

M

Diplomarbeit

Optimierung des 3D-Druck Prozesses für die Herstellung mikrotexturierter Polymerproben und deren tribologische Eigenschaften

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing. oder DI)

eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften,

von

Valentin WALTENBERGER

Mat.Nr.: 01326758

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Carsten Gachot

E
307 – Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung

Wien, Dezember 2021

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung dieser Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde erstellt wurde. gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht. Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein. Ich nehme zur Kenntnis, dass die vorgelegte Arbeit mit geeigneten und dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden Mitteln (Plagiat-Erkennungssoftware) elektronischtechnisch überprüft wird. Dies stellt einerseits sicher, dass bei der Erstellung der vorgelegten Arbeit die hohen Qualitätsvorgaben im Rahmen der geltenden Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis "Code of Conduct" an der TU Wien eingehalten wurden. Zum anderen werden durch einen Abgleich mit anderen studentischen Abschlussarbeiten Verletzungen meines persönlichen Urheberrechts vermieden.

> Valentin Waltenberger Wien, Dezember 2021

Danksagung

Hiermit möchte ich meinen Dank an allejene aussprechen, die mich während der Umsetzung meiner Arbeit mental als auch fachlich unterstützt haben.

Besonderer Dank gilt meinen Betreuern Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Carsten Gachot, Leiter der Forschungsgruppe Tribologie am Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung, und Herrn Dr. Philipp Grützmacher, die mir durch ihre Erfahrung und ihr Expertenwissen immer helfend zur Seite standen. Hervorzuheben ist die großartige Einbindung in das Forschungsteam, und die vielen schönen Erinnungen an die gemeinsame Zeit. Ich möchte mich auch bei Herrn Univ.-Prof Dr. Jürgen Stampfl für das zur Verfügung stellen der Fertigungsanlagen des Instituts für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie bedanken, ohne die eine Herstellung der Proben nicht möglich gewesen wäre.

Weiters möchte ich mich bei den Doktoranten des Instituts für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung Msc. Haken Göcerler, Msc. Chia Jui Hsu und Msc. Azhaarudeen Anifa Mohamed Faruck, für die vielen interessanten Fachgespräche bedanken. Meinen Dank möchte ich außerdem Dr. Simon Medina aussprechen, der mich bei der Interpretation der Ergebnisse maßgeblich unterstützt hat.

Besonderer Dank gilt auch meinen Eltern Constanze & Reinhard, sowie meiner Lebensgefährtin Ina, die mir über die Jahre immer zur Seite gestanden sind, mich gefördert und motiviert haben. Ohne euch stünde ich heute nicht hier.

Inhaltsverzeichnis

1	Abs	stract		7		
2	Ein	Einleitung				
3	The	eorie		11		
	3.1	Additi	ive Fertigung	11		
		3.1.1	Photopolymerisation	13		
		3.1.2	Fertigungsverfahren	15		
	3.2	Tribol	ogie	25		
		3.2.1	Reibung	28		
		3.2.2	Schmierung	32		
		3.2.3	Verschleiß	34		
		3.2.4	Tribologische Eigenschaften strukturierter Oberflächen	37		
4	Met	thoden		45		
	4.1	Konze	ption des Prüfkörpers	45		
		4.1.1	Vorraussetzungen	45		
		4.1.2	Probengeometrie: einskalig texturiert	47		
		4.1.3	Probengeometrie: multiskalig texturiert	48		
		4.1.4	Qualitätssicherung	50		
	4.2	Fertig	ung des Prüfkörpers	51		
		4.2.1	Ermittlung der optimalen Druckparameter	51		
		4.2.2	Verfahrensablauf Druck und Nachbearbeitung	54		
		4.2.3	Probenhandling und Aufbewahrung	56		
	4.3	Analy	se des Prüfkörpers	57		
		4.3.1	Digitalmikroskopie	57		
		4.3.2	Optische Profilometrie	59		

		4.3.3	Infrarotspektroskopie		62		
		4.3.4	Härtemessung		66		
		4.3.5	Tribometrie		68		
5	Erg	ebniss	e und Interpretation		71		
	5.1	Topog	graphiemessung mittels Profilometer		71		
		5.1.1	Untersuchung des Reinigungsprozesses \ldots		71		
		5.1.2	Einfluss der Fokuseinstellung auf die Textur		74		
		5.1.3	Qualitätssicherung der Prüfkörper		76		
	5.2	Chem	ische Analyse mittels Infrarotspektroskopie		85		
	5.3	Härte	messung Shore-D mittels Durometer		89		
	5.4	Messu	ng des Reibungsverhaltens mittels Tribometer		93		
6	Zus	amme	nfassung und Ausblick	1	17		
A	bbild	lungsv	erzeichnis	1	20		
\mathbf{A}	bkür	zungei	n	1	22		
Ta	abell	pellenverzeichnis 122					
R	Referenzen				123		

1 Abstract

Wirtschaftliches Interesse an der Effizienzsteigerung technischer Anlagen stellt den treibenden Faktor der Erforschung der Texturierung von Oberflächen für die Optimierung des Reib- und Verschleißverhaltens dar. Dies spiegelt auch die Vielzahl an Publikationen zu diesem Thema in den letzten Jahren wider. In dieser Arbeit wird die Herstellung mikrotexturierter Oberflächen aus dem Photopolymer R11 mittels der additiven Fertigungsmethode Digital Light Projection, sowie die sich durch die Texturierung ergebenden Einflüsse auf das Reib- und Verschleißverhalten untersucht. Im Zuge dieser Forschungsarbeit werden ein- und multiskalige Rillentexturen, welche anschließend tribologisch charakterisiert werden, hergestellt. Durch optimale Wahl der Parameter des Druckprozesses sowie des Reinigungsprozesses zeigt sich, dass Texturen in geringer Abweichung von der geplanten Texturgeometrie und ohne Ablagerung unpolymerisierten Materials erzeugt werden können. Bei der Ermittlung des Reibkoeffizienten wird ein Kugel-Scheibe-Tribometer in linear reziprokem Modus unter Trockenreibung eingesetzt. Die Kugel wird dabei 0°/90° relativ zur Orientierung der Textur geführt. Die gemessenen Reibkoeffizienten zeigen eine Reduktion der Reibung der texturierten Oberflächen von bis zu 64% verglichen mit der untexturierten Referenzprobe. Trotz einer Reibreduktion für alle Texturtypen und Orientierungen zeigt sich eine klare Richtungsabhängigkeit des Reibkoeffizienten von der Orientierung der Textur. Bei der Messung 90° zu den Texturen offenbart sich die geringere Widerstandsfähigkeit der Texturstege gegen die anliegenden Kräfte. Durch das schnelle Abtragen der Texturen wird der Reibkoeffizient erhöht. Die Ergebnisse unterstreichen das Potential der Beeinflussung der Reib- und Verschleißeigenschaften von additiv gefertigten Polymereroberflächen durch Maßschneidern ihrer Oberfläche.



2 Einleitung

Seit Jahrmillionen optimiert, adaptiert und perfektioniert sich die Natur. Gerade im Bereich der Oberflächentexturen finden sich viele "Ideale", welche sich im Interessensbereich der Forschungsgruppe Tribologie befinden. Laien möchten meinen, dass beispielsweise die Lotusblüte durch ihre besonders glatte Oberfläche Wassertropfen abperlen lässt; doch der Tribologe weiß es besser. Feine Texturen im Mikro- und Nanometerbereich, mit menschlichem Auge nicht zu erkennen, finden sich auf "High-Performance" Oberflächen der Natur wieder; so auch auf dem Blütenblatt der Lotuspflanze. Die Tier- und Pflanzenwelt hat in der Evolution über Jahrmillionen optimale geometrische Strukuren und multi-funktionale Oberflächentexturen entwickelt. Durch Imitation der Textur von Schlangenhaut auf der Oberfläche von weichen Elastomeren konnte Wang et al. [1] deutliche reduzierte Reibeigenschaften gegenüber untexturierten Elastomeren erzielen. Ein weiteres interessantes Beispiel, wodurch die Natur es schafft, die physikalischen Eigenschaften von Oberflächen durch Texturierung zu steuern, stellen die Anti-Fäulnis Eigenschaften von Fischschuppen dar, die ein Ablagern von Mikroorganismen und Algen an der Oberfläche verhindern. Konventionelle Beschichtungen an Schiffsrümpfen, die dieses Problem beheben sollen, sind oft toxisch, weshalb eine Nachahmung einer ökologischen Lösung interessant ist. Das Forschungsgebiet, welches sich damit beschäftigt, Phänomene der Natur nachzuahmen, nennt sich Biomimetik. Die Vorzüge solcher bioinspirierter Texturen sind im Interesse vieler technischer Branchen[2–4].

Nicht nur die Phänomene der Natur bieten Ansporn, die Eigenschaften von Oberflächentexturen näher zu verstehen, sondern auch deren potentielle technische Anwendung. Der Drang, technische Anlagen hinsichtlich ihrer Effizienz, der Langlebigkeit der Komponenten und des Schadstoffausstoßes zu verbessern, tritt zunehmend mehr in den Vordergrund. Begrenzte Verfügbarkeit von seltenen Ressourcen und das Erreichen und Einhalten von Klimazielen tragen maßgeblich zum steigenden Interesse an diesem Forschungsbereich bei und unterstreichen dessen Wichtigkeit[5, 6].

Ziel der Arbeit ist es, aufbauend auf vorhergehenden Forschungsarbeiten, additiv gefertigte, einskalige und multiskalige Topographiemuster herzustellen und diese hinsichtlich ihrer tribologischen Eigenschaften zu untersuchen. Die Fertigung von Proben aus Polymeren mittels additiver Fertigung wurde bewusst gewählt, um schnell und kostengünstig hochqualitative Bauteile herzustellen. Forschungsarbeiten an lasertexturierten metallischen Bauteilen lassen hoffen, dass auch an Oberflächen aus Kunststoff reibungs- und verschleißmindernde Optimierungen durch Texturierung erzielt werden können. Gerade bei Dichtungen sind Polymere ein gängiger Werkstoff. Besonderes Augenmerk soll auf die Fertigungsgenauigkeit der Texturen gelegt werden, so dass die Relevanz der Messergebnisse sichergestellt werden kann. Erläuterungen der bislang verwendeten Fachbegriffe erfolgt im jeweils thematisch passenden Abschnitt.

3 Theorie

Die im Zuge der Arbeit durchgeführten Arbeitsvorgänge und eingesetzten Technologien setzen Vorwissen der Fertigungstechnik und Tribologie vorraus. Aus diesem Grund wird dem Leser im nachfolgenden Abschnitt ein Einblick in diese Themenbereiche gegeben. Dies trägt zum besseren Verständis der Versuche und Analysen der Arbeit bei.

3.1 Additive Fertigung

Unter additiver Fertigung wird die schichtweise Fertigung von Bauteilen aus einem digitalen Modell verstanden. Grundlage dieses Fertigungsverfahren stellt die Entwicklung der CAM und CAD Systeme des späten 20. Jahrhunderts dar. Die Abkürzungen CAM und CAD stehen für "Computer Aided Manufacturing" und "Computer Aided Design", und beinhalten die computerunterstützte Modellierung sowie das numerisch gesteuerte Fertigen von Bauteilen. Verwendung fanden diese Systeme anfangs in der spanabhebenden Fertigung, und wurden mit der Entwicklung additiver Fertigungssysteme auch in deren Prozessabläufen als essentieller Baustein eingebunden[3].

Die additive Fertigung charakterisiert sich durch ein nicht-abtragendes Verfahren, bei welchem ein mehrdimensionales Objekt durch schichtweises Hinzufügen von Material generiert wird. Dabei wird das zugrundeliegende Modell in Einzelschichten zerteilt. Das Konzept der additiven Fertigung ist jedoch kein neues, denn seit den 1950ern existieren Patente zu diversen Verfahren. Der Begriff additive Fertigung wird in Verlauf dieser Arbeit substituierend mit dem Kürzel "AM" abgekürzt, welches für Additive Manufacturing steht. Das englische Wort ist auch in der deutschen Fachsprache ein gängiger Begriff. Das moderne AM lässt sich bis weit über 1988 hinaus mit der Verfügbarkeit des ersten kommerziellen 3D Druckers verfolgen. Der globale Boom der letzten Jahre im Bereich des AM, lässt sich auf das Erlöschen vieler auslaufender Patente, der Entwicklung kostengünstiger Konsumentengeräten und den Bedarf dieser Fertigungstechnik in der Forschung zurückzuführen. Gängige Synonyme des allgemeinen Sprachgebrauchs des additiven Fertigung sind "3D Druck" oder auch "Rapid Prototyping" und werden im Verlauf der Arbeit gleichbedeutend verwendet. "Rapid Prototyping" wird deswegen verwendet, da in vielen Sektoren Prototypen rasch und kosteneffizient durch CAD Systeme virtuell modelliert und anschließend mit dem AM Verfahren ohne Notwendigkeit von Härtung oder Nachbearbeitung hergestellt werden können. Dabei beinhaltet das Spektrum der verfügbaren Materialien nicht nur Kunststoffe sondern auch Metalle, Keramiken und polymerbasierte Komposite[5].

Neben dem "Rapid Prototyping", bei welchem Funktionsprototypen hergestellt werden, exisitiert noch die Subkategorie des "Direct Manufacturing", bei der Endbauteile hergestellt werden, die bereits alle Eigenschaften von marktgängigen Produkten besitzen[7]. In den nachfolgenden Kapiteln werden theoretisches Vorwissen der eingesetzten Verfahren erklärt, die Methodik der Forschungsarbeit beschrieben und die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse diskutiert. Abschließend soll der Erfolg der Zielerreichung der Forschungsarbeit rückblickend evaluiert werden.

3.1.1 Photopolymerisation

Polymerisation

Die Polymerisation ist eine Aufbaureaktion von Polymeren durch eine Kettenreaktion einer wachstumsfähigen Spezies mit Monomermolekülen. Dabei fügen sich Monomereinheiten zu einem Makromolekül zusammen, in Abbildung 1 veranschaulicht. Start des Prozesses ist die Initialisierung, bei der es zum Zerfall eines Moleküls und der Entstehung einer reaktiven Spezies kommt. Diese lagert sich an ein Monomer mit reaktionsfähiger Doppelbindung an und löst eine Kettenreaktion aus. Je nach Art der akiven Spezies unterscheidet man zwischen radikaler, kationischer und anionischer Polymerisation. Die Erzeugung des Startradikals kann durch Thermolyse, Redoxprozesse, mechanische Energie als auch durch Photolyse erfolgen. Erfolgt die Initialisierung mittels einer geeigneten Lichtquelle spricht man von Photopolymerisation[8, 9].

 $M \rightarrow M - M \rightarrow (M)_n$

Abbildung 1: Bildung eines Makromoleküls aus Monomeren M[9]

Photopolymerisation

Die Photopolymerisation beruht auf der Eigenschaft von speziellen Monomeren, Oligomeren und Polymeren unter Lichteinfluss spezifischer Wellenlänge durch photochemische Reaktionen tiefe strukturelle Modifikationen zu vollführen, welche die chemischen als auch mechanischen Eigenschaften verändern. Den Absorbtionseigenschaften geschuldet, sind Monomere nicht empfindlich auf Licht, weshalb die Verwendung eines Photoinitiators (PI) zum Start der Reaktion üblich ist. Durch die Anregung des PI mit Licht entsteht eine reaktive Spezies die die Polymerisationsreaktion auslöst. Der Term Photopolymerisation beschreibt dabei zwei Reaktionsprinzipien; die photoinduzierte radikalische Kettenpolymerisation und die Photovernetzungsreaktion. Zweiteres beschreibt die Verbindungen bereits bestehender Makromoleküle durch Vernetzung, wie in Abbildung 2 gezeigt. Die Photopolymerisation ist eine 3-dimensionale Reaktion, weshalb das Zusammenspiel und die optimale Abstimmung des verwendeten Monomers, dem photoinduzierenden System, der Additive (um die Eigenschaften des Polymers zu verändern) und der eingesetzten Lichtquelle essentiell ist. Gerade in der Photostereolithographie, einem Bereich der im wissenschaftlichen als auch kommerziellen Sektor breite Anwendung findet, ist dies die Vorraussetzung um den Qualitätsund Auflösungsansprüchen gerecht zu werden. Durch das weite Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten und der hohen Geschwindigkeit des Herstellungsprozesses stellt die Photopolymerisation die Grundlage für den rapide wachsenden Bereich des UV Härtens dar (Beschichtungen, Dentaltechnik, 3D Printing, Klebestoffe...)[9–11].



Abbildung 2: Reaktionen der Photopolymerisation (verändert nach [9])

3.1.2 Fertigungsverfahren

Nach ISO / ASTM52900 – 15 lassen sich die Technologien der additivien Fertigung in 7 Kategorien unterteilen. Tabelle 1 bietet einen Auszug einiger Vor- und Nachteile ausgewählter Fertigungsverfahren des AM[12].

Freistrahl-Bindemittelauftrag

Freistrahl-Bindemittelauftrag ist ein generatives, schnelles und kostengünstiges Verfahren zu Herstellung keramischer oder metallischer Bauteile komplexer Geometrien. Dabei wird das Bauteil Schicht für Schicht aufgebaut. Die 2-dimensionale Schichtinformation wird von einem CAM bereitgestellt. Eine Walze trägt dabei feines Pulver auf die Bauplattform auf. Anschließend verfährt ein Drucksprühkopf über die herzustellende Schicht und trägt eine bindemittelhaltige Flüssigkeit selektiv auf. Durch das Bindematerial wird die Bauteilgeometrie schichtweise aufgebaut. Der Prozess des Pulverauftrags und anschließenden Bindemittelauftrags wiederholt sich so lange, bis alle Schichten des Bauteils aufgetragen sind. Der entstehende Körper nennt sich "Grünling" und muss anschließend thermisch nachbehandelt werden (z.B. Sintern). Die Qualität des Drucks hängt dabei von den

Fertigungsverfahren	Vorteil	Nachteil	
Pulverbettbasiertes Schmelzen	- Überschüssiges Material fungiert als Stützstruktur - Gute mechanische Eigenschaften	- Teuer, hoher Materialüberschuss - beschränkte Materialauswahl - raue Oberfläche	
Freistrahl Materialauftrag	- Multimaterial Teileherstellung - Hohes Auflösungsvermögen -Geringe Bauteilspannungen	 Schwache mechanische Materialeigenschaften limitiert auf Polymere 	
Badbasierte Photopolymerisation	-Hohes Auflösung-zu- Bauzeit Verhältnis	 Hohlräume durch flüssiges Material nicht herstellbar Notwendigkeit von Supportmaterial 	
Materialextrusion	-Kostengünstige Maschinen -Verfügbarkeit	 Geringes Auflösungsvermögen Schlechte Oberflächenqualität Hohe Bauteilspannungen 	

Tabelle 1: Vor- und Nachteile einzelner Fertigungsverfahren im AM[5]

Benetzungseigenschaften und der Infiltration des Bindemittels auf dem Pulver ab[13–15].

Pulverbettbasiertes Schmelzen

Die Technologie des pulverbettbasierten Schmelzens beruht ebenfalls auf dem schichtweisen Aufbau eines CAD gestützten Bauteils welches über eine "Slicing"-Software in 2-dimensionale Schichten geteilt wird. Mit dieser Fertigungstechnologie können sowohl Polymere als auch metallische Bauteile hergestellt werden. Das Ausgangsmaterial liegt dabei in Pulverform vor und wird schichtweise auf eine Grundplatte aufgetragen. Anschließend wird das Pulver von einem Hochleistungslaser selektiv geschmolzen. Nach Vollendung einer Schicht wird die Bauplattform abgesenkt, erneut Pulver aufgetragen und der Schmelzvorgang wiederholt. Beim pulverbettbasierten Schmelzen können sowohl Grünkörper als auch Endbauteile gefertigt werden. Um bei metallischen Pulvern Oxidation im Schmelzprozess zu vermeiden, befindet sich das System meist in einer Schutzgasatmosphere aus Argon oder Stickstoff[16].

Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung

Neben dem pulverbettbasierten Schmelzen, stellt der Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung ein zweites Verfahren der Herstellung von additiv gefertigten metallischen Bauteilen dar. Bei der im Englischen als "Direct Energy Deposition" bekannten Technologie wird metallisches Ausgangsmaterial in Form von Draht verwendet und durch fokussierte Wärmeenergie auf die Bauplattform aufgebracht. Die fokussierte Wärmeenergie wird z.B. über Laser, Elektronenstrahl oder Plasmabogen eingebracht und schmilzt das Material auf, während es auf die Bauplattform aufgetragen wird. Dadurch lassen sich komplexe Geometrien Schicht für Schicht herstellen. Die verwendeten Drähte haben einen Durchmesser von 0,2 bis 4mm[12, 17].

Materialextrusion

Bei der Materialextrusion wird das Material schichtweise durch eine Düse aufgetragen. Dieses Herstellungsverfahren ist auch unter dem Namen "Fused Deposition Modelling" (FDM) bekannt. Beim thermoplastischen 3D-Drucken wird ein Polymerfaden durch eine beheizte Düse geführt. Der Vorschubmechanismus kann entweder direkt am Druckkopf angebracht sein (Direct-Extruder) oder über einen extern angebrachten Bowdenvorschub erfolgen. In der Düse wird das Polymer aufgeschmolzen und vom Druckkopf schichtweise anhand der vom Computer bereitgestellten Schichtinformation auf der Bauplattform abgelegt. Nach jedem Schichtauftrag wird entweder die Bauplattform um eine Schichthöhe abgesenkt, oder der Druckkopf um gleiches Maß angehoben. Danach wiederholt sich der Materialauftrag bis die Herstellung des Bauteils abgeschlossen ist[16].

FDM ist durch die kostengünstige Anschaffung der Geräte und einer

Vielzahl an Open-Source Projekten am Privat-Konsumentenmarkt weit verbreitet.

Freistrahl Materialauftrag

Freistrahl Materialauftrag ist auch als "Material Jetting" bekannt. Es ist dem Funktionsprinzip eines Tintenstrahldruckers sehr ähnlich. Dabei wird ein flüssiges Polymerharz schichtweise von einem Druckkopf in feinen Tropfen auf die Bauplattform der Anlage aufgesprüht. Das photosensitive Polymer reagiert mit der auf dem Druckkopf befindenen ultravioleten Lichtquelle und härtet aus. Das Bauteil wird dabei aus horizontalen 2-dimensionalen Schichten vollständig aufgebaut[12, 16].

Schichtlaminierung

Bei der Technik der Schichtlaminierung erfolgt der Bauteilaufbau durch schichtweise Laminierung von Materialfolien (z.B. keramischen Grünfolien), welche mittels thermoplastischem Adhäsiv verbunden, anschließend durch Aufbringung von Druck und Temperatur stoffschlüssig gemacht und letzlich schichtweise mit einem Laser oder Schleppmesser ausgeschnitten werden[18].

Badbasierte Photopolymerisation

Die Technologie der badbasierten Photopolymerisation beruht auf flüssigen Photopolymeren, welche gezielt schichtweise durch lichtaktivierte Polymerisation ausgehärtet werden[12]. Erste Photopolymeristaionssysteme wurden bereits in den 1980ern von Charles W. Hull entwickelt. Die badbasierte Photopolymerisation lässt sich in zwei Kategorien gliedern, welche nachfolgend genauer erläutert werden. Vor allem das "Digital Light Projection" Verfahren ist von Bedeutung, da es für die Probenherstellung dieser Forschungsarbeit verwendet wurde.

Stereolithographie

Auch die Stereolithographie (SLA) ist ein Schicht-für-Schicht Fertigungsverfahren. Grundlage ist ein CAD Modell des Bauteils, welches mit einer speziellen "Slicing"-Software in einzelne 2-dimensionale horizonztal geteilte Bauteilschichten zerlegt wird. Eine Wanne, gefüllt mit photosensitivem Polymer, wird von einem Laser im ultravioleten Spektrum selektiv beleuchtet und das Polymer ausgehärtet. Erste Systeme beruhten auf dem "top down" Prinzip. Hierbei wird die Wanne komplett mit dem flüssigen Photopolymer gefüllt und von oben über einen mit Spiegeln gesteuerten Laser beleuchtet. Neue Anlagen verwenden jedoch das "bottom up" Prinzip, bei welchem die mit flüssigem Photopolymer gefüllte Wanne von unten belichtet wird. Ein Vorteil des "bottom up" Verfahrens ist, dass es beim Start des Druckprozesses nicht nötig ist, die gesamte Wanne mit flüssigem Photopolymer zu füllen. Hinzu kommt eine leichtere Reinigung des Bauteils von nicht ausgehärtetem Material, da die Bauplattform mit dem anhafteten Bauteil immer nur mit der Höhe einer Schicht in den Schlicker eintaucht. Die Schichtinformation wird hierbei durch einen Satz aus Koordinaten, auf Basis welcher die laterale Position des Lasers bestimmt wird, bereitgestellt.

Ist der Laser einmal vollständig über die erste Schicht gefahren und somit diese Bauschicht ausgehärtet, wird die Bauplattform um eine Schichthöhe herabgefahren und der Vorgang startet erneut. Das Auflösungsvermögen ist dabei von der Intensität des Lasers, der Dauer der Belichtung, sowie der Geschwindigkeit des Lasers abhängig[19].

Digital Light Projection (DLP)

Das Digital Light Projection Verfahren ist der Stereolithographie ähnlich und beruht auf der Verwendung von flüssigen Photopolymeren. Dabei härtet das Licht einer UV-Hochleistungsleuchtdiode, welches von einem Sensor aus ansteuerbaren Mikrospiegeln (DMD-Chip) selektiv geblockt wird, die Photopolymere an den gewünschten Stellen schichtweise aus. Der DMD-Chip besteht dabei aus einer Anordnung quadratischer Spiegel, welche oft auch als Pixel bezeichnet werden. Die Mikro-Spiegel des DMD-Chips können dabei individuell geneigt werden, und funktionieren wie Lichtschalter (+10° für "an", -10° für "aus"). Dadurch kann eine Maske der auszuhärtenden Schnittebene auf die Bauplattform projeziert werden[20, 21].



Abbildung 3: Aufbau einer DLP-Anlage bestehend aus (a) Wanne gefüllt mit dem Photopolymerharz, (b) Lichtquelle, (c) Mikrospiegel-Chip, (d) vertikal verschiebbare Bauplattform, (e) Abkippvorrichtung [19]

Eine schematische Darstellung des Funktionsprinzips ist in Abbildung 3 gezeigt. Das DLP Verfahren beruht auf dem "bottom up" Prinzip. Das Schnittbild der jeweiligen Projektionsschicht wird zeitgleich über die Spiegel projeziert und ausgehärtet. Von Vorteil ist, dass in jedem Arbeitsschritt eine komplette Schicht des Bauteils hergestellt wird. Mit "bottom up" wird hierbei beschrieben, dass die Wanne mit dem flüssigen Photopolymer von unten durch ein transparentes Fenster vom UV Licht getroffen wird und das Bauteil beginnend mit der untersten Schicht aufbaut wird. Die Bauplattform taucht hierbei von oben auf Höhe der voreingestellten Schichtstärke in die Wanne ein. Wenn eine Schicht ausgehärtet ist, fährt die Bauplattform nach oben und eine neue Schicht des flüssigen Polymers wird mit einer automatisierten Rakel auf die Bauplattform aufgebracht. Anschließend wird über die zuvor beschriebenen Prozessschritte eine neue Schicht an die bereits ausgehärtete Schicht angefügt. Dies wird wiederholt bis das Bauteil vollständig aufgebaut ist[22].

Das Auflösungsvermögen dieses Produktionsverfahren wird durch die Größe der quadratischen Pixel und der zugehörigen Optik beschränkt und liegt in der Regel bei ca. 10-50 μ m. Nachteilig ist hierbei, dass durch die quadratische Form der Pixel keine gewölbten oder gekrümmten Konturen ausgehärtet werden können, diese müssen approximiert werden. Diese Problematik ist in Abbildung 4 veranschaulicht und zeigt die Stufeneffekte, welche durch die Approximierung in Kauf genommen werden müssen. Durch die gleichzeitige Aushärtung einer Bauteilschicht in einem Prozessschritt lassen sich gegenüber der Stereolithographie höhere Baugeschwindigkeiten erzielen.



Abbildung 4: Approximierung eines Kreises auf Pixelbasis [3]

Uber lithographiebasierte Systeme lassen sich nicht nur Polymere, sondern auch Metalle und Keramiken herstellen, welche gerade in der Zahnheilkunde von großem Interesse sind. Durch den Einsatz eines Komposits aus photosensitivem Polymer und keramischen Füllstoff kann ein "Grünkörper" erzeugt werden, welcher in thermischer Nachbehandlung (Entbindern/Sintern) von seinen organischen Anteilen bereinigt/ausgebrannt wird. Im Sinterprozess fügt sich das Bauteil dann zu einem dichten Werkstoff[3].

3.2 Tribologie

Peter Jost, der Begründer des Terminus "Tribologie" beschreibt es in seiner 1990 veröffentlichten Publikation [23] bildlich: "Wäre Newton nicht ein Apfel auf den Kopf gefallen, sondern an einer Bananenschale ausgerutscht, hätte der Fachbereich der Tribolgie schon viel früher Interesse erweckt." Erstmals erwähnt wurde der Begriff Tribologie im Jahr 1966 in einem Report des *Commitee of British Department of Education and Science*[24]. Wie sich damals herausstellte, existierte bis zu diesem Zeitpunkt in keiner Sprache ein Wort, dass das Konzept der "interagierenden Oberflächen in Relativbewegung" beschreibt. Ins Deutsche wird die Originaldefintion der Tribologie wie folgt übersetzt:

Tribologie ist die Wissenschaft und Technik von Wirkflächen in Relativbewegung und zugehöriger Technologien und Verfahren.[25]

Als Ingenieurwissenschaft lässt sich die Tribologie folgend definieren:

Die Tribologie ist ein interdisziplinäres Fachgebiet zur Optimierung mechanischer Technologien durch Verminderung reibungs- und verschleißbedingter Energie- und Stoffverluste.[25]

Im Vergleich zum Begriff ist die Tribologie selbst uralt. Die Ursprünge verlieren sich in geschichtler Ferne, selbst Jahrtausende vor Christus wurden tribologische Prinzipien von den Sumerern und Ägyptern verwendet; einfache Lager zur Entfachung von Feuer, Töpferscheiben mit Holz- und Steinlagern und Schlittenkonstruktionen zum Transport von Steinen sind nur einige wenige Beispiele[26, 27]. Durch die Einführung des Begriffs im Jahr 1966 wurde ein interdisziplinärer Fachbereich geschaffen, welcher die Forschungsbereiche der Physik, Chemie, Werkstoff- und Ingenieurwissenschaften vereint. Seit den 1980er Jahren beeinflussen Energie- und Umweltdebatten mit zunehmender Relevanz die globale Denkweise. Darauf aufbauend wird der Fachbereich der Tribologie ständig erweitert und weiterentwickelt. Die anfänglichen Ziele "Reibung kontrollieren, Verschleiß mindern und Schmierung verbessern" erweitern sich seit der Jahrtausendwende rasant um Themenbereichen wie "Energie- und Ressourceneinsparung, Reduzierung von Emissionen, Minimierung von Lärmbelästigung, Entwicklung von Bio- und Ecoschmierstoffen und Verbesserung der Lebensqualität." Die Verlängerung der Lebensdauer von Anlagen bei gleichzeitiger Reduktion der Emission und Verbesserung der Effizienz stellen das Kerngebiet wirtschaftlichen Interesses dar. Die Tribologie ist somit nicht nur in der Technik, sondern auch in der Wissenschaft und Wirtschaft von großer Bedeutung[6, 28].

Reibung, Schmierung und Verschleiß bestimmen die Standzeit von Maschinen, deren Wartungsintervalle und unerwünschte Folgen (Wärme, Verschleißteile, Geräusche, Geometrieänderungen...). Hoher Verschleiß kann zu plötzlichen Ausfällen und verschlechterten Systemeigenschaften von Anlagen führen. Hierbei stellen moderne tribologische Technologien wie z.B. Oberflächentexturierung eine Möglichkeit der Verbesserung des Kosten-Nutzen Verhältnisses[26]. Das Bundesministerium für Forschung und Technologie in Deutschland schätzte in einem 1983 veröffentlichten Report, dass sich in Industrieländern die Verluste durch Verschleiß auf eine Höhe von 4,5% des Bruttonationaleinkommens belaufen[29]. TU **Bibliothek**, Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar WIEN Vourknowedge hub The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tribologische Kontakte verbuchen 23% des weltweiten Energiebedarfs. Davon sind 20% auf Reibung und 3% auf die Herstellung von durch Reibung verschlissener Ersatzteile zurückzuführen. Holmberg [30] fand heraus, dass durch die technologische Entwicklung im Bereich neuer Oberflächen, Materialien und Schmierungsverfahren das langfristige (15 Jahre) Einsparungspotential bei Energieverlusten bei 40% und das kurzfriste (8 Jahre) bei 18% liegt. Auf globaler Basis würde das zu einer Kostenersparnis von 1,4% des weltweiten Bruttoinlandprodukts führen. Dies unterstreicht die ökologische als auch ökonomische Relevanz dieses oftmals übersehenen Forschungsbereichs[31, 32].

3.2.1 Reibung

Reibung ist keine Materialeigenschaft sondern eine Systemantwort; der Bewegungswiderstand beim Gleiten oder Rollen eines festen Körpers tangential über einen anderen. Dieser äußert sich als Widerstandkraft bei sich berührenden Körpern entweder gegen die Einleitung einer Relativbewegung (statische Reibung) oder deren Aufrechterhaltung (dynamische Reibung)[33, 34]. Reibung und Verschleiß als Systemantwort sind nicht nur von Werk- und Schmierstoffen abhängig, sondern auch von technisch-physikalischen Parametern wie Kräften, Geschwindigkeiten, Temperaturen, Bewegungsformen und Beanspruchungsdauern. Diese Parameter werden als Beanspruchungskollektiv bezeichnet und kennzeichnen gemeinsam mit Grundkörper, Gegenkörper, Zwischenstoffen und systemunhüllenden Stoffen das tribologische System[34, 35].



Abbildung 5: Tribologisches System [34]

Das Reibungs- und Verschleißverhalten an der Kontaktfläche zweier Körper wird über den Reibungszustand beeinflusst. Diese Zustände lassen sich in 5 Kategorien einteilen:

Festkörperreibung

Festkörperreibung wird auch trockene oder Coulomb'sche Reibung genannt und liegt vor, wenn zwei Kontaktflächen ohne Schmierung in unmittelbarem Kontakt einer Reibbeanspruchung unterliegen. Nach Amontons (1699) und Coulomb (1785) lässt sich folgendes Reibungsgesetz unter unten angeführten Näherungen formulieren:[25, 27]

$$F_R = \mu * F_N$$

- Die Reibungskraft F_R ist bei Festkörperreibung der Normalkraft F_N proportional, der Proportionalitätsfaktor wird als Reibungszahl bezeichnet.
- Die Reibungskraft ist unabhängig von der Größe der nominellen geometrischen Kontaktfläche.

Die ersten experimentellen Untersuchungen der Gesetzmäßigkeiten wurden bereits 200 Jahre vor Amontons durch Leonardo da Vinci durchgeführt, welcher herausfand, dass der Reibwiderstand proportional zum Gewicht und unabhängig von der Größe der Kontaktfläche ist[27, 36].

Grenzreibung

Grenzreibung ist ein Sonderfall der Festkörperreibung, bei der ein Schmierfilm nicht oder nicht mehr vorhanden ist und bei dem im Kontaktbereich der Reibpartner molekulare Randschichten (Grenzschichten, Schutzschichten) wirksam sind[25]. Im Vergleich zur Festkörperreibung zeigt sich in einzelnen Fällen eine Lastabhängigkeit des Reibkoeffizienten. Ein Beispiel hierfür ist die Grenzreibung der Werkstoffpaarung Kupfer auf Kupfer bei Luft als umgebendes Medium. Hierbei bildet sich ein Oxidfilm, der die beiden Kontaktflächen trennt. Aufgrund der niedrigeren Scherfestigkeit des Oxidfilm bei höherer Last bricht die Schicht und es kommt zu metallischem Kontakt, wodurch der Reibungskoeffizient ansteigt. Das Verhalten in diesem Reibungszustand ist in Abbildung 6a zu sehen. Abbildung 6b zeigt den Verlauf des Reibungskoeffizienten der Paarung Stahl und Aluminium; hier bleibt der Reibungskoeffizient unabhängig von der Normalkraft[31].



Abbildung 6: Reibungszustände[31]

Flüssigkeitsreibung

Bereits seit Jahrtausenden werden zur Reduzierung von Reibung und Verschleiß Schmiermittel eingesetzt. Bei der Flüssigkeitsreibung kommt es durch das Schmiermittel zu einer vollständigen Trennung der beiden Kontaktpartner und deren Rauheiten. Dabei wird die Belastung durch den im Schmierfilm aufgebauten Druck übertragen. Die chemische Struktur des Schmiermittels bestimmt die innere auftretende Reibung im Schmierfilm. Eine ausführliche Erläuterung des Druckaufbaus im Schmierfilm erfolgt in Unterkapitel 3.2.2[25, 34].

Mischreibung

In Abhängigkeit von der Belastung und Geschwindigkeit der Kontaktpartner, beziehungsweise der Viskosität des Schmiermittels können sich verschiedene Reibungszustände einstellen. Die Mischreibung ist ein Bereich zwischen Grenzreibung und Flüssigkeitsreibung bei dem die Kontaktflächen und enthaltenen Rauheiten nicht vollständig voneinander durch den Schmierfilm getrennt werden. Wird die Schichtdicke des Schmierfilms vergleichbar mit den Rauheiten der Oberflächen, so kommt das System in den Bereich der Mischreibung. Dabei wird die Belastung einerseits durch den Schmierfilm, andererseits durch die Rauheitsspitzen der Kontaktpartner aufgenommen[25, 27, 31].

3.2.2 Schmierung

In verschiedenen Aggregatzuständen eingesetzt, dienen Schmierstoffe wie Schmieröle, Schmierfette und Festschmierstoffe zur Verminderung von Reibung und Verschleiß in tribologischen Systemen[25].

Die nach dem deutschen Maschinenbau-Ingenieur Richard Stribeck benannte Stribeckkurve (Abbildung 7) zeigt die Zusammenhänge zwischen Reibkraft und Geschwindigkeit in einem flüssig-geschmierten System. Stribeck entdeckte, dass beim Verlauf der Reibkraft über die Reibungsgeschwindigkeit mit steigender Geschwindigkeit die Reibung abnimmt, ein Minimum durchläuft und dann wieder ansteigt. Stribeck's Erkenntnisse wurden 1914 von Ludwig Gümbel zur heute als "Stribeckkurve" bekannten Darstellung zusammengefasst[37, 38].



Abbildung 7: Reibungszustände, gekennzeichnet durch die Stribeck-Kurve [34]

Gibt es keine Relativbewegung zwischen Grund- und Gegenkörper besteht Haftreibung. Mit beginnender Relativbewegung trennen nur einzelne Moleküle die beiden Kontaktpartner, in diesem Stadion liegt Grenzreibung vor. Diese kennzeichnet sich durch hohe Reibung und Verschleiß an den Oberflächen. Mit fortschreitender Geschwindigkeit dringt Schmiermittel in den Spalt und es entsteht ein dünner Schmierfilm. Dieser ist jedoch noch nicht ausreichend, um die Kontaktpartner vollständig zu trennen, Rauheitshügel berühren sich noch; Mischreibung liegt vor. Bei Erreichen einer gewissen Relativgeschwindigkeit führt die Zunahme des Drucks im Schmierspalt zur vollständigen Trennung der Körper. Dieser Punkt wird als Ausklinkpunkt bezeichnet und kennzeichnet den Übergang von Mischreibung zu Flüssigkeitsreibung unter hydrodynamischer Schmierung[39]. Der tragfähige Schmierfilm stellt ein verschleißsicheres und reibungsarmes Betriebsverhältnis sicher[34].

