | 1925 |
| 40 | | 0 | 985 | 1698 | x | x | x | 2232 | 1985 | 1970 | 2000 | 1148 |
| 50 | | 553 | 1378 | 1935 | 1900 | x | x | x | 1933 | 2019 | 1115 | 492 |
| 60 | | 1377 | 1594 | 2040 | 1843 | 1851 | x | x | x | 1244 | 577 | 435 |
| 70 | | 1364 | 1725 | 1884 | 1818 | 2118 | 2178 | x | x | x | 347 | 0 |
| 80 | | 1766 | 1892 | 1865 | 1731 | 2074 | 2052 | 1843 | x | x | x | 0 |
| 90 | | 1866 | 1776 | 1909 | 1793 | 1927 | 1650 | 665 | 402 | x | x | x |
| 100 | | 1753 | 1745 | 1906 | 1882 | 1346 | 422 | 0 | 0 | 0 | x | x |

GL 90°

| | B_Winkel | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|----------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| K_Winkel | | | | | | | | | | | | |
| 0 | | x | x | 0 | 0 | 2234 | 2390 | 2373 | 2361 | 2150 | 2200 | 2312 |
| 10 | | x | x | x | 0 | 2288 | 2384 | 2357 | 2230 | 2194 | 2294 | 2238 |
| 20 | | 0 | x | x | x | 2371 | 2357 | 1736 | 2220 | 2290 | 2217 | 2262 |
| 30 | | 0 | 0 | x | x | x | 1906 | 2265 | 2283 | 2210 | 2175 | 2237 |
| 40 | | 0 | 1301 | 2366 | x | x | x | 2259 | 2173 | 2209 | 2257 | 2237 |
| 50 | | 2201 | 2361 | 2349 | 2351 | x | x | x | 2236 | 2243 | 2287 | 2284 |
| 60 | | 2347 | 2344 | 2353 | 2220 | 2277 | x | x | x | 2213 | 2210 | 2049 |
| 70 | | 2325 | 2347 | 2342 | 2283 | 2227 | 2257 | x | x | x | N/A | N/A |
| 80 | | 2345 | 2243 | 2189 | 2181 | 2248 | 2221 | 2242 | x | x | x | N/A |
| 90 | | 2307 | 2353 | 2215 | 2195 | 2229 | 2244 | 2176 | N/A | x | x | x |
| 100 | | 2255 | 2353 | 2263 | 2197 | 2232 | 2171 | 1068 | N/A | N/A | x | x |

Gewebe

GW 0°

| | B_Winkel | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|----------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| K_Winkel | | | | | | | | | | | | |
| 0 | | x | x | 0 | 0 | 1677 | 305 | 3089 | 2345 | 408 | 338 | 1605 |
| 10 | | x | x | x | 455 | 0 | 2012 | 2342 | 620 | 0 | 1571 | 1780 |
| 20 | | 0 | x | x | x | 1674 | 2278 | 621 | 323 | 1526 | 1838 | 1611 |
| 30 | | 0 | 517 | x | x | x | 150 | 335 | 1555 | 1828 | 709 | 170 |
| 40 | | 1082 | 0 | 1731 | x | x | x | 1532 | 1847 | 646 | 216 | 1298 |
| 50 | | 0 | 1583 | 2298 | 584 | x | x | x | 610 | 387 | 1285 | 1654 |
| 60 | | 1761 | 2304 | 809 | 530 | 1392 | x | x | x | 1277 | 1188 | N/A |
| 70 | | 2250 | 704 | 413 | 1414 | 1878 | 599 | x | x | x | N/A | N/A |
| 80 | | 729 | 514 | 1814 | 1971 | 605 | 450 | 1225 | x | x | x | N/A |
| 90 | | 607 | 1736 | 2147 | 913 | 465 | 1377 | 1121 | N/A | N/A | x | x |
| 100 | | 1743 | 2219 | 1061 | 438 | 1360 | 851 | N/A | N/A | N/A | x | x |

GW 45°

| | B_Winkel | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|----------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| K_Winkel | | | | | | | | | | | | |
| 0 | | x | x | 0 | 0 | 0 | 2025 | 2383 | 2328 | 2345 | 1608 | 1400 |
| 10 | | x | x | x | 0 | 2220 | 2380 | 2286 | 2327 | 2378 | 841 | 681 |
| 20 | | 0 | x | x | x | 2390 | 2239 | 2273 | 2366 | 2366 | 330 | 0 |
| 30 | | 0 | 0 | x | x | x | 2273 | 2350 | 2308 | 2512 | 0 | 0 |
| 40 | | 0 | 0 | 2236 | x | x | x | 2370 | 2384 | 651 | 0 | 0 |
| 50 | | 0 | 1254 | 2293 | 2290 | x | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 60 | | 1242 | 2309 | 2277 | 2337 | 2352 | x | x | x | 0 | 0 | 0 |
| 70 | | 2326 | 2283 | 2224 | 2354 | 1098 | 2355 | x | x | x | 0 | 0 |
| 80 | | 2232 | 2210 | 2363 | 2288 | 719 | 1542 | 0 | x | x | x | 0 |
| 90 | | 2194 | 2348 | 2286 | 1099 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | x | x |
| 100 | | 2296 | 2415 | 1905 | 626 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | x | x |

Abbildung 0-73: Auswertung der detektierten Defektbreite - konvex; Defekt D3 nach (A_Rupp 2015)

