



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Einfluss ausgewählter Druckparameter auf Form und Stabilität beim FDM-Verfahren

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
unter der Leitung von

Univ.Prof. F. Bleicher
E311

Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Stefan Schebesta
1125586
Mühlweg 111
3107 St. Pölten

Wien, am 12.06.2017

Kurzfassung

Die generativen Fertigungsverfahren, besser bekannt als 3D-Drucken, sind eine vielseitig einsetzbare und zukunftssträchtige Technologie. Aufgrund der Geometrieflexibilität sowie der schnellen und einfachen Fertigung geht die Verwendung des 3D-Druckens weit über den Prototypenbau hinaus. Es lassen sich fertige Endprodukte aus verschiedenen Kunststoffen aber auch aus Metallen zum Teil ohne Nachbearbeitung in immer größeren Stückzahlen herstellen.

Im Zuge dieser Masterarbeit wird ein sogenanntes Benchmark-Teil, also ein Vergleichsteil mit relevanten Geometrien, konstruiert und gefertigt. Relevante Geometrien können Gewinde, Überhänge, Fasen, Schriftzüge, Pyramiden, Zylinder, etc. sein. Diese werden auf einer Platte angeordnet, und zwar möglichst platzsparend, da die Druckzeit ein wesentlicher Faktor ist. Die Konstruktion erfolgt in einem beliebigen 3D-CAD Programm, die Daten werden mittels neutraler Schnittstelle (STL-Format) auf den 3D-Drucker überspielt und mit der druckereigenen Software zum Drucken vorbereitet. Der Druckvorgang erfolgt mit unterschiedlichen Parametereinstellungen. Diese Parameter sind die Düsentemperatur, die Bauraumtemperatur, die Ausrichtung des Bauteils im Bauraum sowie die Ausrichtung in der Ebene. Durch Variation dieser Parameter soll die optimale Einstellung für das verwendete Material gefunden werden. Da unterschiedliche Materialien einen starken Einfluss auf das Druckergebnis haben, muss jedes neue Material extra eingestellt werden. Das Benchmark-Teil wird durch optische und taktile Messverfahren vermessen, um Aussagen über die Genauigkeiten der Oberfläche und der Geometrien treffen zu können. Es werden die Geometrien auf eventuelle Druckfehler untersucht, außerdem werden die Rauheiten, Maße, Formen und Lagen zueinander gemessen. Nach Auswertung dieser Daten können die optimalen Druckparameter festgelegt werden.

Neben der optischen Untersuchung wird auch eine Festigkeitsüberprüfung durchgeführt, wozu die Konstruktion und Fertigung eines genormten Zugprüfstabs erfolgt. Dieses zweite Benchmark-Teil wird mit einer Zugprüfmaschine auf seine mechanischen Eigenschaften überprüft. Auch hier wird mit unterschiedlichen Parametereinstellungen gedruckt und danach bewertet. Man erhält somit die optimalen Parameter für die Festigkeit, welche nicht zwingend mit den optimalen geometrischen Parametern übereinstimmen müssen.

Wie groß der Unterschied zwischen den beiden optimalen Einstellungen ist, wird sich in den Versuchen zeigen. Das Ideal wäre natürlich die maximale Festigkeit sowie die beste Geometrie bei denselben Parametern. Der Einsatz der beiden entworfenen Benchmark-Teile soll nicht nur auf den vorhandenen Drucker am Institut begrenzt sein, vielmehr soll durch diese Teile die Möglichkeit bestehen, alle Arten von 3D-Druckern verfahrensunabhängig miteinander zu vergleichen.

Abstract

The generative manufacturing method, or simply 3D-printing, is a versatile and forward-looking technology. Due to the geometric flexibility as well as the fast and simple production, the use of 3D printing goes far beyond prototype construction. Finished end products made from different plastics as well as from metals without reworking can be produced in ever larger numbers.

In the course of this master thesis a so-called benchmark part, like a comparison part with relevant geometries, is constructed and manufactured. Relevant geometries can be threads, overhangs, chamfers, lettering, pyramids, cylinders, etc. Those are arranged on a plate, as space-saving as possible, because the printing time is a significant factor. The design is carried out in any 3D CAD program, the data is transferred to the 3D printer using a neutral interface (STL format) and prepared for printing using the provided software of the manufacturer. The printing process is carried out with different parameter settings. These parameters are the nozzle temperature, the installation space temperature and the alignment of the component in the installation space. By varying these parameters, the optimal setting for the respective material should be found. As different materials have a strong influence on the print result, each new material has to be adjusted separately. The benchmark part is measured by optical and tactile measuring methods, in order to be able to make statements about the accuracies of the surface and the geometries. The geometries are examined for possible printing errors, the roughness, dimensions, shapes and positions are also measured. After evaluation of these data, the optimal pressure parameters can be defined.

In addition to the optical examination, a strength test is also carried out. For this purpose, the design and production of a standardized tensile test rod is carried out. This second benchmark part is tested by a tensile testing machine for its mechanical properties. Here, too, different parameter settings are printed and evaluated. The optimum parameters for the strength are thus obtained, which need not necessarily coincide with the optimum geometric parameters.

How great the difference between the two optimal settings is, will be shown in the experiments. The most ideal would be the maximum strength as well as the best geometry with the same parameters. The use of the two designed benchmark parts is not only to be limited to the existing printer at the institute, but rather these parts should be able to compare all types of 3D printers with one another in a process-independent manner.

Vorwort

Gegen Ende des Studiums hat auch für mich die Suche nach einer passenden Masterarbeit begonnen. Die Wahl des Themas war natürlich sehr wichtig, es sollte unbedingt meinen Interessen entsprechen, da man sich für sehr lange Zeit damit beschäftigt. Ich habe mich bei der Suche auf die Institute beschränkt, welche mir am ehesten zusagen. Dabei bin ich recht schnell auf diese Masterarbeit gestoßen, die sich mit dem Thema 3D-Druck beschäftigt. Ich habe bereits seit längerer Zeit die Entwicklung der Technik des 3D-Druckens mitverfolgt und bewundert, da sie sehr interessant und vielseitig einsetzbar ist. Dazu beigetragen hat auch mein Freundeskreis, da hier bereits private 3D-Drucker im Einsatz sind und mir somit die Technik näher gebracht haben. Somit hatte ich also, unabhängig von der Universität, ein Grundwissen, welches mir für diese Diplomarbeit sicher hilfreich sein konnte. Dadurch war für mich nach dem ersten Gespräch mit Martin Fuchs klar, dass ich diese Arbeit aufgreifen möchte.

Der Umgang mit dem Drucker war einfacher als gedacht, hier ist die amerikanische Technik zu loben, die extra auf Benutzerfreundlichkeit zielt. Martin Trappl hat mich auf den Drucker eingeschult und stand bei Fragen und notwendigen Änderungen am Drucker stets zur Verfügung. Nach dem Abgang von Herrn Fuchs wurde Christoph Habersohn mein Betreuer, dieser hat mich ebenfalls tatkräftig unterstützt und mir den genauen Ablauf der Einzelheiten erklärt. Nach den Drucken, die größtenteils reibungslos verliefen, hat das Vermessen der Bauteile begonnen. Dazu wurde ich im Messlabor mit Michael Nirtl und später mit Johann Sauprigl bekannt gemacht. Von den beiden wurde mir der Umgang mit der optischen Messmaschine erläutert und ich konnte alle meine Teile selber vermessen. Bei späteren Messungen konnte ich jederzeit ohne Probleme die Messmaschine nutzen.

Für die Zugprüfung wurde die Zugprüfmaschine aus dem „Winterschlaf“ geweckt, da sie seit längerer Zeit nicht verwendet wurde. Mir wurde eine Bachelorarbeit bereitgestellt, welche sich mit der Inbetriebnahme der Maschine beschäftigt, dadurch konnte ich Schritt für Schritt die Zugversuche ausführen. Diese waren letztendlich auch kein großes Problem und verliefen fast fehlerfrei.

Zum Schluss möchte ich mich besonders bei meiner Freundin sowie meiner Familie bedanken, die mich immer tatkräftig unterstützt haben.