In vielen Anwendungsgebieten ist aufgrund der Umgebungsparameter der Einsatz von flüssigen Schmiermitteln nicht möglich. Beispielsweise in der Raumfahrt, bei der die Anwendung im Vakuum oder unter sehr hohen Temperaturen erfolgt, sind Festschmierstoffe unumgänglich. Aufgrund ihrer guten adhäsiven Eigenschaften und ihrer leichten Deformierbarkeit sind Graphit und Molybdändisulfid als Schmierstoff weit verbreitet[25]. Festschmierstoffe werden entweder als Beschichtung der Kontaktfläche oder als Beigabe für selbstschmierende Kompositwerkstoffe verwendet. Der Wirkmechnismus ist ähnlich dem Prinzip von Grenzschichten. Der tribologische Kontakt der Reibpartner führt zum Übertrag der Beschichtung vom Grund- auf den Gegenkörper. Diese dünne Schicht des Festschmierstoffs wird als "Tribofilm" bezeichnet [40].

3.2.3 Verschleiß

Wie auch Reibung ist Verschleiß keine Materialeigenschaft, sondern eine Systemantwort [41] und ist eine der Hauptursachen für Bauteilschädigungen und damit verbundenem Maschinenausfall. Verschleiß ist allerdings nicht zwingend unerwünscht, sondern ist oftmals auch Grundlage einer Technolgie wie in den Bearbeitungsarten Schleifen, Polieren und Sandstrahlen. Auch das Schreiben mit einem Bleistift kann als gewollter Verschleiß gesehen werden [27]. In einem tribologisch gut ausgelegten System ist Verschleiß langsam, kontrolliert und gleichmäßig, sodass Wartungen und Bauteilwechsel in geplanten oder zu erwarteten Intervallen durchgeführt werden können [31].

Verschleiß ist der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers (Grundkörper), hervorgerufen durch tribologische Beanspruchungen, d. h. Kontakt- und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers [25, 42].

In den 1930ern veröffentlichte Publikationen begannen eine Unterscheidung des Verschleißes in abrasiven und adhäsiven Verschleiß. Die Differenzierung wurde damals durch die Sichtung von Verschleißspuren oder Ertastung von abtragenden Substanzen mit dem Finger (Abrasiver Verschleiß) gemacht. Konnte keine Verschleißspur festgestellt werden, sprach man von adhäsivem Verschleiß [43]. In der Wissenschaft ist es heutzutage üblich, Verschleiß abhängig von den Prozessen im tribologischen System und der Kinematik der Beanspruchung in Verschleißmechanismen zu gliedern, die nur in seltenen Fällen einzeln auftreten. Die Kenntnis der wirkenden Verschleißmechnismen ist gerade bei der Werkstoffauswahl und Beurteilung von Verschleißzonen von großer Bedeutung [25, 27, 35].

Mechar	nismus	Kennzeichen		Merkmal
Adhä	sion			Vertiefungen, Riefen, Risse, Werkstoff- übertrag, Verformung, Gefügeänderung
Abras	sion			Riefen, Span, Wall, Mulden, Wellen, Verformung, Gefügeänderung
Oberflächen	zerrüttung	A Company of the second		Verformung, Risse, Grübchen, Gefügeänderung
Tribo- chemische und/oder	Reaktions- schicht- bildung	+		Schichtbildung, Oxidation
tribo- physikalische Reaktionen	Ablation		117777	Verdampfen, Ausgasen, Zersetzen

Abbildung 8: Verschleißmechnismen in tribologischer Beanspruchung [35]

Die Verschleißmechanismen lassen sich wie folgt gliedern:

- Abrasiver Verschleiß Rauheitsspitzen harter Körper, harter Abrasivstoffe oder abgetrennte verfestigte Verschleißpartikel dringen unter Last in den weicheren Körper ein und gleiten über dessen Oberfläche.
 Dabei kommt es zu Verformung, Zerspanung oder Brechen.
- Adhäsiver Verschleiß es kommt zu stofflicher Wechselwirkung im Oberflächenbereich der Kontaktpartner. Es kommt zur Bildung (Verschweißung) und Trennung von Grenzflächenverbindungen aufgrund des Fehlens von schützenden Oberflächenschutzschichten bei hohen Belastungen und Temperaturen.
- Oberflächenzerrüttung ist die Folge zyklischer Beanspruchungen an den Mikrokontakten einer Oberfläche, die über plastische Deformation zu Rissbildung und schließlich Ausbrechungen führen.
- Tribochemische Reaktionen durch die tribologische Beanspruchung entstehen chemische Prozesse zwischen Festkörper, Schmierstoff und Umgebungsmedium. Tribooxidation durch Sauerstoff des Umgebungsmediums führt zur Bildung von Oxidschichten und oxidischen Verschleißprodukten. Die thermische und mechanische Aktivierung durch das Belastungskollektiv erhöhrt dabei die chemische Reaktionsbereitschaft. Die gebildeten Reaktionsschichten können dabei sowohl positive als auch negative Auswirkung auf das Reibungsverhalten haben [25, 26, 35].
3.2.4 Tribologische Eigenschaften strukturierter Oberflächen

Das Texturieren von Oberflächen hat sich in den letzten drei Jahrzehnten zu einem vielversprechenden Forschungsgebiet der Tribologie entwickelt. Viele Forschungsarbeiten befassen sich mit unterschiedlichen Arten von Oberflächenstrukturen, Strukturierungstechniken und deren Auswirkung auf Reibungs- und Verschleißverhalten im vorgesehenen Anwendungsfall. Allerdings steht nicht nur die Minimierung der Reibung im Hauptaugenmerk der Untersuchungen, sondern die Beieinflussung und Steuerung des Reibungsverhalten im vorherrschenden Reibungsregime. Trotz großer Anstrengung vieler Wissenschafter gibt es weiterhin viele Unklarheiten über optimale Texturen und deren Einfluss auf das tribologische Verhalten der texturierten Komponente. Oft durchlaufen Komponenten in ihrem Betrieb mehrere Reibungsregime, wodurch Untersuchungen genauer Anwendungsfälle erschwert werden[44, 45]. Untersuchte Texturformen reichen von Rillen, über punktuelle Muster zu nachgeamten Strukturen der Natur. Diese können additiv als auch destruktiv auf der Oberfläche erzeugt werden. Der Größenbereich befindet sich häufig im Mikro- und Nanometerbereich. Die Anordnung der erzeugten funktionellen Modifikationen kann in vordefinierten Mustern als auch rein zufällig erfolgen und ist meist auf der vorgesehenen Einsatzzweck abgestimmt. Die Fortschritte der Technik ermöglichen heutzutage die Herstellungen hochkomplexer hierarchischer Texturformen. Die Herstellungsverfahren lassen sich grob in mechanische, chemische, physische und thermische Methoden gliedern. Dabei stellen das thermische Verfahren des Laserstrukturierens ein sehr gängiges Verfahren dar, welches sich durch seine Flexibilität in der Materialwahl, Genauigkeit, als auch Geschwindigkeit auszeichnet. Durch den Materialabtrag über Aufschmelzen und Ablagerung in Bereiche geringerer Intensität kommt es zu widerstandsfähigeren Texturen im Vergleich zum Materialauftrag. Dies hat das Laserstrukturieren zum "Go-To" Verfahren vieler Forschungsarbeiten rund um das Oberflächentexturieren gemacht[44, 46]. Ein sehr aktuelles und viel dissuktiertes Thema ist jenes der CO_2 Emissionen von Kraftfahrzeugen. Die Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂ Emmissionen von Verbrennungsmotoren, um bestehende Regularien zu erfüllen stellt eine große Herausforderung für Ingenieure dar. Untersuchungen ergaben, dass die Kolbenring-Zylinder Paarung im Kraftfahrzeug zirca 50-60% der Reibungsverluste darstellt. Folgliche würde eine Reduzierung der Reibung dieser Paarung um 5% den Kohlenstoffdioxidausstoß eines Kraftfahrzeuges um 1g/km reduzieren. Dies würde bereits einen erheblichen Beitrag zum Erreichen der Klimaregularien beitragen und ist der Grund für die Vielzahl an Forschungsarbeiten in diesem Themengebiet. Durch Texturierung des Kolbenrings als auch der Zylinderwand mit regelmäßig angeordneten Rechtecken beziehungsweise kreisförmigen Vertiefungen konnten Reibungsminderungen von bis zu 10% erzielt werden. Im Hinblick auf das Treibstoffersparnis können so bis zu 4% eingespart werden [47, 48].

Die aufgebrachte und auf den Anwendungsfall abgestimmte Oberflächentextur kann verschiedenste Aufgaben haben. In geschmierten Systemen können Vertiefungen, Rillen und Mulden als Notfall-Reservoir für Schmierstoffe dienen und im Fall von Mischreibung dafür sorgen, dass Schmierstoff in den Kontaktbereich transportiert wird[49, 50].

Vladescu [51] beschreibt, dass bei der reziproken Bewegung des Kolbens an der Zylinderwand in einer Bewegungsrichtung der Schmierstoff verdrängt wird, und bei der Rückbewegung nicht rechtzeitig ausreichend Schmierstoff zurück in den Kontaktbereich fließen kann. In diesem Fall dienen die Texturen als Schmierstoffspeicher und führen so zu einer Reduktion der Reibung verglichen mit untexturierten Systemen. Dabei zeigte sich ein klarer Unterschied in der Menge des durch die Texturvertiefung zur Verfügung gestellten Schmierstoffes pro Durchgang abhängig von der Geometrie der Vertiefung. Größere Vertiefungen konnten mehr Öl bereitstellen, führten folglich zu geringstem Verschließ im Test, jedoch nicht zu geringstem gemessenen Reibkoeffizienten. Dies zeigt, dass sich durch die gezielte Wahl der Textur das Reib- als auch Verschleißverhalten einer Werkstoffpaarung steuern lässt. Ein Forschungsarbeit von Ronen et. al. [52] über den Effekt von Oberflächentexturierung von automotiven Komponenten aus dem Jahr 2001 untersuchte den Zusammenhang von Geometrie der Textur und Reibungsreduktion. Dabei führte die optimale Wahl der Höhe und des Durchmessers der Vertiefungen einerseits zu einem verfrühten Einsetzen von hydrodynamischer Schmierung, als auch durch den eintretenden Kaviationseffekt zu einer Verdoppelung der Lebensdauer von Dichtungen unter hohen Geschwindigkeiten und geringen Belastungen. Beim Kavitationeffekt kommt es durch die Vertiefungen in den Oberflächen bei hydrodynamischer Schmierung zu einer Erhöhung der Traglast des Schmierfilms[50].

Ein weiterer, jedoch aufgrund der geringeren Zahl an Publikationen zum Thema Oberflächentexturen bei Trockenreibung weniger untersuchter, Effekt von Texturen ist jener der Aufnahme von Verschleißpartikeln. Die Täler der Textur nehmen hierbei Verschleißpartikel auf und halten sie von der Kontaktzone fern. Hierdurch soll abrasiver Verschleiß reduziert werden[53]. Jedoch wird dieser Ansatz kontrovers diskutiert, da besagte Verschleißpartikel ebenfalls dazu beitragen können, das System von Gleit- in Rollreibung zu versetzen und dadurch reibungsmindernd wirken[44].

Die Reduzierung der Reibung durch Texturierung der Oberflächen der Reibungspartner in ungeschmierten System ist auf die Reduzierung der tatsächlichen Kontaktfläche zurückzuführen. Bowden & Tabor [54] schlugen in den 1940er Jahren die Theorie "adhesion concept of friction", übersetzt zu "Adhäsionskonzept der Reibung", vor. Dieses besagt, dass beim Kontakt zweier Oberflächen die tatsächliche Kontaktfläche von der scheinbaren Kontaktfläche abweicht. Tatsächlich kommen nur die Rauheitsspitzen der Oberflächen in Kontakt. Dabei bilden sich Schweißbrücken zwischen den Atomen der beiden Kontaktpartner. Die Summe der Kontaktstellen bildet die reale Kontaktfläche A. Mit der zum Scheren der Schweißbrücken erforderliche Tangentialspannung τ ergibt sich für die Reibkraft F_k folgende Gleichung:

$$F_{\mathbf{k}} = \mu * W = \tau * A$$

Dabei ist die reale Kontaktfläche A proportional zur Last W. Die Verletztung des 2. Gesetzes von Amonton bietet somit die Grundlage der Untersuchungen zur Reibungsverminderung durch Oberflächentexturierung[27, 55].

Multiskalige Oberflächentexturen

Viele Oberflächentexturen finden Inspiration an Beispielen der Natur; beispielsweise die Emulation von Haifisch-Haut auf den Tragflächen von Flugzeugen zur Reduktion von Luftverwirbelungen an strömungsrelevanten Stellen und folglich einhergehende Treibstoffeinsparung. Viele dieser inspirierten Texturen beruhen jedoch nicht auf einer einskaligen Texturgeometrie, sondern sind Konstrukte aus hierarchisch unterteilten Subtexturen. Diese "bioinspirierten" Oberflächentexturen setzen sich oftmals aus kleinen Strukturbauteilen auf größen Elementen zusammen, welche sich in Größe, als auch Geometrie unterscheiden. Die Eigenschaften dieser in der Flora und Fauna zu findenden Strukturen reichen von Minimierung von Reibungs- und Luftwiderstand, Reflexionsminderung, Trockenhaftung, Superhydrophobie bis hin zu Anti-Fäulnis und struktureller Farbänderung[44, 56]. Abbildung 9 zeigt eine Ubersicht einiger in der Natur zu findenden Oberflächentexturen, deren Größenskala und Modifikationen der pyhsikalischen Eigenschaften. Greiner et al. [57] erzielte bei der Imitation von Schlangenhaut mittels Lasertexturierung von Lagerstahl eine Reduktion der Trockenreibung von 40%. Dabei zeigte sich, dass die selbe Textur im geschmierten Zustand zu einer Verdreifachung der Reibung führt. Dies bestätigt, dass die Wahl der Textur in Abstimmung mit dem vorgesehenen Einsatzbereich von großer Bedeutung ist. Die von Greiner et al. hergestellten, Schlangenhaut ähnlichen Texturen wiesen eine laterale Länge von $50\mu m$ auf. Die Texturelemente echter Schlangenhaut messen 300-600nm. Dies zeigt, dass bei der Herstellung bio-inspirierter Texturen auch bei Skalierung der Textur eine Modifikation physikalischer Eigenschaften gegeben ist.

Da viele Komponenten im Maschinenbau ausschließlich unter vorgegebenen Bedingungen betrieben werden können, bzw. diese sich während des



Abbildung 9: Biologische Texturen und deren Eigenschaften [56]

Betriebs ändern, stellt sich die Herausforderung diese Oberflächen auch in Beanspruchungsbereichen abweichend vom Ideal zu optimieren. Viele Bauteile durchlaufen in ihrem Lebenszyklus mehrere Reibungsregime. Eine multiskalige Texturierung von Oberflächen stellt eine vielversprechende Möglichkeit dar, betriebszustandsübergreifend in das Reib- und Verschleißverhalten von technischen Oberflächen einzugreifen und es zu verbessern. Die durch Texturierung erzielte Reib- bzw. Verschleißminderung kann auch zur Schaffung von Notlaufeigenschaften dienen, um beim Ausfall von Schmierung Komponenten vor größeren Schäden zu schützen [44, 58]. Eine Studie von Hsu et al. [58] zeigt, dass die Kombination unterschiedlicher Texturmuster zur Verringerung der Reibung in mehreren Lastbereichen führt. Abbildung 10 zeigt die getesteten Texturformen. Dabei zeigte sich, dass die Reibkoeffizienten der einzelnen Texturvarianten bei Vergrößerung der Normalkraft weiter voneinander abwichen. Durch Kombination der Texturen baseline2 und base*line3* zur multiskaligen Textur *overlap2*, konnte über den getesteten Lastals auch Geschwindigkeitsbereich der geringste Reibkoeffizient verglichen mit den Texturen aus nur einer Geometrieform gemessen werden.



Abbildung 10: Erzeugung einer multiskaligen Textur durch Kombination einzelner Texturformen[58]

Die Herstellung multiskalig texturierter Oberflächen bietet somit die Möglichkeit die Reib- und Verschleißeigenschaften von Oberflächen auch in Anwendungsgebieten wechselnder Last- und Betriebszustände zu verbessern. Gerade bei texturierten Oberfläche ist die Auswirkung von Verschleiß auf die Größe der Kontaktfläche der Reibpartner von großem Interesse. Die Abbott-Firestone Kurve (Abbildung 35) stellt die prozentuelle, in Kontakt stehende Länge der Höhe des Oberflächenprofils gegenüber. Damit kann Auskunft über die Veränderung der Kontaktfläche bei verschleißbedingter Reduzierung der Profilhöhe gewonnen werden. Außerdem lassen sich aus der Kurve verschiedene Oberflächenkennwerte ableiten; z.B. die Bestimmung des Kernbereichs R_k durch die Wendetangente der Kurve, welcher Auskunft über die Trägfähigkeit einer Oberfläche gibt[59, 60]



Abbildung 11: Abbott-Firestone Kurve (verändert nach [61])

4 Methoden

4.1 Konzeption des Prüfkörpers

4.1.1 Vorraussetzungen

Grundvorraussetzungen für die Konzeption des Prüfkörpers war es, einen leichten, effizienten und vor allem präzise wiederholbaren Produktionsprozess zu schaffen, sodass die Qualität der zu untersuchenden Texturen sichergestellt werden konnte. Dies, sowie die Vorraussetzung additiv gefertigte Polymerproben zu untersuchen, waren der Grund weshalb auf das Digital Light Projection Verfahren zurückgegriffen wurde. Durch die Umsetzung der Lichtprojektion durch verstellbare Spiegel und der damit verbundenen gleichtzeitigen Polymerisation einer gesamten Bauteilschicht is die Geschwindigkeit des Prozesses nicht nur sehr hoch, sondern die quadratische Form der Pixel ermöglicht auch ein sehr hohes Auflösungsvermögen bei rechtwinkeliger Auslegung der Bauteilgeometrie. Aus diesem Grund wurde von bogenformigen Texturvarianten und Probengeometrien abgesehen. Die Approximierung einer solchen Geometrie auf Pixelbasis würde die Präzision des Drucks gefährden. Um das Handling der Proben sowie die Positionierung und Verspannung auf den Prüfmaschinen zu erleichtern, wurde als Fundament der Texturprobe die quadratische Grundform von 15x15x2mm gewählt. Ziel war es reproduzierbar Proben gleichbleibender Qualität herzustellen. Dabei sollte die Probengeometrie konstant möglichst vergleichbar zu der am Computer konstruierten Texturdimension sein. Von größeren Proben wurde aufgrund von Zeitersparnis im Herstellungsprozess abgesehen, da die Bauplattform bei gewählter Probengröße die simultane Herstellung zweier Prüfkörper ermöglichte. Außerdem war die gewählte Größe ausreichend für die nachfolgende Charaktersierung. Die Maße der untexturierten Referenzprobe sind in Abbildung 12

zu sehen. Das 3D Modell der herzustellenden und untersuchenden Proben wurde mit der CAD-Software *Solidworks* erstellt und wurde für die Weiterverarbeitung im Dateiformat *.stl* bereitgestellt.



Abbildung 12: Geometrie Grundkörper/Referenzkörper (mm)

Die Herstellung der Proben findet auf einem von der Technischen Universität Wien gebauten Gerät statt, welches auf dem Funktionsprinzip des "Digital Light Projection" Verfahrens beruht. Licht im ultravioletten Spektrum wird durch eine Objektiv auf eine Ebene in der Wanne projiziert und dabei selektiv von DMD-Chip der Anlage geblockt, um das darin befindliche flüssige Photopolymer zu vernetzen. Für die Versuchsreihe wird ein flüssiges Photopolymer auf Methacrylat-Acrylat-Basis der Marke Envision TEC mit dem Handelsnamen R11 [62] verwendet. Methacrylate zeichnen sich durch ihre reaktionsfreudigen Doppelbindungen aus und wurden deshalb für die Herstellung von Polymeren häufig eingesetzt. R11 wird gewählt, da es verwendungsbereit bezogen werden kann und somit von einer eigenen Herstellung des Photopolymers abgesehen werden kann. Ebenfalls die Materialwahl beeinflussend ist, dass mit diesem Material bereits erfolgreich Fertigungen an der vorhandenen DLP-Anlage durchgeführt wurden. Bei den von Philipp Taschner^[63] hergestellten Proben auf selbiger Anlage, wurde eine Restklebrigkeit der Oberfläche sowie eine Verminderung der zu erwarteten Texturhöhe von über 40% festgestellt.

