

Modulares Ringlicht für photometrische Analyse von Mikrostrukturoberflächen

A. Haider, L. Traxler, N. Brosch und C. Kapeller

AIT - Austrian Institute of Technology GmbH
High-Performance Vision Systems
Giefinggasse 4, 1210 Wien

Zusammenfassung Die Analyse von mikrostrukturierten Oberflächen erfordert praktische Analysetools. In diesem Beitrag stellen wir ein modulares Ringlicht vor, welches in einem Mikroskopaufbau integriert wird. Beide Geräte sind miteinander synchronisiert und werden durch einen Strobe-Controller angesteuert. Das Ringlicht besteht aus sechs individuell ansteuerbaren Lichtquellen, die eine Oberfläche aus unterschiedlichen Winkeln beleuchten. Das verbessert die Sichtbarkeit von Mikrostrukturen / Defekten und ermöglicht weitere Analysen mittels Photometrischen Stereo Algorithmen. Das modulare Design ermöglicht einfaches Tauschen von Lichtquellen und beispielsweise die Verwendung von Lichtquellen unterschiedlicher Wellenlänge. Diese Flexibilität macht das Ringlicht zu einem praktischen Analysetool für unterschiedliche Materialien. In diesem Beitrag wird die Konstruktion und das optische Design beschrieben und validiert. Zusätzlich zeigen wir Aufnahmen und photometrische Auswertungen von mikrostrukturierten Oberflächen.

Keywords Optische Inspektion, Ringlicht, mikrostrukturierte Oberflächen, Photometrisches Stereo, Mikroskopie

1 Einleitung

Dieser Beitrag widmet sich der Entwicklung eines Analysetools, einer modularen Ringlichtquelle samt Steuerungssoftware für ein Mikroskop, mit welchem beispielsweise Riblet Folien [1] untersucht

DOI: 10.58895/ksp/1000124383-4 erschienen in:

Forum Bildverarbeitung 2020

DOI: 10.5445/KSP/1000124383 | <https://www.ksp.kit.edu/site/books/m/10.58895/ksp/1000124383/>

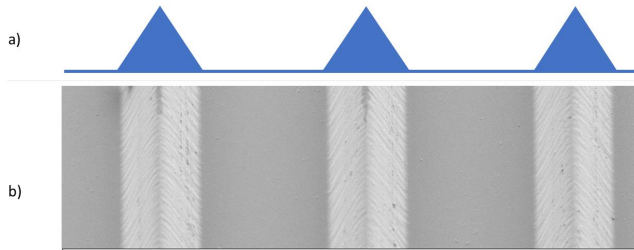


Abbildung 1.1: a) Schematische Darstellung: Riblet Profil. b) Aufnahme mit Rasterelektronenmikroskop (Aufsicht): Riblet Folie mit periodischen Strukturen in der Größenordnung von 20 – 100 μm und Spitzen im einstelligen μm -Bereich.

werden können. Hierbei handelt es sich um Oberflächen mit periodischen Strukturen in der Größenordnung von 20 – 100 μm (Abbildung 1.1), welche der Verringerung des Strömungswiderstands dienen. Sie werden zur Reduktion des Treibstoffverbrauchs in der Luftfahrt [2], zur effizienteren Energieerzeugung mit Windkraftanlagen [3] oder in Turbomaschinen [4] eingesetzt. Die Verringerung des Strömungswiderstands steht im direkten Zusammenhang mit der Ribletgeometrie, welche sich durch Abnutzung / Defekte verändern kann [5].

Die Qualitätssicherung erfordert ein Analysetool, bestehend aus Mikroskop und Beleuchtungseinheit, welches Strukturen im einstelligen μm -Bereich sichtbar macht, d.h., auflöst und optimal beleuchtet. Das Mikroskop [6] mit 10-facher Vergrößerung hat eine Auflösung von 0,7 $\mu\text{m}/\text{px}$ und ein Field of View von $1,624 \times 1,208 \text{ mm}^2$. Das dafür entwickelte Ringlicht besteht aus sechs fokussierten Lichtquellen und kann, im Vergleich zu Beleuchtungen mit nur einer Lichtquelle, strukturelle Defekte besser sichtbar machen [7]. Deren Reflexionseigenschaften können dazu führen, dass sie nur bei Beleuchtung aus einem bestimmten Winkel sichtbar sind (z. B. Kratzer orthogonal zur Beleuchtungsrichtung). Durch alternierende Beleuchtung aus mehreren Winkeln, können verschiedene Defekte sichtbar gemacht und komplexere Auswertungen, wie photometrische Stereo Analysen (z. B. [8]), durchgeführt werden. Unser

Analysetool, erstellt solche Aufnahmen automatisch, indem einzelne Lichtquellen mittels eines Strobe-Controllers angesteuert und mit der Mikroskop-Kamera synchronisiert werden.