Gelege

GL 0°

| H_Winkel | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 |
|----------|---|----|----|----|----|----|------|------|------|------|-----|------|------|------|
| 0 | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1328 | 323 | 0 | 1459 | 2032 | |
| 10 | | x | x | 0 | 0 | 0 | 493 | 1248 | 1317 | 1231 | 968 | 1307 | 260 | 0 |
| 20 | | | x | x | 0 | 0 | 1265 | 1395 | 1373 | 1488 | 566 | 1131 | 0 | 918 |
| 30 | | | | x | x | 0 | 1516 | 1568 | 1534 | 1240 | 0 | 0 | 326 | 1194 |
| 40 | | | | | x | 0 | 1251 | 1288 | 0 | 0 | 0 | 340 | 828 | 1042 |
| 50 | | | | | | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 340 | 264 | 1016 | 1948 |
| 60 | | | | | | | x | 0 | 0 | 151 | 137 | 1252 | 2173 | |
| 70 | | | | | | | | x | 0 | 157 | 484 | 2013 | 2222 | |
| 80 | | | | | | | | | x | 0 | 650 | 1972 | 2171 | |
| 90 | | | | | | | | | | x | 0 | 1084 | 1517 | |
| 100 | | | | | | | | | | | x | 0 | 0 | |
| 110 | | | | | | | | | | | | x | 0 | |
| 120 | | | | | | | | | | | | | x | x |
| 130 | | | | | | | | | | | | | | x |

GL 45°

| H_Winkel | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 |
|----------|---|----|----|----|----|----|----|----|------|------|------|------|------|------|
| 0 | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 204 | 0 | 0 |
| 20 | | | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 242 | 738 | 958 | 670 | 0 |
| 30 | | | | x | x | 0 | 0 | 0 | 318 | 346 | 1319 | 1550 | 858 | 440 |
| 40 | | | | | x | 0 | 0 | 0 | 694 | 1029 | 1564 | 1610 | 215 | 146 |
| 50 | | | | | | x | 0 | 0 | 1131 | 1655 | 1864 | 626 | 0 | 0 |
| 60 | | | | | | | x | 0 | 1052 | 1679 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 70 | | | | | | | | x | 0 | 295 | 361 | 1004 | 0 | 0 |
| 80 | | | | | | | | | x | 0 | 347 | 373 | 1760 | 1658 |
| 90 | | | | | | | | | | x | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 100 | | | | | | | | | | | x | 0 | 0 | 0 |
| 110 | | | | | | | | | | | | x | x | 0 |
| 120 | | | | | | | | | | | | | x | x |
| 130 | | | | | | | | | | | | | | x |

GL 90°

| H_Winkel | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 |
|----------|---|----|----|----|----|----|----|----|------|------|------|------|------|------|
| 0 | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | N/A | N/A | 1715 | 2238 | 1077 | 1300 |
| 10 | | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | N/A | N/A | 1700 | 2154 | 2311 | 2154 |
| 20 | | | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | N/A | N/A | 1599 | 2236 | 2328 | 1904 |
| 30 | | | | x | x | 0 | 0 | 0 | 1872 | 2212 | 2335 | 2241 | 2258 | 2384 |
| 40 | | | | | x | 0 | 0 | 0 | 1584 | 2154 | 2323 | 2350 | 2232 | 2360 |
| 50 | | | | | | x | 0 | 0 | 2185 | 2228 | 2226 | 2341 | 2477 | N/A |
| 60 | | | | | | | x | 0 | 2130 | 2335 | 2468 | N/A | N/A | 0 |
| 70 | | | | | | | | x | 2428 | N/A | N/A | 0 | 0 | 0 |
| 80 | | | | | | | | | N/A | N/A | 2169 | 2217 | 2429 | 2201 |
| 90 | | | | | | | | | N/A | N/A | 2194 | 2338 | 2454 | 2338 |
| 100 | | | | | | | | | N/A | N/A | 2199 | N/A | 2318 | 2454 |
| 110 | | | | | | | | | | N/A | 2199 | N/A | 2318 | 2454 |
| 120 | | | | | | | | | | | | N/A | 2318 | 2454 |
| 130 | | | | | | | | | | | | | | N/A |

Gewebe

GW 0°

| H_Winkel | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 |
|----------|---|----|----|----|----|----|----|----|------|------|------|------|------|------|
| 0 | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | N/A | N/A | N/A | N/A | 862 | 2293 |
| 10 | | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | N/A | N/A | N/A | 1529 | 2319 | |
| 20 | | | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | N/A | N/A | N/A | 1500 | 2319 | |
| 30 | | | | x | x | 0 | 0 | 0 | N/A | N/A | N/A | 1472 | 2321 | |
| 40 | | | | | x | 0 | 0 | 0 | N/A | N/A | N/A | 2328 | 2380 | |
| 50 | | | | | | x | 0 | 0 | 2389 | 2355 | 2059 | 2328 | 1108 | |
| 60 | | | | | | | x | 0 | 2121 | 2312 | N/A | N/A | N/A | |
| 70 | | | | | | | | x | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| 80 | | | | | | | | | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| 90 | | | | | | | | | | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| 100 | | | | | | | | | | | N/A | N/A | N/A | |
| 110 | | | | | | | | | | | | N/A | N/A | |
| 120 | | | | | | | | | | | | | N/A | |
| 130 | | | | | | | | | | | | | | |