St. Pölten, am 12.06.2017

Stefan Schebesta

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	2
Abstract	3
Vorwort	4
Inhaltsverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis.....	7
1 Einleitung.....	8
2 Stand der Technik	9
2.1 Begriffsbestimmung.....	9
2.2 Generative Fertigungsverfahren im Produktentstehungsprozess.....	9
2.3 Geschichtliche Entwicklung	10
2.4 Grundlagen 3D-Druck.....	12
2.4.1 Erzeugung der Schicht.....	13
2.4.2 STL-Format.....	15
2.5 Generative Fertigungsverfahren	17
2.5.1 Stereolithographie.....	17
2.5.2 Selektives Lasersintern und Laserschmelzen (SLS).....	19
2.5.3 3D-Printing	20
2.5.4 Multi-Jet-Modeling (MJM).....	21
2.5.5 Laserauftragsschweißen	22
2.5.6 Schicht-Laminat-Verfahren (Layer-Laminate-Manufacturing, LLM)	23
2.5.7 Fused-Deposit-Modeling (FDM).....	24
2.6 Anwendungsgebiete	26
2.6.1 Brennerspitzen in Gasturbinen.....	27
2.6.2 Wasserpumpenräder in KFZ	28
2.6.3 Medizintechnik	28
3 Ziel der Arbeit	30
4 Methodik.....	31
5 Versuchsträger	32
5.1 Benchmark-Teil	32
5.1.1 Merkmale	33
5.1.2 Fertigung Benchmark-Teil.....	38
5.2 Zugstab	41
5.2.1 Grundlagen Zugversuch	41
5.2.2 Versuchsaufbau	43

5.3	Druckparameter	45
5.3.1	Düsentemperatur	45
5.3.2	Bauraumtemperatur	45
5.3.3	Bauteilausrichtung im Raum	45
5.3.4	Bauteilausrichtung in der Ebene	46
5.4	Versuchsplan.....	46
6	Geometrische Vermessung	48
6.1	Grundlagen.....	48
6.1.1	Rauheitsmessung	49
6.1.2	Form- und Lagetoleranzen.....	52
6.1.3	Koordinatenmesstechnik.....	53
6.2	Messmittel (Messaufbau)	55
6.2.1	Optische Messtechnik.....	55
6.2.2	Taktile Messtechnik	56
6.3	Ergebnisse optische Messungen.....	57
6.3.1	Resultate Türme	58
6.3.2	Resultate Welle	63
6.3.3	Resultate Rauchfang	66
6.3.4	Resultate Bohrungen und Sechskant.....	68
6.3.5	Resultate Vermessungsblock.....	71
6.3.6	Resultate der Zylinder	73
6.3.7	Resultate Überhang	75
6.3.8	Resultate der Gewinde	76
6.3.9	Resultate für die Halbkugel	77
6.3.10	Resultate der Pyramide	78
6.3.11	Resultate der Grundplatte.....	80
7	Analytische Vergleichsrechnung	83
8	Zugprüfung.....	90
9	Zusammenfassung	94
10	Literaturverzeichnis.....	95
	Abbildungsverzeichnis	97
	Formelverzeichnis	100

Abkürzungsverzeichnis

FDM.....	Fused-Deposit Modeling
FLM.....	Fused-Layer Modeling
STL.....	Standard Transformation Language
CAD.....	computer-aided design
mm.....	Millimeter
µm.....	Mikrometer
N.....	Newton
DT.....	Düsentemperatur
BRT.....	Bauraumtemperatur

1 Einleitung

Um einen erfolgreichen Produktionsprozess mittels generativen Fertigungsverfahren zu entwickeln, ist viel Erfahrung notwendig und es sind hohe Investitionskosten zu tätigen. Auch wenn die Preise für Einsteigermodelle bereits relativ gering sind (<1000€), so sind industrielle, hochwertige 3D-Drucker je nach Art des Druckverfahrens preislich nach oben nahezu unbegrenzt. Daher muss für jeden Einsatz genau überprüft werden, ob ein 3D-Drucker wirklich benötigt wird und wie die genauen Einsatzparameter lauten (Verfahren/Material/Genauigkeit/...).

Ist die Maschine gefunden, kann mit den Druckeinstellungen begonnen werden, was womöglich den schwierigsten Teil darstellt. 3D-Drucker ist nicht gleich 3D-Drucker, es spielen Faktoren der Druckerparameter selber, wie Drucktemperaturen und Vorschubgeschwindigkeiten, aber auch die Umgebungstemperatur und das Material eine wichtige Rolle. Genau hier setzt diese Diplomarbeit an. Es wird ein Benchmark-Teil mit möglichst vielen geometrischen Merkmalen entwickelt. Da der Drucker möglicherweise mit bestimmten Geometrien Probleme hat und andere wiederum ohne Fehler druckt, wird mit diesem Vergleichsteil ein großer Bereich abgedeckt. Als Merkmale gelten die Oberfläche, Genauigkeit, Rauheit und eventuelle Fehler in den Schichten, welche optisch überprüft werden. Damit ist nach der Herstellung sofort ersichtlich, ob der Drucker richtig eingestellt ist und gute Ergebnisse liefert. Ist dies nicht der Fall, müssen die Druckparameter geändert und der Druck erneut gestartet werden. Somit kann der verwendete Drucker richtig eingestellt werden und es liegen die für dieses Material optimalen Parameter vor. Für die Messung der Merkmale wird auf zwei verschiedene Arten der Messtechnik zurückgegriffen - die optische und die taktile Koordinatenmesstechnik. Mit je einer Maschine können alle relevanten Messdaten aufgenommen und ausgewertet werden.

Zusätzlich wird noch ein weiteres Benchmark-Teil für die Festigkeitsüberprüfung entwickelt, welches nur eine einfache Geometrie (Zugstab) hat. Dieses wird auch mit den verschiedenen Parametern gedruckt und in einer Zugprüfmaschine auf die Festigkeit getestet.

Am Institut ist der 3D-Drucker SST 1200es von der Firma Stratasys vorhanden. Dieser verwendet das von Stratasys patentierte Fused-Deposit-Modeling Verfahren (FDM). Mittlerweile ist das Patent ausgelaufen und der allgemeine markenrechtsfreie Name lautet Fused-Layer-Modeling (FLM), es wird aber trotzdem meistens vom FDM - Verfahren gesprochen.

2 Stand der Technik

2.1 Begriffsbestimmung

Das 3D-Drucken ist ein generatives Fertigungsverfahren, wozu alle Verfahren gehören, bei denen ein Bauteil durch Aneinanderfügen von Volumenteilen erstellt wird. Die Begriffe Generative Fertigungsverfahren sowie das englische Pendant Additive Manufacturing sind in Deutschland in der VDI 3403 und in den Vereinigten Staaten in der ASTM F2792 genormt, der Begriff 3D-Druck bzw. 3D-Printing hingegen nicht. Trotzdem wird letzterer immer häufiger verwendet, da dieser Begriff aussagekräftiger und einfacher zu vermitteln ist. In dieser Arbeit wird deshalb auch meistens vom 3D-Drucken und nicht vom generativen Fertigen gesprochen [1].

Neben diesen beiden Begriffen ist oftmals der Begriff Rapid Prototyping im Umlauf, welcher nur teilweise richtig ist. Denn das Rapid Prototyping, also die Herstellung eines Prototypen bzw. Modells, ist bereits eine weitere Unterteilung vom 3D-Drucken. Es spielt somit schon die Funktion des Bauteils eine Rolle für die Unterteilung: Rapid Prototyping für Modelle, Rapid Manufacturing für Funktionsbauteile und als Zwischengruppe Rapid Tooling für Werkzeuge, siehe Abbildung 1.

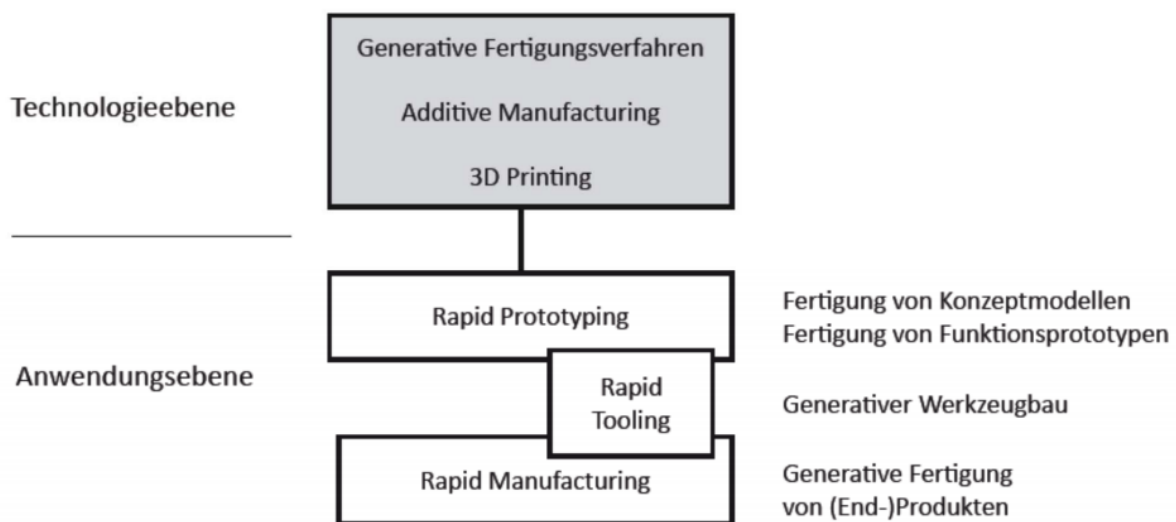


Abbildung 1: Einteilung der generativen Fertigungsverfahren [2]

Neben den genannten einzelnen Begriffen auf der Anwendungsebene kann man als Überbegriff Rapid Technology verwenden, welcher international anerkannt und gebräuchlich ist.

