

Schnelle Sortierung und Prüfung von Schüttgut im freien Fall am Beispiel Ventildfeder

Peter Jakob, Carl Basler, Tobias Schmid-Schirling, Albrecht Brandenburg und Daniel Carl

Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM

Zusammenfassung

Am Beispiel von zylindrischen Ventildedern mit einem Durchmesser von etwa 2 cm wird gezeigt, wie eine Oberflächenprüfung hinsichtlich fluoreszierender Ölreste sowie die Sortierung anhand einer Messung des Federdurchmessers ermöglicht wird. Das verwendete Inspektionssystem ist dabei modular aufgebaut und charakterisiert die Prüflinge als vereinzelttes Schüttgut im freien Fall ohne spezielles Teilehandling. Von den Federn ist keine spezielle Vorkenntnis der Geometrie erforderlich, also z. B. keine CAD-Zeichnung. Die gezeigten Verfahren sind genau genug, um Federn mit einem Durchmesser-Unterschied von etwa einem mm sicher zu unterscheiden sowie geringe Ölreste von einigen $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ aufzuspüren. Die Verfahren sind schnell genug, um eine Prüfung bzw. Sortierung im Sekundentakt auf diese Weise durchzuführen.

Schlagwörter

Reinheitsprüfung, Geometrieprüfung, Schüttgut, Sortierung

Motivation

Es gibt derzeit keine vollständige Oberflächen- und Maßhaltigkeitsprüfung für Drahtprodukte wie z. B. Federn, die in großer Zahl hergestellt und daher meist als Schüttgut transportiert werden. Aufwändiges Handling – Bauteile vereinzeln und orientieren – kann hier zwar Abhilfe schaffen, doch ist dies in vielen Anwendungsfällen entweder zu teuer oder bei großer Typenvielfalt zu unflexibel und daher in der Praxis nicht verbreitet. Das Fraunhofer IPM hat ein modulares Inspektionssystem realisiert (siehe Abbildung 1), mit dem viele einfache Drahtprodukte, wie z. B. Schrauben, Bolzen etc. aber auch komplex geformte Bauteile wie Federn im Sekundentakt sortiert und inspiziert werden können. Einzige Voraussetzung ist, dass das Schüttgut vereinzelt und vertikal fallend zugeführt werden kann. Beim Durchfallen der Prüfstecke werden in einem Sekundenbruchteil hochauflösende Aufnahmen aus verschiedenen Ansichten generiert, so dass auch komplexe Geometrien mittels automatisierter Bildverarbeitung gegen ein Soll geprüft werden können. Voraussetzung ist hierfür, dass die Sollgeometrie beispielsweise in Form einer CAD-Zeichnung bekannt ist. Dabei spielt die Schätzung der Orientierung des Prüflings eine entscheidende Rolle [Wuest2007]. Das Problem ist, dass bei vielen Bauteilen kein vollständiges CAD-Modell existiert bzw. die realen Bauteile – selbst Gutteile – stark vom Modell abweichen, so dass die genannten Verfahren nicht verwendet werden können.

In diesem Tagungsbeitrag wird am Beispiel von zylindrischen Ventildedern *ohne Vorkenntnis der Geometrie* demonstriert, wie dennoch auf relevante Merkmale des Prüflings geschlossen werden kann. Erstens wird das Quantifizieren von fluoreszierenden Stoffen auf der Oberfläche dargestellt [Holz2018]. Unsichtbare filmische Verunreinigungen, z. B. durch Öle, Ziehmittel etc., und funktionale Beschichtungen, z. B. Korrosionsschutz, können so verlässlich bildgebend quantifiziert werden. Zweitens wird am Beispiel des Federdurchmessers gezeigt, wie die im freien Fall gewonnen Bilddaten für eine automatisierte Merkmalsbestimmung verwendet werden können. Sofern sich verschiedene Federn in diesen exemplarisch untersuchten Merkmalen unterscheiden ist eine Sortierung der Prüflinge möglich. Die Untersuchungen wurden an Ventildedern mit einem Außendurchmesser von etwa 2 cm durchgeführt.

