

---

# Entwicklung eines automatischen photogrammetrischen Prüfverfahrens zur Oberflächeninspektion im Automobilbau

Max HÖDEL, Ludwig HOEGNER, Uwe STILLA

## Zusammenfassung

Der moderne Automobilbau, insbesondere im Premiumsegment, setzt äußerst enge Toleranzen hinsichtlich der Oberflächengüte des Endproduktes voraus. Beginnend mit der Blechumformung im Presswerk, über den Karosseriebau, bis hin zur Lackierung und Endmontage, müssen etwaige Oberflächenfehler im teilweise einstelligen Mikrometerbereich detektiert, klassifiziert und lokalisiert werden können.

Diese Fehler können systematisch sein, wie beispielsweise Beulen und Dellen, oder auch unsystematisch, wie etwa Schmutzpickel und Spanabdrücke. Mit jedem erfolgten Arbeitsschritt steigen die assoziierten Nacharbeits- und Ausschusskosten, so dass eine frühzeitige Erkennung unumgänglich ist. Zusätzlich kann mit einer lückenlosen Verfolgung dieser Fehler über die gesamte Produktionskette hinweg die Gesamtproduktion auf datengetriebener Basis nachhaltig gesichert und kontinuierlich optimiert werden.

Hier wird durch die Nahbereichsphotogrammetrie große Abhilfe geschaffen, da hierdurch eine robuste, kontakt- und zerstörungsfreie Prüfung ermöglicht wird. Allerdings stellen Faktoren wie: Vibrationen, Beölung, Lichtverhältnisse und Bauteilbewegung eine große Herausforderung dar, so dass manche klassischen photogrammetrischen Verfahren in dieser harten Produktionsumgebung scheitern. Darüberhinaus ändern sich die Reflektanteigenschaften der Komponenten während der Produktion, beginnend mit diffusem (unlackiertem) Blech und endend mit einer spekularen (glänzenden) Oberfläche.

In diesem Beitrag werden die der Automobilindustrie zur Verfügung stehenden Technologien wie Lasertriangulation, Streifenprojektion und Deflektometrie hinsichtlich ihrer Eignung in jedem Produktionsschritt gegenübergestellt, unter Berücksichtigung der obigen Faktoren. Hierfür wird ein neu entwickeltes standardisiertes Prüfverfahren vorgestellt, das die aus der manuellen Inspektion definierten Fehlermerkmale auf eine automatisierte Inspektion überträgt. Zur Evaluierung der verschiedenen Aufnahmesysteme werden vordefinierte, reproduzierbare Fehler in Pressteilen erzeugt. Basierend auf bestehenden Verfahren des Maschinellen Lernens wird ein neuer Ansatz zur Fehlerdetektion und Klassifikation basierend auf Deep Learning vorgestellt und evaluiert.

# 1 Motivation

## 1.1 Übersicht: Automobilbau

Da es sich bei diesem Forschungsprojekt anwendungsseitig um die Qualitätssicherung im Automobilbau handelt, wird mir einer (stark vereinfachten) Übersicht der vier Hauptprozesse in dieser Produktionskette begonnen.

1. Presswerk
  - Blechplatinen werden zu Außenhaut- und Strukturteilen umgeformt
2. Karosseriebau
  - Presswerkskomponenten werden miteinander verschweißt
3. Lackiererei
  - Rohkarosse wird mehrschichtig lackiert
4. Endmontage
  - Interieur und Exterieur werden ausgebaut, Integration des Antriebs

Beginnend mit einer metallenen Rolle werden Blechplatinen ausgeschnitten und an ein Presswerk geliefert. Im Presswerk werden diese durch eine Reihe aufeinanderfolgender Umformungsoperationen zu rohen Karosseriekomponenten verarbeitet. Diese Komponenten fließen anschließend in den Karosseriebau, wo sie zu Rohkarossen verschweißt (oder anderweitig verbunden) werden. Nach Fertigstellung einer jeden Rohkarosse wird diese in die Lackiererei überführt, wo sie mit mehreren Lackschichten versehen wird (Basislack, Farblack, Decklack). Abschließend fließt die lackierte Karosse in die Endmontage, in der der Antrieb, die Elektronik und alle Anbauteile montiert werden.