2.2 Generative Fertigungsverfahren im Produktentstehungsprozess

Wie im vorigen Kapitel bereits erwähnt, lassen sich die generativen Fertigungsverfahren in der Anwendungsebene unterteilen. Da der 3D-Druck in der Produktentwicklung eine immer wichtigere Rolle spielt, lassen sich die Fertigungsverfahren zu den Produktentwicklungsphasen zuteilen, siehe dazu Abbildung 2. In der frühen Phase wird daher eher auf den Prototypen- und Modellbau zurückgegriffen, gegen Ende der Produktentwicklung werden bereits fertige Endprodukte mittels 3D-Druck hergestellt.

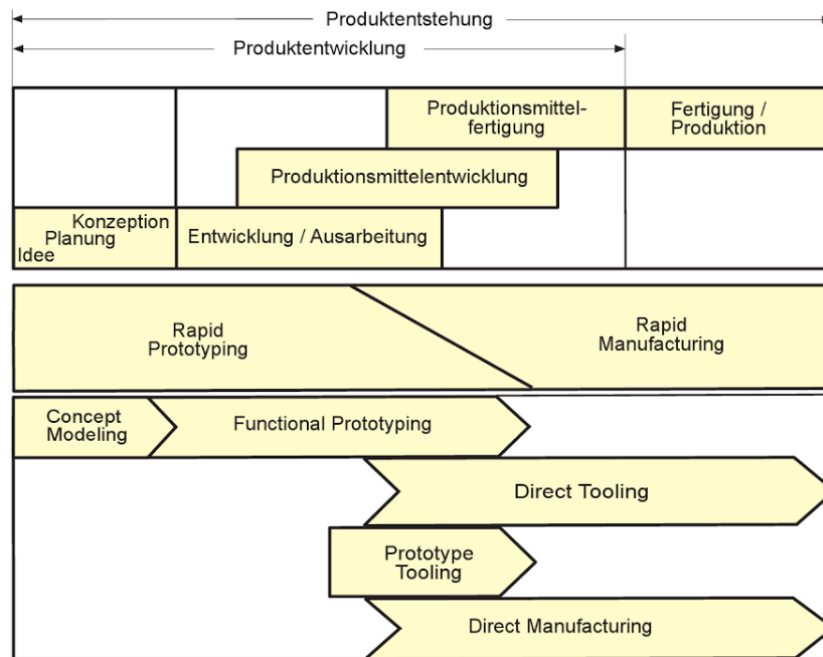


Abbildung 2: Produktentwicklungsphasen nach VDI 2221 [1]

In der Produktentwicklung ist das Rapid Prototyping, also die Herstellung von Prototypen mittels 3D-Drucker, ein sehr wichtiges Werkzeug. Durch die in der anfänglichen Produktentstehungsphase gefertigten Prototypen kann bereits sehr früh auf eventuelle Fehler eingegangen und diese sofort ausgemerzt werden. Da die Kosten einer Änderung zu Beginn der Planung erheblich niedriger sind, ist Rapid Prototyping aus wirtschaftlicher Sicht besonders interessant. Wird das gefertigte Bauteil hauptsächlich zur 3D-Visualisierung verwendet, nennt man es Concept Modeling, zum Testen der Funktionalität heißt es Functional Prototyping.

Weist das gefertigte Bauteil die Eigenschaften von Endprodukten (Serienprodukten) auf, so nennt man die Anwendung Rapid Manufacturing. Die Endprodukte können jegliche Bauteile in Einzelstücke oder in Kleinstserien (Direct Manufacturing) oder auch Werkzeuge bzw. Werkzeugeinsätze sein (Direct Tooling) [1].

2.3 Geschichtliche Entwicklung

Das Grundprinzip des 3D-Drucks geht bereits auf das Jahr 1860 zurück, als der Franzose François Willème ein Abbild von sich reproduzierte. Dazu fotografierte er sich von allen Seiten mit 24 Kameras gleichzeitig, schnitt danach jede Silhouette aus und fügte sie zusammen. Dadurch entstand ein stückweises Abbild von ihm, das an die heutige 3D-Druck Technik erinnert.

Fast ein Jahrhundert später, im Jahr 1951, hat Otto John Munz in den USA ein Patent für eine Maschine angemeldet, welche der heutigen Stereolithografie sehr ähnelt. Die Methode nannte er „Photo-Glyph Recording“, diese verwendete wie die Stereolithografie eine fotosensitive Flüssigkeit. Die Maschine erzeugte schichtweise dreidimensionale Bauteile, indem sie verschiedene Aufnahmebereiche durch eine Lichtquelle und einem Linsensystem kreierte.

Durch die Entwicklung des Lasers vom US-Amerikaner Theodore Maimann im Jahr 1960 wurde der Grundstein für die heutigen Verfahren der Stereolithografie und des selektiven Lasersinterns gelegt. Es gilt also die Stereolithografie als erstes Verfahren dieser neuen Technologie. Die amerikanische Firma 3D Systems, welche von Chuck Hull 1987 gegründet wurde, stellte ein Jahr später die erste Stereolithografie Maschine auf der Fachmesse „Autofact“ vor.

Im Jahr 1972 patentierte Pierre Alfred Ciraud ein „Verfahren zur Herstellung beliebiger Gegenstände“. Auf diesem basiert das heutige selektive Lasersintern. 1977 erfand W.K. Swainson einen Ansatz zum Lasersintern, wobei das Original grobflächig durch drei konzentrisch angeordnete Laserinterferometer vermessen wurde, da es noch keine CAD - Programme für virtuelle Modelle gab. Danach wurde die Kopie durch schichtweises Aufschmelzen der Pulver in der Lasersinteranlage erstellt, siehe Abbildung 3 [3].

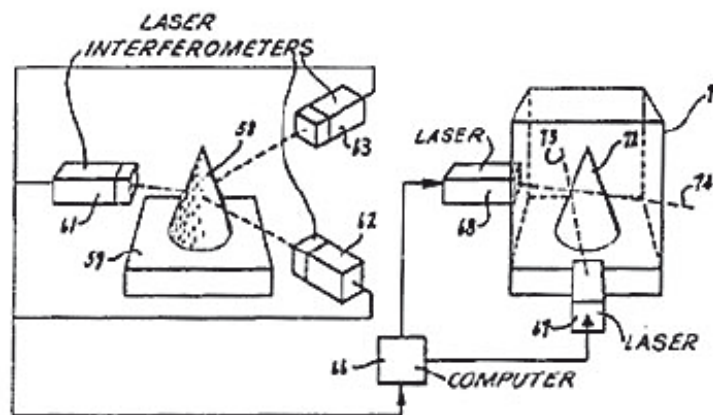


Abbildung 3: Schema Lasersinteranlage 1977 [3]

Der Amerikaner Ross F. Housholder patentierte 1979 eine Lasersintermaschine, die den heute eingesetzten in vielen Bereichen gleicht. Er konnte diese Maschine aber noch nicht kommerziell vermarkten. Dies gelang erst Dr. Carl Deckard von der University of Texas, welcher die Technologie bis zur Mitte der 80er Jahre weiterentwickelte [3].

S. Scott Crump kam auf die Idee des 3D-Druckens, als er einen Spielzeugfrosch für seine Tochter mit einer Leimpistole aus einer Mischung von Polyethylen und Kerzenwachs herstellte. Die Idee dahinter war der schichtweise Aufbau des Spielzeugs, außerdem überlegte er diesen Prozess zu automatisieren. Scott Crump gründete daraufhin gemeinsam mit seiner Frau die Firma Stratasys. Es wurde das Verfahren des Fused-Deposit-Modeling (FDM) entwickelt und patentiert. Im April 1992 wurde das erste Produkt von Stratasys verkauft, der 3D-Modeler [4].

All diese Entwicklungen und Patente haben zum heutigen Stand der Technik beigetragen. Es haben sich viele Firmen daraus entwickelt und die Verkaufszahlen steigen ständig. Zu Beginn war ein 3D-Drucker eine immense Investition, welche sich nur sehr schwierig amortisiert hat. Dies hat sich durch das Auslaufen des Patents für das Fused-Deposit-Modeling der Firma Stratasys im Jahre 2014 geändert. Denn ab diesem Zeitpunkt ist aufgrund des freien Zugangs zur Technik (Open Source) die Zahl

der 3D-Drucker rapide gestiegen und somit der Preis stark gefallen. So waren früher Drucker unterhalb eines 5-stelligen Eurobetrags nicht auszudenken - mittlerweile gibt es Einstiegermodelle um einige Hundert Euro. Es gibt eine Vielzahl an Herstellern und mittlerweile ist es sogar möglich, sich einen 3D-Drucker größtenteils selber zu drucken. Bekanntester Vertreter der reproduzierenden Drucker ist der RepRap, dabei steht der Name für Replicating Rapid Prototyper, welcher seine notwendigen Kunststoffteile selbst ausdrucken kann.

