

Funktionales Laserfinishing additiv gefertigter PA12-Bauteile

Lukas Eckhardt¹; Michel Layher¹; Andreas Hopf¹; Jens Bliedtner¹;
Markus May²; Steven Lachmund²; Benjamin Buttler³

¹Ernst-Abbe-Hochschule Jena, Carl-Zeiss-Promenade 2, 07745 Jena; ²3Faktur GmbH, Göschwitzer Str. 22, 07745 Jena; ³GOT Gesellschaft für Oberflächentechnik mbH, Konrad-Zuse-Straße 4, 07745 Jena

Das pulverbasierte Multi Jet Fusion Verfahren (MJF) hat sich seit der Einführung 2016 in der additiven Serienfertigung etabliert. Einige Anwendungsfelder von MJF-Bauteilen werden jedoch durch eine prozessbedingt körnige Oberfläche mit Rauheiten von $R_a > 5 \mu\text{m}$ eingeschränkt. Ziel dieser Forschungsarbeit ist daher die Identifikation und Charakterisierung von Methoden zur Reduzierung der Rauheit sowie zur Anpassung der optischen und haptischen Oberflächeneigenschaften. Im Mittelpunkt steht die Glättung durch Laserstrahlpolieren (LSP). Damit ist es möglich, den PA12-Kunststoff lokal aufzuschmelzen und die Rauheit auf $R_a < 1 \mu\text{m}$ zu reduzieren. Anschließend können zusätzlich Verfahren wie Metallisieren oder Pulverbeschichten eingesetzt werden, um funktionelle Eigenschaften der Bauteiloberflächen anzupassen.

The powder-based Multi Jet Fusion process (MJF) has become an established technology in additive series production since its launch in 2016. MJF components have a distinctive grainy surface with a roughness of $R_a > 5 \mu\text{m}$. The aim of this study is the identification and characterization of methods to reduce the roughness and adapt optical and haptic surface properties in order to expand the scope of MJF applications. The focus is set on smoothing by laser beam polishing. With this process it is possible to locally melt the PA12 plastic and reduce the roughness to $R_a < 1 \mu\text{m}$. Subsequently additional processes, such as metallizing or powder coating, can be utilized in order to adapt the functional properties of the component's surface.

1. Einleitung

Die additive Fertigung gewinnt mit einem mittleren jährlichen Marktwachstum von 27% stetig an Bedeutung [1]. Seit einigen Jahren beschränkt sich die Technologie nicht mehr nur auf die Herstellung geometrisch komplexer Prototypen, sondern drängt zunehmend in die Serienproduktion [2]. Dieser Wandel bewirkt steigende Anforderungen an Werkstoffe, Produktionskosten, Prozesszeiten, Bauteilqualitäten und Oberflächeneigenschaften, denen nicht alle Fertigungsverfahren gerecht werden können.

Mit einem schnell wachsenden Marktanteil [3] und bereits über 60 Millionen produzierten Bauteilen [4] gehört das 2016 von HP eingeführte Multi Jet Fusion Verfahren (MJF) zu den serientauglichen Technologien. MJF verwendet Kunststoffpulver, welches durch Infrarotstrahlung verschmolzen wird. Ein Düsen-Array trägt in jeder Pulverschicht eine wärmeleitende Flüssigkeit, genannt „Fusing Agent“, sowie ein wärmehemmendes Mittel, „Detailing Agent“, auf, sodass nur definierte Bereiche verschmelzen und schichtweise ein Bauteil entsteht (Abb. 1). Auf diese Weise hergestellte Kunststoffteile sind mechanisch belastbar und erlauben die Fertigung filigraner Strukturen mit geringen Formabweichungen.

Der verbreitetste MJF-Werkstoff ist Polyamid 12 (PA12). Alternativ können PA11 und hochelastisches TPU verarbeitet werden. Während das Verfahren und die verwendeten Kunststoffe aufgrund von Bauteilqualität, -festigkeit und Druckgeschwindigkeit enormes Potential bieten, können anwendungsspezifische Anforderungen an die Bauteiloberfläche häufig nicht erfüllt werden. Auch

nach der Entfernung von Pulverresten, i.d.R. durch Kugelstrahlen, bleibt eine körnige, raue Oberfläche zurück, welche anfällig für Verschmutzungen ist und ggf. Folgeverfahren erschwert.