Zu jedem dieser vier Hauptprozesse gehört eine durchgängige, einhundertprozentige Qualitätskontrolle. Diese dient sowohl der Identifikation von Fehlern (z.B. hinsichtlich Ausschuss und Nacharbeit), als auch der prozessbegleitenden Ermittlung von Prozessparametern, so dass auf datengetriebener Basis eine robuste Produktion mit immer näher eingewählten Parametern gewährleistet wird. So wird auch ein erheblicher Beitrag zu den Ansprüchen von Industrie 4.0 durch diese flächendeckenden Qualitätsdaten geleistet.

Auch wenn die technologischen Einzelheiten dieser Produktionsprozesse an dieser Stelle nicht unmittelbar relevant sind, so ist eine kurze Diskussion der mit ihnen einhergehenden Störfaktoren essenziell. Diese sind gegeben durch die *Spekularität* und die *Taktzeit*.

## 1.2 Kritische Faktoren für die Inspektion

### 1.2.1 Spekularität

Der erste kritische Faktor, die *Spekularität*, beschreibt die Reflektanzeigenschaften eines Werkstoffes. Je höher der Spekularitätsgrad, desto mehr „glänzt“ der Werkstoff. Je niedriger dieser Grad, desto „rauer“ erscheint er. Für die Produktionsprozesse 1 (Presswerk) und 2 (Karosseriebau), handelt es sich dabei um unlackiertes (raues) Blech, so dass der Spekularitätsgrad gering ausfällt. Für die Prozesse 3 (Lackiererei) und 4 (Endmontage) ist das Blech lackiert (glänzend), so dass der Spekularitätsgrad in diesen späteren Prozessen steigt. Dies wird bei der Auswahl der Erfassungstechnologien relevant bleiben, da unterschiedliche photogrammetrischen Technologien unterschiedliche Spekularitätsgrade voraussetzen.