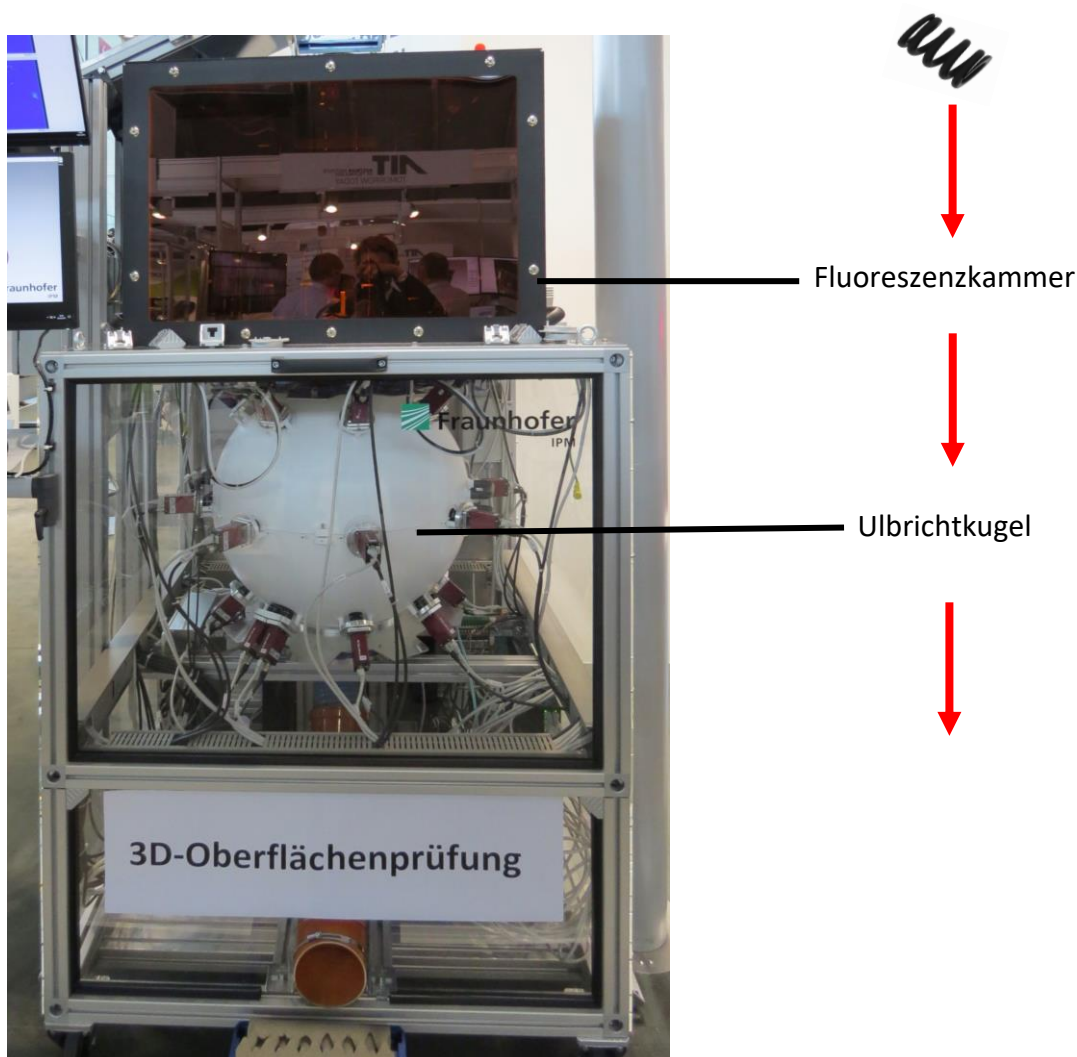


Abbildung 1: Modulares Konzept von zwei verschiedenen Freifall-Experimenten, die nacheinander oder unabhängig voneinander verwendet werden können. Zuerst fällt der Prüfling durch die schwarze Fluoreszenzkammer und wird, z. B. auf Ölreste, untersucht. Im Anschluss werden gleichzeitig Bilder aus bis zu 27 Richtungen in einer Ulbrichtkugel aufgenommen. Computergestützt lassen sich so Merkmale der Textur und Geometrie des Prüflings extrahieren. In dieser Veröffentlichung betreffen diese Merkmale den Durchmesser sowie die dreidimensionale Orientierung und Position einer fallenden Ventildeder. Bildquelle: Fraunhofer-Allianz Vision.