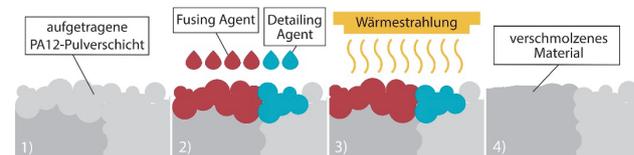


Abbildung 1: Multi Jet Fusion-Verfahren: 1) schichtweiser Pulverauftrag, 2) Auftragen von Fusing- und Detailing-Agent, 3) Erwärmung und 4) Verschmelzen des Kunststoffpulvers

Ziel dieser Forschungsarbeit ist daher die Identifikation und Charakterisierung von Methoden zur Reduzierung der Rauheit, sowie zur Anpassung der optischen, haptischen und funktionalen Eigenschaften von MJF-Bauteilen.

2. Zielstellung und Methoden

2.1. Das Laserstrahlpolierverfahren

Prozessbedingt weisen Oberflächen von MJF gedruckten Werkstücken eine körnige Struktur mit einer Rauheit von $R_a > 5 \mu\text{m}$ auf. Eine Glättung dieser Struktur kann durch Laserstrahlpolieren (LSP) erfolgen. Dabei wird die Deckschicht lokal von einem Laserstrahl aufgeschmolzen, sodass der verwendete PA12-Kunststoff fließt und mit dem Erstarren eine Glättung der Oberfläche erfolgt (Abb. 2). Das Verfahren wird gegenüber Kugelstrahlen, Gleitschleifen und anderen konventionellem Post-Processing-Methoden bevorzugt, da es verschleißfrei, schnell,

ohne Verbrauchsmittel und weitestgehend geometrieunabhängig arbeitet. Zudem ist es für viele verschiedene Kunststoffe geeignet [5] und zur lokal begrenzten Nachbearbeitung von definierten Funktionsflächen einsetzbar.

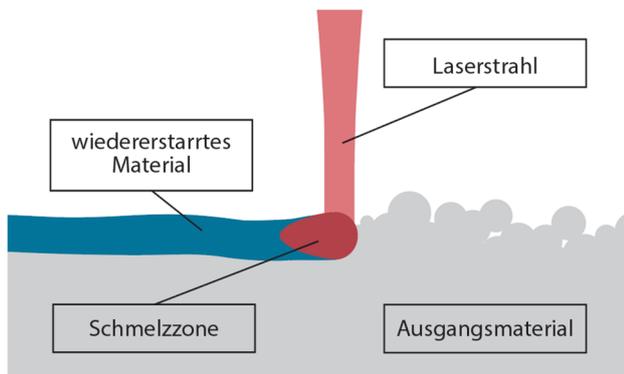


Abbildung 2: Laserstrahlpolierverfahren (LSP)

Für die nachfolgend vorgestellten Versuche wird ein 30 W CO₂-Laser mit einem Fokusbereich $D_{86,5}$ von 0,34 mm eingesetzt. Ein 3D-Laser-Scan-Modul ermöglicht die Bearbeitung komplexer Bauteile mit Scangeschwindigkeiten von bis zu 6000 mm/s.

2.2. Bestimmung des Prozessfensters

In Vorversuchen wird zur Eingrenzung des LSP-Prozessfensters zunächst das Schmelzverhalten des verwendeten PA12-Polymers in Abhängigkeit der eingebrachten Strahlungsenergie untersucht. Dafür erfolgt die Generierung von Einzelspuren unter Variation von Scangeschwindigkeit, Laserleistung und Strahldurchmesser. Mithilfe eines 3D-Messmikroskops und einer taktilen Prüfung können bereits geringfügige Veränderungen der Werkstückoberfläche erfasst werden. Dabei zeigt sich, dass die Abtragtiefe linear mit der eingebrachten Energie je Flächeneinheit, also der Bestrahlung, korreliert ($R^2 = 94\%$). Für das Laserstrahlpolieren ist der Bereich interessant, in dem das Material umschmilzt, aber noch nicht abgetragen wird. Unabhängig vom Fokusbereich liegt dieses Prozessfenster zwischen 20 und 100 mJ/mm^2 .