2.4 Grundlagen 3D-Druck

Alle gängigen generativen Fertigungsverfahren beruhen auf dem Prinzip, einen Bauteil durch schichtweises Aneinanderfügen von Volumenelementen zu erstellen. Die Schichtdicke ist jeweils gleich. Durch dieses Aufteilen des Bauteils ergibt sich eine Stufenform wie in Abbildung 4 ersichtlich. Je geringer die Schichthöhe gewählt wird, umso feiner werden die Stufen, welche aber nie komplett vermieden werden können.

Die Formgebung jeder einzelnen Schicht erfolgt 2-Dimensional in der X-Y - Ebene. Durch die Aneinanderreihung der Schichten ergibt sich die nicht kontinuierliche Z-Koordinate. Dadurch ist 3D-Drucken streng genommen ein 2 ½D - Verfahren. [1]

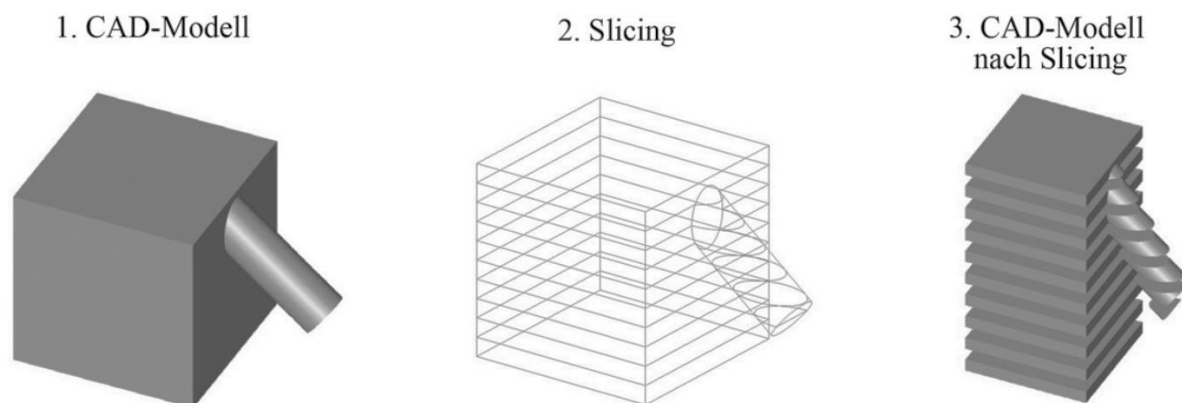


Abbildung 4: Prinzip Schichtbauverfahren [5]

Die Positionierung der formgebenden Elemente, wie z.B. einer Düse, erfolgt je nach Druckverfahren unterschiedlich und wird später erläutert. Ebenso sind die Schichtdicken und Genauigkeiten zwischen den Verfahren verschieden. So können Maschinen für Mikrobauerteile Schichten bis zu 5 Nanometer herstellen, wogegen bei größeren Maschinen Dicken von mehr als 0,2 mm zur Verkürzung der Bauzeit möglich sind.

Die prinzipbedingte Stufung muss bei der Konstruktion berücksichtigt werden: Falls wichtige geometrische Details in der Schichtebene liegen, muss überprüft werden, ob die Stufung nicht zu Fehlern führt. In Abbildung 5 ist dies anhand einer Bohrung zu sehen, einmal in der Schichtebene und einmal senkrecht dazu. So kann der Stufeneffekt durch Änderung der Achsausrichtung und somit der Fehler vermieden werden. Dieser Effekt soll durch die Wahl verschiedener Ausrichtungen auch bei den Benchmark-Teilen überprüft werden.

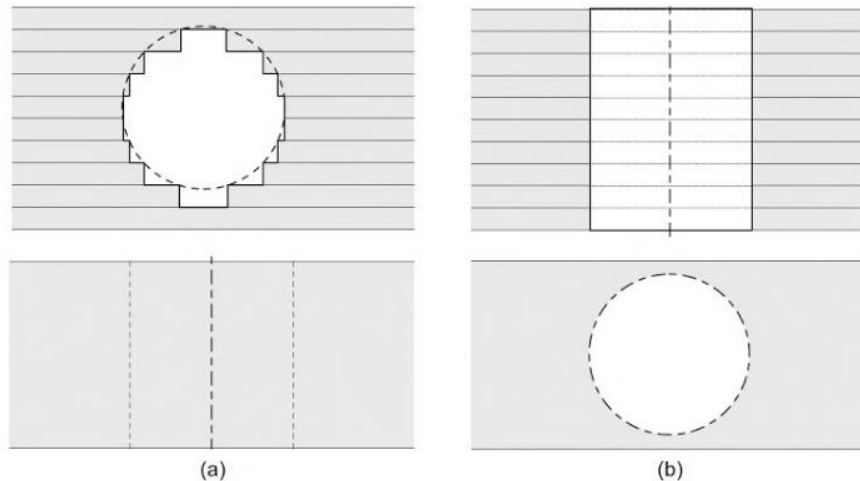


Abbildung 5: Stufenschichtung am Beispiel einer Bohrung: (a) in der Schichtebene; (b) senkrecht zur Schichtebene [1]

2.4.1 Erzeugung der Schicht

Um ein fertiges dreidimensionales Bauteil mittels 3D-Drucker herzustellen, sind drei Teilschritte notwendig:

1. dreidimensionale Beschreibung der Geometrie
2. Erzeugung der Schichtinformationen der einzelnen Schichten
3. Umsetzung dieser Informationen und Erzeugung des Bauteils

Die Erstellung der Geometrie erfolgt üblicherweise durch Konstruktion in 3D-Zeichenprogrammen. Hier kann das Bauteil direkt gezeichnet werden und es liegt ein vollständiges 3D - Volumenmodell vor. Dies ist notwendig, um ein Bauteil 3D-Drucken zu können. Neben der direkten Konstruktion kann die Geometrie auch aus verschiedensten Messungen wie von einem 3D-Scanner oder aus einem Computertomographie Scanner (CT) stammen. Dabei werden die Geometriedaten mit einer Daten-Schnittstelle an die Maschine übergeben. Hierzu werden meistens neutrale Schnittstellen verwendet. Hier hat sich das STL(Standard Transformation Language)-Format weltweit etabliert - heutige 3D-Drucker werden fast ausschließlich mit diesem Dateiformat angesteuert, dazu mehr im nächsten Kapitel. Neben dem STL - Format kann die dreidimensionale Geometrie auch durch andere neutrale Schnittstellen wie IGES (Initial Graphics Exchange Specification) oder STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data) übergeben werden.

Neben den Geometriedaten sind für einen erfolgreichen 3D-Druck noch zusätzliche Informationen bezüglich Material, Verfahren und der Anlage notwendig. Diese werden mit mitgelieferten Programmen vom Hersteller festgelegt (Frontend Software) oder mit Programmen von unabhängigen Dritten (Third-Party Software). Die zusätzlichen Informationen wie die Orientierung und Platzierung des Bauteils im Bauraum sowie die optimale Baurichtung aber auch notwendige Hilfsstrukturen wie Stützen werden beim sogenannten Slicen festgelegt. Hierbei wird neben den zusätzlichen Informationen die gesamte Bauteilhöhe in konstante Schichtdicken unterteilt, somit virtuell geschnitten. Üblicherweise wird das gesamte Bauteil gesliced und danach abgearbeitet. Das Slicen kann aber auch für jede Schicht direkt vor dem 3D-Druck erfolgen. Das lag früher an

der geringeren Speicherkapazität der Rechner, heute gibt es adaptive Slice-Verfahren mit einer stetigen Höhenmessung während des Druckprozesses und Anpassung der Schichtstärke. Dadurch wird der Baufehler in Z-Richtung verringert, der sich sonst durch das Fehlerfortpflanzungsgesetz bei größerer Bauhöhe stetig steigert. Nach dem Slicen liegt das Bauteil mit konstanten Schichtdicken und allen notwendigen Informationen vor und ist bereit zur generativen Fertigung [1].

Der gesamte Informationsverlauf ist nochmal in Abbildung 6 ersichtlich - von den 3D - CAD - Daten bishin zu den fertigen Daten für den 3D-Drucker.