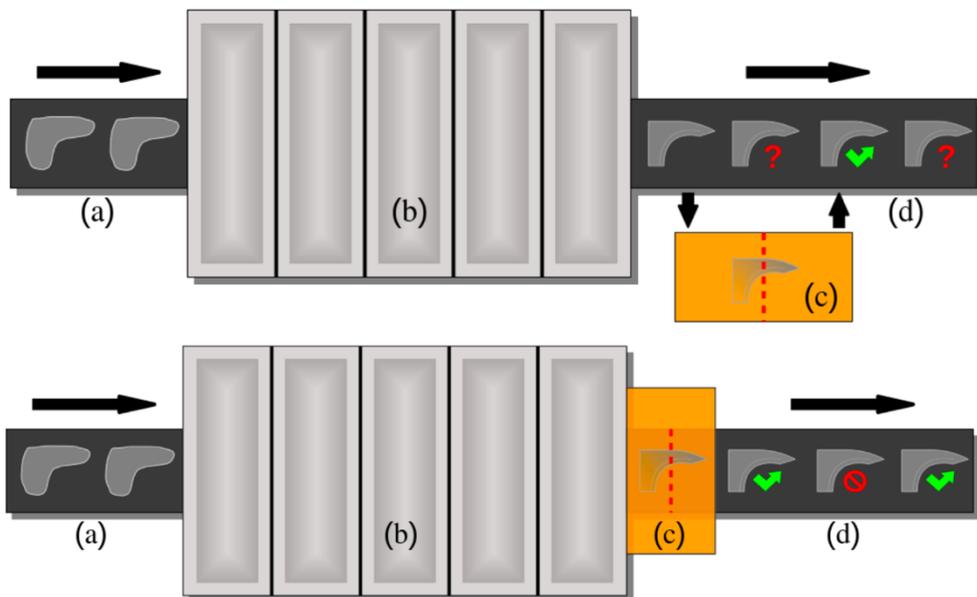
### 1.2.2 Taktzeiten

Der zweite kritische Faktor, die *Taktzeit*, beschreibt den bloßen Zeitaufwand für je einen Produktionsschritt. Für den ersten Prozess (Presswerk) ist diese Taktzeit sehr gering, da moderne Presswerke Komponenten in Intervallen von wenigen Sekunden produzieren können. Für alle weiteren Prozesse ist diese Taktzeit wesentlich höher, da die einzelnen Presswerkskomponenten verbunden werden bzw. dies sind und die Karosse als Gesamteinheit durch die restliche Produktion fließt. Hier ist eine Taktzeit von ca. einer bis hin zu mehreren Minuten zu erwarten, in Abhängigkeit der Produktionskapazität des jeweiligen Herstellers. Zur Unterscheidung werden hier die Begriffe *Komponenten-Taktzeit* (Presswerk) und *Fahrzeug-Taktzeit* (Rest) eingeführt. Diese Taktzeiten sind ebenfalls kritisch, da die photogrammetrische Oberflächeninspektion vollständig erfolgen muss, ohne sie zu verlängern.

### 1.3 Problemformulierung

Mit dem Vorliegen eines Grundverständnisses der Automobilproduktion und der mit ihren Hauptprozessen verbundenen Faktoren für die photogrammetrische Oberflächeninspektion, kann eine konkrete Problemformulierung aufgesetzt werden. Diese ist gegeben als die Erfassung, Evaluierung und Interpretation aller notwendigen Informationen, die zur Beschreibung der Oberflächenbeschaffenheit von Komponenten und Karossen während der gesamten Produktion dienen. Dies kann vereinfachend auch als *Inline*, oder *100%* Prüfung, aufgefasst werden und ist ein zentraler Bestandteil einer datengetriebenen Produktion nach den Ansprüchen von Industrie 4.0.

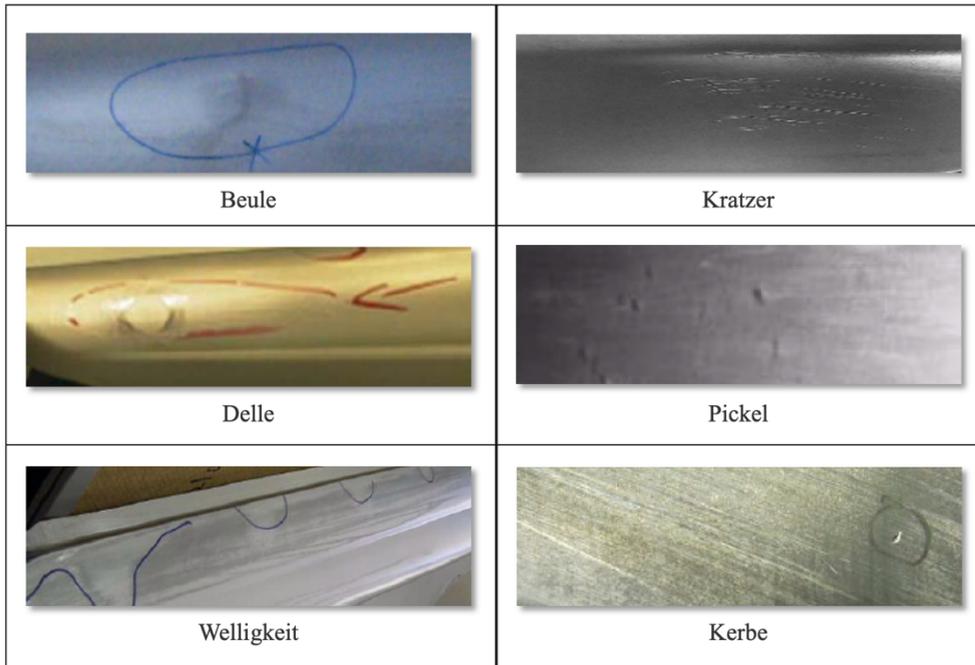
Das Prinzip der Inline-Oberflächeninspektion, verglichen mit dem bisherigen Prinzip der At-line Inspektion, wird für das Beispiel Presswerk in Abbildung 1 grafisch dargestellt.