GW 45°

| H_Winkel | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 |
|----------|---|----|----|----|----|----|----|----|------|------|------|------|------|------|
| 0 | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 391 | 1814 | 2510 | 2016 |
| 10 | | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2357 | 549 | 2286 | 2678 |
| 20 | | | x | x | 0 | 0 | 0 | 0 | 686 | 0 | 1077 | 2048 | 2095 | 1269 |
| 30 | | | | x | x | 0 | 0 | 0 | 760 | 1059 | 1175 | 2342 | 1136 | 2445 |
| 40 | | | | | x | 0 | 0 | 0 | 3800 | 2202 | 2366 | 2204 | 497 | 2583 |
| 50 | | | | | | x | 0 | 0 | 1942 | 1260 | 1497 | 2323 | 2322 | 2670 |
| 60 | | | | | | | x | 0 | 1012 | 2448 | 2491 | 2400 | 2772 | 1015 |
| 70 | | | | | | | | x | 2588 | 1046 | 1133 | 605 | 665 | 0 |
| 80 | | | | | | | | | 813 | 2400 | 2500 | 2688 | 2731 | 2529 |
| 90 | | | | | | | | | 2525 | 2484 | 2321 | 2638 | 2653 | 2347 |
| 100 | | | | | | | | | 2420 | 2421 | 2684 | 2643 | 2631 | 2547 |
| 110 | | | | | | | | | 2218 | 2620 | 2788 | 2675 | 625 | 967 |
| 120 | | | | | | | | | 2420 | 2620 | 2550 | 0 | 880 | 652 |
| 130 | | | | | | | | | 2220 | 2440 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Abbildung 0-79: Auswertung der detektierten Defektbreite - Rampe; Defekt D3 nach (A_Rupp 2015)

Forschungsberichte aus dem wbk
Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Bisher erschienene Bände:

Band 0

Dr.-Ing. Wu Hong-qi

Adaptive Volumenstromregelung mit Hilfe von drehzahlgeregelten Elektroantrieben

Band 1

Dr.-Ing. Heinrich Weiß

**Fräsen mit Schneidkeramik - Verhalten des System
Werkzeugmaschine-Werkzeug-Werkstück und Prozessanalyse**

Band 2

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Stierle

**Entwicklung und Untersuchung hydrostatischer Lager für die
Axialkolbenmaschine**

Band 3

Dr.-Ing. Herbert Hörner

Untersuchung des Geräuschverhaltens druckgeregelter Axialkolbenpumpen

Band 4

Dr.-Ing. Rolf-Dieter Brückbauer

**Digitale Drehzahlregelung unter der besonderen Berücksichtigung
von Quantisierungseffekten**

Band 5

Dr.-Ing. Gerhard Staiger

Graphisch interaktive NC-Programmierung von Drehteilen im Werkstattbereich

Band 6

Dr.-Ing. Karl Peters

**Ein Beitrag zur Berechnung und Kompensation von Positionierfehlern an
Industrierobotern**

Band 7

Dr.-Ing. Paul Stauss

Automatisierte Inbetriebnahme und Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen

Band 8

Dr.-Ing. Günter Möckesch

Konzeption und Realisierung eines strategischen, integrierten Gesamtplanungs- und -bearbeitungssystems zur Optimierung der Drehteilorganisation für auftragsbezogene Drehereien

Band 9

Dr.-Ing. Thomas Oestreicher

Rechnergestützte Projektierung von Steuerungen

Band 10

Dr.-Ing. Thomas Selinger

Teilautomatisierte werkstattnahe NC-Programmerstellung im Umfeld einer integrierten Informationsverarbeitung

Band 11

Dr.-Ing. Thomas Buchholz

Prozessmodell Fräsen, Rechnerunterstützte Analyse, Optimierung und Überwachung

Band 12

Dr.-Ing. Bernhard Reichling

Lasergestützte Positions- und Bahnvermessung von Industrierobotern

Band 13

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lesser

Rechnergestützte Methoden zur Auswahl anforderungsgerechter Verbindungselemente

Band 14

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lauffer

Einsatz von Prozessmodellen zur rechnerunterstützten Auslegung von Räumwerkzeugen

Band 15

Dr.-Ing. Michael C. Wilhelm

Rechnergestützte Prüfplanung im Informationsverbund moderner Produktionssysteme

Band 16
Dr.-Ing. Martin Ochs

Entwurf eines Programmsystems zur wissensbasierten Planung und Konfigurierung

Band 17
Dr.-Ing. Heinz-Joachim Schneider

Erhöhung der Verfügbarkeit von hochautomatisierten Produktionseinrichtungen mit Hilfe der Fertigungsleittechnik

Band 18
Dr.-Ing. Hans-Reiner Ludwig

Beanspruchungsanalyse der Werkzeugschneiden beim Stirnplanfräsen

Band 19
Dr.-Ing. Rudolf Wieser

Methoden zur rechnergestützten Konfigurierung von Fertigungsanlagen

Band 20
Dr.-Ing. Edgar Schmitt

Werkstattsteuerung bei wechselnder Auftragsstruktur

Band 21
Dr.-Ing. Wilhelm Enderle

Verfügbarkeitssteigerung automatisierter Montagesysteme durch selbsttätige Behebung prozessbedingter Störungen