Methoden

Quantifizierung filmischer Verunreinigung mit Öl durch Fluoreszenz

Fluoreszenz

Wird ein organischer Stoff mit UV-Strahlung beleuchtet, so absorbieren die Moleküle des Stoffes ein Teil dieser Strahlung und strahlen bei größeren Wellenlängen wieder ab (Stokes shift) [Lako2008]. Dieser Effekt wird Autofluoreszenz genannt, da er ohne die Zugabe von speziellen Fluoreszenzpigmenten stattfindet. Autofluoreszenz tritt bei nahezu allen organischen Schichten, wie beispielsweise bei Öl, Fett und Staub, aber auch bei polymerhaltigen oder siliziumbasierten Korrosionsschutzschichten auf. Metalle dagegen fluoreszieren nicht, so dass fluoreszierende Stoffe auf Metall optisch detektiert werden können, selbst wenn diese für das menschliche Auge nicht sichtbar sind, z. B. sehr dünne transparente Schichten. Die Stärke der Fluoreszenz ist abhängig von der Beleuchtungswellenlänge, der Beleuchtungsintensität, der Zusammensetzung des verwendeten Stoffes, aber insbesondere von der Stoffmenge. Ist die Zusammensetzung des Stoffes bekannt, kann mit einer Referenzprobe die abgestrahlte Lichtmenge einer Schichtdicke zugeordnet werden [Holz2019].

Aufbau

Abbildung 2 zeigt den Aufbau des Messsystems von Innen. Die Probe fällt von oben durch die Prüfkammer. Aus dem Signal von zwei Lichtschranken wird der Zeitpunkt der Bildaufnahme bestimmt. Etwa 100 LEDs mit je 2 W optischer Leistung und 365 nm Wellenlänge beleuchten dann das Objekt von allen Seiten in einem Bereich mit ca. 10 cm Kantenlänge. Sechs Kameras, die jeweils unter 90 Grad zueinander angeordnet sind, nehmen ein Bild mit 200 µs Belichtungszeit auf. Vor den Kameras befindet sich ein optischer Bandkantenfilter, der nur Fluoreszenzstrahlung transmittiert und dadurch das Anregungslicht herausfiltert.

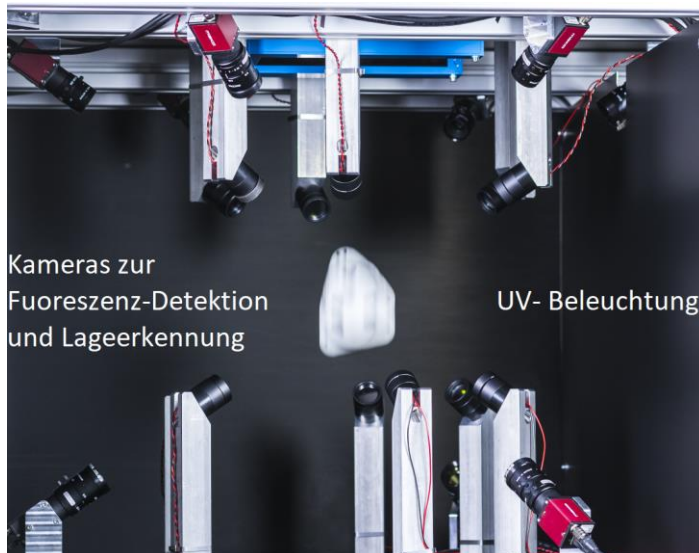


Abbildung 2: Aufbau zur Messung der Menge von organischen Materialien auf Metallbauteilen im freien Fall.

Experiment

Zur Quantifizierung einer Ölbelegung auf einem Bauteil wurden zuerst Bleche mit einer definierten Ölmenge hergestellt. Die Menge wurde durch Wiegen mit einer Präzisionswaage bestimmt. Abbildung 3 links zeigt den Zusammenhang zwischen der Ölmenge und der

Bildhelligkeit. Verwendet wurde das Öl KTL N16, ein weit verbreitetes Korrosionsschutz- und Umformöl.

Um den Bereich abzuschätzen in dem die Kalibrierkurve zuverlässig ist, wurde mit einem Absorptionsspektrometer der Absorptionskoeffizient α von KTL-N16 bei 365 nm gemessen: $\alpha = 40/\text{cm}$.