Der Übergang zum flächigen Laserstrahlpolieren erfolgt nun durch ein schrittweises Verringern des Abstands zwischen den Einzelspuren. In Vorversuchen hat sich eine mäanderförmige Scanstrategie mit einem Fokusüberlapp $> 50\%$ etabliert. Für ausreichend große Scangeschwindigkeiten entsteht ein Quasi-Linienfokus mit einer annähernd homogenen Temperaturverteilung (Abb. 3, links). Mit steigendem Überlapp nimmt die effektiv eingebrachte Energie je Flächeneinheit und somit auch die Temperatur in der Bearbeitungszone zu. Thermografische Messungen zeigen zunächst einen linearen Zusammenhang zwischen der Bestrahlung und der Temperatur im Linienfokus (Abb. 3, rechts). Erreicht die Fokustemperatur 350°C, sinkt dieser Anstieg aufgrund von Wärmeentzug durch einsetzende Verdampfung. Gleichzeitig entstehen Bläschen auf der Oberfläche.

Optimale Polierergebnisse werden für Temperaturen von ca. 300°C im Fokus erreicht. In diesem Bereich ist die Verdampfung mit weniger als 1 mg/cm^2 vernachlässigbar. Dennoch ist die Viskosität der PA12-Schmelze so niedrig, dass das Material fließen kann und eine glatte Deckschicht ausbildet. Messungen mit dem Tastschnittverfahren nach DIN EN ISO 4287 [6] ergeben eine Reduzierung der Rauheit von $R_a 6,4 \pm 0,3 \mu\text{m}$ auf $R_a 0,6 \pm 0,1 \mu\text{m}$.

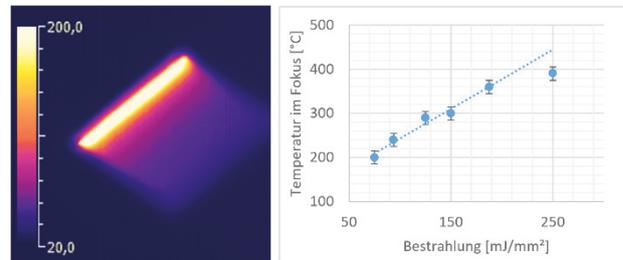


Abbildung 3: Thermografieaufnahme des Quasi-Linienfokus (links) und Zusammenhang zwischen Fokustemperatur und Bestrahlung (rechts)

Die notwendigen Bearbeitungsparameter (Fokusbereich, Scangeschwindigkeit, Leistung und Überlapp) sind von der Größe des Bearbeitungsfeldes, bzw. der Länge des Linienfokus abhängig. Mit steigender Fokuslinienlänge nimmt die effektive Vorschubgeschwindigkeit ab, sodass Wärme aus der Schmelzzone durch Konvektion und Wärmeleitung verloren geht. Um dennoch eine Temperatur von 300°C zu erreichen muss die Bestrahlung erhöht oder die Scangeschwindigkeit angepasst werden. Entsprechende Versuchsreihen wurden für Fokuslinienlängen von 5 bis 200 mm ausgewertet. Aus der Korrelation der genannten Parameter mit der jeweils resultierenden Oberflächenrauheit lässt sich ein Prozessmodell ableiten, welches die Bearbeitung nahezu beliebiger Geometrien mit reproduzierbaren Ergebnissen ermöglicht. Unabhängig von der Größe des Bearbeitungsfeldes schließt das Laserstrahlpolierverfahren die körnige Struktur der Oberfläche zuverlässig und reduziert die Rauheit auf $R_a < 1 \mu\text{m}$ (Abb. 5, links).

Das Finishing dreidimensionaler Oberflächen erfolgt unter Verwendung eines 3D-Laser-Scanners analog. Mit zunehmendem Einfallswinkel sinkt der Anteil absorbierte Strahlung. Dennoch wird auf konvex und konkav geformten Probekörpern für Einfallswinkel von bis zu 80° ein Umschmelzen der Deckschicht erreicht (Abb. 6 e).