Band 22
Dr.-Ing. Dieter Buchberger

Rechnergestützte Strukturplanung von Produktionssystemen

Band 23
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Rechnerunterstützte Technologieplanung für die flexibel automatisierte Fertigung von Abkantteilen

Band 24
Dr.-Ing. Lukas Loeffler

Adaptierbare und adaptive Benutzerschnittstellen

Band 25
Dr.-Ing. Thomas Friedmann

Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue rechnergestützte Verfahren

Band 26

Dr.-Ing. Robert Zurrin

Variables Formhonen durch rechnergestützte Hornprozesssteuerung

Band 27

Dr.-Ing. Karl-Heinz Bergen

Langhub-Innenrundhonen von Grauguss und Stahl mit einem elektromechanischem Vorschubsystem

Band 28

Dr.-Ing. Andreas Liebisch

Einflüsse des Festwalzens auf die Eigenspannungsverteilung und die Dauerfestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder

Band 29

Dr.-Ing. Rolf Ziegler

Auslegung und Optimierung schneller Servopumpen

Band 30

Dr.-Ing. Rainer Bartl

Datenmodellgestützte Wissensverarbeitung zur Diagnose und Informationsunterstützung in technischen Systemen

Band 31

Dr.-Ing. Ulrich Golz

Analyse, Modellbildung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben

Band 32

Dr.-Ing. Stephan Timmermann

Automatisierung der Feinbearbeitung in der Fertigung von Hohlformwerkzeugen

Band 33

Dr.-Ing. Thomas Noe

Rechnergestützter Wissenserwerb zur Erstellung von Überwachungs- und Diagnoseexpertensystemen für hydraulische Anlagen

Band 34

Dr.-Ing. Ralf Lenschow

Rechnerintegrierte Erstellung und Verifikation von Steuerungsprogrammen als Komponente einer durchgängigen Planungsmethodik

Band 35

Dr.-Ing. Matthias Kallabis

Räumen gehärteter Werkstoffe mit kristallinen Hartstoffen

Band 36

Dr.-Ing. Heiner-Michael Honeck

Rückführung von Fertigungsdaten zur Unterstützung einer fertigungsgerechten Konstruktion

Band 37

Dr.-Ing. Manfred Rohr

Automatisierte Technologieplanung am Beispiel der Komplettbearbeitung auf Dreh-/Fräszellen

Band 38

Dr.-Ing. Martin Steuer

Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur wissensbasierten Inbetriebnahme von komplexen Serienmaschinen

Band 39

Dr.-Ing. Siegfried Beichter

Rechnergestützte technische Problemlösung bei der Angebotserstellung von flexiblen Drehzellen

Band 40

Dr.-Ing. Thomas Steitz

Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Werkzeugmaschinen mit Integration von funktionsbasierter Strukturierung und Kostenschätzung

Band 41

Dr.-Ing. Michael Richter

Wissensbasierte Projektierung elektrohydraulischer Regelungen

Band 42

Dr.-Ing. Roman Kuhn

Technologieplanungssystem Fräsen. Wissensbasierte Auswahl von Werkzeugen, Schneidkörpern und Schnittbedingungen für das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 43

Dr.-Ing. Hubert Klein

Rechnerunterstützte Qualitätssicherung bei der Produktion von Bauteilen mit frei geformten Oberflächen

Band 44

Dr.-Ing. Christian Hoffmann

Konzeption und Realisierung eines fertigungsintegrierten Koordinatenmessgerätes

Band 45

Dr.-Ing. Volker Frey

Planung der Leittechnik für flexible Fertigungsanlagen

Band 46

Dr.-Ing. Achim Feller

Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung

Band 47

Dr.-Ing. Markus Klaiber

Produktivitätssteigerung durch rechnerunterstütztes Einfahren von NC-Programmen

Band 48

Dr.-Ing. Roland Minges

Verbesserung der Genauigkeit beim fünfachsigem Fräsen von Freiformflächen

Band 49

Dr.-Ing. Wolfgang Bernhart

Beitrag zur Bewertung von Montagevarianten: Rechnergestützte Hilfsmittel zur kostenorientierten, parallelen Entwicklung von Produkt und Montagesystem

Band 50

Dr.-Ing. Peter Ganghoff

Wissensbasierte Unterstützung der Planung technischer Systeme: Konzeption eines Planungswerkzeuges und exemplarische Anwendung im Bereich der Montagesystemplanung

Band 51

Dr.-Ing. Frank Maier

Rechnergestützte Prozessregelung beim flexiblen Gesenkbiegen durch Rückführung von Qualitätsinformationen

Band 52

Dr.-Ing. Frank Debus

Ansatz eines rechnerunterstützten Planungsmanagements für die Planung in verteilten Strukturen

Band 53

Dr.-Ing. Joachim Weinbrecht

Ein Verfahren zur zielorientierten Reaktion auf Planabweichungen in der Werkstattregelung

Band 54

Dr.-Ing. Gerd Herrmann

Reduzierung des Entwicklungsaufwandes für anwendungsspezifische Zellenrechnersoftware durch Rechnerunterstützung

Band 55

Dr.-Ing. Robert Wassmer

Verschleissentwicklung im tribologischen System Fräsen: Beiträge zur Methodik der Prozessmodellierung auf der Basis tribologischer Untersuchungen beim Fräsen