Bei der Konstruktion des Ringlichts wurde auf austauschbare, modulare Lichtquellen und auf optische Standardkomponenten gesetzt. Dadurch können einzelne Lichtquellen getauscht und das Ringlicht beispielsweise mit Infrarot- oder kohärenter Laser-Lichtquellen betrieben werden. Mit einer Beleuchtungsstärke von 40 Mlx pro Lichtquelle realisiert das Ringlicht optimale Beleuchtungsbedingungen. Die hohe Beleuchtungsstärke ermöglicht kurze Belichtungs- und Strobezeiten (10 ms) und sogt daher für einen schnellen Aufnahme-prozess.

State-of-the-Art Ringlichter erfüllen die Anforderungen bezüglich Beleuchtungsintensität, Beleuchtungsrichtungen und Modularität nicht. Als Vergleich dient die Vier-Segment-Ringlichtbeleuchtung (HPR2-250SW-DV04M12-5)¹ von Computational Imaging mit einer Gesamtleistung von 46 W. Dessen Lichtquellen sind fest verbaut und beleuchten Oberflächen diffus. Das in diesem Beitrag entwickelte Ringlicht ist im Gegensatz modular konzipiert und ermöglicht im Pulsbetrieb Spitzenleistungen von 60 W pro Lichtquelle.

Abschnitt 2 beschreibt die Konstruktion, das Lichtdesign sowie die Ansteuerung des modularen Ringlichts. In Abschnitt 3 wird das entwickelte Ringlicht experimentell validiert. Abschnitt 4 zeigt Aufnahmen und Ergebnisse einer photometrischen Stereo Analyse von Riblet Oberfläche.

2 Modulares Ringlicht für Photometrische Analyse von Mikrostruktureoberflächen

Das Ringlicht beleuchtet software-gesteuert die Oberfläche aus sechs Winkeln und ergibt, gemeinsam mit einem Mikroskop [6], ein photometrisches Analysetool (Abbildung 2.1 a) für Mikrostruktureoberflächen. Unten beschreiben wir die modulare Konstruktion (Abschnitt 2.1), das Lichtdesign (Abschnitt 2.2) und die Ansteuerung (Abschnitt 2.3).

¹ <http://www.computationalimaging.com/files/HPR2-DV04M12-5-Product-Introduction-Sheet.pdf>

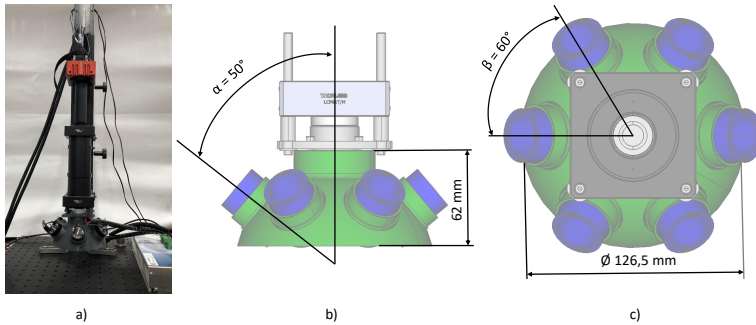


Abbildung 2.1: a) Analysesetool bestehend aus Mikroskop [6] und Ringlicht. b) und c) stellen das Ringlicht, bestehend aus Dome (*grün*) und Tubes (*blau*), dar. b) Vorderansicht, Domehöhe 62 mm. c) Aufsicht, Domedurchmesser $\varnothing 126,5 \text{ mm}$.

2.1 Konstruktion mit Rapid-Prototyping-Verfahren

Das Ringlicht (Abbildung 2.1) besteht aus folgenden Hauptkomponenten: (i) Schirm, (ii) sechs Tubes und (iii) sechs Lichtquellen.