Die Klebrigkeit der Oberfläche zu vermeiden, sowie die Höhendifferenz der Textur verglichen mit der geplanten Strukturgeometrie zu minimieren, wird als Kriterium des Erfolgs zur Verbesserung des Herstellungsprozesses definiert.

4.1.2 Probengeometrie: einskalig texturiert

Die Festlegung des Texturmusters der vollständig texturierten Oberfläche beruht auf früheren Untersuchungen der Forschungsarbeit "Erzeugung von Mikrorillenstrukturen mittels Additive Manufacturing" von Philipp Taschner[63]. Die Herstellung der gleichen Texturauflösung soll eine Vergleichbarkeit zu diesen Ergebnissen schaffen und die Möglichkeiten der Auswertung erweitern. Basierend auf dem Grundkörper aus Abbildung 12, wird die Textur in einer weiteren Druckschicht additiv aufgetragen. Die Tiefe der Textur wurde exakt so gewählt, dass sie der Schichtstärke einer Druckschicht entspricht. Des weiteren erzielten Versuche von Peddakondigalla et al. [48] bei der Texturierung von Kolben und Zylinderinnenwänden beste reibungsreduzierende Eigenschaften bei einer Texturhöhe von 25μ m. Die Textur besteht aus Stegen mit einer Breite von 25μ m und einer Periodizität von 50μ m.



Abbildung 13: Auflösung der vollständig texturierten Oberfläche (mm)

4.1.3 Probengeometrie: multiskalig texturiert

Obgleich sich das Gesetz von Amonton-Coulomb in vielen Anwendungsfällen als richtig gezeigt hat, existiert kein physikalisches Prinzip, welches vorraussetzt dass die Reibkraft linear proportional zur vorherrschenden Normalkraft und unabhängig von der Kontaktfläche der beiden Reibpartner ist. Durch Fortschritte in der Messtechnik konnte gezeigt werden, dass bei fein texturierten Oberflächen besagte Gesetzmäßigkeit verletzt wird und eine Abhängigkeit von der Kontaktfläche besteht. [64] Weshalb das Gesetz von Amonton-Coulomb trotzdem in vielen Fällen bei Normallasten von mehreren Meganewton bis hin zu Nanonewton und verschiedensten Materialien stimmt, begründen Greenwood und Williamson [65] darüber, dass die reale Kontaktfläche der sich berührenden Rauheitsspitzen zweier Kontaktpartner linear proportional zur herrschenden Normalkraft ist. [66] In Arbeiten wie jener von Gachot et al. [46] über den Einfluss von Oberflächentexturierung auf das Reibverhalten zeigt sich eine klare Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten sowohl von der tatsächlichen Kontaktfläche als auch von der Orientierung der beiden Kontaktpartner zueinander.

Um die Auswirkungen einer weiteren Texturskala auf das Reib- und Verschleißverhalten eines texturierten Polymerkörpers unter Trockenreibung zu erforschen, wird ein zweite Texturvariante entworfen. Die Auflösung der zweiten Texturvariante orientiert sich an der Arbeit von Costagliola et al. [64] In numerischen Berechnungen des statischen und dynamischen Reibungskoeffizienten von Linientexturen unterschiedlicher Periodiziäten zeigt sich, dass sich durch die Texturierung eine Reduktion des statischen Reibkoeffzienten gegenüber einer untextuierten Oberfläche erreichen lässt. Durch die Einführung einer zweiten und dritten hierarchischen Ebene der Textur lies sich erkennen, dass mit zunehmenden Größenunterschieden und Periodizitäten der Subtexturen der jeweiligen Hierarchiestufe der statische Reibkoeffizient wieder zunahm. Dies lässt schließen, dass durch die Wahl der Hierarchiestufen und Periodizitäten der jeweiligen Stufe sich der statische als auch dynamische Reibkoeffizient annähernd getrennt beeinflussen lassen.[64]





4.1.4 Qualitätssicherung

Für die Qualitätssicherung der Proben und Untersuchung der addivitiv gefertigten Topografie wurde ein optisches Profilometer der Firma Nanovea verwendet. Die damit gemessenen Profildaten wurden mit der Software *Professional 3D* ausgewertet und für die Illustrierung und Vermessung geplotet. Jede Probe der finalen Druckserie wurde nach dem Druck, der Reinigung und Nachhärtung auf einem Bereich von mindestens $200 \times 100 \mu$ m vermessen. Vorraussetzung für das erfolgreiche Bestehen der Qualitätsprüfung war, dass die Texturtäler keine erkennbaren Ablagerungen und Unebenheiten aufweisen, was auf einen Verbleib unvernetzten Materials hindeuten würde. Weiters wurde festgelegt, dass die mittlere Differenz zwischen Textursteg und Texturtal größer als 20μ m sein muss. Dies entspricht einem maximalen Verlust der Texturhöhe von 20%.

Das Funktionsprinzip der Topographievermessung wird in Abschnitt 4.3.2 genauer erläutert. Die Analyse der Topographie der finalen Druckserie ist in Abschnitt 5.1 zu finden.

4.2 Fertigung des Prüfkörpers

4.2.1 Ermittlung der optimalen Druckparameter

Da die DLP-Anlage von mehreren Personen der Technischen Universität Wien für Forschungszwecke verwendet wird, wurde, um Kontamination zu vermeiden, eine neue Wanne gegossen. Die Wanne besteht aus einer 2mm starken Glasplatte, welche mit einer Silikonschicht versehen ist. Dadurch soll ein Haften der polymerisierten Schicht am Boden der Wanne vermieden werden. Dieser Verbund aus Glas und Silikon bildet die Basis der Wanne und wird von einem Kunststoffrahmen niedergespannt. Vor jedem Druck wurde die Silikonplatte, der Spannrahmen, die Rakel und die Bauplattform mit Isopropanol sorgfältig gereinigt.

Um das Parameterset, welches vom Nutzer über die Softwareschnittstelle der Druckereinheit übergeben wird, bestmöglich zu wählen, wurden in ersten Testdrucken der Einfluss der gewählten Parameter auf das Druckverhalten getestet. Dabei musste auf Probleme wie Undichtigkeiten der Wanne, ein frühzeitiges Ablösen des Bauteils von der Bauplattform und Überpolymerisation eingegangen werden. Durch Adaptierung des Kippwinkels und der Abkippgeschwindigkeit der Wanne konnte die Haftung des Bauteils über den gesamten Druckprozess gewährleistet werden, und stellte den ersten Schritt der Prozessoptimierung dar. Das Austreten des flüssigen Polymerharzes an den Rändern der Spannvorrichtung konnte auf die geringere Vorspannkraft der Exzenterhebel durch die dünnere Glasplatte, verglichen mit der Glasplatte der zweiten Person die das Gerät zur gleichen Zeit verwendete, zurückgeführt werden. Die Vorspannkraft konnte durch die Verwendung von Unterlegscheiben ausreichend erhöht werden, um ein Austreten des flüssigen Photopolymers zu verhindern. Im nächsten Prozessschritt wurde das Polymerisationsverhalten analysiert. Dazu wurde ein Siemensstern gedruckt, welcher üblicherweise als Testmuster für die Qualitätsüberprüfung optisch abbildender Systeme Verwendung findet. Die sich verjüngenden Stege des Siemenssterns, in Abbildung 15 gezeigt, geben Aufschluss über das maximale Auflösungsvermögen, sowie das Polymerisationsverhalten der Anlage. Bei optimaler Wahl der Parameter würden Stege bis zu einer Breite von 25μ m zur Mitte hin polymerisiert werden.



Abbildung 15: Modell eines Siemenssterns

Bei der Versuchsreihe wurde die Belichtungszeit pro Ebene mit 1 Sekunde festgesetzt, und die Intensität der Belichtungseinheit stetig reduziert. Ziel der Reduzierung der Intensität war es, die feinste Auflösung des Siemenssterns zu finden, bei der sich Stege bis hin zum Mittelpunkt ausbilden. Ist die Intensität zu hoch gewählt, kommt es zu einer Überpolymerisation unter welcher das Auflöunsgvermögen leidet. Abbildung 16 zeigt das Beispiel einer Unterund Überpolymerisation am Siemenssterns. Das sichtbare Rastermuster auf der Oberfläche des Drucks entspricht der Größe der Pixel von $25 \times 25 \mu m^2$.



(a) zu geringe Intensität

(b) zu hohe Intensität

Abbildung 16: Unter- und Überpolymerisation in der Mitte des Siemensstern

Die durch die Versuchsreihen gewonnenen Erkenntnisse über das Vernetzungsverhalten des Materials führten zur Festlegung der in Tabelle 2 angeführten Druckparameter für die Herstellung der Prüfkörper. Der Intensitätswert 1600 ist ein Maschinenparameter, welcher sich nach Interpolation einer durch Messreihen erstellten Umrechnungstabelle zu $42,57mW/cm^2$ errechnet.

Belichtungszeit	1s
Intensität	1600
Schichtdicke	$25\mu m$

Tabelle 2: Druckparameter der DLP Anlage

4.2.2 Verfahrensablauf Druck und Nachbearbeitung

Zum Start jeder Druckserie wurden alle involvierten Komponenten mit Isopropanol und Papiertüchern sorgfältig gereinigt. Nach dem Befüllen der Wanne mit dem flüssigen Polymer wurde die Höhe des Rakelblatts mittels Mikrometerschraube auf 180μ m eingestellt, da dies sich bei den Testdrucken mit Siemensstern bewährte. Bei dünnerer Rakelhöhe war der Anpressdruck zu hoch, sodass das Polymer von der Bauplattform verdrängt wurde, und es zu keiner Ausprägung der ersten Druckschicht kam.

Pro Druckvorgang wurden zwei Proben in der Software des Druckers mittig positioniert. Diese wurde mit der *.stl* Datei aus Solidworks gespeist und dient zum Erstellen des Druckauftrags, auch "Job" genannt. Es wurden lediglich zwei Proben pro Druckvorgang auf der Bauplattform positioniert, da die Fokuseinstellung der Projektionsebene sich mittels der 3 vorhandenen Mikrometerschrauben nicht über das gesamte Baufeld gleichmäßig gut einstellen ließ. Somit wurde nur der schärfste Bereich mittig der Baufläche für die Herstellung der Proben verwendet. Der mit der Software erstellte Job wurde in die Schnittstellensoftware von PC zu DLP-Anlage eingelesen und an die Druckersteuerung übermittelt.

Auf das Polymerisationverhalten und die Auswirkung auf die Texturgenauigkeit bei schlechter Position der Fokusebene wird in Abschnitt 5.1.2 genauer eingegangen.

Nach dem Start des Druckvorgangs wurde der Probenkörper Schicht für Schicht hergestellt. Dabei setzten sich die ersten 2mm der Bauhöhe aus 80 Schichten zusammen, die den Grundkörper bildeten. In der 81. Schicht wurde die gewählte Textur mit einer Bauhöhe von 25μ m polymerisiert. Nach Fertigstellung jedes Druckprozesses wurde die Bauplattform aus dem Gerät ausgebaut. Auf dieser hafteten die zwei hergestellten Probenkörper. Diese wurden mit Isopropanol benetzt, um einfacher gelöst werden zu können. Das Lösen mittels Rasierklinge, welche seitlich unter die Probe geschoben wurde, erwies sich als effektiv.

Anschließend wurden die Proben wie in Abschnitt 5.1.1 beschrieben, für zwei Minuten in einem mit Isopropanol gefüllten Becherglas gereinigt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Proben nur mit einer gereinigten Pinzette bewegt wurden, kein Kontakt und Druck auf die Textur ausgeübt wurde, und die Proben nicht durch Textilfasern verunreinigt wurden. Um das Verflüchtigen des Isopropanols zu beschleunigen, wurden die Proben anschließend mit Druckluft behandelt.

Die gereinigten Probe wurden anschließend auf einen gläsernen Objektträger gelegt und von jeder Seite 40 Sekunden bei 60% Intensität der UV-Kammer nachgehärtet. Dabei wurde präventiv immer die texturierte Seite zuerst gehärtet, sodass es beim Aufliegen der noch nicht nachgehärteten Textur auf dem Becherglas zu keinen Schädigungen kommen kann. Die Auswirkung des Nachhärtens unter UV-Licht auf die Härte des Werkstücks sowie die chemische Zusammensetzung wird in Abschnitt 5.2 und 5.3 untersucht.

4.2.3 Probenhandling und Aufbewahrung

Um Verunreinigung der Proben durch Fett, Mikroplastik oder Staub zu vermeiden wurden die Proben ausschließlich mit Einweghandschuhen aus Nitril und Pinzetten berührt und bewegt. Das Ablösen erfolgte mit einer gereinigten Rasierklinge. Die Proben wurden somit im Herstellungszyklus möglichst geringer Kontaminationsgefahr ausgesetzt. Die Verpackung in Aluminiumfolie anstatt eines Kunststoffbeutels wurde gewählt, um die Gefahr von Ablagerung von Mikroplastik auf der Oberfläche zu vermeiden, welche Einfluss auf die anschließenden Versuche haben könnte. Von der Nachhärtung in der UV-Kammer bis zur Untersuchung an den Prüfmaschinen wurden die Proben vor UV-Licht und Feuchtigkeit geschützt. Von einer direkten Beschriftung der Proben wurde ebenfalls abgesehen. Lediglich die Außenseite der Aluminiumfolie wurde mit einem Permanentmarker mit einer Laufnummer und Buchstabenkennzeichnung der Texturart versehen.

4.3 Analyse des Prüfkörpers

4.3.1 Digitalmikroskopie

Basierend auf der Weiterentwicklung der Lupe dient das Mikroskop dazu, kleine Details eines Objekts betrachten zu können. Durch eine zusätzliche Abbildungsstufe wird die Austrittspupille weit genug vom Objekt entfernt, sodass sie für das menschlichen Auge zugänglich ist. Durch Prismen-Anordnungen und Zwischenabbildungen wird die Bildorientierung des umgekehrt seitenverkehrten Abbilds des Objekts wieder korrigiert.[67]

Das Digitalmikroskop verzichtet im Vergleich zum konventionellen Mikroskop auf ein Okular. Die Betrachtung erfolgt über einen eingebauten digitalen Bildsensor auf einem Monitor. Das menschliche Auge ist gerade im Bereich der farblichen Wahrnehmung dem digitalen Empfänger vorraus. Da die an der Erfassung des analogen Bildsignals beteiligten Fotodioden des CMOS-Sensor keine Farbinformationen erfassen können, werden diese über einen im Mikroskop verbauten Farbfilter reproduziert.

Ein großer Vorteil des Digitalmikroskops und der damit verbundenen Softwareapplikation ist die Möglichkeit der geringer werdenen Tiefenschärfe bei zunehmender Vergrößerung entgegegenzuwirken. Durch geringfügige Verschiebung des Objektivfokus und der Aufnahme einzelner Bilder verschiedener Fokusebenen kann anschließend durch Extraktion der scharfen Pixel ein zusammengefügtes Bild am Monitor betrachtet werden, welches über das gesamte Sichtfeld scharf dargestellt ist. Im Vergleich zum konventionellen Mikroskop bietet die Digitalmikroskopie dem Betrachter eine Vielzahl neuartiger Betrachtungsvarianten sowie digitaler, softwaregestützter Analysemöglichkeiten. Abbildung 17 zeigt die Extraktion einer Profillinie aus dem durch Fokus-Variation am Laserkonfokalmikroskop erstellten 3-dimensionalen Bilds[68].



Abbildung 17: Extrahierte Profillinie aus einem mittels Laserkonfokalmikroskopie erstellten Bilds

Zur raschen optischen Beurteilung der Druckqualität wurde ein Digitalmikroskop des Herstellers Keyence (Modellreihe VHX-6000) verwendet. Gerade bei der Ermittlung der optimalen Druckparameter mittels Siemensstern konnte mit dem Digitalmikroskop schnell ein Eindruck der Auswirkung der Intensitätswahl auf das Vernetzungsverhalten des Polymers in der Mitte des Sterns gewonnen werden. Basierend auf dieses Beobachtungen wurde die Intensität variiert, um die bestmögliche Auflösung der Druckserie zu erreichen.

4.3.2 Optische Profilometrie

Optische Profilometrie beschreibt eine Vielzahl an Methoden des schnellen, zerstörungsfreien und kontaktlosen Beurteilens und Vermessens von Oberflächentopographien. Das für die Arbeit verwendete Profilometer beruht auf dem Prinzip der kontaktlosen Messung mittels chromatischer Abarration. Erste Entwürfe dieses Messprinzips entstanden 1984 von Molesini et al. Über die Jahre führte der technische Fortschritt zur Einführung der Norm ISO EN 25178-602: Merkmale von berührungslos messenden Geräten (mit chromatisch konfokaler Sonde)[69].

Das Prinzip beruht darauf, dass Weißlicht (LED) durch eine Reihe von Linsen mit hohem Brechungsindex zu leiten. Diese Linsenanordnung wird als "Optical Pen" bezeichnet. Die resultierende chromatische Aberration führt zu unterschiedlichen Brennweiten der Wellenlängen im Spektrum. Der Messbereich ergibt sich aus dem Abstand der Brennweite der kürzesten und längsten Wellenlänge wie in Abbildung 18 dargestellt. Ist die zu vermessende Oberfläche innerhalb dieses Messbereich ist eine spezielle Wellenlänge im Fokus, während alle anderen außerhalb sind. [70]

Das zurückgeworfene Weißlicht trifft durch eine Lochblende auf ein CCD Spektrometer. Dabei sollen die meisten Wellenlänge, welche fernab der fokussierten Wellenlänge liegen herausgefiltert werden. Das Spektrometer identifiziert die fokussierte Wellenlänge, über das Intensitätsmaximum in der Spektrometerkurve. Durch Kalibrierung des Sensors kann die zum Intensitätsmaximum gehörende Wellenlänge in einen Abstand von einer vorher definierten Bezugsebene umgewandelt werden. Durch Bewegung des zu vermessenden Objekts in X- und Y-Richtung kann über Zusammenfügen in der Computersoftware ein flächenhaftes topografisches Bild erzeugt werden. [71]



Abbildung 18: Illustrierung der Brennweiten des Spektrums (https://nanovea.com/chromatic-confocal/)

Die dabei erzielbare Messtiefe ist abhängig von der spektralen Bandbreite und der chromatischen Dispersion in axiale Richtung[72]. Nach ISO EN 25178-602 lässt sich somit das Messprinzip in zwei charakterisierende Prozessschritte unterteilen:[71]

- Durchführung einer spektralen Kodierung des Messraumes. Diese erfolgt durch Streckung der axialen chromatischen Dispersion des Beleuchtungsstrahls in kontrollierter Weise
- Durchführung einer spektralen Dekodierung des reflektierten Lichtstrahls. Diese kann zum Beispiel durch die Benutzung eines Spektrometers erfolgen.

Zur Beurteilung der Druckqualität wurde ein optisches Profilometer des Herstellers *NANOVEA* mit der Modellbezeichnung *PS50 3D* eingesetzt. Die Messdaten wurden zur Analyse mit der Software *Professional 3D* weiterverarbeitet.