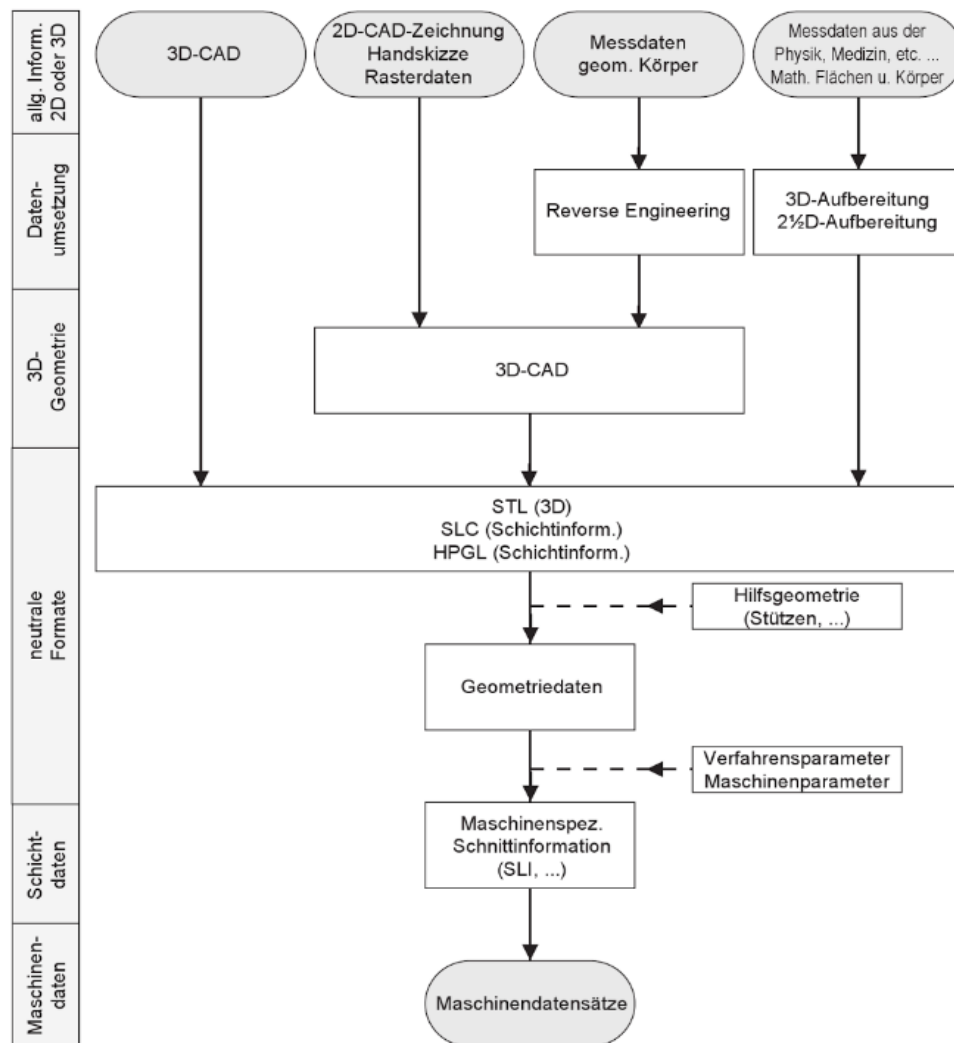


Abbildung 6: Datenwege 3D-Druck [1]

Nachdem die dreidimensionale Geometrie mittels systemneutralen Format auf den 3D-Drucker gespielt und dort das Bauteil durch die druckerspezifische Software gesliced wurde, kann nun die physikalische Erzeugung der Schichten erfolgen. Dies erfolgt bei Generativen Fertigungsverfahren generell in zwei Teilschritten:

1. Erstellung der ebenen Schicht in der X-Y-Ebene
2. Erzeugung der Z-Richtung durch Verbinden der aktuellen Schicht mit der vorhergehenden.

Diese zwei Teilschritte erfolgen bei den meisten Verfahren in der gleichen Weise, das heißt, der Aufbau in X-Y-Richtung ist technisch gleich dem Aufbau in Z-Richtung. Die Energie, die notwendig ist, um die Teilchen zu verbinden, wird dabei so bemessen, dass nicht nur die ebene Schicht selber, sondern auch ein Teil der vorherigen Schicht beeinflusst wird und die beiden Schichten dadurch verbunden werden. Für diese Schichterzeugung gibt es mehrere unterschiedliche physikalische Verfahren, die anhand dem Aggregatzustand des Ausgangsmaterials differenziert werden können. Dabei ist der Zustand entscheidend, in dem das Material in die Maschine eingebracht wird. Im Folgenden sind diese Verfahren laut [1] kurz aufgezählt:

1. Generieren aus der flüssigen Phase
 - Verfestigung flüssiger bzw. teigiger Materialien (Stereolithographie, Polymerdrucken)
2. Generieren aus der festen Phase
 - An- oder Aufschmelzen mit anschließender Verfestigung von Pulvern, Granulaten oder Pulvermischungen (Sinter- und Schmelzverfahren)
 - Ausschneiden oder Ausfräsen aus Folien, Bändern oder Platten (Schicht-Laminat-Verfahren)
 - An- oder Aufschmelzen und Verfestigen von festen Materialien (Extrusionsverfahren)
 - Verkleben von Granulaten oder Pulvern durch Binder (3D Printing-Verfahren)
3. Generieren aus der Gasphase
 - Physikalisches Abscheiden aus Aerosolen
 - Chemisches Abscheiden aus der Gasphase.

Im Zuge dieser Arbeit wird nur auf das Extrusionsverfahren eingegangen, da das verwendete FDM - Verfahren auf diesem Prinzip beruht. Die Beschreibung dieses Verfahrens erfolgt im Kapitel 2.5.7.

2.4.2 STL-Format

Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, muss zur generativen Fertigung eines Bauteils die dreidimensionale Geometrie in einzelne, gleich dicke Schichten zerlegt werden. Dieses Slicen kann dabei auf zwei Arten erfolgen: Durch Triangulation, was zum STL-Format führt, oder direkt im CAD, das zum CLI- (SLI-) Format führt. Da heutzutage fast ausschließlich das STL-Format Verwendung findet, wird in dieser Arbeit nur jenes beschrieben.

Beim STL-Format wird die komplette Geometrie mit ebenen Dreiecken unterschiedlicher Größe überzogen. Je nach Größe der Dreiecke ergibt sich eine bestimmte Annäherung an die echte Form, die entsprechend der Genauigkeit Rechenleistung benötigt. Diese Beschreibung durch Dreiecke nennt man Triangulation bzw. Tessellation. Für jedes dieser Dreiecke sind im Datensatz die Koordinaten der Eckpunkte und die Flächennormale beschrieben. Anhand des Normalenvektors der Dreiecksfläche erhält sie eine Richtungsinformation, wodurch bestimmt werden kann, ob die Fläche nach außen oder innen zeigt. Die Speicherung der Informationen kann als binäre Datei oder als ASCII Datei erfolgen. Speichereffizienter ist das binäre

Format, jedoch lassen sich aus dem ASCII - Quellcode leichter Informationen herauslesen und somit besser handhaben. In Abbildung 7 ist eine Dreiecksfläche mit zugehörigen ASCII Code ersichtlich.

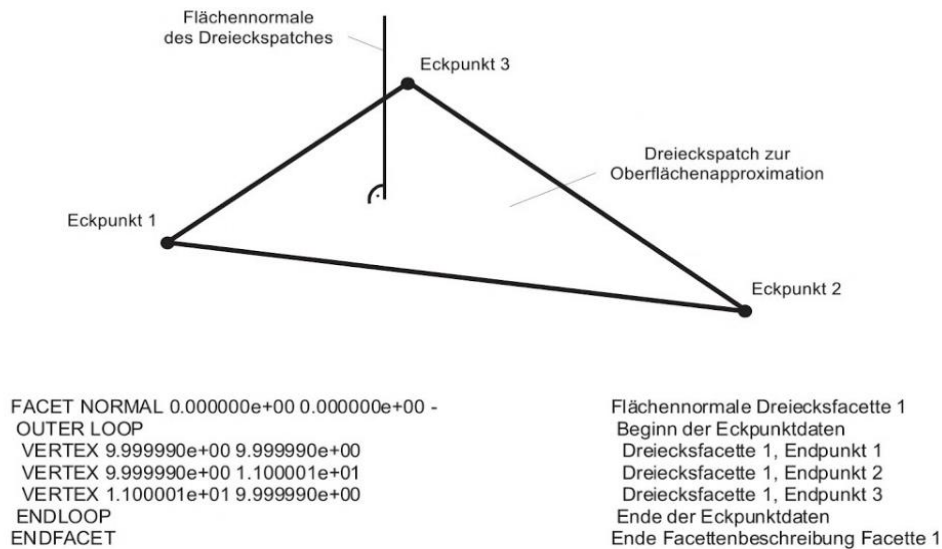


Abbildung 7: Dreieckelement mit zugehörigen ASCII Code [1]

Das STL-Format hat sich als standardmäßiges Format im 3D-Druck - Bereich etabliert, obwohl es nirgends genormt oder standardisiert ist. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass es bereits lange vor dem Aufkommen der 3D-Drucker zur Schattierung und Visualisierung von 3D-Gittermodellen diente. Die Schnittstellenformulierung wurde früh veröffentlicht und stand für jedermann frei zur Verfügung. Es konnten somit die Maschinenhersteller selbst als auch freie Programmierer auf dieses Format zurückgreifen und verwenden. Dadurch wurde eine große Anzahl unterschiedlicher (Spezial-) Software entwickelt, die von unabhängigen Entwicklern angeboten wurde und die der gesamten Branche zu Gute gekommen sind [1].