Der kuppelförmige Schirm (i) ist als 3D-Druck ausgeführt (Abbildung 2.1 b und c). In dessen sechs Aussparungen wird jeweils eine Tube/Lichtquelle eingesetzt. Aufgrund der Materialwahl können die Lichtquellen mit hohen Leistungen betrieben werden, da das für den 3D-Druck verwendete Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS) im Bereich von 40°C bis 75°C formstabil und temperaturbeständig [9] ist.

Die Tubes (ii) sind ebenfalls als 3D-Druck ausgeführt. Sie werden in die Aussparungen im Schirm eingesetzt und beinhalten selbst jeweils eine Lichtquelle. Da die Tubes samt Lichtquellen einfach und schnell ausgetauscht werden können, sorgen diese für ein modulares Design.

Die Lichtquellen (iii) befinden sich in den Tubes. Sie strahlen mit einem Steigungswinkel von 40° auf die Oberfläche (Abbildung 2.1 b) und sind in 60° zueinander radial um die optische Achse angeordnet (Abbildung 2.1 c). Durch diese Beleuchtungswinkel werden die Mikrostrukturen mit hoher Sensitivität erkannt.

2.2 Lichtdesign

Das Lichtdesign umfasst sowohl das Design der Lichtführung als auch die Auswahl passender Lichtquellen. Das vorgestellte Analysetool dient der Untersuchung von Mikrostrukturen und erfordert damit die Beleuchtung von kleinen Inspektionsflächen ($1,624 \times 1,208 \text{ mm}^2$). Das Licht wird auf diese kleine Fläche fokussiert und dadurch die Beleuchtungsintensität erhöht. Diffuse, im Gegensatz zur gewählten fokussierten, Beleuchtung, würde das Licht an die Umgebung abgeben und damit Mikrostrukturen nicht ausreichend beleuchten.

Die Fokussierung erfolgt durch die Kollimator-Optik, bestehend aus zwei gegengleich zueinander angeordneten asphärischen Linsen. Die erste Linse kollimiert und die zweite Linse bündelt das Licht homogen auf die Inspektionsfläche. Das Lichtdesign und die Auswahl der Linsen erfolgten mittels Optikdesign-Software². Abbildung 2.2 zeigt das Ergebnis des optischen Lichtdesigns mit eingezeichnetem Strahlengang und definierten Brennweiten (16 mm bzw. 50 mm) der Linsen unter Einhaltung des Abstrahlwinkels der Lichtquellen. Als Lichtquellen dienen Leuchtdioden³ mit einem Lichtstrom von 545 lm bei einem Betriebsstrom von 1,8 A, einer Leistung von 6 W, einem Abstrahlwinkel von 150° und einer Farbtemperatur von 5000 K. Da die Beleuchtungsrichtungen in einem Zeitmultiplex-Verfahren sequentiell aufgenommen werden, kann der Lichtstrom der Leuchtdioden durch Pulsen noch weiter gesteigert werden. Die Lichtquellen können bei kurzen Pulsen im ms-Bereich problemlos mit dem Zehnfachen des angegebenen Stroms betrieben werden ohne die Leuchtdioden zu überhitzen. Bei einem Strom von 18 A und einer Leistung von ca. 60 W lassen sich Lichtströme von bis zu 1911 lm beobachten.

Bei der Wahl der Leuchtdioden wurde auf eine kleine Etendue mit hohem Lichtstrom geachtet, damit die Lichtstrahlen möglichst vollständig von der, darauf angepassten, Kollimator-Optik aufgefangen werden. Das gewährleistet eine maximal mögliche Lichtausbeute.

² Zemax, <http://zemax.com>

³ Osram Power LED: OSRON LED typ. 5000K CSSRM2.EM-MFN3-XX33-K2L1-700-R18

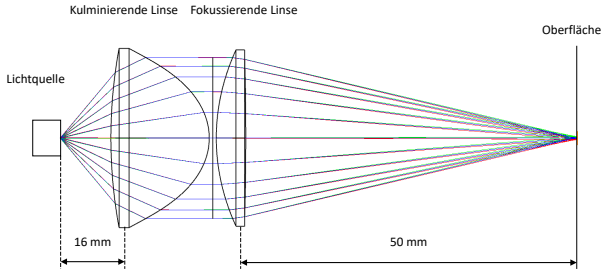


Abbildung 2.2: Entstehender Strahlengang der Kollimator-Optik durch die Verwendung von zwei gegengleich angeordneten asphärischen Linsen.