Band 56

Dr.-Ing. Peter Uebelhoer

Inprocess-Geometriemessung beim Honen

Band 57

Dr.-Ing. Hans-Joachim Schelberg

Objektorientierte Projektierung von SPS-Software

Band 58

Dr.-Ing. Klaus Boes

Integration der Qualitätsentwicklung in featurebasierte CAD/CAM-Prozessketten

Band 59

Dr.-Ing. Martin Schreiber

Wirtschaftliche Investitionsbewertung komplexer Produktionssysteme unter Berücksichtigung von Unsicherheit

Band 60

Dr.-Ing. Ralf Steuernagel

Offenes adaptives Engineering-Werkzeug zur automatisierten Erstellung von entscheidungsunterstützenden Informationssystemen

Band 62

Dr.-Ing. Uwe Schauer

Qualitätsorientierte Feinbearbeitung mit Industrierobotern: Regelungsansatz für die Freiformflächenfertigung des Werkzeug- und Formenbaus

Band 63

Dr.-Ing. Simone Loeper

Kennzahlengestütztes Beratungssystem zur Verbesserung der Logistikleistung in der Werkstattfertigung

Band 64

Dr.-Ing. Achim Raab

Räumen mit hartstoffbeschichteten HSS-Werkzeugen

Band 65,

Dr.-Ing. Jan Erik Burghardt

Unterstützung der NC-Verfahrenskette durch ein bearbeitungs-elementorientiertes, lernfähiges Technologieplanungssystem

Band 66

Dr.-Ing. Christian Tritsch

Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter: Ansatz zur Planung und (teil-)automatisierten Durchführung industrieller Demontageprozesse

Band 67

Dr.-Ing. Oliver Eitrich

Prozessorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation

Band 68

Dr.-Ing. Oliver Wilke

Optimierte Antriebskonzepte für Räummaschinen - Potentiale zur Leistungssteigerung

Band 69

Dr.-Ing. Thilo Sieth

Rechnergestützte Modellierungsmethodik zerspantechnologischer Prozesse

Band 70

Dr.-Ing. Jan Linnenbuerger

Entwicklung neuer Verfahren zur automatisierten Erfassung der geometrischen Abweichungen an Linearachsen und Drehschwenkköpfen

Band 71

Dr.-Ing. Mathias Klimmek

Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeuges

Band 72

Dr.-Ing. Marko Hartel

Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten

Band 73

Dr.-Ing. Jörg Schaupp

Wechselwirkung zwischen der Maschinen- und Hauptspindeltriebsdynamik und dem Zerspanprozess beim Fräsen

Band 74

Dr.-Ing. Bernhard Neisius

Konzeption und Realisierung eines experimentellen Telemanipulators für die Laparoskopie

Band 75

Dr.-Ing. Wolfgang Walter

Erfolgsversprechende Muster für betriebliche Ideenfindungsprozesse. Ein Beitrag zur Steigerung der Innovationsfähigkeit

Band 76

Dr.-Ing. Julian Weber

Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien

Band 77

Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Markus Posur

Unterstützung der Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch Kommunikation über mobile Rechner

Band 78

Dr.-Ing. Frank Fleissner

Prozessorientierte Prüfplanung auf Basis von Bearbeitungsobjekten für die Kleinserienfertigung am Beispiel der Bohr- und Fräsbearbeitung

Band 79

Dr.-Ing. Anton Haberkern

Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung

Band 80

Dr.-Ing. Dominik Matt

Objektorientierte Prozess- und Strukturinnovation (OPUS)

Band 81

Dr.-Ing. Jürgen Andres

Robotersysteme für den Wohnungsbau: Beitrag zur Automatisierung des Mauerwerkbaus und der Elektroinstallation auf Baustellen

Band 82

Dr.-Ing. Dipl.Wirtschaftsing. Simone Riedmiller

Der Prozesskalender - Eine Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Prozessen

Band 83

Dr.-Ing. Dietmar Tilch

Analyse der Geometrieparameter von Präzisionsgewinden auf der Basis einer Least-Squares-Estimation

Band 84

Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Oliver Stiefbold

Konzeption eines reaktionsschnellen Planungssystems für Logistikketten auf Basis von Software-Agenten

Band 85

Dr.-Ing. Ulrich Walter

Einfluss von Kühlschmierstoff auf den Zerspansprozess beim Fräsen: Beitrag zum Prozessverständnis auf Basis von zerspantechnischen Untersuchungen

Band 86

Dr.-Ing. Bernd Werner

Konzeption von teilautonomer Gruppenarbeit unter Berücksichtigung kultureller Einflüsse

Band 87

Dr.-Ing. Ulf Osmers

Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality

Band 88

Dr.-Ing. Oliver Doerfel

Optimierung der Zerspantechnik beim Fertigungsverfahren Wälzstossen: Analyse des Potentials zur Trockenbearbeitung

Band 89

Dr.-Ing. Peter Baumgartner

Stufenmethode zur Schnittstellengestaltung in der internationalen Produktion

Band 90
Dr.-Ing. Dirk Vossmann

Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitätsmethodenverbund und Qualitätsmethodenintegration

Band 91
Dr.-Ing. Martin Plass

Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer Honprozessregelung

Band 92
Dr.-Ing. Titus Konold

Optimierung der Fünffachsfräsbearbeitung durch eine kennzahlenunterstützte CAM-Umgebung