Abbildung 19: Optisches Profilometer Nanovea PS50 3D

Für die Betrachtung und Vermessung der Verschleißspuren nach den Reibungsversuchen wurde ein konfokales 3D Laser-Scanning Mikroskop des Herstellers *KEYENCE* mit der Modellbezeichnung *VK-X1000* eingesetzt. Bei Laser-Scanning Mikroskopen wird das Präperat vom Laser des Mikroskops abgerastert und das Bild wird am Computer zusammengesetzt. Dabei trifft ein fokussierter Laserstrahl im Brennpunkt auf das Präperat. Das vom Präperat zurückgeworfene Licht wird als Fluoreszenzlicht bezeichnet. Es trifft über einen halbdurchlässigen Spiegel und durch eine Lochblende auf den Detektor, wenn sich die Probe gerade im Fokus befindet. Dabei erfolgt die Abrasterung der Probe meist über das bewegliche Spiegelsystem. Vor der Betrachtung des Bildes muss dieses dann aus den einzelnen Rasteraufnahmen von der Computersoftware zusammengesetzt werden[73].

4.3.3 Infrarotspektroskopie

Die Infrarot Spektroskopie stellt ein schnelles, nicht-destruktives Analyseverfahren chemischer als auch physikalischer Informationen einer Matrix dar. Die Einsatzgebiete dieser Technologie sind weit verbreitet und reichen von Qualitätskontrollen, über Rohmaterialtests bis hin zu Prozessbeobachtungen in der pharmazeutischen Industrie. [74]



Abbildung 20: Aufspaltung des infraroten Spektralbereichs^[75]

Als Spektroskopie wird die Summe der Methoden bezeichnet, die Strahlung zur Informationsgewinnung in Anteile unterschiedlicher Energie unterteilt und misst. Spezielle Detektorsysteme erlauben dabei Messung in Bereichen außerhalb des sichtbaren Lichtspektrums. Abbildung 20 zeigt den Wellenlängenbereich des infraroten Spektrums.

Gerade im Infrarotbereich ist die Photonenenergie so gering, dass durch das Planck'sche Rauschen eine rasche Analyse nur durch eine Weiterentwicklung in der Analysetechnik gegeben ist; durch die Fourier-Transform-Interferometrie[76]. Physikalisch beruht dieses Analyseverfahren auf dem Phänomen, dass Objekte elektromagnetische Strahlen emittierten und reflektieren. Die gemessere Strahlung gibt Aufschluss über die chemische Zusammensetzung des Objekts. Heutzutage existierten eine Vielzahl verschiedener Spektrometer; in der Basis beruhen sie jedoch auf einer Lichtquelle, einem Spektralapparat, einem Detektor und einem Auslese- und Analysegerät. Bei der Fourier-Transform-Interferometrie wird der Spektralapparat durch ein Interferometer ersetzt. Der Aufbau ist in Abbildung 21 dargestellt.



Abbildung 21: Schematische Darstellung eines Michelson Interferometers

Dabei trifft das Licht auf einen halbdurchlässigen Spiegel und wird in zwei rechtwinkelige Strahlenarme aufgeteilt. Ein Strahlenarm trifft auf einen stationären Spiegel, der andere auf einen beweglichen. Die beiden Teilstrahlen werden über die Spiegel refelektiert und treffen durch den halbdruchlässigen Spiegel wieder aufeinander. Anschließend treffen die Strahlen auf die vor dem Detektor positionierte Probe, wo sie mit dieser wechselwirken. In der Probe kommt es zu Absorption von Energie durch atomare Bindungen. Die durch die Probe hindurchtretenden Strahlen (Transmission) treffen auf den Detektor und ergeben ein Interferenzsignal abhängig vom Spiegelweg. Die Strahlen interferieren konstruktiv oder destruktiv in Abhängigkeit von zurückgelegtem Weg und Wellenlänge. Durch die Fourier-Transformation wird das Interferenzsignal in Abhängigkeit des Spiegelwegs in Intensität über die Wellenlänge oder Wellenzahl übergeführt[67, 76]. Durch das gemessene Intensitätsspektrum lässt sich Information über chemische Zusammensetzung der Probe gewinnen. Im Idealfall lässt sich somit über die IR-Spektroskopie die Identität einer Substanz bestimmen. Für diese Arbeit wurden die Untersuchungen an einem *Tensor 27* Spektrometer der Firma *Bruker Optik GmbH* in einem Wellenzahlbereich von 400cm⁻¹- 4000cm⁻¹ durchgeführt. Dabei wurde das Gerät im abgeschwächten Totalreflexionsmodus (ATR) betrieben. Im Vergleich zum Transmissionsmodus bei dem die Probe von der Infrarotstrahlung durchdrungen wird, wird die interne Reflexion der Probe gemessen.



Abbildung 22: Schematische Aufbau eines ATR-IR Spektrometers[77]

Dabei wird ein ATR-Kristall mit hohem Brechungsindex auf die Probe gepresst. Die Lichtenergie tritt durch den Kristall auf die Probenoberfläche und wird in den Kristall reflektiert. Vorteilhaft hierbei ist, dass die Dicke der Probe keinen Einfluss auf das aufgenomme Infrarotspektrum hat. In dem Bereichen des Infrarotspektrums in welchem Energie von der Probe absorbiert wird, wird die Welle gedämpft. Diese gedämpfte Welle wird evaneszente Welle genannt. Die Reflexion tritt zurück durch den Kristall auf den Detektor. Anschließend kann das gemessene Intensitätssignal in die Intensität über die Wellenzahl übergeführt werden. Das erhaltene Spektrum gibt Auskunft über das Absorbtionsverhalten des Probenmaterials. Mit Hilfe verschiedener Datenbanken können den Ausschlägen im aufgenommenen Spektrum, auch Banden genannt, Molekülbindungen zugewiesen werden[78].

4.3.4 Härtemessung

Härtemessungen stellen eine einfache und schnelle Methode der Testung von Festkörpern dar. Es existiert eine Vielzahl an Testverfahren welche sich durch Geometrie, Dimension des Indenters und Prüflast unterscheiden[79].



Abbildung 23: Aufbau eines Shore Härtemessgerät (https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/SHORE-H%C3%A4rte)

Die Shore Härtemessung ist das gängiste Verfahren zur Messung der Härte von Kunststoffen. Die zerstörungsfreie und portable Natur der Messmethode ermöglicht eine Eigenschaftbestimmung direkt an elastomerischen Produkten und Komponenten. Das Durometer misst die Gegenkraft auf den Indenter über eine kalibrierte Feder nach einer festgelegten Zeit. Dabei definiert die Norm ASTM D 2240 sieben Typen von Durometern, wobei nur Typ A und Typ D Anwendung bei der Charakterisierung von Kunststoffen Anwendung finden. Die dabei gängisten Durometer sind die Shore A Härtemessung für weiche Materialien (z.B. Gummi) und Shore D für härtere Polymere wie z.B. Duromere und Thermoplaste. Der am Durometer abgelesene H-Werte der Härtemessung ist eine Funktion der Positionsänderung des Indenters, welche unter in der Norm definierten Bedingungen (Dauer und Kraft) in die Probe gedrückt wird[80].



Abbildung 24: Indenter Shore Typ-D [81]

Der schematische Aufbau eines Durometers ist in Abbildung 23 zu sehen. Die zu untersuchenden Proben wurden mit einem Shore Härtemessgerät Typ-D der Firma Hildebrand mit Indenterform nach Abbildung 24 untersucht. Die dabei verwendete Anpressgewicht lag bei 4kg. Die Härtewerte wurden wie von der Norm vorgeschrieben, nach 15 Sekunden ausgelesen[81].

4.3.5 Tribometrie

Da bei der Untersuchung der additiv gefertigten Texturen die Richtungsabhängigkeit des Reibungsverhaltens von großem Interesse ist, wurde von der Verwendung eines rotierenden Testverfahrens abgesehen und ein linearreziproker Tribometer-Aufbau verwendet. Dabei ist der Gegenkörper stationär ausgeführt und der Prüfkörper wird unter vordefinierten Testparametern (Normalkraft, Distanz, Frequenz und Dauer) bewegt. Je nach Modell des Prüfgeräts kann auch der Prüfkörper stationär ausgeführt sein[82].



Abbildung 25: Schema eines reziproken Tribometeraufbaus [83]

Uber faseroptische Sensoren wird die durch die Reibkraft induzierte elastische Auslenkung des Auslegers (engl. Cantilever) ermittelt, wodurch auf die Reibkraft rückgeschlossen werden kann. Durch Quotientenbildung zur bekannten aufgebrachten Normalkraft lässt sich der Reibungskoeffizient errechnen. [83] Die Auswertung des Verschleißes auf dem Testkörper kann anschließend über den Massenverlust der Probe oder die Reduktion des Volumens bestimmt werden.

Bei der für die Untersuchung des richtungsabhängigen Reibungsverhalten der texturierten Proben wurde ein Kugel-Scheibe-Tribometer der Firma *Anton Paar GmbH* im linear-reziproken Modus verwendet. Hierbei wurde von der Verwendung von Schmiermittel abgesehen, um den trockenen Reibungszustand zu simulieren. Die Versuche fanden bei Raumtemperatur (23°C) und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 4% statt. Die Anzahl der Zyklen wurde auf 1000 gesetzt, um das Einlaufverhalten und die Langzeitbeständigkeit der Textur zu untersuchen. Die Normalkraft wurde mit 100mN festgelegt, die maximale Verfahrgeschwindigkeit 1mm/s und der Verfahrweg mit 0,6mm festgesetzt. Die Orientierung der Probe auf der Maschine erfolgte anhand der Orientierung der Texturen. So wurden Messungen entlang als auch normal zur Oberflächentextur durchgeführt. Das Material des kugelförmigen Gegenkörpers war Al₂O₃ mit einem Kugeldurchmesser von 6mm. Die Lösung der Hertz'schen Gleichung für den Kontakt einer Kugel mit einem elastischen Halbraum[84] ergibt einen Kontaktradius von $50,8\mu$ m und ein maximalen Kontaktdruck von 18,58MPa für die Materialpaarung (Aluminiumoxid - PMMA).



Abbildung 26: Ausrichtung der Textur zur Verfahrensrichtung des Tribometers



5 Ergebnisse und Interpretation

5.1 Topographiemessung mittels Profilometer

5.1.1 Untersuchung des Reinigungsprozesses

Bei badbasierten Fertigungsverfahren kommt es durch das Eintauchen des Bauteils in das photosensitive Harz zur Ablagerung von unpolymerisiertem Material auf der Oberfläche des Werkstücks. Um die von Philipp Taschner [63] beschriebene Klebrigkeit der Oberfläche zu vermeiden, wurde eine Versuchsreihe durchgeführt, bei der die Auswirkung verschiedener Reinigungtechniken verglichen wurde.

Isoproanol wurde aus folgenden Gründen als Reinigungs- und Lösungsmittel gewählt:

Einerseits wurde es bereits erfolgreich für die Reinigung von 3D gedruckten Polymerproben aus R11 von Akanji [85] eingesetzt. Andererseits war die Verfügbarkeit von Lösungsmitteln bedingt durch die SARS-CoV-2 Pandemie sehr beschränkt. Isopropanol war im Vergleich zu Ethanol in ausreichender Menge in den Laborräumen verfügbar und erwies sich bereits vorab bei der Reinigung der Arbeitsoberfläche als besseres Lösungsmittel beim Entfernen von R11 als Ethanol. Somit wurde von einem Vergleich verschiedener Lösungsmittel abgesehen.

Um die Reinigung mit Isopropanol zu optimieren, wurden texturierte Proben mit verschiedenen Verweildauern in Isopropanol eingelegt, siehe Tabelle 3. Wie in Abbildung 27 zu sehen, kommt es bei Variante 1 zu Ablagerung von unvernetztem Material in den Tälern. Dies führt zu einer Reduzierung der Texturhöhe um 7μ m. Variante 2 schreibt eine Verweildauer von zwei Minuten in Isopropanol vor. Die Vermessung der Topographie nach dieser Reinigungvarinte zeigt keine Ablagerungen unpolymerisierten Materials in den Texturtälern. Die hergestellte Textur weist eine Höhe von 22μ m auf und die Texturtäler zeigen sich klar ausgeprägt. Bei der Erhöhung der Reinigungsdauer in Isopropanol von zwei auf zehn Minuten ist keine Veränderung in den Texturtälern verglichen mit den zwei Minuten gereinigten Proben zu erkennen. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde Variante 2.1 entwickelt. Dabei wurde die Probenoberfläche nach dem zwei-minütigen Bad in Isopropanol mit Druckluft abgeblasen. Mittels Profilometrie, konnte keine weitere Verbesserungen der Texturgenauigkeit im Vergleich zu Variante 2 festgestellt werden. Trotzdem wurde an der Probenreinigung mit Druckluft festgehalten, da dies das Verflüchtigen des Reinigungsalkohols wesentlich beschleunigt. Es ist festzuhalten, dass nach dem Reinigungsprozess laut Variante 2.1, keine Klebrigkeit der Probenoberfläche bei Kontakt mit dem Finger festgestellt werden konnte.

	Dauer	Zusatzbehandlung
Variante 1	1x Eintauchen	
Variante 2	2min	
Variante 3	10min	
Variante 2.1	2min	Druckluft

Tabelle 3: Verweildauer der Proben in Isopropanol


Abbildung 27: Die Profillinie beim Schnitt durch die Probentextur bei Reinigung nach Variante 1 zeigt deutliche Ablagerungen von Material in den Texturtälern.

Reinigung im Ultraschallbad

In einem weiteren Versuch wurde die Möglichkeit der Probenreinigung mittels Ultraschallbad untersucht. Dabei wurde die texturierte Probe nach dem Druck in mit Isopropanol gefülltes Becherglas gelegt und in den Netzbehälter des Ultraschallreinigungsgeräts gestellt. Darin wurde die Probe für 1 Minute bei 50% Intensität des Geräts gereinigt. Nach der Reinigung waren bereits mit dem Auge Beschädigungen an der Probentextur zu erkennen. Abbildung 28 zeigt den Schaden an der Linienstruktur. Dabei ist ein Ablösen der Texturstege von der vorherigen Druckschicht zu erkennen. Auf Basis dieser Beobachtungen wurde für die finale Druckserie von der Reinigung im Ultraschallbad abgesehen.



Abbildung 28: Durch Ultraschall verursachte Schädigung der Textur. Zu sehen ist ein Ablösen der Stege von der vorherigen Druckschicht.

5.1.2 Einfluss der Fokuseinstellung auf die Textur

Abbildung 29 zeigt die die 3D Ansicht, als auch die extrahierte Profillinie einer multiskalig texturierten Proben, welche in der Computerapplikation bewusst außerhalb des ideal scharfen Bereichs des Baufelds positioniert wurde. Durch die abweichende Fokusebene an dieser Stelle kommt es zu Überlagung der Lichtintensitäten der einzelnen Pixel, sodass Material an ungewollten Stellen polymerisiert. In diesem Fall kommt es zu Vernetzung im Bereich der Texturtäler an den Stellen der kleineren, dichter gepackten Texturskala. Dadurch wird die Texturhöhe an diesen Stellen reduziert und es entsteht eine zweite, ungewollte, vertikale Hierarchiestufe der Textur. Daraus lässt sich schließen, dass die Einstellung und Kontrolle der Fokusebene der Belichtungseinheit Grundvorrausetzung für die Herstellung von Texturen am Auflösungsmaximum der Fertigungsanlage ist.



Abbildung 29: Topographie bei Probenpositionierung am Rand der Bauplattform

5.1.3 Qualitätssicherung der Prüfkörper

Die Beurteilung der Probentopographie stellte das entscheidende Beurteilungskriterium im Herstellungsprozess der Prüfkörper dar. Die exakte Replikation der mittels CAD-Software entworfenen Textur wurde neben der Vermeidung von Klebrigkeit der Probenoberfläche als eines der Ziele dieser Arbeit definiert. Philipp Taschner [63] beschreibt in seiner Forschungsarbeit eine Klebrigkeit der Probenoberfläche additiv gefertigter Polymerproben nach dem Druck, welche bei nachfolgenden Messungen zu Reibkoeffizienten über eins und großer Streuung der gemessenen Werte führte. Dadurch war eine sinnvolle Auswertung des Einflusses von Oberflächentexturen auf das Reibverhalten nicht möglich. Aus diesem Grund wurde nach jedem Verändern des Parametersets auf der Produktionsanlage eine Untersuchung der Auswirkung auf die Texturgeometrie und zur frühzeitigen Erkennung von Ablagerungen unpolymerisierten Materials auf der Textur über Vermessung mittels Profilometer, entsprechend Abschnitt 4.3.2, durchgeführt. Zur Qualitätssicherung der finalen Druckserie wurden zusätzlich an jeder hergestellten Probe drei weitere Messungen durchgeführt. Dabei wurde die Probe händisch auf dem Profilometer (Modell Nanovea $PS50 \ 3D$) ausgerichtet. Die Position der Messtelle wurde in etwa mittig auf der Texturseite der Probe gewählt. Im nachfolgenden Abschnitt werden die Messergebnisse der finalen Druckserie der drei Texturvarianten analysiert.

Referenzgeometrie

Bei Betrachtung der Oberfläche der untexturierten bzw. glatten Probe, siehe Abbildung 30, ist ein regelmäßiges Muster zu erkennen. Die Oberfläche ähnelt einem "Pixelraster", welches auf die Bauweise des DMD-Chips zurückzuführen ist. Jede Erhebung, in Abbildung 30a und 30b in weißer Farbe dargestellt, spiegelt die Gauß'sche Intensitätsverteilung des Lichts eines Pixels wieder. Durch das Abfallen der Intensität von der Mitte hin zum Rand des Pixels entstehen gezeigte Profilhügel, da in Bereichen höherer Intensität mehr Material polymerisiert wird. Dies führt zu einer konstruktionsbedingten, ungewollten Texturierung der als "glatt" definierten Referenzprobe. Die Profillinie ähnelt eher Sinuswellen mit einer Periodizität von 24μ m und einer mittleren Amplitude von $0,77\mu$ m. Im Vergleich zur gewählten Texturhöhe von 25μ m der texturierten Probe, kann die Amplitude der untexturierten Probe als hinreichend glatt bezeichnet werden. Die Periodizität der Textur lässt sich auf die Größe der Mikrospiegel des DMD-Chips von $25x25\mu$ m zurückführen.



Abbildung 30: Veranschaulichung und Vermessung der Topographie der untexturierten Referenzprobe. (a) Top-Down Ansicht der Messfläche, (b) 3D Visualisierung der Oberfläche, (c) Profillinie bei Schnitt durch die Erhebungen der Textur

Einskalig texturierte Geometrie

Abbildung 31 zeigt die Topographie der einskalig texturierten Proben. Die Profillinie 31c ergibt sich bei vertikalem Schnitt durch in Abbildung 31a gezeigte Ansicht. Anhand der Profillinie lässt sich die Periodizität zu 50 μ m bestimmen, siehe Messmarker 4-5. Messstelle 0-1 misst eine Schichthöhe von 23,5 μ m. Da jede Probe der finalen Druckserie mittels Profilometer zur Qualitätssicherung vermessen wurde, lässt sich die gemittelte Höhe der Texturierung berechnen, und ergibt sich zu 22,93 μ m. Dies liegt den in der CAD-Software konstruierten 25 μ m sehr nahe. Die Abweichung von 8,23% liegt im tolerierbaren Bereich. Philipp Taschner [63] kam bei der Vermessung seiner ebenfalls mittels DLP-Verfahren hergestellten Probenserie lediglich auf eine Texturhöhe von 14 μ m. Daraus lässt sich schließen, dass die getroffenen Schritte zur Optimierung der Probenreinigung und des Druckprozesses sich als wirksam für die Herstellung von mikrotexturierten Oberflächen mit geringer Abweichung von vorgegebenen Texturdimensionen erwiesen.



Abbildung 31: Digitale Abbildung und Vermessung der Topographie der einskalig texturierten Probenoberfläche. (a) Top-Down Ansicht der Messfläche, (b) 3D-Visualisierung der Oberfläche, (c) Profillinie bei Schnitt durch die Textur

Multiskalig texturierte Geometrie

Wie in Abbildung 32b 3-dimensional dargestellt, charakterisiert das größere Texturtal nach 3 Texturlinien die multiskalige Geometrie. Bei Vermessung der extrahierten Profillinie misst die größere Periodizität 200 μ m. Die Höhe der Textur beträgt 24,12 μ m an der Messstelle und liegt damit, wie auch die Periodizität, sehr nahe an den vorgegebenen Maßen des CAD-Modells.