**Abb. 1:** At-line Oberflächeninspektion (oben) vs. Inline-Oberflächeninspektion (unten)

## 2 Oberflächendefekte

Bevor mit einer Diskussion der der Automobilindustrie zur Verfügung stehenden Technologien für die Oberflächeninspektion begonnen wird, wird zunächst die Landschaft der unterschiedlichen Oberflächendefekte präsentiert. Da das von den Autoren durchgeführte Forschungsprojekt in Kooperation mit der BMW Group erfolgt, wird ein Ausschnitt der durch die BMW Group festgelegten Oberflächendefekte in Abbildung 2 nachfolgend präsentiert.



**Abb. 2:** Oberflächendefekte nach BMW Group Standard

In Abbildung 2 sind 6 unterschiedliche Oberflächendefekte zu sehen, die primär im Presswerk, aber auch bei späteren Prozessen, entstehen können. Dabei ist es ratsam, diese Defekte nach ihrer geometrischen Ausprägung zu kategorisieren. Solch eine Kategorisierung erleichtert weiter die Technologieauswahl und ist hier durch die linke und rechte Spalte gegeben.

In der linken Spalte sind *geometrische* Oberflächendefekte zu sehen, nämlich Beulen, Dellen und Welligkeiten. Solche Defekte schlagen sich in der Bauteilgeometrie wieder, da es sich um lokale Abweichungen in der Komponentenform handelt. Eine Detektion durch Triangulation bzw. 3D Rekonstruktion wird hierdurch möglich.

In der rechten Spalte sind *nicht-geometrische* Oberflächendefekte aufgezeigt, nämlich Kratzer, Pickel und Kerben. Im Gegensatz zu den geometrischen Oberflächendefekten besitzen diese keine oder eine maximal sehr kleine geometrische Ausprägung, da sie eher Störungen im Blech selbst sind als Abweichungen in der Komponentenform. Eine Detektion durch Triangulation bzw. 3D Rekonstruktion wird in diesem Fall schwer bis unmöglich.

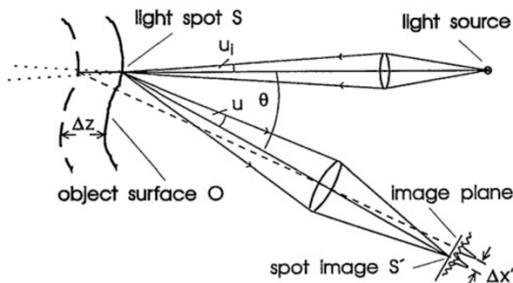
### 3 Technologien

Mit einer Kenntnis der Produktions- und Inspektionsaufgaben, sowie der zu erwartenden Oberflächendefekte, kann nun mit der Auswahl einer geeigneten sensorischen Lösung begonnen werden. Diese Lösungen sind vielfältig in ihren Erscheinungen, lassen sich jedoch sehr übersichtlich in vier Hauptkategorien eingliedern. Dabei stellen die ersten 3 Kategorien die „klassischen“ Lösungen dar, die 4. Kategorie hingegen ein aktuelles Forschungsfeld.

1. Laserscanning
  - Vorwärtstriangulation einer projizierten Laserlinie (kein polares Scanning)
2. Streifenprojektion
  - Vorwärtstriangulation eines projizierten, strukturierten Musters
3. Deflektometrie
  - Beobachtung eines reflektierten, strukturierten Musters
4. Kameras mit Bildverarbeitung
  - Analyse von Bildern ohne Verwendung eines strukturierten Musters

#### 3.1 Laserscanning

Die erste und älteste der „klassischen“ Lösungen ist die Technologie des *Laserscannings*. Diese Technologie hat bereits breiten Einzug in geodätische, bautechnische und produktionsbezogene Erfassungsaufgaben gefunden (SPRING, 2000) und ermöglicht die 3D Rekonstruktion globaler Koordinaten von realen Szenen und Objekten. Für die Oberflächeninspektion wird hier aber auf eine gesonderte Variante des Laserscannings eingegangen, nämlich auf die *Laserlinientriangulation*, wie in Abbildung 3 dargestellt.