In Abbildung 8 ist anhand eines Beispiels die Triangulation durch Dreiecke und das vorhergehende CAD - Modell ersichtlich.

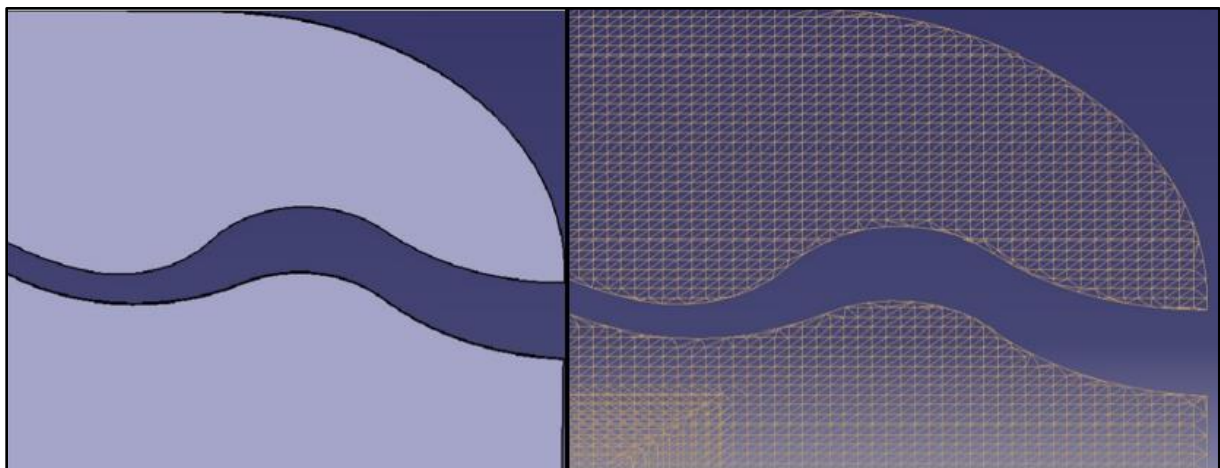


Abbildung 8: CAD - Modell mit zugehöriger Triangulation

Zu den Vorteilen des STL-Formats sei gesagt, dass durch die geometrische Beschreibung durch Dreiecke ein Schneiden in Z-Richtung an jeder beliebigen Position möglich ist. Dies ist für das Slicen von wichtiger Bedeutung, außerdem kann dies ohne dem verwendeten CAD - Programm geschehen. Durch diese Systemunabhängigkeit kann auf nahezu jedem üblichen 3D - Konstruktionsprogramm die Geometrie erzeugt und durch das STL-Format auf den 3D-Drucker überführt werden. Die erzeugte STL - Datei lässt sich danach auch beliebig skalieren, ohne Rückführung auf die originale Geometrie im CAD. Die Schnittstelle beschränkt sich nur auf Datenelemente eines Typs (Binär bzw. ASCII), daher ist die Beschreibung der Elemente relativ einfach und Fehler sind beim ASCII - Code leicht erkennbar. Diese Fehler lassen sich danach mit wenig Aufwand beheben, solange sie sich in Grenzen halten.

Als Nachteil der STL - Beschreibung sei natürlich der erhöhte Datenaufwand bei Verfeinerung des Netzes erwähnt. Es muss die Genauigkeit in Abhängigkeit der Rechenleistung abgeschätzt werden. Da die Genauigkeiten aber durch den 3D-Drucker sowie das Verfahren beschränkt sind, ist die Rechenleistung in den meisten Fällen ausreichend. Ein weiterer Nachteil ist neben den vorhandenen Geometrieinformationen das Fehlen von zusätzlichen Informationen wie Material, Farbe, Texturen und andere Bauteileigenschaften.

2.5 Generative Fertigungsverfahren

Wie in Abbildung 9 ersichtlich, gibt es eine große Anzahl von unterschiedlichen generativen Fertigungsverfahren. Im Folgenden werden die grundsätzlich verwendeten Verfahren kurz beschrieben. Es gibt noch einige weitere 3D-Druck - Verfahren, welche auf den hier Erwähnten basieren und auf welche daher nicht eingegangen wird. Da hier nur ein Überblick gegeben wird und der 3D-Drucker am Institut mit dem FDM-Verfahren druckt, erfolgt die genaue Beschreibung von jenem in Kapitel 2.5.7.

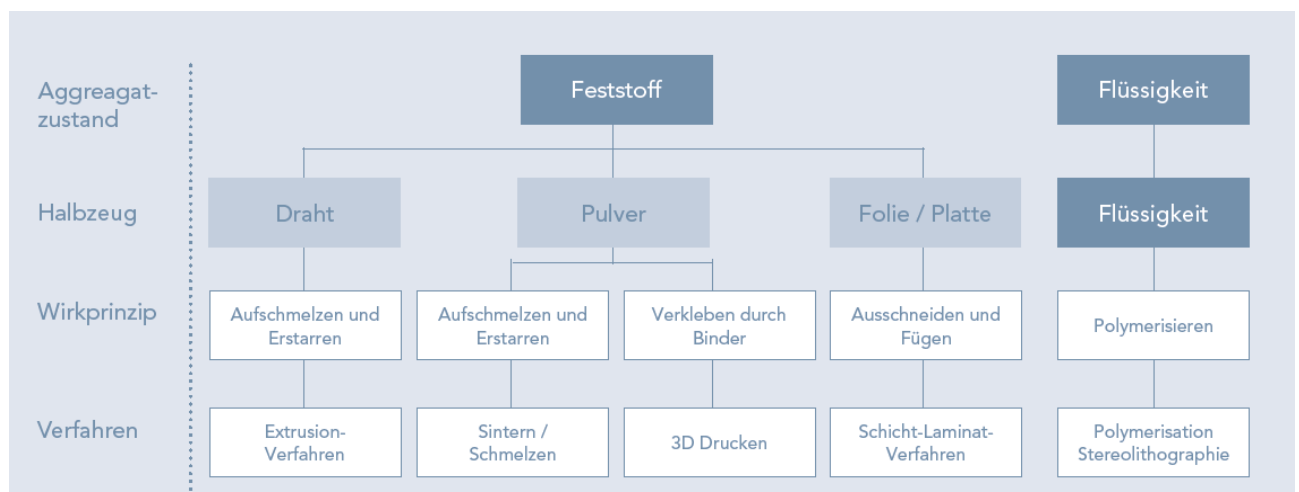


Abbildung 9: Übersicht der generativen Fertigungsverfahren [6]

2.5.1 Stereolithographie

Wie bereits vorher erwähnt, war die Stereolithographie das erste in der Industrie eingesetzte Verfahren. Es basiert auf der Aushärtung eines lichtempfindlichen Kunstharzes durch UV-Lichtquellen. Dies geschieht in den meisten Fällen durch einen

Laser, daher kommt der Name Laser-Scanner-Verfahren. Daneben gibt es noch das Maskenverfahren und das Druckkopf-Lampe-Verfahren, welche jedoch nur untergeordnete Bedeutung haben und hier nicht behandelt werden. Das Verfahrensprinzip der Stereolithographie ist in Abbildung 10 ersichtlich. Der gesamte Bauraum ist mit einem flüssigen Monomer gefüllt. Dieses wird punktwise durch einen abgelenkten Laserstrahl ausgehärtet. Die Aushärtung erfolgt durch die Polymerisation des photosensitiven Monomers durch Belichtung des Lasers. Nachdem die gewünschten Punkte (Flächen) in der Schicht fertig ausgehärtet sind, wird die ganze Bauplattform in der Z-Richtung um genau eine Schichtdicke gesenkt und die nächste Schicht kann gefertigt werden. Dazu wird mit einem speziellen Wischsystem das neue Harz gleichmäßig auf der Fläche aufgetragen und der Vorgang beginnt von vorne. Neben dem eigentlichen Bauteil können auch direkt Stützstrukturen erzeugt werden, die nach Beendigung des Bauprozesses einfach entfernt werden können. Somit ist eine Konstruktion von Überhängen sowie beweglichen Teilen möglich. Grundsätzlich ist das Verfahren zweistufig: Das Bauteil wird in der Maschine wie beschrieben gefertigt und mit einem hohen Prozentsatz (>95%) vernetzt. Dieser sogenannte Grünling wird anschließend mit Lösungsmitteln gereinigt und durch starke UV - Beleuchtung in einer Kammer (Post Curing Oven) vollständig ausgehärtet.