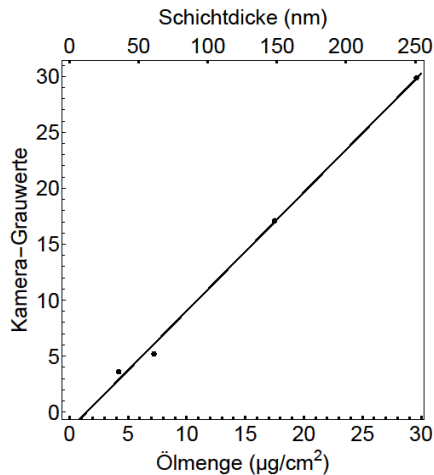


Abbildung 3: Bestimmung einer Kalibrierkurve zur Quantifizierung der Ölmenge mittels Fluoreszenz. Dargestellt sind die Kamera-Grauwerte (Bildhelligkeit) in Abhängigkeit von der Ölmenge für Bleche mit gewogener, homogener Schichtauflage.

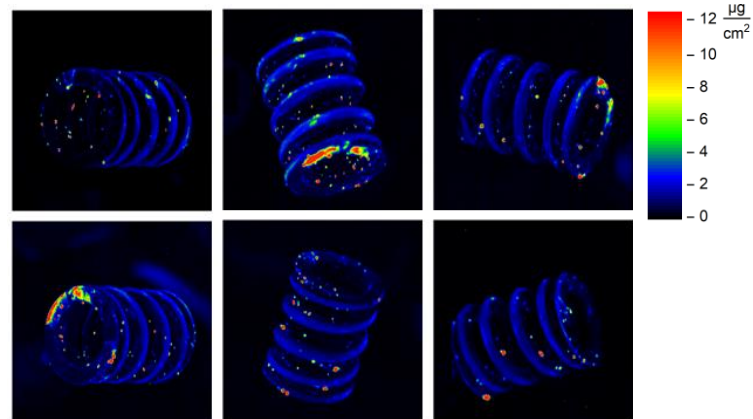


Abbildung 4: Aufnahme einer auf der Außenseite mit KTL-N16 beölten Feder. Die geringe Ölaufage wurde mit einer höheren Verstärkung als die Kalibrierkurve aufgenommen und entsprechend skaliert. So sind auch sehr geringe Schichtauflagen von wenigen $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ messbar. (Ausschnitt aus dem Bildfeld von $10 \times 10 \text{ cm}^2$)

Diskussion

Abbildung 4 zeigt die Aufnahme einer mit einem dünnen Ölfilm beölnten Probe, die von sechs Seiten im freien Fall aufgenommen wurde. Die Belichtungszeit betrug $200 \mu\text{s}$, was zu einer vertikalen Bewegungsunschärfe von ca. $0,5 \text{ mm}$ führt. Der Abbildungsmaßstab ist etwa $0,2 \text{ mm}$ pro Pixel und damit verbunden eine entsprechende Ortsauflösung. Auch extrem dünne Ölaufagen von $1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ sind ortsaufgelöst erkennbar. An der Unterseite der Feder ist ein Fleck mit dickerer Ölaufage zu sehen, die kleinen roten Punkte sind organische Staubpartikel, die an der mit Öl benetzten Oberfläche anhaften.

Die Dauer einer Fluoreszenzmessung und –auswertung mit hinterlegter Kalibrierkurve ist im Wesentlichen bestimmt durch die Zeit der Bildaufnahme und –übertragung zum Computer und beträgt weniger als eine Sekunde.

Bei Prüflingen, von denen ein CAD-Modell existiert, ist die ortsaufgelöste Prüfung des Ölbelags möglich. Dabei würde nach erfolgreicher Schätzung der Orientierung des Prüflings die gemessene, fluoreszierende Textur auf das CAD-Modell gelegt.