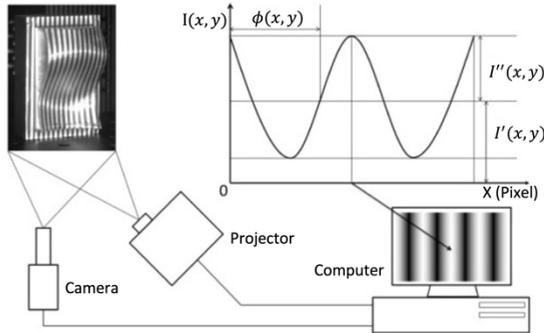


**Abb. 3:** Laserlinientriangulation (DORSCH ET AL., 1994)

Im Gegensatz zum klassischen, polaren Laserscanning, bei dem aus Strecken- und Winkelmessungen eine Punktwolke aufgenommen wird, wird bei der Laserlinientriangulation eine Laserlinie auf ein Bauteil projiziert und relativ zum Bauteil bewegt. Dabei wird die Projektion dieser Linie durch eine oder mehrere versetzte Kameras kontinuierlich beobachtet. Jede örtliche Störung ( $\Delta z$  in Abb. 3) äußert sich dann als transversale Verzerrung des Bildes der aufgenommenen Laserlinie ( $\Delta x'$  in Abb. 3). Diese Technologie ermöglicht die Detektion geometrischer Defekte, bei einem geringen Spekularitätsgrad, in mittel- bis langer Taktzeit.

### 3.2 Streifenprojektion

Die zweite technologische Lösung für die Oberflächeninspektion ist gegeben durch die *Streifenprojektion* (WUST & CAPSON 1991). Diese Technologie ist bereits in der Automobilindustrie, als auch in weiteren Produktionssektoren, vielfältig im Einsatz. Allerdings ist dieser Einsatz bisher primär auf die Geometrieabsicherung beschränkt gewesen (Ist-Soll Validierung). Durch sensorische Weiterentwicklungen werden aber zunehmend auch Lösungen für die Oberflächeninspektion angeboten. Das Funktionsprinzip dieser Technologie ist in Abbildung 4 dargestellt.



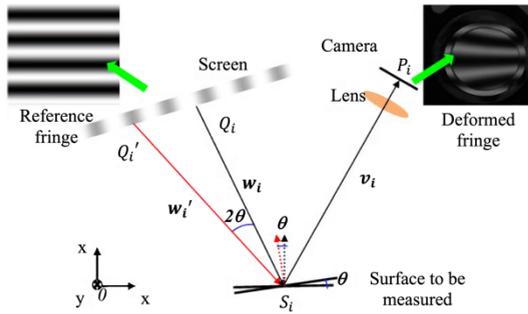
**Abb. 4:** Streifenprojektion (LIN ET AL., 2016)

Bei der Streifenprojektion wird, dem Namen entsprechend, ein strukturiertes, i.d.R. sinusförmiges Streifenmuster von einem Projektor aus auf ein Bauteil projiziert und von einer oder mehreren statisch angeordneten Kameras aufgenommen. Dabei formen die Projektionszentren von Projektor und Kamera(s) eine bekannte Triangulationsbasis. Zu jedem Flächenpunkt wird dann die Phase des Musters ( $\varphi(x,y)$  in Abb. 4), welche in der Lichtintensität ( $I(x,y)$  in Abb. 4) codiert ist, aufgenommen und zu ihr trianguliert. Wie auch die Laserlinientriangulation werden hier geometrische Defekte, bei einem geringen Spekularitätsgrad, in mittel- bis langer Taktzeit detektiert.

### 3.3 Deflektometrie

Eine neuere, aber durchaus auch bewahrte Technologie im Produktionskontext ist die der *Deflektometrie* (KNAUER ET AL., 2004). Das Funktionsprinzip dieser Technologie kann intuitiv als Umkehrung der Streifenprojektion aufgefasst werden. Es wird, wie bei der Streifenprojektion, ein i.d.R. sinusförmiges Muster für die Detektion von Störungen verwendet. Im Gegensatz zur Streifenprojektion wird dieses Muster jedoch nicht *projiziert*, sondern *reflektiert*. Diese Umkehrung bedeutet auch, dass die Deflektometrie einen *hohen* Spekularitätsgrad voraussetzt, da schließlich eine Spiegelung (oder eine Reihe davon) aufgenommen wird und keine Projektion.