Weitere Rauheitsreduzierungen sind durch eine Erhöhung der Wechselwirkungszeit von Laser und Werkstoff möglich. Bearbeitungsstrategien mit unfokussierter Laserstrahlung oder vielen, schnell aufeinanderfolgenden Überfahrten verlängern die Zeit, in der Material fließen kann und ermöglichen Bestwerte von $R_a 0,39 \pm 0,03 \mu\text{m}$. Gleichzeitig steigt der notwendige Wärmeeintrag jedoch deutlich, sodass ein nicht unerheblicher Bauteilverzug entstehen kann. Auch die effektive Flächenrate sinkt von ca. 1 cm^2/s auf $< 0,1 \text{cm}^2/\text{s}$. Für nachfolgende Untersuchungen wird diese Prozessvariante daher nicht berücksichtigt.

2.3. Bewertung prozessierter Bauteile

Eines der dominierenden Probleme beim Laserstrahlpolieren von PA-12-Bauteilen stellen Formabweichungen durch thermisch induzierten Verzug dar. Diese sind maßgeblich von der Bauteilstärke abhängig und können auf Materialexpansion und -kontraktion durch Temperaturgradienten im Bauteil zurückgeführt werden. Eine Quantifizierung der Deformation erfolgt mithilfe eines Kamerasystems an 0,5 & 1 mm dünnen Stegen (Abb. 4).

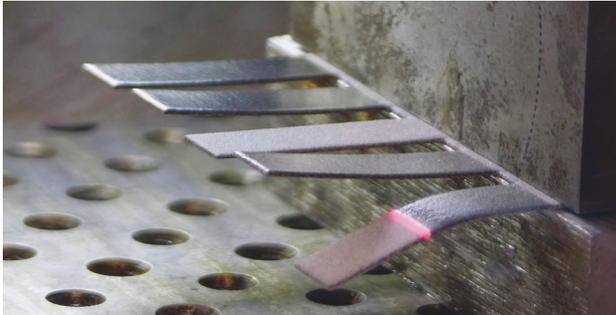


Abbildung 4: Verzug dünnwandiger Geometrien

Im Ergebnis zeigt sich, dass unabhängig von der gewählten Bearbeitungsstrategie eine Korrelation zwischen dem Verzug der Stege und der eingebrachten Energie besteht. Da die Energie nicht beliebig reduziert werden kann, ist eine Minimierung des Verzugs durch die alleinige Anpassung der Parameter nicht möglich. Eine Verbesserung der Formhaltigkeit wird jedoch durch Vorwärmen der Bauteile auf ca. 80°C und Laserstrahlpolieren mit entsprechend geringerer Bestrahlung erzielt. Zudem kann ein nachträgliches Tempern unter Gegendruck vorhandene Deformationen zurückbilden. Dies gelingt jedoch nur bei planen Körpern oder unter Verwendung entsprechender Negativformen. Sofern möglich, sollte dem Verzug daher durch ein optimiertes Bauteildesign mit Versteifungsrippen oder erhöhten Wandstärken entgegengewirkt werden.

Weniger signifikant ist der Einfluss des Laserstrahlpolierens auf Zugfestigkeit und Härte. In Abbildung 5 (rechts) ist ein umgeschmolzener Bereich von 170 µm Tiefe erkennbar. Diese ersichtliche Verdichtung der Pulverpartikel legt einen möglichen Anstieg der Oberflächenhärte nahe. Messungen nach DIN ISO 7619-1 [7] zeigen jedoch keine signifikante Veränderung der Härte von 73 ± 3 Shore D.

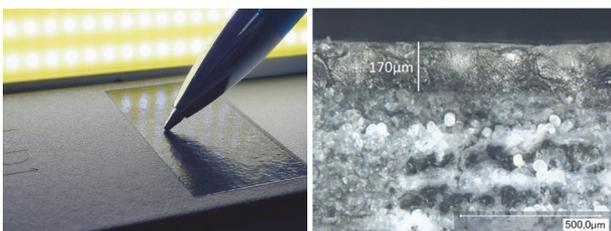


Abbildung 5: Laserstrahlpoliertes PA12-Bauteil (links) und polierte Deckschicht im Querschnitt (rechts)

Auch die Zugfestigkeit nach Norm DIN EN ISO 527-2/1A/10 [8] kann nicht verbessert werden. Stattdessen sinkt die maximale Belastbarkeit von Prüfkörpern durch

Laserstrahlpolieren um ca. 6% auf 39 bis 45 MPa, je nach Druckorientierung im Bauraum. Mögliche Ursachen hierfür sind Eigenspannungen, welche sich mit den eingebrachten Zugspannungen überlagern.