Abbildung 32: Digitale Abbildung und Vermessung der Topographie der multiskalig texturierten Probenoberfläche

Im Bereich der Täler zwischen den nahe beisammen liegenden Texturhügeln zeigen sich leichte Erhöhungen verglichen mit dem Niveau des weiten Tals. Im in etwa 75 μ m weiten Texturtal nach drei Erhebungen sind weitere "hügelige" Erhebungen zu erkennen. Diese Erhebungen sind auf die bereits erwähnte Rasterung der Baufläche durch die Pixel des DMD-Chips und einhergebende Inhomogenität der Intensität über die Pixelfläche zurückzuführen. Die Höhe dieser Erhebung erreicht jedoch eine maximale Amplitude von 1μ m und ist verglichen mit den Texturmaxima vernachlässigbar. Abbildung 33 zeigt die Auswertung an einer zweiten Stelle der multiskaligen Textur und dient der Verifizierung der Geometriemesswerte. Die Form der Texturerhebungen weicht nur geringfügig von jenen der ersten Messstelle ab.



Abbildung 33: Auswertung der Topographiemessung an einer weiteren Messstelle zur Verifizierung der gemessenen Werte

In den Profillinien der einskaligen als auch multiskaligen Textur zeigt sich ein ähnliches Verhalten bezüglich der Ausprägung der aufgebrachten Erhebungen. Wie in Abbildung 34 veranschaulicht, kommt es zu einer Abweichung der Texturhügel von der vorgegebenen rechteckigen Geometrie der CAD-Datei. Dies ist ebenfalls auf die Bauweise des DMD-Chips zurückzuführen. Die abnehmende Intensität zum Rand der Pixelfläche führt zu einer verlangsamten Polymerisationsreaktion in diesem Bereich. Die Ausbildung der schrägen Flanken kommt daher, dass die Kettenreaktion der Polymerisation nicht abrupt abbricht, sondern mit abfallender Energie abnimmt, bis sie zum Stillstand kommt. Die Breite der Texturhügel variiert deshalb zwischen ca. 24μ m im Bereich der Täler und circa 16μ m bei einer Höhe von 20μ m. Durch die Geometrie der Texturerhebung kommt es zu einer Veränderung des Materialtraganteils über die Höhe der Textur, was im Abbot-Firestone Diagramm (Abbildung 35) dargestellt ist. Die Geometrie der CAD-Datei weist einen konstanten Materialtraganteil von 50% über die Texturhöhe auf und erreicht erst bei vollständigem Abtrag der Textur 100%. Auf die Auswirkungen der Texturform auf das Reibungsverhalten bei fortschreitendem Materialabtrag wird in Kapitel 5.4 eingegangen.



Abbildung 34: Vergleich der Geometrie der Texturhügel mit jenen der CAD-Datei



Abbildung 35: Abbot-Firestone Diagramm der einskaligen Texturvariante

5.2 Chemische Analyse mittels Infrarotspektroskopie

Zur Uberprüfung der Vernetzung des Photopolymers auf der Probenoberfläche wurde eine FTIR-Spektroskopie an einem Spektrometer Tensor 27 der Firma Bruker Optik GmbH durchgeführt. Vermessen wurde die Oberfläche einer nachgehärteten einskalig texturierten Probe, sowie einer nicht-gehärteten einskalig texturierten Probe. Ziel der Untersuchung war es, festzustellen ob nach der Reinigung mit Isopropanol verbliebenes unvernetztes Material an der Oberfläche des Prüfkörpers verbleibt. Da die Probe bei jeder Messung nicht an der exakt selben Stelle der Textur auf dem ATR-Prisma des Spektrometers positioniert werden konnte, wurden auf jeder Probe zwei Messungen durchgeführt. Abbildung 36 zeigt die mit der Softwareapplikation Origin Pro erzeugten Messkurven. Dabei ist die gemessene Intensität über die Wellenzahl aufgetragen. Die Wellenzahl ist der reziproke Wert der Wellenlänge λ , die Intensität eine relative Einheit (arb.unit) und dient der Vergleichbarkeit der Messungen. [86] Aufgrund der Eigenschaft der meisten Moleküle Licht im infraroten Spektrum zu absorbieren und in molekulare Schwingungen umzuwandeln, lassen sich durch das gemessene Spektrum Rückschlüsse über die vorhandenen Bindungen ziehen. [87] Um den Einfluss der Oberflächentexturierung auf das Messergebnis zu vermeiden, und guten Kontakt zwischen ATR-Kristall und Probenoberfläche sicherzustellen, wurden weitere Messungen an der untexturierten Unterseite der Proben durchgeführt. Die Probenunterseite stand während des Herstellungsprozesses in ständigem Kontakt mit der Bauplattform und weist keine Texturierung auf.

Durch den Versuchsaufbau bei der Infrarotspektroskopie bedingt, unterliegt die Höhe eines Ausschlags Einflussfaktoren, die nicht, oder nur schwer kontrolliert werden können. Dabei hat sich gezeigt, dass das Absorbtionsverhalten direkt proportional zur Anzahl der zum Ausschlag führenden chemi-



Abbildung 36: Skalierte Infrarot-Spektren der Textur vor und nach der Aushärtung unter UV-Licht

schen Komponente ist. Beim Vergleich von Infrarot-Spektren ist es deshalb üblich, die einzelnen Spektren über den gesamten Wellenlängebereich um eine Konstante zu skalieren. Dieser Prozessschritt nennt sich Normalisierung und stellt sicher, dass zwei oder mehr Spektren hinlänglich des Vorhandenseins als auch der Menge der vorherrschenden Bindungen verglichen werden können. Dabei kann nur festgestellt werden, ob in einer Probe mehr oder weniger Molekülbindungen vorliegen.[87, 88] Die in Abbildung 36 und 37 gezeigten Spektren wurden um den $peak^1$ bei 1150 cm⁻¹ normalisiert. Bei Betrachtung der Spektren der nachgehärteten und nicht nachgehärteten Probenkörpern zeigen sich keine signifikanten Abweichungen des Absorbtionsverhalten der Bindungen. Die beiden Spektren sind nahezu deckungsgleich. Daraus lässt sich schließen, dass durch die auf die Reinigung der Proben folgende Exposition unter UV-Licht zu keine weitere Vernetzungsreaktion auf der Oberfläche

¹Spitze - peak (engl.)

ausgelöst wurde. Die einzige in Abbildung 36 ersichtliche Abweichung der Spektrumslinien bei 2950 cm⁻¹ ist wömöglich auf intrinsische Limitationen des Messinstruments zurückzuführen, die durch suboptimalen Kontakt des ATR-Kristalls mit der Oberfläche des Prüfkörpers verursacht werden[88]. Wie von Kerr et al. [89] beschrieben, würden sich bei unvernetzem Material Monomercharakteristiken bei 1726 cm⁻¹ und 1270 cm⁻¹ zeigen. Da es in diesen Wellenzahlbereichen zu keinen Unterschieden zwischen den Proben kommt, lässt sich festhalten, dass durch das Tränken der Proben in Isopropanol und der anschließenden Nachbehandlung mit Druckluft das unvernetzte, flüssige, photosensitive Polymerharz unvollständíg von der Oberfläche gelöst und entfernt wurde. Somit befinden sich keine Monomerreste mehr an der Oberfläche, die bei einem nachfolgenden Behandlungsschritt mit UV-Licht nachgehärtet werden könnten.

Wie in Abbildung 37 zu sehen, zeigt auch die zu Zwecken der Validierung durchgeführte Messung an der Unterseite der Probe keine Abweichungen im Spektrum der beiden Probentypen (gekennzeichnet mit "BP" - engl. build plate) Für die Bestimmung der charakteristischen Bindungen wurde die Software *KnowItAll Informatics Systems* verwendet.



Abbildung 37: Skalierte Infrarot-Spektren der Probenunterseite vor und nach der Aushärtung unter UV-Licht

Die markanten Ausschläge im Spektrum bei 1270 cm⁻¹ und 1726 cm⁻¹ weisen auf eine hohe Anzahl vorherrschenden C-O und C=O Bindungen hin. Weiters lassen sich die hervorgerufenen Ausschläge bei 1440 cm⁻¹ auf Scherenschwingung der Methylgruppe CH₃, und bei 2920 cm⁻¹ auf Streckschwingung der Methylengruppe CH₂ zurückführen. Diese Gruppen charakterisieren das Monomer Methylmethacrylat, aus welchem das Material R11 aufgebaut ist. [62, 89–91]

5.3 Härtemessung Shore-D mittels Durometer

Die Messung Shore-D Härte wurde nach den Bestimmungen der Norm DIN ISO 868:2003 [81] durchgeführt. Die geforderte Mindestdicke der Probenkörper von 4mm wurde durch Schichtung zweier Proben von je 2mm Dicke erreicht. Zum Erreichen der Mindestdicke wurde für alle unterschiedlichen Texturtypen die selbe untexturierte Referenzprobe als Unterlage verwendet. An jedem Texturtyp wurden 5 Messungen an zufällig gewählten Punkten mittig auf dem Probenkörper durchgeführt.

Um den Einfluss der nachträglichen Härtung der Proben unter UV-Licht zu testen, wurden weitere fünf Messungen an einem nicht nachgehärteten einskalig texturierten Probenkörper durchgeführt. Aus Tabelle 4 ist ersichtlich, dass die Härte an nicht gehärteten Texturoberflächen nicht vermindert ist. Die bestätigt, dass es durch die Exposition unter UV-Licht zu keinem Aushärten der Proben kommt, was einen Anstieg der Härte der Proben bedingen würde.

Shore-D				
Messung	gehärtet	nicht gehärtet		
1	74,0	75,0		
2	74,0	75,0		
3	73,5	76,0		
4	74,0	76,0		
5	73,0	76,0		
Mittelwert	73,7	75,6		
Standardabweichung	0,40	0,49		

Tabelle 4: Vergleich der Härtemesswerte (Shore-D) von gehärteten und nicht gehärteten Oberflächen

Shore-D				
Messung	Untexturiert	Einskalig text.	Multiskalig text.	
1	77,0	74,0	78,0	
2	76,0	74,0	78,0	
3	76,0	73,5	79,0	
4	77,5	74,0	77,0	
5	78,0	73,0	77,0	
Mittelwert	76,9	73,7	77,8	
Standardabweichung	0,8944	0,4472	$0,\!8367$	

Tabelle 5 zeigt ein Auflistung der gemessenen Härtewerte der unterschiedlichen Texturvarianten, deren Mittelwerte und deren Standardabweichungen.

Tabelle 5: Vergleich der gemessenen Härtewerte an unterschiedlichen Texturvarianten

Es lässt sich kein signifikanter Unterschied der Härtewerte zwischen den einzelnen Texturformen erkennen. Zwischen dem höchsten gemessenen Härtewert, 79 Shore-D an einer multiskalig texturierten Probe, und 73 Shore-D an der einskalig texturierten Probe, liegen 7.6%, was im Bereich der Messungenauigkeit des Geräts liegt. Des weiteren zeigt sich kein Einfluss der Textur auf die Messung der Härte. Vielmehr zeigt sich bei Betrachtung des Eindrucks des Indenters am Digitalmikroskop, dass die Textur an der Stelle des Eindringens vollständig zerstört, beziehungsweise verformt wird(Abbildung 39a). Die Tiefe des Eindrucks von ca. 86μ m geht weit über die Höhe der Textur hinaus, wie in Abbildung 39c zu sehen. Der Kontaktbereich des Eindrückkörpers mit dem Prüfkörper misst einen Durchmesser von 354.7μ m. Der Bereich, in dem der Probenkörper über die Tiefe der Texturhöhe hinweg plastisch deformiert wurde, hat einen Durchmesser von 214.4μ m. Abbildung 39b zeigt die Größe der Indenterspur. Aus den Messergebnissen aus Tabelle 4 lässt sich schließen, dass die Position des Eindrückkörpers der Messanlage auf der Textur keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Messung hat.



Abbildung 38: Vergleich der gemessenen Shore-D Härtewerte verglichen mit der Herstellerangabe

Envision TEC, der Hersteller des photosensitiven Polymers [62], gibt die Härte des Materials mit 85 Shore-D an. Die additiv gefertigten Proben haben im Schnitt einen um 10.6% geringeren gemessenen Härtewert. Ein Ursache dafür dürfte die Schichtung der Proben sein, die nötig ist, um die in der DIN ISO 868[81] vorgegebenen Mindestdicke für den Versuchsaufbau von 4mm zu erreichen. Laut Norm kann es durch Schichtung zu unvollständigem Kontakt der gestapelten Körper kommen. Beim Vergleich mit Messungen an Probenkörpern welche aus einem Stück gefertigt wurden, können dadurch Differenzen des Messwerts auftreten[81]. Leider gibt der Hersteller des Probenmaterials keine Auskunft über das durchgeführte Testverfahren und die Geometrie des Prüfkörpers, wodurch ein Vergleich der gemessenen Härtewerte mit den Angaben des Herstellers nicht sinnvoll ist.



(c) Extrahiertes Profil bei Schnitt durch die Stelle des Eindrucks

Abbildung 39: Mittels Laserkonfokalmikroskopie erstellte Bilder der plastischen Deformation am Probenkörper nach der Messung der Shore-D Härte an additiv gefertigtem Körper

5.4 Messung des Reibungsverhaltens mittels Tribometer

Zur Untersuchung des Einflusses der Oberflächentexturierung auf die Reibund Verschleißeigenschaften der additiv gefertigten, texturierten Polymerproben wurde ein Tribometer eingesetzt. Wie in Kapitel 4.3.5 beschrieben, sind die Testparameter in Tabelle 6 zusammengefasst. Als Referenz für die Beurteilung des Reibverhaltens der texturierten Proben, wurde zuerst die untexturierte Probe vermessen. Bei der Auswahl der zu vermessenden Proben wurde darauf geachtet, dass die Proben jeder Texturvariante nicht aus dem selben Druckdurchlauf stammen. Durch Streuung der Proben soll vermieden werden, dass unentdeckte Fehler oder intrinsische Einflüsse des Druckprozesses Auswirkung auf die tribologische Untersuchung haben.

Testmodus	linear reziprok
Kugeldurchmesser	6mm
Kugelmaterial	Al_2O_3
Distanz	$600 \mu { m m}$
Normalkraft	0,1N
Zyklen	1000/500
Umgebungsmedium	Luft
Umgebungstemperatur	23°C
rel. Luftfeuchtigkeit	4%

Tabelle 6: Zusammenfassung der Prüfparameter am Tribometer

Für die grafische Aufbereitung der Daten wurde der durchschnittliche Reibkoeffizient pro Zyklus ermittelt. Dabei wurde darauf geachtet, die statischen Anteile im Bereich des Wendepunkts der Messstrecke zu exkludieren.



Abbildung 40: Vergleich der zeitlichen Verläufe der Reibkoeffizienten der untersuchten Texturmuster

An den untexturierten Proben ist in den ersten 100 Zyklen eine Einlaufphase (engl. "running-in") zu erkennen. Die Einlaufphase stellt neben dem stationären Bereich (engl. "steady-state") und der starken Abnutzung (engl. "severe-wear") eine der drei Verschleißstadien im Lebenszyklus von Bauteilen dar. In erstgenanntem Bereich kommt es zum initialen Kontakt der beiden Reibpartner. Aufgrund des Abtrags der Rauheitsspritzen ist dieser durch erhöhten Verschleiß charakterisiert. Der resultierende Anstieg der Kontaktfläche führt zum Anstieg des Reibkoeffizienten im Diagramm[92]. Ab ca. 200 Zyklen bleibt der Reibkoeffizient über die Zeit nahezu konstant. Dieses Stadium wird als "steady-state" bezeichnet. Stadium 3 wird innerhalb von 1000 Zyklen nicht erreicht. Wie in Abbildung 41 zu sehen, misst die Verschleißspur eine Breite von 125μ m und deckt sich annähernd mit dem nach Hertz berechneten Kontaktdurchmesser von 104μ m.

Bei Betrachtung der Verschleißspuren an der untexturierten Probenoberfläche fällt auf, dass im Bereich der Spur die Rasterung der Pixelränder noch zu erkennen ist (Abbildung 42a). Im Bereich der Täler zwischen zwei angrenzenden Pixeln kam es zu keinem Verschleiß an der Oberfläche. Daraus lässt sich schließen, dass im Bereich der Verschleißspur der Materialabtrag unter 1μ m beträgt. Dies zeigt sich auch in der Profillinie (Abbildung 42b) bei Schnitt durch die Verschleißspur aus Abbildung 42a.



Abbildung 41: Verschleißspur an der untexturierten Probe



(a) 50x



Abbildung 42: Verschleißspur an der untexturierten Probe (50x Vergrößerung)

Bei den Messungen an der einskalig texturierten Probe (Abb. 43) normal (90°) zur Textur sind zwei Bereiche auffällig. Im Bereich der ersten 200 Zyklen steigt der Reibkoeffizient stark an. Dies deutet auf auf erhöhten Verschleiß im Anfangsstadium hin. Danach kommt es zu einem graduellen Anstieg des Reibkoeffizienten durch fortschreitenden Verschleiß. Wie in Abbildung 35 des Abbot-Firestone Diagramms der einskaligen Textur zur sehen, führt Verschleiß und die einhergehende Reduktion der Texturhöhe zu einer starken Zunahme des Materialtraganteils. Dadurch erhöht sich die Kontaktfläche zwischen der Kugel und der Probenoberfläche. Dies reduziert den reibungsmindernden Effekt der Textur. Die Ungleichmäßigkeit des Anstiegs des Reibkoeffizienten, erkennbar durch die fluktuierende Reibkurve, erklärt sich durch das ungleichmäßige Abtragen bzw. Abreißen der Texturstege über die Länge der Verschleißspur beider Proben.



Abbildung 43: Vergleich der zeitlichen Verläufe des Reibkoeffizienten an der einskalig texturierten Probe quer (90°)

TU Bibliothek, Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar WIEN Vourknowledge hub. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Beim Vergleich der beiden vermessenen Proben mit einskaliger Textur wurde ein höherer Reibkoeffizient für Probe 2 beobachtet. Die Analyse der Verschleißmarken von Probe 2, lässt einen unregelmäßigen Abtrag der Texturstege erkennen, siehe Abbildung 44. Die Verschleißspur nach 1000 Zyklen misst eine Breite von $285\mu m$ und eine Länge von $698\mu m$. Bis auf den Bereich in der Mitte der Verschleißspur wurde die Textur komplett abgetragen. In der Verschleißspur sind nach 500 Zyklen nur mehr 6 von 12 Texturstegen vorhanden, nach 1000 Zyklen nur mehr 2. Erkennbar ist dabei, dass die fehlenden Texturstege auf Höhe der vorherigen Bauschicht im Druckprozess abgetrennt wurden. Dies ist auf schlechte Quervernetzung der auszuhärtenden Schicht mit der bereits zuvor vernetzten Polymerschicht zurückzuführen. Die durch Kontaktanalyse errechnete Druckverteilung in Abhängigkeit von der Position der Kugel des Tribometers ist in Abbildung 45 gezeigt. Dabei zeigt sich, dass der Kontaktdruck im Bereich der Ränder der Textur auf bis zu 130MPa ansteigt. Durch die in Bewegungsrichtung der Kugel seitlich auf die Stege wirkenden Kräfte lösen sich diese von der vorherigen Bauschicht.



(c) 50x Vergrößerung

(d) 50x Vergrößerung

Abbildung 44: Verschleißverhalten der einskaligen Textur bei Beanspruchung quer zur Texturrichtung (Probe 2)



Abbildung 45: Veranschaul
ichung des tatsächlichen Kontaktdrucks abhängig von der Position der Kug
el (Position in $\mu m)$

Der höhere Reibkoeffizient der Probe 2 ist somit durch die entstehenden Löcher in der Verschleißspur zu erklären. Da diese Bereiche eine Breite von 60 μ m überschreiten, kommt es zu Verhakung der Kugel in der Textur, da diese vertikal absinkt und im weiteren Verlauf der Bewegung auf noch bestehende Texturstege trifft. Durch eine Versuchsreihe stellten Sung et al. [93] fest, dass es bei einem Unterschreiten des "Kugeldurchmesser zu Rillengröße-Verhältnisses" von 1/100 zu Verhakungen und folglich zum Anstieg des Reibkoeffizienten kommt. Ab einem Größenverhältnis von kleiner 1/100 kam es zu keinem Anstieg des Reibkoeffizienten. Die einskalige Textur weist eine auf das CAD-Modell basierendes theoretisches Verhältnis von 1/240, beziehungsweise ein durch Vermessung der Textur ermitteltes Verhältnis von 1/158 auf. Bei vollständigem Verlust eines Textursteges kommt es bereits zu einer Lücke von 85μ m und Unterschreiten des kritischen Verhältnisses von 1/100.