Eine schematische Übersicht der Funktionsweise dieser Technologie ist in Abbildung 5. grafisch gegeben.

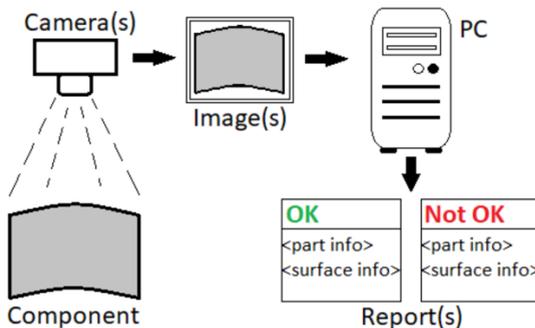


**Abb. 5:** Deflektometrie (ZHANG ET AL., 2017)

Bei der deflektometrischen Oberflächeninspektion wird ein Referenzmuster (oben links in Abb. 5) auf einem Bildschirm angezeigt. Eine oder mehrere Kameras (oben rechts in Abb. 5) beobachten dann die Reflexion dieses Musters auf dem Bauteil (unten mittig in Abb. 5). Jede örtliche Störung äußert sich dann unmittelbar in der aufgenommenen Reflexion. Somit können geometrische (und bedingt auch nicht-geometrische) Oberflächendefekte, bei einem diesmal hohen Spekularitätsgrad, in mittel- bis langer Taktzeit detektiert werden.

### 3.4 Kameras mit Bildverarbeitung

Die letzte Kategorie, welche diesmal weniger eine schlüsselfertige Produktpalette als ein aktives Forschungsfeld beschreibt, ist gegeben durch *Kameras mit Bildverarbeitung*. Diese als Sammelbegriff zu verstehende Bezeichnung beschreibt die Aufnahme und Auswertung von Kamerabildern ohne strukturierte Muster mit den Methoden der modernen Bildverarbeitung.



**Abb. 6:** Kameras mit Bildverarbeitung

In Abbildung 6 ist eine Konfiguration für die Inspektion durch Kameras und Bildverarbeitung dargestellt. Eine Komponente wird hier, meist unter Verwendung einer starken Lichtquelle, mit einer oder mehreren Kameras aufgenommen und die Bilder maschinell ausgewertet. Für die Auswertung kommen häufig Methoden des Deep Learnings zum Einsatz. Hierdurch wird eine Detektion nicht-geometrischer Oberflächendefekte bei unterschiedlichen Spekularitätsgraden in sehr kurzen Taktzeiten möglich.

## 4 Eignungsvergleich

Nach der Evaluierung der unterschiedlichen Inspektionstechnologien kann ein Eignungsvergleich aufgestellt werden. Dieser stuft die 4 Inspektionstechnologien aus Kapitel 3 hinsichtlich ihrer potenziellen Eignung für die 4 Hauptprozesse des Automobilbaus ein, unter besonderer Berücksichtigung der kritischen Faktoren aus Kapitel 1. Dieser Vergleich ist in Tabelle 1 nachstehend visualisiert und entstammt der bisherigen Forschung der Autoren.

**Tabelle 1:** Eignungsvergleich der Inspektionstechnologien

Technologie Prozess	Laserscanning	Streifen- projektion	Deflektometrie	Kameras mit Bildverarbeitung
Presswerk	Potenziell	Potenziell	Ungeeignet	Potenziell
Karosseriebau	Geeignet	Geeignet	Ungeeignet	Potenziell
Lackiererei	Ungeeignet	Ungeeignet	Geeignet	Potenziell
Endmontage	Ungeeignet	Ungeeignet	Geeignet	Potenziell

In Tabelle 1 sind diejenigen Technologien, die sowohl theoretisch als auch praktisch ihre Eignung bewiesen haben, als grün markiert. Dies kann auch als Vorhandensein einer schlüsselfertigen Lösung aufgefasst werden. Technologien mit theoretischer Eignung, die jedoch praktisch noch nicht in Serie verwendet werden können, sind gelb markiert. Als rot markiert sind Technologien, die aufgrund ihrer jeweiligen Funktionsprinzipien für die Inspektion in einem gewissen Produktionsschritt inhärent ungeeignet sind.