Quantifizierung des Durchmessers einer zylindrischen Feder

Aufbau

Der Prüfling fällt zur Textur- und Geometrieprüfung durch eine Ulbrichtkugel, siehe Abbildung 1. Die extrem diffuse Beleuchtung in der Ulbrichtkugel unterdrückt wirkungsvoll die Bildung von Schlagschatten an komplexen Geometrien und ermöglicht eine deutlich bessere Oberflächen- und Geometrieprüfung als z. B. unter gerichteter Beleuchtung. Die zweite Prüfstation kann sich unterhalb der Fluoreszenzkammer befinden, so dass beide Prüfungen in einem Schritt durchgeführt werden können. Analog zur Fluoreszenzkammer wird das Signal von zwei Lichtschranken genutzt, um bis zu 27 monochromatische Kameras gleichzeitig auszulösen. Der Abbildungsmaßstab ist mit 0,07 mm pro Pixel im Bereich der Bewegungsunschärfe. Geblitzt wird mit LEDs im blauen Spektralbereich mit einer Dauer von nur 20 μ s. Durch die hohe Abdeckung der Kugeloberfläche mit Kameraperspektiven sind auch konkave Stellen auf der Oberfläche des Prüflings einsehbar.

Verfahren

Das Vermessen des Federdurchmessers wird mit drei verschiedene Verfahren durchgeführt und die Ergebnisse miteinander verglichen:

1. Der Federdurchmesser D_M wird mittels Messschieber vermessen und eine entsprechende Unsicherheit durch wiederholte Messung angegeben. Das Ergebnis dieses Verfahrens ist im Folgenden die Referenz, um die Ergebnisse der anderen Verfahren zu bewerten.
2. Ein fotogrammetrisches Verfahren nutzt einen konstanten Abbildungsmaßstab zur Vermessung der Feder (siehe Abbildung 5). Die Breite der Feder D_i wird auf Perspektive i abgeschätzt und über alle¹ Perspektiven N gemittelt.

$$\bar{D} = \frac{1}{N} \sum_N D_i \quad (1)$$

Der Fehlereinfluss der fehlenden Tiefeninformationen wird durch das Mitteln gegenüberliegender Perspektiven näherungsweise eliminiert. Das Ergebnis dieses Verfahrens dient als Startwert für das iterative, dritte Verfahren.

3. Als iteratives Verfahren setzt die dritte Variante die Posenschätzung von Zylindern nach [Becke2015] voraus. Dabei wird die Feder als Zylinder approximiert und die Pose (d. h. die Orientierung und Position)

$$\hat{a} = (\mathbf{v}^T, d)^T \quad (2)$$

dieses Zylinders auf Basis der Bilder aller¹ Perspektiven geschätzt. Die Rotation des Zylinders wird dabei als Rodrigues Vektor \mathbf{v} ausgedrückt. Die Größe d beschreibt den Abstand der Zylindersymmetrieachse zum Ursprung.

Das Ablauf-Diagramm in Abbildung 6 dient zur Veranschaulichung des Verfahrens. Im Wesentlichen wird der Durchmesser \bar{D} mit Startwert aus Gl. (1) variiert und zu jedem \bar{D} eine Posenschätzung durchgeführt. Das Ergebnis jeder Posenschätzung ist die optimale Pose $\hat{a}^*(\bar{D})$. Je besser die Posenschätzung funktioniert hat, desto kleiner ist der

¹ Sofern keine Federn-Flanken im Bild erkennbar sind, fällt der Beitrag dieser Perspektive weg.

resultierende Residuum-Vektor $\delta(\hat{a}^*, \bar{D})$, Gl. (4). Ein optimaler Federdurchmesser findet sich also durch

$$\bar{D}^* = \arg \min \{ \delta(\hat{a}^*, \bar{D})^T \delta(\hat{a}^*, \bar{D}) \} \quad (3)$$

und mit $\delta(\hat{a}^*, \bar{D})$ [Becke2016]

$$\delta(\hat{a}^*, \bar{D}) = \begin{pmatrix} \tilde{n}_{+,1} \\ \tilde{n}_{-,1} \\ \tilde{n}_{+,2} \\ \tilde{n}_{-,2} \\ \vdots \\ \tilde{n}_{+,N} \\ \tilde{n}_{-,N} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \hat{n}_{+,1} \\ \hat{n}_{-,1} \\ \hat{n}_{+,2} \\ \hat{n}_{-,2} \\ \vdots \\ \hat{n}_{+,N} \\ \hat{n}_{-,N} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Die gemessenen Normalen $\tilde{n}_{\pm,i}$ werden aus den Bildern der einzelnen Perspektiven gewonnen (siehe Abbildung 5). Diese Vektoren stehen senkrecht auf die Ebenen, die durch die rote bzw. blaue Gerade und dem Kamera-Ursprung definiert sind. Die Normalen $\hat{n}_{\pm,i}$ dagegen werden durch das Modell von [Becke2015] berechnet und hängen neben der Pose \hat{a}^* vom betrachteten Zylinderdurchmesser \bar{D} ab.