Der zeitliche Verlauf des Reibkoeffizienten von Probe 1 ist durch die spitzen Ausschläge am Ende der Einlaufphase nach 150 beziehungsweise 210 Zyklen charakterisiert, siehe Abbildung 43. Dies dürfte den Zeitpunkt kennzeichnen, an dem es, wie in der Verschleißspur (Abb. 46) zu sehen, schlagartig zu einem vollständigen Verlust der Texturstege kommt. Durch die bessere Vernetzung innerhalb des Steges verglichen mit der Vernetzung zur vorherigen Bauschicht verbreitert sich die Verschleißspur signifikant und misst an der breitesten Stelle 510 μ m. Bei genauerer Vermessung der von Stegen befreiten Verschleißspur ist eine Resttextur mit einer Texturhöhe von etwa 5 μ m zu erkennen. Die Verschleißspur ist in 50-facher Vergrößerung in Abbildung 48 gezeigt. Es ist selbst bei geringer verbleibender Texturhöhe eine Ablagerung von Verschleißpartikel in den Texturtälern zu erkennen. Da die Textur über die gesamte Verschleißspur abgetragen ist, kommt es in diesem Szenario zu keinem Verhaken der Kugel. Die verbleibende Texturhöhe reicht aus, um durch Minimierung der Kontaktfläche reibungsmindernde Eigenschaften aufzuweisen. Folglich ist der reibungsmindernde Effekt bei Probe 1 größer als bei Probe 2. Der graduelle Anstieg der Messkurven ist, wie zuvor beschrieben, auf die Vergrößerung der Kontaktfläche mit zunehmenden Verschleiß zurückzuführen. Es ist anzunehmen, dass es beim Herstellungsprozess zwischen Probe 1 und Probe 2 durch nicht identifizierte Einwirkungen zu unterschiedlich stark ausgeprägter Vernetzung zwischen den Bauschichten gekommen ist.



Abbildung 46: Verschleißspur der einskaligen Textur (90°)(Probe 1)



Abbildung 47: Vermessung der Verschleißspur der einskaligen Textur (Probe 1)



Abbildung 48: Abgetragene Texturstege in der Mitte der Verschleißspur (Abb.46) der einskalig texturierten Probe (50x)

Abbildung 49 zeigt eine 3D Aufnahme der Verschleißspur an Probe 2 in 50-facher Vergrößerung. Dabei sind Ablagerungen von Verschleißpartikeln in den Texturtälern zu erkennen. Die Fähigkeit Verschleißpartikel von der Kontaktzone der Reibpartner fern zu halten, welche dort abrasiv wirken könnten, stellt neben der Reduktion der Kontaktfläche, einen weiteren reibungsmindernden Effekt von Oberflächentexturierung unter Trockenreibung dar.



Abbildung 49: 3D Ansicht in 50x Vergrößerung der abgelagerten Verschleißpartikel in den Texturtälern (Probe 2)

Bei der Messung entlang (0°) der Texturstege auf den einskalig texturierten Proben (Abbildung 50) zeigt sich ein gradueller Verschleiß der Textur, was den stetigen Anstieg des Reibkoeffizienten über die Zyklenzahl hervorruft. Wie in Abbildung 51 gezeigt, kommt es bei den Messungen zu unterschiedlich starker Abnützung der Stege. Dies führt zu Unterschieden der Reibkoeffizienten der gemessenen Probe. In einer Messung ist nahzu kein Verschleiß festzustellen, während es an einer anderen Messstelle zu einem Abtrag von etwa 2μ m der Texturstege, einer Verbreiterung der Verschleißspur und damit einhergehendem Anstieg der realen Kontaktfläche kommt. Dies erklärt die unterschiedlichen Steigungen der Reibkurven.

Der starke Anstieg des Reibkoeffizienten der gelben Linie in Abbildung 50 ist auf das in Kontakt treten eines weiteren Textursteges durch fortschreitenden Verschleiß der zu Beginn in Kontakt stehenden Texturstege zurückzuführen. Durch den verschleißbedingten Höhenverlust kommt es zur Verbreiterung der Verschleißspur, und bei anschließendem in Kontakt treten des benachbarten Stegs erhöht sich die reale Kontaktfläche sprungartig.

Die beiden Messungen an Probe 2, in rot und blau dargestellt, dürften einem Messfehler des Tribometers zugrunde liegen. Die Verschleißspuren dieser Messungen zeigen ein ähnliches Bild, wie jene der zuvor beschriebenen Messkurven.



Abbildung 50: Reibkoeffizient der einskaligen Textur parallel (0°) zur Textur
orientierung



Abbildung 51: Verschleißspuren bei Messung parallel (0°) zur einskaligen Textur

Die Messkurven des Reibkoeffizienten an den multiskalig texturierten Proben quer (90°) zur Texturorientierung (Abbildung 52) zeigen einen fluktuierenden, stetig steigenden Verlauf. Zwischen den durchgeführten Messungen an beiden Proben zeigt sich kein signifikanter Unterschied in den Messkurven des Reibungskoeffizienten. Der Anfangs sehr fluktuierende Verlauf des Reibkoeffizienten ist auf das von Sung et al. [93] beobachtete Verhaken der Kugel in den Rillen der Textur zurückzuführen. Die multiskalige Textur weist Rillenbreiten von 75 μ m auf. Da es wie bereits beschrieben ab einer Rillenbreite von 60 μ m zu Verhakungen kommt, sind die Sprünge im Verlauf auf Verhakungen und, wie in Abbildung 53 zu erkennen, unregelmäßigen Abriss von einzelnen Texturstegen zurückzuführen.



Abbildung 52: Vergleich der zeitlichen Verläufe der dynamischen Reibungskoeffizienten der untersuchten Texturmuster

Bei Vergleich der beiden Verschleißspuren in Abbildung 53a und 53b fällt auf, dass Verschleißsspur 2 sowohl breiter ist, als auch mehr Höhenverlust der Textur aufweißt. Dies dürfte auf die unterschiedliche Anzahl der Zyklen (500 vs 1000) der Messreihen zurückzuführen sein.



(c) Verschleißspur 1 (50x)

(d) Verschleißspur 2 (50x)

Abbildung 53: Verschleißspuren bei Messung quer (90°) zur multiskaligen Textur



Abbildung 54: Veranschaulichung des tatsächlichen Kontaktdrucks abhängig von der Position des Balls auf der multiskaligen Textur
Das Reibverhalten der multiskaligen Textur bei Messung parallel (0°) zur Orientierung der Stege zeigt eine schwach ausgeprägte Einlaufphase. Nach bereits 100 Zyklen flachen die Messkurven ab und es zeigt sich ein "steady state" Verhalten der Reibeigenschaften. Abbildung 56 zeigt die Aufnahmen der Verschleißspur in 20-facher Vergrößerung. Der Materialabtrag der Stege vermisst sich in Abbildung 56a zu $2,5\mu$ m, während er in Abbildung 56b 4μ m misst. Der Unterschied der Breiten der beiden Verschleißspuren dürfte auf die Höhendifferenz des Verschleißes und dadurch zunehmenden Kontaktdurchmesser zurückzuführen sein.



Abbildung 55: Vergleich der zeitlichen Verläufe des Reibkoeffizienten der untersuchten Texturmuster



Abbildung 56: Verschleißspuren bei Messung parallel (0°) zur multiskaligen Textur



Abbildung 57: Detailaufnahme der Verschleißspur aus Abbildung 56b (50x)



Abbildung 58: Vergleich der zeitlichen Verläufe des Reibkoeffizienten der untersuchten Texturmuster

Zum Vergleich der Reibkoeffizient der einzelnen Texturvarianten wurde in Abbildung 58 der gemittelte Reibkoeffizient jeder Texturvariante und dessen Standardabweichung über die Anzahl der Zyklen aufgetragen. Es zeigt sich, dass sowohl die einskalige, als auch die multiskalige Textur einen verminderten Reibkoeffizienten gegenüber der untexturierten Oberfläche aufweisen. Die Messungen an der untexturierten Probe zeigen im Vergleich zu den anderen eine ausgeprägte Einlaufphase mit steilem Anstieg des Reibkoeffizienten in den ersten 100 Zyklen. Dies ist auf den starken Anstieg der realen Kontaktfläche bereits bei geringem Verschleiß durch die flache, herstellungsbedingte Oberflächentextur zurückzuführen (siehe Abbildung 41). Beim Vergleich der Messungen quer zur Texturorientierung (90°) weist die einskalig texturierte Probe einen niedrigeren Reibkoeffizienten als die multiskalig texturierte Probe auf. Dies ist damit zu begründen, dass die multiskalige Textur bereits von Anfang an Rillenabstände aufweist, die nach Sung et al. [93] das kritische Rillen-Kugeldurchmesser-Verhältnis unterschreiten, welches zu Verhakungen beim Reiben über die Oberfläche führt. Abbildung 59 illustriert die von Sung et al. untersuchte Problematik. Basierend auf den Daten der Kontaktanalyse (Abbildung 45 und 54) kommt es bei den multiskaligen Texturen abhängig von der Position der Kugel zu einem um 61,9% höheren maximalen Kontaktdruck auf die Stege. Dies, einhergehend mit den durch das Absinken der Kugel in den Texturtälern (siehe Abbildung 60b) auftretenden tangentialen Kräften auf die Stege führt zu stärkerem Verschleiß und unkontrollierten Abriss der Texturstege. Abbildung 60 zeigt einen Vergleich des Maximaldurcks, der Kontaktfläche und der vertikalen Kugelposition in Abhängigkeit von der Position auf der Textur.



Abbildung 59: Illustration der Verhakung der Kugel in den Rillen der Textur[93].



(c) Kontaktfläche abh. von Kugelposition

Abbildung 60: Auswertung der Kontaktanalyse

Im Vergleich der Messungen parallel (0°) zur Textur zeigt sich die einskalige Textur ebenfalls überlegen. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass es bei dieser Textur-Orientierungs-Kombination, bedingt durch die größere Kontaktfläche durch und damit einhergehend geringeren Kontaktdruck, in Abbildung 60a) gezeigt, zu weniger Verschleiß an der Textur kommt. Auf der multiskaligen Textur dürfte es anfänglich durch die geringere Kontaktfläche und höherem Kontaktdruck zu stärkerem Verschleiß und folglich zum in Kontakt treten von weiteren Stegen kommen. Basierend auf den Beobachtungen ist anzunehmen, dass die auftretenden tangentialen Kräfte auf die Texturstege die kritische Kraft vereinzelt übersteigt, sodass es zum Abriss bzw. Versagen einzelner Texturstege kommt.



Abbildung 61: Vergleich der über die Zyklen gemittelten Reibkoeffizienten und dessen Standardabweichung jeder getesteten Textur-Richtungskombination. (EQ=einskalig-quer, EP=einskalig-parallel, MQ=multiskalig-quer, MP=multiskalig-parallel)

In Abbildung 61 werden die über die Zyklen gemittelten Reibkoeffizienten jeder Textur in Abhängigkeit von der getesteten Richtung gegenübergestellt. Die prozentuelle Angabe der Reibungsreduktion ist dabei gegenüber der untexturierten Referenzprobe angegeben. Dabei erzielt die Messung bei 0° an der einskalig texturierten Probe die größte Reduktion des Reibkoeffizienten. Wie bereits beschrieben ist jedoch das Potential der Reibreduktion der Messungen 90° nicht ausgeschöpft, da der unkontrollierte Texturabriss dieser Messungen sich negativ auf das Reibverhalten auswirkt. Trotz des starken Verschleißes und Texturabrisses an den multiskalig texturierten Proben bei Messung quer (90°) zur Texturrichtung lässt sich eine Reduktion des Reibkoeffizienten von 18% erreichen. Um die Widerstandfähigkeit der Stege zu verbessern wird im Ausblick (Kapitel 6) ein Vorschlag zur Anpassung der Geometrie der Textur für Messungen quer (90°) zur Texturrichtung gemacht.



6 Zusammenfassung und Ausblick

Der erste Teil dieser Arbeit befasst sich mit der Optimierung des 3D-Druckprozesses. Im Speziellen wurde die Texturgenauigkeit durch Minimierung der Abweichung zur geplanten Geometrie verbessert, als auch das Auftreten von Klebrigkeit der Probenoberfläche vermieden. Ziel dieser Optimierung war es, anschließend reproduzierbare, aussagekräftige tribologische Messungen durchführen zu können.

Die definierten Ziele für den Herstellungsprozess texturierter Proben konnten erfolgreich erreicht werden. Einerseits zeigte sich, dass die präzise Einstellung der Fokusebene der Anlage ein essentieller Bestandteil des 3D-Drucks am Auflösungsmaximum einer DLP-Fertigungsmaschine ist. Andererseits zeigte die anschließende Reinigung der Proben durch 2-minütiges Tauchen in Isopropanol, kombiniert mit der Behandlung mit Druckluft, dass unpolymerisiertes Material vollständig aus den 25μ m breiten Texturtälern entfernt werden kann. Die von Philipp Taschner [63] beschriebene Klebrigkeit der Oberfläche, die zu sehr breiter Streuung der gemessenen Reibkoeffizienten führte, und folglich eine Beurteilung des Einflusses von Mikrotexturierung auf das Reib- und Verschleißverhalten in der Aussagekräftigkeit beeinflusste, konnte weder bei Kontakt mit dem Finger noch mit analytischen Methoden festgestellt werden.

Die Messung der Shore-D Härte der unterschiedlich texturierten Proben ergab, dass das Texturmuster bei einer Schichthöhe von 25μ m keinen Einfluss auf die gemessene Härte hat. Alle Proben wiesen einen zueinander gering abweichenden Härtewert auf. Die Differenz der Messwerte zur Härteangabe des Materialherstellers konnte mit der Stapelung der Proben zum Erreichen der erforderlichen Schichtdicke erklärt werden. Bei der Analyse der chemischen Struktur mittels ATR-Infrarotspektroskopie zeigten sich keine Unterschiede im gemessenen Intensität-Spektrum zwischen einer mittels UV-Licht nachgehärteten Probe und einer nicht nachgehärteten Probe. Dies bestätigt den Erfolg des Reinigungsprozesses bei der Entfernung von unpolymerisierten Materialresten.

Die zur Sicherstellung der Texturqualität durchgeführte Topographiemessung mittels Profilometer bestätigt den Optimierungserfolg im Herstellungsprozess. Die Profilhöhe der mittels Digital Light Projection-Verfahren hergestellten Proben lag im Durchschitt bei etwa 22μ m. Die Texturtäler zeigten in den Messungen keine Ablagerung von Material.

Bei der tribologischen Untersuchung des Einflusses der Texturvarianten auf den Reibkoeffizienten wurden Messungen parallel (0°) als auch quer (90°) zur Texturrichtung auf einem Tribometer durchgeführt. Als Referenz wurde der Reibkoeffizient auf einer ebenfalls mittels DLP-Verfahren hergestellten untexturierten Probe gemessen. Unabhängig von der gemessenen Orientierung zur Textur zeigten alle texturierten Probentypen einen niedrigeren Reibkoeffizienten als die Referenzprobe. Bei der multiskalig texturierten Probe zeigten sich trotz der reduzierten Kontaktfläche im Vergleich zu den einskalig texturierten Proben negative Einflüsse der großen Abstände in den Texturtälern auf den Reibkoeffizienten. Die Reduzierung des Reibkoeffizienten der texturierten Proben gegenüber der untexturierten Referenzprobe lag zwischen 18% (multiskalige Textur bei 90°) und 64% (einskalige Textur bei 0°).

Die Betrachtung und Vermessung der entstandenen Verschleißspuren auf den Probenoberflächen offenbaren das Verschleißverhalten in der Kontaktstelle. Dabei zeigte sich, dass trotz erhöhtem Verschleiß an den texturierten Proben, reibungsmindernde Effekte durch die Verminderung der Kontaktfläche und Aufbewahrung von Verschleißpartikel in den Texturtälern resultieren. Bei den Messungen quer (90°) zur Texturrichtung zeigt sich jedoch ein unregelmäßiger Abriss der Texturstege durch die hohen auf die Kanten der Textur wirkenden Kräfte.

Basierend auf Beobachtungen von vollständig abgerissenen Stegen zeigt sich die Kontaktstelle der letzten Bauschicht, welche die Textur beherbergt, zur vorherigen Bauteilschicht als Schwachpunkt für das Versagen der additiv gefertigten Texturstege. Bei Messungen quer zur Orientierung der Textur würde es sich bei Weiterführung der Untersuchungen des Reibverhaltens mittels DLP erzeugten Mikrotexturen empfehlen, die Kontaktfläche der Stege zur darunter liegenden Bauschicht durch Verbreiterung der Stege zu vergrößern und so den auftretenden Kontaktdruck zu vermindern. Dadurch könnten die Effekte unkontrollierten Texturabrisses auf den Reibkoeffizienten vermieden werden.

Ein anderer Ansatz wäre die Einführung einer weiteren vertikalen Hierarchiestufe, sodass sich nach Verschleiß der initial in Kontakt stehenden Textur eine weitere Texturstufe zur Verfügung steht. Abbildung 62 zeigt eine Kombination der beiden Verbesserungsvorschläge der Texturgeometrie.