2.3 Ansteuerung

Die Ansteuerung wird mittels einer graphischen Benutzeroberfläche und einem Strobe-Controller realisiert. Die Lichtquellen sind mit dem Strobe-Controller verbunden, der diese über definierte digitale Pulse einschaltet. Ein weiterer Puls am Triggereingang der Kamera sorgt für das Starten der Belichtungszeit und das Erstellen einer Aufnahme. Die Lichtquellen werden vom Strobe-Controller über eine Konstantstromquelle versorgt. Diese verhindert Beschädigung der Leuchtdioden bei längerem Betrieb (temperaturabhängige erhöhte Stromaufnahme).

3 Experimentelle Designvalidierung

In diesem Abschnitt werden die Konstruktionsparameter des Ringlichts validiert. Die vertikalen Beleuchtungswinkel (i) wurden experimentell mit einem Light-Dome ermittelt. Durch die Messung der Helligkeit gegenüber der Stromstärke (ii) wurde die Erhöhung des emittierenden Lichts mit zunehmender Stromstärke getestet.

Der optimale Beleuchtungswinkel (i) wurde mit einem photometrischen Light-Dome identifiziert. Im Light-Dome sind 32 Lichtquellen auf drei unterschiedlichen Ebenen angeordnet. Dadurch wird erreicht, dass die Lichtquellen mit 65° , 52° und 36° auf die Oberfläche strahlen (horizontal gemessen). Aus den theoretischen Überlegungen

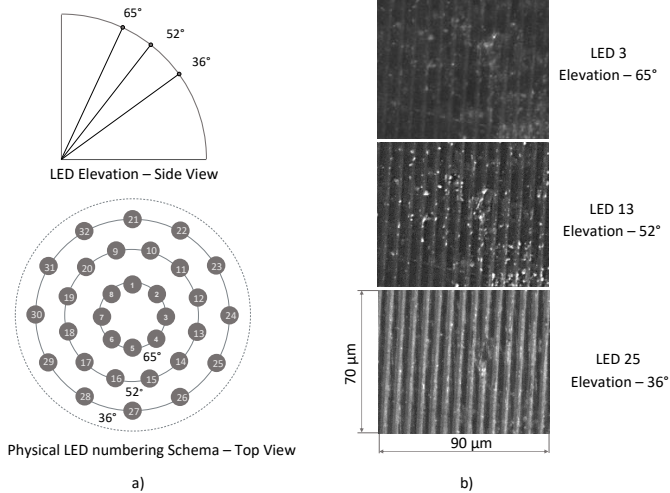


Abbildung 3.1: a) Lichtwinkel des Light-Domes: Oben rechts Beleuchtungswinkel von 65°, mittig mit 52° und unten mit 36°. b) Ausschnitte der Aufnahmen mit Beleuchtung aus 65°, 52° und 36°. Je kleiner der Beleuchtungswinkel in diesem Light-Dome, umso höher ist die Erkennbarkeit der Ribletstrukturen.

geht hervor, dass der optimale Beleuchtungswinkel im Bereich von 40° liegt, da die dreieckigen Ribletstrukturen eine Steigung von 40° aufweisen. Das zusätzlich durchgeführte Light-Dome-Experiment bestätigt die theoretischen Überlegungen: Die Struktur ist in Aufnahmen mit einer Beleuchtung aus einem Winkel von 36° am sichtbarsten (Abbildung 3.1 b, LED Elevation - 36°). Aus diesem Grund wurde der Beleuchtungswinkel des entwickelten Ringlichts mit 40° konstruktiv festgelegt.

Die Messung der relativen Helligkeit gegenüber der Stromstärke (ii) testet die Änderung des abstrahlenden Lichts mit zunehmender Stromstärke. Die Auswertung der mittleren Helligkeit erfolgt am Sensor des Mikroskopaufbaus. Abbildung 3.2 zeigt, dass die relative Helligkeit beim Betriebsstrom von 1,8 A 100% beträgt - dies entspricht dem im Datenblatt angegebenen Lichtstrom von 545 lm. Wird der Strom im Pulsbetrieb weiter erhöht, lässt sich die relative Hellig-

keit um über 250% auf 351% bei 18 A steigern. Es lässt sich festhalten, dass die Leuchtdioden im Pulsbetrieb kurzfristig mit einem zehnfach höheren Strom betrieben werden können als im Datenblatt angegeben. Somit kann für mehr Helligkeit innerhalb kürzester Belichtungszeiten auf der Mikrostruktureoberfläche gesorgt werden.