3. Anwendungen

3.1. Beschriftungen & Texturen

Potentielle Anwendungen des Laserstrahlpolierverfahrens sind vielfältig. Naheliegender ist die Modifikation der optischen und haptischen Oberflächeneigenschaften für Bauteile im Sichtbereich. Je nach Anwendung ist zusätzlich die Erstellung von dreidimensionalen Texturen möglich. Als Grundlage dafür dienen Bilddateien, z.B. von Holz- oder Ledertexturen, aus denen automatisch Bearbeitungsroutinen erstellt werden. In Abhängigkeit der Helligkeit einzelner Bildpunkte und der Lage von Kontrastgrenzen werden lokale Abtragtiefen bestimmt und Vektoren für die Bewegung des Laserstrahls abgeleitet. Unterschiedliche Parametersätze für die charakteristischen Elemente der Textur erlauben ein gezieltes Umschmelzen und Abtragen zur Erstellung realistischer, dreidimensionaler Strukturen (Abb. 6 d). Die elliptische Verzerrung des Strahlprofils für nicht plane Bauteiloberflächen beschränkt das Prozessfenster der Texturierung auf einen Einfallswinkel $\leq 60^\circ$.

Ebenfalls möglich ist die flächige Beschriftung zweidimensionaler Strukturen durch lokales Laserstrahlpolieren. Dies kann beispielsweise zur Markierung von Bauteilen mit Mustern oder QR-Codes eingesetzt werden. Um eine zuverlässige Lesbarkeit mit herkömmlichen Systemen zu gewährleisten, sollten die einzelnen QR-Code Pixel jedoch nicht kleiner als 1 mm^2 ausfallen (Abb. 6 c).

3.2. Mechanisch belastete Funktionsflächen

Aus funktionaler Sicht sind geglättete Oberflächen auch für mechanisch belastete Funktionsflächen vorteilhaft. Während der Traganteil in der $5 \mu\text{m}$ Schnittebene für unbearbeitete MJF-Bauteile nur ca. 1% beträgt, sind laserstrahlpolierte Oberflächen in dieser Tiefe bereits komplett geschlossen. Dies deutet auf eine deutliche Minimierung des abrasiven Verschleißes durch Kontakt mit Reibungspartnern hin. Das Verschmelzen der Deckschicht bindet gleichzeitig mögliche Pulverreste, weshalb polierte Bauteile auch in schmutzempfindlichen Umgebungen zu bevorzugen sind.

Ein in der Praxis häufig anzutreffender Anwendungsfall ist die Schaffung druckdichter Bauteilverbindungen. Die ideale Rauheit der Dichtfläche ist dichtungs- und materialspezifisch, Literaturangaben von $R_a 0,25 \mu\text{m}$ bis $R_a 1,6 \mu\text{m}$ [9] suggerieren jedoch eine Verbesserung der Dichtwirkung durch Laserstrahlpolieren. Eine Prüfung nach DIN EN 1779 C1 [10] bestätigt die gesteigerte Druckdichtheit zwischen unpolierter ($5,3 \text{ Bar}$) und polierter Dichtfläche ($8,7 \text{ Bar}$) für einen verschraubten Probekörper.

3.3. Kombinierte Prozessketten

Weiterführende Untersuchungen zielen auf die Bauteilfunktionalisierung durch Pulverbeschichten oder Metallisieren von Laserstrahlpolierten Bauteiloberflächen ab. Im dreistufigen Metallisierungsprozess wird der Kunststoff zunächst mit Palladium bekeimt, sodass sich im anschließenden Elektrolytbad eine Nickelschicht anlagern kann. Diese nasschemische Beschichtung ist elektrisch leitfähig und ermöglicht die Galvanisierung mit Metallen wie Chrom, Kupfer oder Gold. Die Ausgangsoberfläche muss hierfür eine gewisse Mikrorauigkeit aufweisen, um eine gute Schichthftung zu gewährleisten. Es zeigt sich, dass das Laserstrahlpolieren mit reduzierter Bestrahlung grobe Profilsitzen entfernt und so einen guten metallischen Glanz ermöglicht, ohne die Schichthftung sichtlich zu reduzieren (Abb. 6 b). Mit zunehmender Schichtdicke kann so auch die thermische Leitfähigkeit von Bauteilen gesteigert werden, um eine metallische Haptik nachzuempfinden.