Band 93
Dr.-Ing. Jürgen Brath

Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien

Band 94
Dr.-Ing. Dirk Geisinger

Ein Konzept zur marktorientierten Produktentwicklung

Band 95
Dr.-Ing. Marco Lanza

Entwurf der Systemunterstützung des verteilten Engineering mit Axiomatic Design

Band 96
Dr.-Ing. Volker Hüntrup

Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit von Stählen durch das Fertigungsverfahren Fräsen

Band 97
Dr.-Ing. Frank Reinboth

Interne Stützung zur Genauigkeitsverbesserung in der Inertialmesstechnik: Beitrag zur Senkung der Anforderungen an Inertialsensoren

Band 98
Dr.-Ing. Lutz Trender

Entwicklungintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung

Band 99

Dr.-Ing. Cornelia Kafka

Konzeption und Umsetzung eines Leitfadens zum industriellen Einsatz von Data-Mining

Band 100

Dr.-Ing. Gebhard Selinger

Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen

Band 101

Dr.-Ing. Thomas Windmüller

Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine mitarbeiterorientierte Informationsversorgung

Band 102

Dr.-Ing. Knud Lembke

Theoretische und experimentelle Untersuchung eines bistabilen elektrohydraulischen Linearantriebs

Band 103

Dr.-Ing. Ulrich Thies

Methode zur Unterstützung der variantengerechten Konstruktion von industriell eingesetzten Kleingeräten

Band 104

Dr.-Ing. Andreas Schmälzle

Bewertungssystem für die Generalüberholung von Montageanlagen –Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Gestaltung geschlossener Facility- Management- Systeme im Anlagenbau

Band 105

Dr.-Ing. Thorsten Frank

Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer Vorschubachsen mit Kugelgewindetrieb

Band 106

Dr.-Ing. Achim Agostini

Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Interaktionen: Beitrag zur ganzheitlichen Strukturierung und Verarbeitung von Interaktionen von Bearbeitungsobjekten

Band 107

Dr.-Ing. Thomas Barrho

Flexible, zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung in segmentierten Fertigungsstrukturen

Band 108

Dr.-Ing. Michael Scharer

Quality Gate-Ansatz mit integriertem Risikomanagement

Band 109

Dr.-Ing. Ulrich Suchy

Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Mischkopfes für das Wasser Abrasivstrahlschneiden

Band 110

Dr.-Ing. Sellal Mussa

Aktive Korrektur von Verlagerungsfehlern in Werkzeugmaschinen

Band 111

Dr.-Ing. Andreas Hühsam

Modellbildung und experimentelle Untersuchung des Wälzschälprozesses

Band 112

Dr.-Ing. Axel Plutowsky

Charakterisierung eines optischen Messsystems und den Bedingungen des Arbeitsraums einer Werkzeugmaschine

Band 113

Dr.-Ing. Robert Landwehr

Konsequent dezentralisierte Steuerung mit Industrial Ethernet und offenen Applikationsprotokollen

Band 114

Dr.-Ing. Christoph Dill

Turbulenzreaktionsprozesse

Band 115

Dr.-Ing. Michael Baumeister

Fabrikplanung im turbulenten Umfeld

Band 116

Dr.-Ing. Christoph Gönzheimer

Konzept zur Verbesserung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in Produktionssystemen durch intelligente Sensor/Aktor-Anbindung

Band 117

Dr.-Ing. Lutz Demuß

Ein Reifemodell für die Bewertung und Entwicklung von Dienstleistungsorganisationen: Das Service Management Maturity Modell (SMMM)

Band 118

Dr.-Ing. Jörg Söhner

Beitrag zur Simulation zerspanungstechnologischer Vorgänge mit Hilfe der Finite-Element-Methode

Band 119

Dr.-Ing. Judith Elsner

Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse

Band 120

Dr.-Ing. Lijing Xie

Estimation Of Two-dimension Tool Wear Based On Finite Element Method

Band 121

Dr.-Ing. Ansgar Blessing

Geometrischer Entwurf mikromechatronischer Systeme

Band 122

Dr.-Ing. Rainer Ebner

Steigerung der Effizienz mehrachsiger Fräsprozesse durch neue Planungsmethoden mit hoher Benutzerunterstützung

Band 123

Dr.-Ing. Silja Klinkel

Multikriterielle Feinplanung in teilautonomen Produktionsbereichen – Ein Beitrag zur produkt- und prozessorientierten Planung und Steuerung

Band 124

Dr.-Ing. Wolfgang Neithardt

Methodik zur Simulation und Optimierung von Werkzeugmaschinen in der Konzept- und Entwurfsphase auf Basis der Mehrkörpersimulation

Band 125

Dr.-Ing. Andreas Mehr

Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen mit kristallinen diamantbeschichteten Werkzeugen beim Fertigungsverfahren Wälzstoßen

Band 126

Dr.-Ing. Martin Gutmann

Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Diagnose von hydraulischen Produktionsmaschinen

Band 127

Dr.-Ing. Gisela Lanza

Simulative Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen

Band 128

Dr.-Ing. Ulf Dambacher

Kugelgewindetrieb mit hohem Druckwinkel

Band 129

Dr.-Ing. Carsten Buchholz

Systematische Konzeption und Aufbau einer automatisierten Produktionszelle für pulverspritzgegossene Mikroteile

Band 130

Dr.-Ing. Heiner Lang

Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten

Band 131

Dr.-Ing. Daniel Nesges

Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen

Im Shaker Verlag erschienene Bände:

Band 132

Dr.-Ing. Andreas Bechle

Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschälen

Band 133

Dr.-Ing. Markus Herm

Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business Capabilities

Band 134

Dr.-Ing. Hanno Tritschler

Werkzeug- und Zerspanprozessoptimierung beim Hartfräsen von Mikrostrukturen in Stahl

Band 135

Dr.-Ing. Christian Munzinger

Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen

Band 136

Dr.-Ing. Andreas Stepping

Fabrikplanung im Umfeld von Wertschöpfungsnetzwerken und ganzheitlichen Produktionssystemen

Band 137

Dr.-Ing. Martin Dyck

Beitrag zur Analyse thermische bedingter Werkstückdeformationen in Trockenbearbeitungsprozessen

Band 138

Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried

Dreidimensionales optisches Messsystem für eine effizientere geometrische Maschinenbeurteilung

Band 139

Dr.-Ing. Marc Wawerla

Risikomanagement von Garantieleistungen

Band 140

Dr.-Ing. Ivesa Buchholz

Strategien zur Qualitätssicherung mikromechanischer Bauteile mittels multisensorieller Koordinatenmesstechnik

Band 141

Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther

Empirische Erweiterung von Modellen der Makrozerspanung auf den Bereich der Mikrobearbeitung

Band 142

Dr.-Ing. Andreas Knödel

Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit

Band 143

Dr.-Ing. Gregor Stengel

Fliegendes Abtrennen räumlich gekrümmter Strangpressprofile mittels Industrierobotern

Band 144

Dr.-Ing. Udo Weismann

Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling

Band 145

Dr.-Ing. Rüdiger Pabst

Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte zur Simulation des thermischen Bauteilverhaltens bei der Trockenbearbeitung

Band 146

Dr.-Ing. Jan Wieser

Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen

Band 147

Dr.-Ing. Sebastian Haupt

Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch eine Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation

Band 148

Dr.-Ing. Matthias Schlipf

Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile

Band 149

Dr.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig

Methodische Erarbeitung und Umsetzung eines neuartigen Maschinenkonzeptes zur produktflexiblen Bearbeitung räumlich gekrümmter Strangpressprofile

Band 150

Dr.-Ing. Thomas Ender

Prognose von Personalbedarfen im Produktionsanlauf unter Berücksichtigung dynamischer Planungsgrößen

Band 151

Dr.-Ing. Kathrin Peter

**Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden
in der Kleinserienproduktion**

Band 152

Dr.-Ing. Matthias Schopp

Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben

Band 153

Dr.-Ing. Martin Kipfmüller

Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen

Band 154

Dr.-Ing. Carsten Schmidt

**Development of a database to consider multi wear mechanisms
within chip forming simulation**

Band 155

Dr.-Ing. Stephan Niggeschmidt

**Ausfallgerechte Ersatzteilbereitstellung im Maschinen- und Anlagenbau
mittels lastabhängiger Lebensdauerprognose**

Band 156

Dr.-Ing. Jochen Conrad Peters

**Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der
Mikro-Koordinatenmesstechnik**

Band 157

Dr.-Ing. Jörg Ude

**Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration
globaler Wertschöpfungsnetzwerke**

Band 158

Dr.-Ing. Stefan Weiler

Strategien zur wirtschaftlichen Gestaltung der globalen Beschaffung

Band 159

Dr.-Ing. Jan Rühl

Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung

Band 160

Dr.-Ing. Daniel Ruch

Positions- und Konturerfassung räumlich gekrümmter Profile auf Basis bauteilimmanenter Markierungen

Band 161

Dr.-Ing. Manuel Tröndle

Flexible Zuführung von Mikrobauteilen mit piezoelektrischen Schwingförderern

Band 162

Dr.-Ing. Benjamin Viering

Mikroverzahnungsnormal

Band 163

Dr.-Ing. Chris Becke

Prozesskrafttrichtungsangepasste Frässtrategien zur schädigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen

Band 164

Dr.-Ing. Patrick Werner

Dynamische Optimierung und Unsicherheitsbewertung der lastabhängigen präventiven Instandhaltung von Maschinenkomponenten

Band 165

Dr.-Ing. Martin Weis

Kompensation systematischer Fehler bei Werkzeugmaschinen durch self-sensing Aktoren

Band 166

Dr.-Ing. Markus Schneider

Kompensation von Konturabweichungen bei gerundeten Strangpressprofilen durch robotergestützte Führungswerkzeuge

Band 167

Dr.-Ing. Ester M. R. Ruprecht

Prozesskette zur Herstellung schichtbasierter Systeme mit integrierten Kavitäten

Band 168

Dr.-Ing. Alexander Broos

Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen

Band 169

Dr.-Ing. Frederik Zanger

Segmentspanbildung, Werkzeugverschleiß, Randschichtzustand und Bauteileigenschaften: Numerische Analysen zur Optimierung des Zerspanungsprozesses am Beispiel von Ti-6Al-4V

Band 170

Dr.-Ing. Benjamin Behmann

Servicefähigkeit

Band 171

Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes

Band 172

Dr.-Ing. Christoph Ruhs

Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion

Band 173

Dr.-Ing. Steven Peters

Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen

Band 174

Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation – 3D-FEM Kinematik- und Spanbildungssimulation

Band 175

Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für μ MIM-Bauteile

Band 176

Dr.-Ing. Heiko Hennrich

Aufbau eines kombinierten belastungs- und zustandsorientierten Diagnose- und Prognosesystems für Kugelgewindetriebe