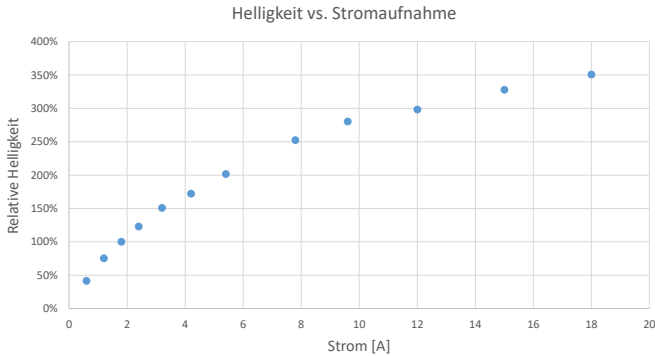


Abbildung 3.2: Darstellung der relativen Helligkeit gegenüber der Stromaufnahme der Leuchtdioden. Auf der x-Achse ist der Strom in Ampere und auf der y-Achse die relative Helligkeit in Prozent aufgetragen.

4 Ergebnisse der Oberflächenanalyse

Dieser Abschnitt zeigt Aufnahmen (Abbildung 4.1 a), welche mit dem vorgestellten Analysetool gemacht wurden und das Ergebnis der photometrischen Stereo Auswertung (Abbildung 4.1 b, Abbildung 4.2 a und b). Das Analysetool erstellt automatisch pro Lichtrichtung eine Mikroskopaufnahme eines Objekts (z.B. Riblet Folie). Nach der Kalibrierung der Lichtquellen (Lage und Intensität), kann mittels photometrischer Stereo Analyse [8], auf die Oberflächenorientierung geschlossen werden. In den berechneten Oberflächennormalen können strukturelle Defekte der Oberfläche erkannt werden. Abbildung 4.1 b zeigt das Ergebnis einer photometrischen Auswertung (Oberflächennormalen), berechnet aus den unterschiedlich beleuchteten Aufnahmen einer Riblet Folie, die in Ab-

bildung 4.1 a gezeigt werden. In diesem Beispiel sind Defekte deutlich als Unregelmäßigkeiten in der horizontalen Linienstruktur erkennbar (Abbildung 4.1, gelbe Markierungen). Obwohl die Beleuchtungswinkel des Analysetools für die Strukturen der Riblet Folien optimiert wurden, kann dieses auch zur (photometrischen) Untersuchung beliebiger mikrostrukturierter Oberflächen herangezogen werden. Abbildung 4.2 zeigt photometrische Auswertungen des Intaglio-Drucks eines 20-Euro-Scheins und einer 5-Cent-Münze. Das einfache Tauschen der Lichtquellen (z. B. Infrarot) ermöglicht außerdem die Analyse von Proben mit unterschiedlichen Materialeigenschaften.

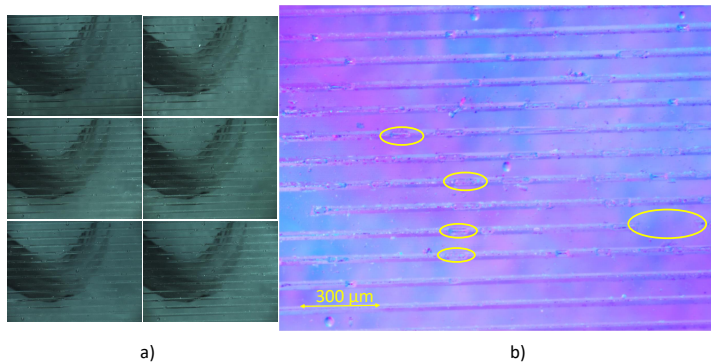


Abbildung 4.1: a) Erstellte Aufnahmen der Oberfläche und b) Darstellung der abstrahlenden Oberflächennormalen der photometrischen Stereo Analyse einer beschädigten Riblet-Oberfläche. Die Defekte sind als Abschliffe der Struktur erkennbar, einige Defekte sind gelb markiert.