Abbildung 6: Versuchskörper mit Finishing-Verfahren: a) Pulverbeschichten, b) Metallisieren, c) Laserstrahlbeschriften, d) Laserstrahltexturieren, e) 3D-Laserstrahlpolieren

Die Qualität von Pulverbeschichtungen wird durch Laserstrahlpolieren jedoch nicht verbessert. Übliche Schichtdicken liegen hier im Bereich von 100 μm und sind ausreichend dick, um die Rauheit von MJF-Bauteilen auszugleichen. Fehlerfrei polierte Bauteile sind daher nach der Pulverbeschichtung nicht mehr von unpolierten Bauteilen zu unterscheiden (Abb. 6 a). Einzig für sehr niedrige Pulverschichtdicken sind Rauheitsreduzierungen feststellbar.

4. Zusammenfassung & Ausblick

Das Laserstrahlpolieren hat sich als geeignetes Verfahren zur Nachbearbeitung von MJF-Bauteiloberflächen erwiesen. Ein abgeleitetes Prozessmodell ermöglicht die schnelle und reproduzierbare Glättung nahezu beliebiger Geometrien. Polierte Oberflächen zeichnen sich durch niedrige Rauheiten und hohe Traganteile aus. Eigenspannungen und ein daraus resultierender Bauteilverzug bleiben jedoch als Herausforderungen bestehen. In Kombination mit konventionellen Beschichtungsver-

fahren können Oberflächeneigenschaften auf verschiedene Arten modifiziert werden. Um das Potenzial dieser Technologien zu nutzen, wird in weiterführenden Versuchen die Integration von Bauteilfunktionen in die Oberfläche, beispielsweise durch das selektive Metallisieren von Leiterbahnen, angestrebt.

Danksagung

Das Verbundvorhaben „FunkFin - Entwicklung einer neuartigen Prozesskette zum funktionalen Oberflächenfinishen 3D-gedruckter Kunststoffteile“ (Förderkennzeichen ZF4039614GM8) wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literaturverzeichnis

- [1] Campbell, I., Diegel, O., Kowen, J., Mostow, N., Wohlers, T., Wohlers Report 2021: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry, Wohlers Associates Inc., Fort Collins, 2021
- [2] Lachmayer, R., Lippert, R. B., Kaierle, S., Additive Serienfertigung: Erfolgsfaktoren und Handlungsfelder für die Anwendung, Springer Berlin, 2018
- [3] Back, A., HP's MJF: The fastest growing 3D Printing Process of 2019. <https://www.3dhubs.com/blog/mjf-fastest-growing-3d-printing-process/> (aufgerufen 14.07.2021)
- [4] HP Inc., Additive Manufacturing Playing Significant Role in Digital Transformation, On-Demand Production and More Sustainable Workflows, (Pressemeldung 22.06.2021), <https://press.hp.com/us/en/press-releases/2021/additive-manufacturing-trends-report-emea.html>
- [5] Layher, M., Hopf, A., Eckhardt, L., Bliedtner, J., Laser Beam Polishing of Polymers, PhotonicsViews 3-2019, 83-87.
- [6] DIN EN ISO 4287:2010-07, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4287:1997 + Cor 1:1998 + Cor 2:2005 + Amd 1:2009)
- [7] DIN ISO 7619-1:2012-02, Elastomere oder thermoplastische Elastomere - Bestimmung der Eindringhärte - Teil 1: Durometer-Verfahren (Shore-Härte) (ISO 7619-1:2010)
- [8] DIN EN ISO 527-2:2012-06, Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen (ISO 527-2:2012); Deutsche Fassung EN ISO 527-2:2012
- [9] Reibert J.-P.: Statisches Abdichten auf nicht idealen Dichtflächen in der Antriebstechnik, Diss., Universität Stuttgart, 2015
- [10] DIN EN 1779:1999-10, Zerstörungsfreie Prüfung - Dichtheitsprüfung - Kriterien zur Auswahl von Prüfmethoden und -verfahren; Deutsche Fassung EN 1779:1999