Band 177

Dr.-Ing. Stefan Herder

Piezoelektrischer Self-Sensing-Aktor zur Vorspannungsregelung in adaptiven Kugelgewindetrieben

Band 178

Dr.-Ing. Alexander Ochs

Ultraschall-Strömungsgreifer für die Handhabung textiler Halbzeuge bei der automatisierten Fertigung von RTM-Bauteilen

Band 179

Dr.-Ing. Jürgen Michna

Numerische und experimentelle Untersuchung zerspanungsbedingter Gefügeumwandlungen und Modellierung des thermo-mechanischen Lastkollektivs beim Bohren von 42CrMo4

Band 180

Dr.-Ing. Jörg Elser

Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen

Band 181

Dr.-Ing. Katharina Klimscha

Einfluss des Fügespalts auf die erreichbare Verbindungsqualität beim Sinterfügen

Band 182

Dr.-Ing. Patricia Weber

Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels Analyse akustischer Emissionen bei der Mikrolaserablation mit UV-Pikosekundenlasern

Band 183

Dr.-Ing. Jochen Schädel

Automatisiertes Fügen von Tragprofilen mittels Faserwickeln

Band 184

Dr.-Ing. Martin Krauße

Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen

Band 185

Dr.-Ing. Raphael Moser

Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186

Dr.-Ing. Martin Otter

Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen

Band 187

Dr.-Ing. Urs Leberle

Produktive und flexible Gleitförderung kleiner Bauteile auf phasenflexiblen Schwingförderern mit piezoelektrischen 2D-Antriebsselementen

Band 188

Dr.-Ing. Johannes Book

Modellierung und Bewertung von Qualitätsmanagementstrategien in globalen Wertschöpfungsnetzwerken

Band 189

Dr.-Ing. Florian Ambrosy

Optimierung von Zerspanungsprozessen zur prozesssicheren Fertigung nanokristalliner Randschichten am Beispiel von 42CrMo4

Band 190

Dr.-Ing. Adrian Kölmel

Integrierte Messtechnik für Prozessketten unreifer Technologien am Beispiel der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge

Band 191

Dr.-Ing. Henning Wagner

Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen

Band 192

Dr.-Ing. Johannes Gebhardt

Strukturoptimierung von in FVK eingebetteten metallischen Lasteinleitungselementen

Band 193

Dr.-Ing. Jörg Bauer

Hochintegriertes hydraulisches Vorschubsystem für die Bearbeitung kleiner Werkstücke mit hohen Fertigungsanforderungen

Band 194

Dr.-Ing. Nicole Stricker

Robustheit verketteter Produktionssysteme

Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit

Band 195

Dr.-Ing. Anna Sauer

Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel der Batteriemontage für Elektrofahrzeuge

Band 196

Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc

Prozessmodell für das Linearwickeln unrunder Zahnspulen

Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik

Band 197

Dr.-Ing. Frederic Förster

Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte

Band 198

Dr.-Ing. Nikolay Boev

Numerische Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess und Maschine am Beispiel Räumen

Band 199

Dr.-Ing. Sebastian Greinacher

Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourceneffizienter Produktionssysteme

Band 200

Dr.-Ing. Benjamin Häfner

Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen

Band 201

Dr.-Ing. Stefan Klotz

Dynamische Parameteranpassung bei der Bohrungsherstellung in faserverstärkten Kunststoffen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einspannsituation

Band 202

Dr.-Ing. Johannes Stoll

Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung

Anwendung am Beispiel der Blechpaketfertigung für automobiler Elektromotoren

Band 203

Dr.-Ing. Simon-Frederik Koch

Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen im Schleuderverfahren
ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung

Band 204

Dr.-Ing. Julius Ficht

Numerische Untersuchung der Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse

Band 205

Dr.-Ing. Manuel Baumeister

Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion

Band 206

Dr.-Ing. Daniel Bertsch

Optimierung der Werkzeug- und Prozessauslegung für das Wälzschälen von Innenverzahnungen

Band 207

Dr.-Ing. Kyle James Kippenbrock

Deconvolution of Industrial Measurement and Manufacturing Processes for Improved Process Capability Assessments

Band 208

Dr.-Ing. Farboud Bejnoud

Experimentelle Prozesskettenbetrachtung für Räumbauteile am Beispiel einer einsatzgehärteten PKW-Schiebemuffe

Band 209

Dr.-Ing. Steffen Dosch

Herstellungsübergreifende Informationsübertragung zur effizienten Produktion von Werkzeugmaschinen am Beispiel von Kugelgewindetrieben

Band 210

Dr.-Ing. Emanuel Moser

Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke

Bestimmung robuster Migrationspfade und risiko-effizienter Wandlungsbefähiger

Band 211

Dr.-Ing. Jan Hochdörffer

Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken

Band 212

Dr.-Ing. Tobias Arndt

Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in globalen Produktionsnetzwerken

Band 213

Dr.-Ing. Manuel Peter

Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch modellbasierte Online-Optimierung

Band 214

Dr.-Ing. Robin Kopf

Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien

Band 215

Dr.-Ing. Harald Meier

**Einfluss des Räumens auf den Bauteilzustand in der Prozesskette
Weichbearbeitung – Wärmebehandlung – Hartbearbeitung**

Band 216

Dr.-Ing. Daniel Brabandt

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels
optischer Messtechnik**