Die Stereolithographie zeichnet sich durch eine hohe Genauigkeit aus, und gilt somit als das genaueste generative Fertigungsverfahren. Verwendete Materialien waren früher allesamt transparent oder transluzent, mittlerweile sind viele undurchsichtig. Transparenz kann in speziellen Fällen gewünscht sein (Strömungsuntersuchungen), meistens wird diese jedoch als störend empfunden. Nachteilig ist die Notwendigkeit der Verwendung eines photosensitiven Materials, was vor allem spezielle Harze mit eher schlechteren mechanischen Eigenschaften sind. Das nicht ausgehärtete Material (Monomer) kann nach dem Fertigungsprozess größtenteils erneut verwendet werden. Dieses flüssige Monomer gilt als Sondermüll, das ausgehärtete, polymerisierte Material kann jedoch als Hausmüll behandelt werden [7].

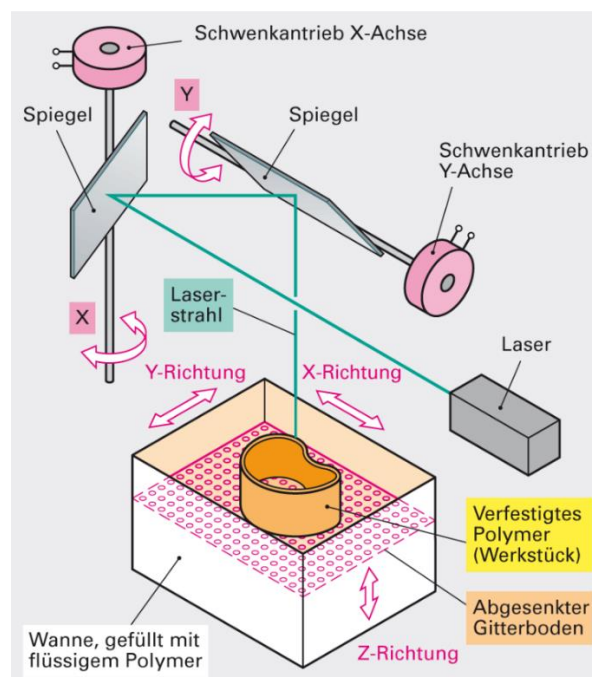


Abbildung 10: Prinzip der Stereolithographie [7]

2.5.2 Selektives Lasersintern und Laserschmelzen (SLS)

Beim selektiven Lasersintern/-schmelzen liegt als Grundstoff ein pulverförmiges Ausgangsmaterial vor. Dieses, vom jeweiligen Prozess abhängige, unterschiedlich dicht gepackte Pulver mit einem Durchmesser von 20 bis maximal 100 μm wird mithilfe eines Lasers, Elektronenstrahls oder eines Infrarotstrahls leicht auf- oder angeschmolzen. Durch die Abkühlung infolge der Wärmeleitung erstarrt das Pulver und verbindet sich zu einer festen Schicht. Nachdem eine Schicht komplett gefertigt wird, senkt sich das Maschinenbett um eine Schichtdicke und neues Pulvermaterial wird auf der gesamten Fläche verteilt (siehe Abbildung 11). Danach beginnt der Prozess von vorne. Der Bauraum ist so konstruiert, dass das Baumaterial bis knapp unterhalb der Schmelztemperatur vorgeheizt werden kann. Dadurch muss der Laser/Elektronenstrahl/Infrarotstrahl nur noch eine kleine Energiemenge aufbringen, um das Pulver zu schmelzen. Nach dem eigentlichen Sintern muss das Bauteil noch abschließend behandelt werden (Post-Processing): das anhaftende überschüssige Pulver wird nach ausreichender Abkühlung entfernt, danach erfolgt eine weitere Oberflächenbehandlung (Sandstrahlen, Schleifen).

Da im Vergleich zu Stereolithographie das Material durch die Wärmeenergie aufschmilzt und sich so verbindet und nicht durch die photosensitive Polymerisation, ist ein viel größerer Materialbereich verwendbar. Somit lassen sich neben Thermoplasten auch Metalle sowie keramische Werkstoffe herstellen. Bei leicht oxidierenden Metallen kann zur Vermeidung der Oxidation mit Schutzgas gearbeitet werden. Dabei wird mit Argon-Wasserstoff oder Stickstoff-Wasserstoff-Gasgemischen gearbeitet. Nebenbei kann auf Stützstrukturen weitestgehend verzichtet werden, da das nicht aufgeschmolzene Pulver selbst als Stütze wirkt und nach dem Prozess einfach entfernt wird. Nur bei metallischen Bauteilen werden zum Abbau von thermisch induzierten mechanischen Spannungen Stützstrukturen verwendet. Das thermisch unbelastete Pulver kann auch teilweise wiederverwendet werden - Polyamidpulver hat eine Recycling-Rate von 30-50%, Metallpulver kann sogar bis zu 100% wiederverwertet werden. Als Nachteil sei die durch Größe der Pulverteilchen und des Strahldurchmessers geringere Genauigkeit genannt, weswegen die Stereolithographie ein genaueres Verfahren ist. Nebenbei können durch die Wärmeleitung zusätzliche, außerhalb des eigentlichen Bauteils befindliche, unerwünschte Pulverpartikel erhitzt und so an das Bauteil gefügt werden. Dadurch hat das Bauteil falsche geometrische Daten. Dieses Verhalten hängt vom Verhältnis zwischen eingebrachter Energie und Wärmeleitfähigkeit ab. Die Oberflächen sind beim SLS relativ rau, dies gilt vor allem für amorphe Kunststoffe, da diese beim Anschmelzen ihre Form beibehalten. Metalle oder kristalline Kunststoffe, die komplett schmelzen, haben glattere Oberflächen, neigen aber zu Grübchenbildung und sind dadurch ebenfalls vergleichsweise rau. Die Dichtheit der Bauteile spielt vor allem bei amorphen Kunststoffen eine wichtige Rolle, da aufgrund der drucklosen Fertigung große Hohlräume entstehen. Diese wirken sich negativ auf die Bauteileigenschaften aus. Metallbauteile oder kristalline Kunststoffe sind nahezu vollständig dicht, dafür kann aufgrund der thermischen Volumenänderung eine nicht unerhebliche Schwindung entstehen, somit ein Schrumpfen der Bauteile. Zum Ausgleich müssen die Bauteile anhand von Erfahrungswerten dementsprechend größer konstruiert werden [1, 7].

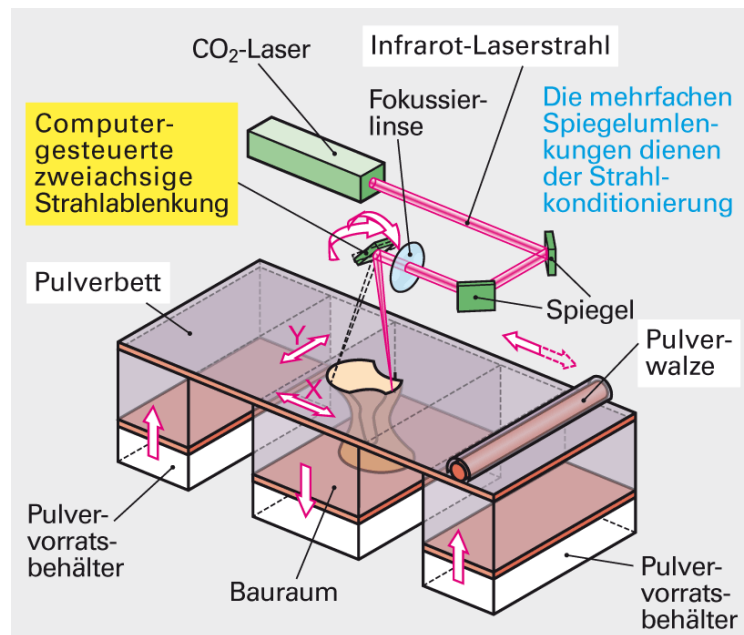


Abbildung 11: Prinzip beim selektiven Lasersintern/Laserschmelzen [7]

Die auf diesem Prinzip basierenden Maschinen haben durch ihre aufwendige Technik (Lasertechnologie, Schutzgas-Atmosphäre) einen sehr hohen Preis, weshalb sie für den privaten Gebrauch ungeeignet sind. Bei industriellen Anwendungen kann der gesamte Druckprozess mit dazugehörigen Werkstoffkreislauf komplett automatisiert werden. Hier sind neben der zentralen 3D-Druck - Maschine zusätzliche Module vorhanden, die automatisch das alte Pulver sieben, mit dem neuen Pulver wieder in die Maschine zuführen sowie das Bauteil entfernen. Damit ist es möglich, serienmäßige Endprodukte auch für größere Stückzahlen herzustellen [1, 8].