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde ein Ringlicht vorgestellt, welches zusammen mit einem Mikroskop ein praktisches Analysetool bildet. Das Lichtdesign wurde mit einer Optikdesign-Software erstellt und in zwei Experimenten validiert. Das Ringlicht zeichnet sich durch eine hohe Beleuchtungsstärke (40 Mlx), kurze Belichtungs- bzw. Strobe-

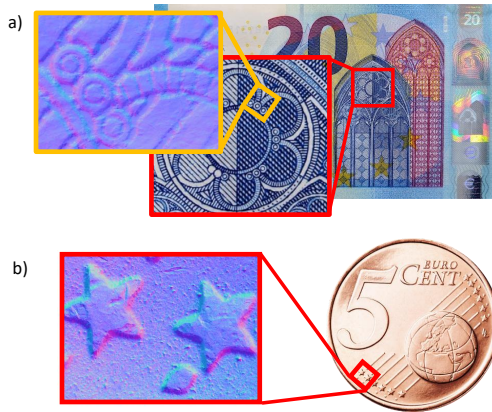


Abbildung 4.2: a) Darstellung der abstrahlenden Oberflächennormalen der photometrischen Stereo Analyse eines Intaglio-Drucks eines 20-Euro-Scheins und b) Darstellung der abstrahlenden Oberflächennormalen der photometrischen Stereo Analyse einer 5-Cent-Münze.

zeiten (10 *ms*) und Modularität aus. Die von uns entwickelte Beleuchtung wurde mittels Rapid-Prototyping-Verfahren konstruiert und ist aufgrund von einfach austauschbaren Standardkomponenten vielseitig anwendbar. Das Ringlicht eignet sich als photometrische Beleuchtung, da mehr als drei unabhängig voneinander ansteuerbare Lichtquellen mit bekannter Lichtintensität und Lage zur Verfügung stehen. An den photometrischen Stereo Auswertungen von Riblet Folien zeigen wir, dass sich das Ringlicht für Analysen im einstelligen μm -Bereich eignet.

6 Dankaussagung

Dieser Beitrag wurde vom Resreach und Invoationsprogramm „Beyond Europe“ unter Projekt RiSPECT (Projekt Nummer 874163) gefördert.

Literatur

1. V. Stenzel, Y. Wilke, and W. Hage, "Drag-reducing paints for the reduction of fuel consumption in aviation and shipping," *Progress in Organic Coatings*, vol. 70, no. 4, pp. 224–229, 2011.
2. P. Leitl, S. Kuntzagk, A. Flanschger, and K. Pfingsten, "Experimental and numerical investigation of the reduction in skin friction due to riblets applied on the surface of a taylor-couette cell," in *AIAA Scitech 2019 Forum*, 2019.
3. P. Leitl, S. Schreck, C. Feichtinger, A. Flanschger, V. Stenzl, H. Kordy, Y. Kowalik, and D. Stuebing, "Riblet-surfaces for improvement of efficiency of wind turbines," in *AIAA Scitech 2020 Forum*, 2020.
4. E. Costa, M. G. de Albeniz, S. Barberis, and P. Leitl, "Increase of compressor performance through the use of microstructures," in *Conference on Sustainable Mobility*. SAE International, 2019.
5. W. Hage, *Zur Widerstandsverminderung von dreidimensionalen Riblet-Strukturen und anderen Oberflächen*. Berlin: Mensch und Buch Verlag, 2004.
6. L. Traxler and S. Štolc, "3D microscopic imaging using structure-from-motion," in *IS&T International Symposium on Electronic Imaging 2019*, no. 16. Society for Imaging Science and Technology, 2019, pp. 1–6.
7. Y.-H. Tsai, D.-M. Tsai, W.-C. Li, W.-Y. Chiu, and M.-C. Lin, "Surface defect detection of 3d objects using robot vision," in *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 38. Emerald Group Publishing Limited, 2011, pp. 381–398.
8. D. Antensteiner and S. Stolz, "Regularization in higher-order photometric stereo inspection for non-lambertian reflections," in *VISIGRAPP*. SCITEPRESS, 2020, pp. 253–259.
9. H. Wittel, D. Muhs, D. Jannasch, and J. Voßiek, *Roloff/Matek Maschinenelemente: Tabellenbuch*. Wiesbaden: Springer, 2009.