Die erste und signifikanteste Erkenntnis aus Tabelle 1 ist das akute Fehlen einer geeigneten Lösung für den Einsatz im Presswerk. Deshalb wird an dieser Stelle erneut betont, dass der Lückenschluss im Presswerk das anwendungsseitige Hauptaugenmerk dieser Arbeit ist, da hier sowohl Spekularitätsgrad als auch Taktzeit gering ausfallen.

Die zweite wichtige Erkenntnis liegt in der Einstufung der 4. Kategorie (Kameras mit Bildverarbeitung). Dieser technologische Ansatz ist als potenziell anwendbar für jeden Produktionsprozess eingestuft worden. Maßgeblich hierzu beitragend sind die Tatsachen, dass die Aufnahmezeiten sehr gering ausfallen und dass die Methode als einzige mit einer großen abdeckbaren Spekularitätsspanne auskommt.

## 5 Ansatz

Basierend auf den hier gezeigten Erkenntnissen wird nun abschließend ein konkreter Ansatz für die Entwicklung eines automatischen, photogrammetrischen Prüfverfahrens für die Oberflächeninspektion im Automobilbau präsentiert. Diese Entwicklung wird als Bestandteil einer Doktorarbeit des Hauptautors unter der Supervision der Nebenauforen in Kooperation mit der BMW Group geleistet. Mit ihr soll die in Kapitel 4 beschriebene Lücke in der Presswerksproduktion geschlossen und die Fähigkeiten der Photogrammetrie im industriellen Umfeld ausgebaut werden.

## 5.1 Datengrundlage

Ein aussagekräftiger, breit aufgestellter Datensatz ist unumgänglich für erfolgreiche Forschung in der Disziplin der modernen Bildverarbeitung. Deshalb sind in einem ersten Schritt ca. 50 Presswerksteile unterschiedlicher Größe beschafft worden. Dieser Satz an Versuchsteilen wird kontinuierlich wachsen.

### 5.1.1 Reproduzierbare Defekte

Für die eigentliche Oberflächeninspektionsforschung werden reproduzierbare Defekte in einem untergeordneten Satz der Teile eingebracht (manche Teile bleiben unversehrt). Durch die Verwendung normierter Werkzeuge und Fallhöhen können beispielsweise Beulen, Dellen und Welligkeiten kontrolliert durch Fallversuche eingebracht werden. Die Parameter für das Einbringen der Defekte werden dabei so präzise gewählt, dass sie jederzeit in gleicher Kategorie und Ausprägung in weitere Teile eingebracht werden können.

### 5.1.2 Nicht-reproduzierbare Defekte

Die reproduzierbaren Defekte erlauben die schnelle Erzeugung eines aussagekräftigen und beliebig erweiterbaren Datensatzes für die Inspektionsforschung. Um Probleme wie beispielsweise das Overfitting (bei neuronalen Netzen) zu vermeiden, sind dennoch Bauteile mit realen Defekten notwendig. Diese werden aus der Produktion ausgeschleust und zu den Bauteilen mit reproduzierbaren Defekten aufgenommen. Durch eine inline-Kameraanlage im Presswerk soll dieser Datensatz ebenfalls kontinuierlich wachsen.

## 5.2 Forschung Deflektometrie (Infrarot, Lattitude Code Scanning)

In Kapitel 2 findet eine Unterteilung der Defekte in *geometrisch* und *nicht-geometrisch* statt. Für die geometrisch ausgeprägten Oberflächendefekte (Defekt als lokale geometrische Abweichung) wird auf die Deflektometrie zurückgegriffen. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die „klassische“ Deflektometrie eine spekulare (glänzende) Oberfläche voraussetzt, wird die Wellenlänge hin zum Infrarotbereich verlängert, so dass eine kohärente Reflektion aufgenommen werden kann (HÖFER, 2016). Durch die zusätzliche Verwendung einer neuartigen Technologie namens „Lattitude Code Scanning Deflectometry“ (DU PREEZ, 2022) werden flächenhafte Scans komplexer, nicht-spekularer (rauer) Bauteile in kurzer Zeit möglich.