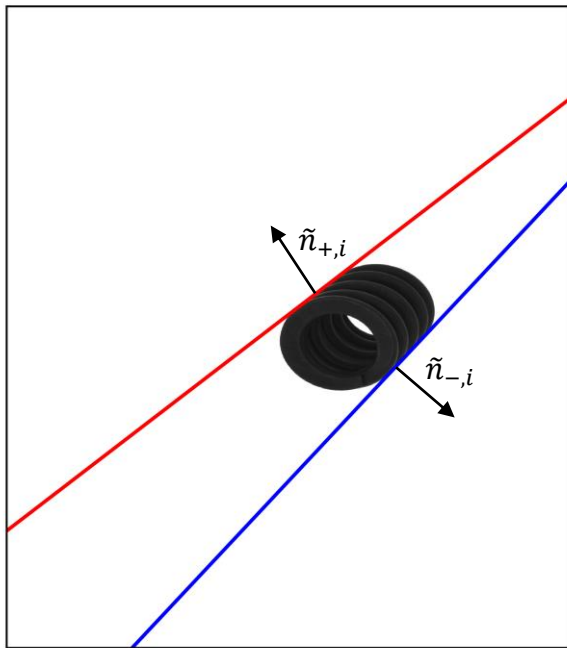


Abbildung 5: Das Bild einer Feder aus einer Kameraperspektive mit automatischer Erkennung der Federn-Flanken (rot und blau). Der Federdurchmesser D_i wird abgeschätzt als Abstand dieser beiden Geraden in der Mitte der Feder. Für alle Perspektiven wird der gleiche Abbildungsmaßstabs angesetzt. Die Normalen $\tilde{n}_{\pm,i}$ stehen senkrecht auf die Ebenen, die durch die Federn-Flanken und dem Kameraursprung definiert sind.

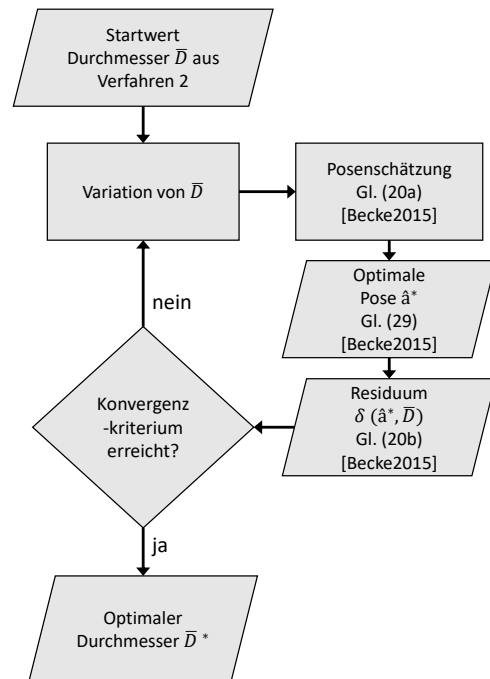


Abbildung 6: Ablauf-Diagramm für Verfahren 3 zur Bestimmung des Durchmessers \bar{D}^* . Das Verfahren baut auf der Posenschätzung von [Becke2015] auf. Der Startwert \bar{D} für den Durchmesser der Feder wird durch Verfahren 2 ermittelt.

Simulation und Experiment

Zwei handelsübliche Zylinderfedern werden nach Verfahren 1, 2 und 3 (siehe vorheriger Abschnitt) hinsichtlich Durchmesser charakterisiert. Die Ergebnisse dazu sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Mit $N = 15$ wurden Daten von etwa der Hälfte der möglichen Cameras ausgewertet. Je Ventileder wurden etwa 20 Messungen durchgeführt. Das Potential der vorgestellten Verfahren kann mithilfe synthetischer Daten weiter abgeschätzt werden. Hierfür wurden Fotoaufnahmen aus den unterschiedlichen Perspektiven simuliert indem CAD-Modelle zu Feder 1 mit $D_M = 22,8$ mm und zu Feder 2 mit $D_M = 23,9$ mm entworfen und anschließend je Feder 90 Messungen mit zufälliger Federorientierung und Position simuliert wurden.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Auswertungen bezüglich Federdurchmesser. Es wurden synthetische Messdaten ausgewertet („Simulation“) sowie tatsächliche Daten von $N = 15$ Kameras ausgewertet („Experiment“). Die verschiedenen Durchmesser werden durch drei Verfahren ermittelt: D_M aus direktem Messen (bzw. definiert für die Simulation), \bar{D} (Gl.(1)) aus der fotogrammetrischen Messung sowie \bar{D}^* (Gl.(3)) aus Verfahren 3 mit der Posenschätzung nach [Becke2015].