Abbildung 62: Adaptierung der multiskaligen Geoemtrie basierend auf gewonnen Erkenntnissen

Abbildungsverzeichnis

1	Bildung eines Makromoleküls [9]	. 13
2	Radikalische Kettenpolymerisation und Photovernetzung[9].	. 15
3	Aufbau einer DLP-Anlage [19]	. 22
4	Approximierung eines Kreises auf Pixelbasis [3]	. 24
5	Tribologisches System [34]	. 28
6	Reibungszustände[31]	. 30
7	Stribeck-Kurve [34]	. 32
8	Verschleißmechnismen [35]	. 35
9	Biologische Texturen [56]	. 42
10	Kombination von Texturen[58]	. 43
11	Abbott-Firestone Kurve [61]	. 44
12	Geometrie Grundkörper/Referenzkörper	. 46
13	Auflösung der vollständig texturierten Oberfläche	. 47
14	Auflösung der multiskalig texturierten Oberfläche	. 49
15	Modell eines Siemenssterns	. 52
16	Überpolymerisation Siemensstern	. 53
17	Profillinie aus Laserkonfokalmessung	. 58
18	Illustrierung der Brennweiten des Spektrums	. 60
19	Optisches Profilometer NANOVEA	. 61
20	Infraroter Spektralbereich	. 62
21	Schema Michelson Interferometer	. 63
22	Schematischer Aufbau ATR-FTIR Spektroskopie	. 65
23	Aufbau Shore Härtemessgerät	. 66
24	Indenter Shore Tvp-D [81]	. 67
25	Schema eines reziproken Tribometeraufbaus [83]	. 68
26	Ausrichtung der Probentextur am Tribometer	. 69
27	Profilline unzureichender Reinigung	. 73
28	Texturschädigung durch Ultraschallreinigung	. 74
29	Polymerisation bei falscher Fokusebene	. 75
30	Topographie der untexturierten Referenzprobe	. 78
31	Topographie der einskalig texturierten Probe	. 80
32	Topographie der multiskalig texturierten Probe	. 81
33	Topographie der multiskalig texturierten Probe - Messstelle 2	. 82
34	Vergleich der Texturgeometrie	. 83
35	Abbot-Firestone Diagramm einskalige Textur	. 84
36	IB-Spektren skaliert	. 86
37	IR-Spektren Unterseite skaliert	. 88
38	Balkendiagramm der Shore-D Messwerte	91
39	Plastische Deformations an der Messstelle	92
~ ~		



40	Vergleich Reibkoeffizient Referenz
41	Verschleißspur an untexturierter Probe
42	Verschleißspur an untexturierter Probe 50x
43	Vergleich Reibkoeffizient einskalig 90°
44	Verschleißspuren einskalige Textur quer
45	Kontaktdruck einskalige Textur
46	Verschleißspur einskalige Textur (90°)
47	Vermessung der Verschleißspur der einsk. Textur
48	Abgetragene Textur in der Verschleißspur
49	3D Bild der Verschleißpartikel
50	Reibkoeffizient einskalig 0°
51	Verschleißspur der einskaligen Textur 0°
52	Vergleich dyn. Reibungskoeffizient
53	Verschleißspuren der multiskaligen Textur quer
54	Kontaktdruck multiskalige Textur
55	Verlauf des Reibkoeffizienten der Texturmuster
56	Verschleißspur der multiskaligen Textur 0°
57	Detailaufnahme Verschleiß multiskalig parallel
58	Verlauf des Reibkoeffizienten der Texturmuster
59	Kugel-Rillendurchmesser-Verhältnis nach Sung
60	Kontaktanalyse
61	Vergleich gemittelte Reibkoeffizienten
62	Adaptierung der Geometrie

Abkürzungen

 ${\bf AM}\,$ Additive Manufacturing. 11, 12

ATR Attenuated Total Reflection. 65, 85, 87

CAD Computer Aided Design. 11, 21, 76, 81, 83

CAM Computer Aided Manufacturing. 11, 15

CCD Charge Coupled Device. 59

CMOS Complementary Metal-Oxide Semiconductor. 57

DLP Digital Light Projection. 7, 45, 46, 51, 79, 117–119

DMD Digital Micromirror Device. 22, 46, 76, 77, 82

FDM Fused Deposition Modelling. 18

FTIR Fourier Transform Infrared. 85

IR Infrarot. 64

SLA Stereolithographie. 21

UV Ultraviolet. 55, 118

Tabellenverzeichnis

1	Vor- und Nachteile einzelner Fertigungsverfahren im $AM[5]$	16
2	Druckparameter der DLP Anlage	53
3	Verweildauer der Proben in Isopropanol	72
4	Vergleich Härte Nachhärtung	89
5	Härtemessung Shore-D	90
6	Zusammenfassung der Prüfparameter am Tribometer	93

Referenzen

- Mengyuan Wang et al. "Snakeskin-Inspired Elastomers with Extremely Low Coefficient of Friction under Dry Conditions". In: ACS Applied Materials & Interfaces 12.51 (2020), pp. 57450–57460.
- [2] Zhendong Dai, Jin Tong, and Luquan Ren. "Researches and developments of biomimetics in tribology". In: *Chinese Science Bulletin* 51.22 (2006), pp. 2681–2689.
- [3] Malte Hartmann and Jürgen Stampfl. "Additive Fertigung in der digitalen Zahnheilkunde". In: BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 164.3 (Feb. 2019), pp. 141–146.
- [4] Nazanin Maani, Vitaliy S Rayz, and Michael Nosonovsky. "Biomimetic approaches for green tribology: from the lotus effect to blood flow control". In: Surface Topography: Metrology and Properties 3.3 (2015), p. 034001.
- [5] Iwona Jasiuk et al. "An Overview on Additive Manufacturing of Polymers". In: JOM 70.3 (Jan. 2018), pp. 275–283.
- [6] I. Tzanakis et al. "Future perspectives on sustainable tribology". In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16.6 (Aug. 2012), pp. 4126–4140.
- Martin G. Möhrle and Ralf Isenmann. *Technologie-Roadmapping*. Springer-Verlag GmbH, July 2017. ISBN: 978-3-662-52708-5.
- [8] Vasiliki-Maria Archodoulaki. Skriptum Werkstoffkunde nichtmetallischer Werkstoffe. TU Wien. 2006.
- [9] J.P. Fouassier. *Photoinitiators for polymer synthesis : scope, reactivity and efficiency.* Weinheim: Wiley-VCH, 2012. ISBN: 978-3-527-33210-6.
- [10] James V. Crivello and Elsa Reichmanis. "Photopolymer Materials and Processes for Advanced Technologies". In: *Chemistry of Materials* 26.1 (Nov. 2013), pp. 533–548.
- [11] Céline Dietlin et al. Photopolymerization upon LEDs: new photoinitiating systems and strategies. Tech. rep. 21. 2015, pp. 3895–3912.
- [12] ISO/ASTM 52900 Additive Fertigung Grundlagen Terminologie. Standard. Berlin, GER: DIN-Normenausschuss Werkstofftechnologie, June 2018.

- [13] Lorenz Schlier et al. "Macro-Cellular Silicon carbide Reactors for Nonstationary Combustion Under Piston Engine-Like Conditions". In: *International Journal of Applied Ceramic Technology* 8.5 (Sept. 2011), pp. 1237–1245.
- [14] Mohsen Ziaee and Nathan B Crane. "Binder jetting: A review of process, materials, and methods". In: Additive Manufacturing 28 (2019), pp. 781–801.
- [15] Freistrahl-Bindemittelauftrag SZENE ADDITIV. https://www. szene-additiv.de/nav/technologies/freistrahl_bindemittelauftrag. (Accessed in Mar 2021).
- [16] Flaviana Calignano et al. "Overview on additive manufacturing technologies". In: *Proceedings of the IEEE* 105.4 (2017), pp. 593–612.
- [17] Ryan Anderson et al. "Characteristics of bi-metallic interfaces formed during direct energy deposition additive manufacturing processing". In: *Metallurgical and Materials Transactions B* 50.4 (2019), pp. 1921– 1930.
- [18] Nahum Travitzky et al. "Additive Manufacturing of Ceramic-Based Materials". In: Advanced Engineering Materials 16.6 (2014), pp. 729– 754.
- [19] Samuel Clark Ligon et al. "Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing". In: *Chemical Reviews* 117.15 (2017). PMID: 28756658, pp. 10212–10290.
- [20] M. Hatzenbichler et al. "DLP-based light engines for additive manufacturing of ceramic parts". In: *Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications IV*. Ed. by Michael R. Douglass and Patrick I. Oden. SPIE, Feb. 2012.
- [21] Markus Schönberger and Marc Hoffstetter. "Generative Manufacturing Technologies—The Future?" In: *Emerging Trends in Medical Plastic Engineering and Manufacturing*. Elsevier, 2016, pp. 107–174.
- [22] K. Salonitis. "Stereolithography". In: Comprehensive Materials Processing. Ed. by Saleem Hashmi et al. Oxford: Elsevier, 2014, pp. 19–67. ISBN: 978-0-08-096533-8.
- [23] H.Peter Jost. "Tribology Origin and Future". In: Wear 136.1 (Feb. 1990), pp. 1–17.
- [24] H Peter Jost et al. "Lubrication (tribology) education and research".
 In: A Report on the Present Position and Industry Needs, Department of Education and Science, HM Stationary Office, London (1966).

- [25] Horst Czichos. Tribologie-Handbuch : Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik. Wiesbaden Germany: Springer Vieweg, 2015. ISBN: 978-3-8348-1810-2.
- [26] Ilka Lenke. In: CeramTec AG. Chap. 3.1 Tribologie, Reibung und Verschlie
 ß (Grundlagen), pp. 60–75.
- [27] Valentin Popov. *Kontaktmechanik und Reibung*. Vol. 1. Springer Berlin Heidelberg, 2009. ISBN: 9783540888369.
- [28] Si-wei Zhang. "Green tribology: Fundamentals and future development". In: *Friction* 1.2 (June 2013), pp. 186–194.
- [29] BMFT Report: Damit Rost und Verschleiß nicht Milliarden fressen. Tech. rep. Bonn: Bundesministerium f
 ür Forschung und Technologie, 1983.
- [30] Kenneth Holmberg and Ali Erdemir. "Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions". In: *Friction* 5.3 (Sept. 2017), pp. 263–284.
- Bharat Bhushan. Introduction to Tribology. John Wiley & Sons, Mar. 22, 2013. 738 pp. ISBN: 978-1-119-94453-9.
- [32] M Woydt. "The importance of tribology for reducing CO2 emissions and for sustainability". In: *Wear* 474 (2021), p. 203768.
- [33] Bharat Bhushan. Principles and Applications to Tribology. John Wiley & Sons, Ltd, Feb. 2013.
- [34] Wilhelm Matek. Maschinenelemente : [Normung, Berechnung, Gestaltung. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009. ISBN: 978-3-8348-0689-5.
- [35] Karl Sommer, Rudolf Heinz, and Jörg Schöfer. "Tribologische Grundlagen". In: Verschleiβ metallischer Werkstoffe. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, pp. 3–34.
- [36] Elena Popova and Valentin L Popov. "Coulomb und Amontons und verallgemeinerte Reibgesetze". In: ().
- [37] Michael M. Khonsari and E. Richard Booser. "Recent developments in wear prevention, friction, and lubrication". In: ed. by George Nikas. Kerala, India: Research Signpost, 2010. Chap. 7. On the Stribeck curve, pp. 263–278. ISBN: 978-81-308-0377-7.
- [38] Yansong Wang et al. "Development of a Set of Stribeck Curves for Conformal Contacts of Rough Surfaces". In: *Tribology Transactions* 49 (Oct. 2006), pp. 526–535.

- [39] Richard Stribeck. Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager. Berlin: Springer Verlag, 1903.
- [40] T. W. Scharf and S. V. Prasad. "Solid lubricants: a review". In: Journal of Materials Science 48.2 (Dec. 2012), pp. 511–531.
- [41] K Kato. "Classification of wear mechanisms/models". In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology 216.6 (June 2002), pp. 349–355.
- [42] DIN 50320: Verschleiß, Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes. Norm. 1979.
- [43] Ajayi Layo; Ludema Kenneth C. Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology. Second edition. Taylor & Francis, 2019.
- [44] Philipp Grützmacher, Francisco Profito, and Andreas Rosenkranz. "Multi-Scale Surface Texturing in Tribology-Current Knowledge and Future Perspectives". In: *Lubricants* 7 (Oct. 2019).
- [45] Andreas Rosenkranz et al. "Surface Texturing in Machine Elements -A Critical Discussion for Rolling and Sliding Contacts". In: 21.8 (June 2019), p. 1900194.
- [46] Carsten Gachot et al. "Dry friction between laser-patterned surfaces: role of alignment, structural wavelength and surface chemistry". In: *Tribology letters* 49.1 (2013), pp. 193–202.
- [47] I Etsion and E Sher. "Improving fuel efficiency with laser surface textured piston rings". In: *Tribology International* 42.4 (2009), pp. 542– 547.
- [48] Venkateswara Babu Peddakondigalla, Ismail Syed, and Satish Ben. "Experimental investigation on effects of positive texturing on friction and wear reduction of piston ring/cylinder liner system". In: Materials Today: Proceedings 24 (Jan. 2020), pp. 1112–1121.
- [49] Izhak Etsion. "Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing". In: *Tribology letters* 17.4 (2004), pp. 733–737.
- [50] Stephen M Hsu et al. "Friction reduction using discrete surface textures: principle and design". In: Journal of Physics D: Applied Physics 47.33 (2014), p. 335307.
- [51] Sorin-Cristian Vlădescu et al. "Combined friction and wear reduction in a reciprocating contact through laser surface texturing". In: Wear 358 (2016), pp. 51–61.

- [52] Aviram Ronen, Izhak Etsion, and Yuri Kligerman. "Friction-reducing surface-texturing in reciprocating automotive components". In: *Tribol*ogy transactions 44.3 (2001), pp. 359–366.
- [53] C Gachot et al. "A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement". In: *Wear* 372 (2017), pp. 21–41.
- [54] FP Bowden and D Tabor. "Mechanism of metallic friction". In: Nature 150.3798 (1942), pp. 197–199.
- [55] WE Jamison. "Introduction to tribology". In: Journal of Vacuum Science and Technology 13.1 (1976), pp. 76–81.
- [56] Ekkard Brinksmeier et al. "Manufacturing of multiscale structured surfaces". In: CIRP Annals 69.2 (2020), pp. 717–739. ISSN: 0007-8506.
- [57] Christian Greiner and Michael Schäfer. "Bio-inspired scale-like surface textures and their tribological properties". In: *Bioinspiration & biomimetics* 10.4 (2015), p. 044001.
- [58] Stephen M Hsu, Yang Jing, and Fei Zhao. "Self-adaptive surface texture design for friction reduction across the lubrication regimes". In: Surface Topography: Metrology and Properties 4.1 (2015), p. 014004.
- [59] Andreas Rosenkranz. "Tribologie an Oberflächen mit maßgeschneidertem topographischem Design". In: (2014).
- [60] Milton Coba Salcedo, Irene Buj Coral, and Guillermo Valencia Ochoa.
 "Characterization of surface topography with Abbott Firestone curve".
 In: Contemporary Engineering Sciences 11.68 (2018), pp. 3397–3407.
- [61] ES Gadelmawla et al. "Roughness parameters". In: Journal of materials processing Technology 123.1 (2002), pp. 133–145.
- [62] Perfactory Materials R11 Datenblatt. Datenblatt. envisionTEC. 2021.
- [63] Philipp Taschner. "Erzeugung von Mikrorillenstrukturen mittels Additive Manufacturing und deren Auswirkungen auf die Benetzbarkeit und die tribologischen Eigenschaften". diplomathesis. Technische Universität Wien, 2019.
- [64] Gianluca Costagliola, Federico Bosia, and Nicola M. Pugno. "Static and dynamic friction of hierarchical surfaces". In: *Physical Review E* 94.6 (Dec. 2016).
- [65] James A Greenwood and JB Pl Williamson. "Contact of nominally flat surfaces". In: Proceedings of the royal society of London. Series A. Mathematical and physical sciences 295.1442 (1966), pp. 300–319.

- [66] Michael Nosonovsky and Bharat Bhushan. "Multiscale friction mechanisms and hierarchical surfaces in nano-and bio-tribology". In: *Materials Science and Engineering: R: Reports* 58.3-5 (2007), pp. 162–193.
- [67] H. Naumann, G. Schröder, and M. Löffler-Mang. Handbuch Bauelemente der Optik: Grundlagen, Werkstoffe, Geräte, Messtechnik; [Extra mit kostenlosem E-Book]. Hanser, Carl, 2014. ISBN: 9783446426252.
- [68] Digitalmikroskop: Funktionsweise & mehr KEYENCE Deutschland. https://www.keyence.de/ss/products/microscope/glossary/ cat1/digital_microscope/. Accessed in Mar 2021.
- [69] Wojciech Kapłonek et al. "Optical profilometer with confocal chromatic sensor for high-accuracy 3D measurements of the uncirculated and circulated coins". In: Journal of Mechanical and Energy Engineering 2.3 (Dec. 2018), pp. 181–192. ISSN: 25441671, 25440780.
- [70] Chromatic Confocal Surface Measurement NANOVEA. https:// nanovea.com/chromatic-confocal-old/. (Accessed on 03/23/2021).
- [71] DIN EN ISO 25178-602 Geometrische Produktspezifikation (GPS) Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 602: Merkmale von berührungslos messenden Geräten (mit chromatisch konfokaler Sonde). Norm. Jan. 2011.
- [72] W Lyda et al. "Advantages of chromatic-confocal spectral interferometry in comparison to chromatic confocal microscopy". In: *Measurement Science and Technology* 23.5 (Mar. 2012), p. 054009.
- [73] Stephen W Paddock. "Principles and practices of laser scanning confocal microscopy". In: *Molecular biotechnology* 16.2 (2000), pp. 127– 149.
- [74] Gabriele Reich. "Near-infrared spectroscopy and imaging: Basic principles and pharmaceutical applications". In: Advanced Drug Delivery Reviews 57.8 (2005). Non-Invasive Spectroscopic and Imaging Techniques in Drug Delivery, pp. 1109–1143. ISSN: 0169-409X.
- [75] Gabriele Reich. "Mid and Near Infrared Spectroscopy". In: Analytical Techniques in the Pharmaceutical Sciences. New York, NY: Springer New York, 2016, pp. 61–138. ISBN: 978-1-4939-4029-5.
- [76] Jack L. Koenig. "Fourier transform infrared spectroscopy of polymers". In: Spectroscopy: NMR, Fluorescence, FT-IR. Springer Berlin Heidelberg, 1984, pp. 87–154.

- [77] Alessio Ausili, Marina Sánchez, and Juan C. Gómez-Fernández. "Attenuated total reflectance infrared spectroscopy: A powerful method for the simultaneous study of structure and spatial orientation of lipids and membrane proteins". In: *Biomedical Spectroscopy and Imaging* 4.2 (2015), pp. 159–170. ISSN: 22128794.
- [78] Stefanie E Glassford, Bernadette Byrne, and Sergei G Kazarian. "Recent applications of ATR FTIR spectroscopy and imaging to proteins".
 In: Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Proteins and Proteomics 1834.12 (2013), pp. 2849–2858.
- [79] Iranthi M. Meththananda et al. "The relationship between Shore hardness of elastomeric dental materials and Young's modulus". In: *Dental Materials* 25.8 (2009), pp. 956–959. ISSN: 0109-5641.
- [80] H. Qi, K. Joyce, and M. Boyce. "Durometer Hardness and the Stress-Strain Behavior of Elastomeric Materials". In: *Rubber Chemistry and Technology* 76 (May 2003), pp. 419–435.
- [81] DIN EN ISO 868:2003-10 Kunststoffe und Hartgummi Bestimmung der Eindruckhärte mit einem Durometer (Shore-Härte). Norm. Oct. 2003.
- [82] J. Paulo Davim, ed. Measurement in Machining and Tribology. Springer International Publishing, 2019.
- [83] "Contact Between Solid Surfaces". In: Introduction to Tribology. John Wiley & Sons, Ltd, 2013. Chap. 3, pp. 91–155. ISBN: 9781118403259.
- [84] Heinrich Rudolf Hertz. "Über die Berührung fester elastischer Körper und über die Härte". In: Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbfleises, Berlin : Verein zur Beförderung des Gewerbefleisses 1882 (2006), pp. 449–463.
- [85] Omololu Akanji et al. "Micromachined structures for nonlinear ultrasonic transduction". In: 2013 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS). IEEE, July 2013.
- [86] Thomas Lehmann. "IR-Spektroskopie". Freie Universität Berlin, Institut für Chemie und Biochemie, Takustr. 3, 14195 Berlin. 2010.
- [87] Grundlagen der FT-IR-Spektroskopie BRUKER. URL: https:// www.bruker.com/de/products-and-solutions/infrared-andraman/ft-ir-routine-spectrometer/what-is-ft-ir-spectroscopy. html.

- [88] Loong Chuen Lee, Choong-Yeun Liong, and Abdul Aziz Jemain. "A contemporary review on Data Preprocessing (DP) practice strategy in ATR-FTIR spectrum". In: *Chemometrics and Intelligent Laboratory* Systems 163 (2017), pp. 64–75.
- [89] Tanya J Kerr, Keith L Duncan, and Leary Myers. "Application of vibrational spectroscopy techniques for material identification from fire debris". In: *Vibrational Spectroscopy* 68 (2013), pp. 225–235.
- [90] Magdalena Bisztyga et al. "Cathodic Behaviour of Nickel in Alcohol Solutions of Electrolytes". In: 207 (July 2016), pp. 1–8.
- [91] Interpretation von C,H,O-Verbindungen. URL: http://www.chemgapedia. de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/3/anc/ir_spek/cho_verbindungen. vlu/Page/vsc/de/ch/3/anc/ir_spek/schwspek/spektreninterpretation/ ir_13_4_1_1/n_alkane.vscml.html.
- [92] MM Khonsari, Sahar Ghatrehsamani, and Saleh Akbarzadeh. "On the running-in nature of metallic tribo-components: A review". In: Wear (2021), p. 203871.
- [93] In-Ha Sung, Hyung-Suk Lee, and Dae-Eun Kim. "Effect of surface topography on the frictional behavior at the micro/nano-scale". In: Wear 254.10 (2003), pp. 1019–1031.