## 5.3 Forschung Bildverarbeitung (Deep Learning)

Betrachte man erneut die nicht-geometrischen Oberflächendefekte wie Kratzer und Kerben, so ergibt sich der Schluss, dass diese nicht durch Triangulationsverfahren detektierbar sind und nur bedingt durch die Deflektometrie detektierbar sind. Da diese Defekte dennoch als lokale Störungen im Blech existieren und diese oft mit bloßem Auge erkennbar sind liegt es nahe, diese Defekte mit Kameras und Bildverarbeitung zu erkennen. Hierzu werden anhand der Testkomponenten neuronale Netze trainiert, die diese Defekte detektieren können. Um eine robuste Detektion zu ermöglichen, müssen die (Anfangs) vergleichsweise geringen Datenmengen gemeistert werden. Hierzu werden mitunter Verfahren der Datenaugmentierung, generative Netze und das sogenannte Transfer Learning zur Anwendung kommen.

## 5.4 Hybridisierung

Am Ende sollen keine zwei getrennten, sondern eine ganzheitliche Oberflächeninspektion bewirkt werden. Deshalb müssen, nach dem Erforschen und Optimieren der beiden getrennten Inspektionssystemen, deren Ausgaben miteinander hybridisiert werden. Resultat dieser Hybridisierung (und somit des Gesamtsystems) wird eine grafische Ausgabe sein, bei dem je ein Bauteil zu sehen ist mit einer Markierung der ggf. durch Oberflächendefekte betroffenen Regionen. Zusätzlich zur grafischen Ausgabe wird zu jedem gemessenen Bauteil eine kompakte Datei erzeugt, die alle relevanten Oberflächendefektinformationen beinhaltet. Diese Datei wird künftig als Eingabegröße in die datengetriebene Pressenproduktion einfließen.

## 6 Zusammenfassung

Mit dieser Arbeit soll ein automatisches, photogrammetrisches Oberflächeninspektionssystem entstehen, welches dazu in der Lage ist, alle relevanten Oberflächendefekte zu *Detektieren*, *Klassifizieren* und *Lokalisieren*. Dabei werden neue Erkenntnisse über die Photogrammetrie in diesem herausfordernden industriellen Umfeld erwartet. Durch die neuartige Kopplung von Deflektometrie und Bildverarbeitung soll ein möglichst breites Spektrum an bisher nicht erkennbaren Oberflächendefekten detektierbar gemacht werden. Die Autoren werden projektbegleitend detaillierte Ergebnisse mit der Community teilen und publizieren.

## Literatur

- Dorsch, R. G., Hausler, G., Herrmann, J. M. (1994): *Laser triangulation: fundamental uncertainty in distance measurement*. Appl. Opt., 33(7), S. 1306–1314.
- Blackman, G. & Du Preez, I. (2022): *Rethinking 3D scans of reflective surfaces*. Imaging & Machine Vision Europe, 108/2022, S. 6.
- Höfer, S. & Beyerer, J. (2016): *Scannende Infrarotdeflektometrie für die Inspektion diffus spiegelnder Oberflächen*. tm - Technisches Messen, 83(6), S. 374–385.
- Lin, H., Gao, J., Mei, Q., He, Y., Liu, J., Wang, X. (2016): *Adaptive digital fringe projection technique for high dynamic range three-dimensional shape measurement*. Opt. Express, 24(7), S. 7703–7718.
- Knauer, M. C., Kaminski, J., Hausler, G. (2004): *Phase measuring deflectometry: a new approach to measure specular freeform surfaces*. Optical Metrology in Production Engineering, 5457, S. 366–376.
- Spring, A. P. (2020): *A history of laser scanning, Part 1: space and defense applications*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 86(7), S. 419–429.
- Wust, C. & Capson, D. W. (1991): *Surface profile measurement using color fringe projection*. Machine Vision and Applications, 4(3), S. 193–203.
- Zhang, X., Jiang, L., Zhang, G. (2017): *Novel method of positioning optical freeform surfaces based on fringe deflectometry*. CIRP Annals, 66(1), S. 507–510.