	Simulation				
	D_M/mm	\bar{D}/mm	$\frac{\bar{D} - D_M}{D_M}$	\bar{D}^*/mm	$\frac{\bar{D}^* - D_M}{D_M}$
Feder 1	22,8	$22,60 \pm 0,75$	-0,89%	$22,731 \pm 0,083$	-0,30%
Feder 2	23,9	$23,66 \pm 0,74$	-1,02%	$23,80 \pm 0,15$	-0,40%
	Experiment				
	D_M/mm	\bar{D}/mm	$\frac{\bar{D} - D_M}{D_M}$	\bar{D}^*/mm	$\frac{\bar{D}^* - D_M}{D_M}$
Feder 1	$22,653 \pm 0,031$	$22,7 \pm 1,7$	+0,34%	$22,63 \pm 0,19$	-0,10%
Feder 2	$23,908 \pm 0,048$	$24,0 \pm 1,8$	+0,36%	$23,94 \pm 0,66$	+0,12%

Diskussion

Die Abschätzung des Durchmessers mit \bar{D} beruht auf der Auswertung von Daten verschiedener Kameraperspektiven. Ein konstanter Abbildungsmaßstab bei unbekanntem Objekttiefen je Perspektive führt zur Standardabweichung von $\pm 0,74$ mm (Simulation) bis $\pm 1,8$ mm (Experiment). Lässt man die Ventildfeder einmal fallen, so kann der Durchmesser mit dieser relativen Unsicherheit bestimmt werden. Lässt man die Ventildfeder öfter fallen (Simulation: 90-mal, Experiment: 20-mal) so wird im Mittel der wahre Wert des Durchmessers nach Verfahren 2 um etwa 1 % verfehlt. Die Simulation scheint den Durchmesser zu unterschätzen, das Experiment dagegen zu überschätzen.

Je genauer man die Feder entlang der Symmetrieachse fallen lässt, desto kleiner wird die relative Unsicherheit von \bar{D} , weil die Objekttiefen je Perspektive weniger variieren.

Die mit Verfahren 3 ermittelten Ergebnisse \bar{D}^* haben eine relative Unsicherheit, die signifikant kleiner ist als die Unsicherheit bei der Bestimmung von \bar{D} aus Verfahren 2. Der Durchmesser \bar{D} der Feder 2 wird z. B. im Experiment mit etwa $\pm 1,8$ mm Unsicherheit ermittelt; \bar{D}^* dagegen mit $\pm 0,66$ mm. Hervorzuheben ist, dass nach etwa 20-facher Messung derselben zylindrischen Ventildfeder der Durchmesser mit einer absoluten Abweichung vom Referenzwert D_M von etwa $\pm 0,1$ % vermessen werden kann – kontaktlos im freien Fall.

Die Unsicherheit von \bar{D}^* für Feder 1 im Experiment wurde berechnet zu $\pm 0,2$ mm (also auf 1 % genau!). Da dieser Wert etwa 3-4 Pixeln bei vorliegendem Abbildungsmaßstab entspricht, wäre es vielversprechend, die Objektive der Kameras durch Optiken mit längerer Brennweite zu ersetzen, um eine noch höhere Messgenauigkeit zu erzielen.

Damit eine Sortierung von Federn nach Durchmesser möglich ist, sollten sich die Messungen \bar{D}^* je Ventildfeder signifikant unterscheiden. Da sich der Durchmesser der vorliegenden Federn tatsächlich um etwas mehr als einen mm unterscheidet, wäre eine Sortierung der beiden

Federn wegen geringer Unsicherheit von \bar{D}^* möglich. Das Anpassen der Kameraobjektive an die kleinen Bauteilmaße birgt hier das größte Potential, dass eine Sortierung von Ventildfedern mit noch ähnlicheren Durchmessern sicher funktioniert.

Die Dauer einer Freifallmessung dieser Art ist – analog zur Aufnahme und Auswertung einer Fluoreszenzmessung – im Wesentlichen bestimmt durch die Datenübertragung zum Computer und ersten Bildvorverarbeitungen. Zu vernachlässigen ist die Rechenzeit bei der Bestimmung von D_i , wodurch eine Rechenzeit von etwa einer Sekunde eine gute Abschätzung auf einem Computer mit Intel i7 Architektur darstellt. Dagegen braucht die bisherige Implementierung von Verfahren 3 zur Bestimmung von \bar{D}^* etwa 1-2 Sekunden je Messung. Als Anmerkung sei hier erwähnt, dass Programmteile in relativ langsamer Python-Programmierung realisiert wurde. D. h. das Beschleunigungspotential von Hochsprachen wie c++ und Parallelisierungs-Techniken wurden nicht vollständig ausgeschöpft.

Fazit

In der vorliegenden Publikation wurde ein einfaches und schnelles Sortier- und Prüfsystem für Schüttgutartikel wie beispielsweise Ventildfedern vorgestellt. Die Objekte werden kontaktlos im freien Fall von allen Seiten mit Industriekameras aufgezeichnet. Die Bilddaten werden automatisiert ausgewertet, um die Sortier- und Prüfentscheidungen im Sekundentakt abzuleiten. Es wurde gezeigt, wie organische Anhaftungen (Beschichtungen, Verunreinigungen, ...) ab etwa $1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ mittels Fluoreszenz erkannt und quantifiziert werden können. Bei Vorliegen eines CAD-Modells können diese zusätzlich lokalisiert werden. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass der Außendurchmesser von Ventildfedern mit einem zweistufigen Verfahren vermessen werden kann. In zwei exemplarischen Messreihen konnte der Außendurchmesser mit 0,02 mm Abweichung vom Referenzwert ermittelt werden. Dazu wurden dieselben Federn mehrfach (20x) vermessen. Die Streuung einer Einzelmessung ist beim gezeigten Verfahren deutlich größer und ist im Bereich 0,2 mm bis 0,7 mm (1 bis 3% relative Abweichung vom Mittelwert). Zur Verringerung der Streuung ist eine höhere optische Auflösung notwendig. Die Vermessung weiterer Eigenschaften wie z. B. Federnlänge ist mit ähnlichen Verfahren denkbar.

Literatur und Quellenangaben

- [Becke2015] M. Becke und T. Schlegl, *Least squares pose estimation of cylinder axes from multiple views using contour line features*, IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Yokohama, **2015**, pp. 001855-001861.
- [Holz2018] P. Holz und A. Brandenburg, *Ortsaufgelöste Messung filmischer Verunreinigungen*, JOT Journal für Oberflächentechnik 58 (10), 46-49 (**2018**)
- [Holz2019] P. Holz und A. Brandenburg, *Fluorescence laser scanner for in-line inspection of functional coatings in metal processing industries*, Proc. SPIE 11056, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI, 110561X (**2019**)
- [Lako2008] Lakowicz, Springer Verlag, Principles of Fluorescence Spectroscopy (**2006**)
- [Wuest2007] H. Wuest und D. Stricker, *Tracking of industrial objects by using CAD models*. JVRB - Journal of Virtual Reality and Broadcasting, **4(2007)**, no. 1.

Autor(en):

Dr. Jakob, Peter
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Produktionskontrolle, Inline Vision Systeme
peter.jakob@ipm.fraunhofer.de

Dr. Basler, Carl
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Produktionskontrolle, Optische Oberflächenanalytik
carl.basler@ipm.fraunhofer.de

Dr. Schmid-Schirling, Tobias
Gruppenleiter Inline Vision Systeme
Produktionskontrolle
tobias.schmid-schirling@ipm.fraunhofer.de

Dr. Brandenburg, Albrecht
Gruppenleiter Optische Oberflächenanalytik
Produktionskontrolle
albrecht.brandenburg@ipm.fraunhofer.de

Dr. Carl, Daniel
Stellv. Institutsleiter
Abteilungsleiter Produktionskontrolle
daniel.carl@ipm.fraunhofer.de