2.5.3 3D-Printing

Beim 3D-Printing (Dreidimensionales Drucken) erfolgt der Schichtaufbau durch Verbindung eines pulverförmigen Ausgangsmaterials durch ein Bindemittel. Wie der Name bereits sagt, ist dieses Verfahren eng mit den 2D-Druckverfahren, z.B. Tintenstrahldrucken, verwandt. Der 3D-Drucker besteht dabei aus zwei bzw. drei Kammern (siehe Abbildung 12): dem eigentlichen Bauraum für die Herstellung des Bauteils, einem Vorratsbehälter für das Pulver und eventuell noch einem Überlaufbehälter. Die Wischeinheit drückt das Pulver von der Vorratskammer in den Bauraum und verteilt es gleichmäßig. Überschüssiges Pulver kommt in den Überlaufbehälter. Durch einen Tintenstrahl-Düsenkopf, welcher in der X-Y-Ebene beweglich ist, wird das Bindemittel aufgetragen und somit das Bauteil erzeugt. Nach Beendigung der aktuellen Schicht senkt sich die Bauteilplattform um eine Schichtdicke und die Vorratsplattform wird angehoben; der Prozess beginnt von neuem.

Da Bindemittel für die meisten Werkstoffe vorhanden sind, lassen sich alle möglichen Materialien verwenden. So können neben Polymerpulver auch Metall- oder Keramikpulver verarbeitet werden, aber auch Lebensmittel oder pharmazeutische Wirkstoffe. Hier sind, ebenso wie bei den vorher genannten Verfahren, keine Stützstrukturen notwendig, da das nicht gebundene Pulver diese Funktion übernimmt. Es können im selben Bauteil lokal unterschiedliche mechanische Eigenschaften

erzeugt werden. Dazu wird durch den Düsenkopf ein für die jeweilige Eigenschaft entsprechender Binder verwendet.

Das 3D-Printing ist in den meisten Fällen ein zweistufiges Verfahren. Nach dem Fertigungsprozess liegt ein sogenanntes „Grünteil“ vor, welches noch zu einem großen Teil aus Porosität und Bindemittel besteht. Deswegen wird im zweiten Prozessschritt das Bauteil gesintert. Bei dieser thermischen Behandlung wird der Binder entfernt und das Bauteil erreicht die gewünschten Eigenschaften. Hier ist wegen dem Verzug und der Schrumpfung auf die Einhaltung der Toleranzen zu achten. Die 3D-Printing - Maschinen an sich sind sehr robust, dies gilt jedoch nur bedingt für die Drückköpfe. Bei einer großen Anzahl an Druckköpfen mit vielen Düsen besteht eine große Chance eines Ausfalls für den Gesamtkopf [1, 8].

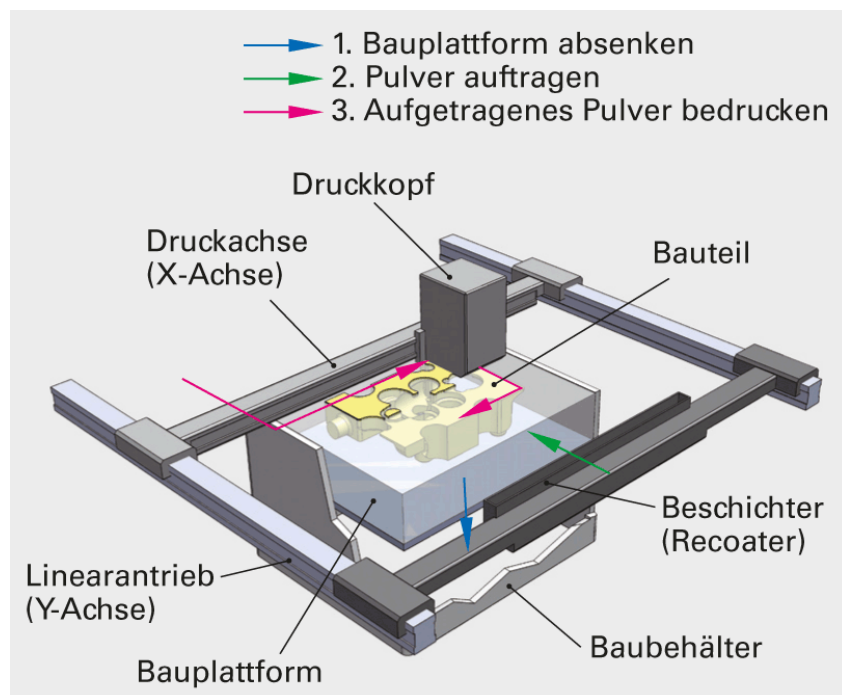


Abbildung 12: Prinzip beim Verfahren 3D-Printing [8]

2.5.4 Multi-Jet-Modeling (MJM)

Auch dieses Verfahren gleicht vom Prinzip her einem standardmäßigen Tintenstrahldrucker. Es ist ein Druckkopf vorhanden, welcher sich im Gegensatz zum Tintenstrahldrucker in X- und in Y-Richtung bewegen lässt. Mithilfe dieses Druckkopfes wird das flüssige Material auf der Bauplattform platziert, wo es mittels UV-Licht polymerisiert und aushärtet. Dazu sitzen auf dem Druckkopf UV-Lampen, wie in Abbildung 13 ersichtlich, die mit diesem mitbewegt werden. Die Bauplattform ist in Z-Richtung beweglich und wird nach Abschluss einer Schicht um eine Schichtdicke gesenkt. Da bei diesem Verfahren nur UV-Lampen anstatt eines Lasers verwendet werden, kommen als Baumaterial Acrylate in Verwendung, da diese eine höhere Reaktivität mit UV-Strahlen im Gegensatz zu Epoxidharzen aufweisen.

Beim Multi-Jet-Modeling ist bei Überhängen eine Stützstruktur notwendig, welche durch eigene Düsen erzeugt wird. Die Stützstruktur besteht dabei entweder aus einem niedrig schmelzenden Wachs oder aus dem Baumaterial selbst in nadelartigen,

dünnen Stützen. Das Stützmaterial muss nach dem Druck entfernt werden. Dies muss entweder mechanisch (Stütze aus Baumaterial) oder thermisch (Wachs aufwärmen und abschmelzen) erfolgen. Materialtechnisch ist hier auch eine Beschränkung vorhanden, da nur UV-empfindliche Kunststoffe verwendet werden können [9].

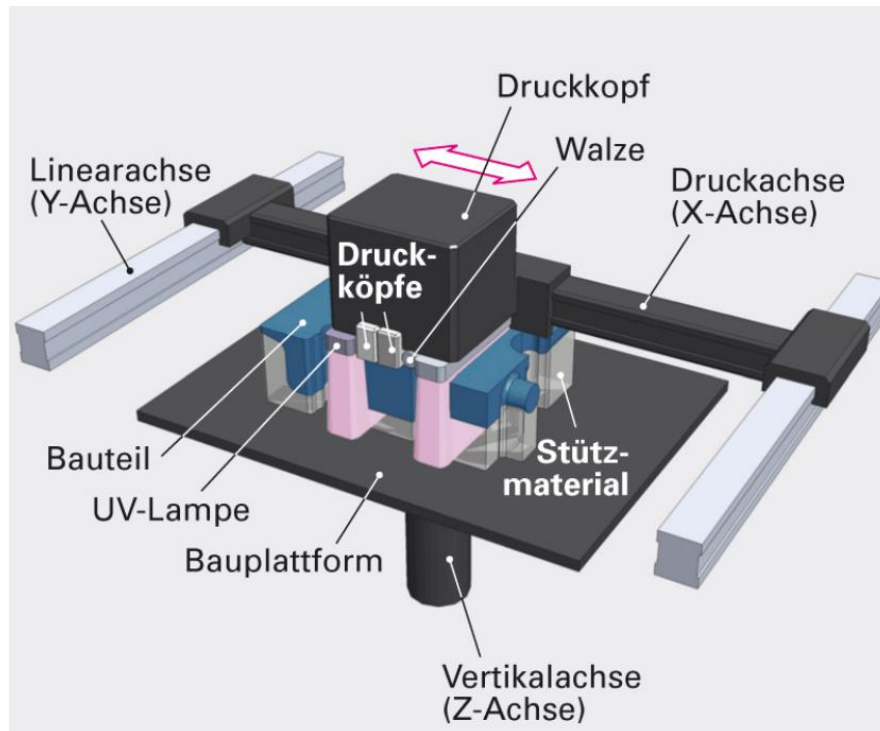


Abbildung 13: Prinzip beim Multi-Jet-Modeling [7]

2.5.5 Laserauftragsschweißen

Bei diesem Verfahren wird der Werkstoff in Drahtform oder in Pulverform durch Düsen direkt an die gewünschte Stelle gebracht und dort lokal durch einen Laserstrahl vollständig aufgeschmolzen. Dieses Prinzip, wie es in Abbildung 14 ersichtlich ist, wird auch als Laser-Generieren, Laser Cladding oder einfach nur Beschichten mit Laserstrahlung bezeichnet. Zusätzlich wird eine lokale Schutzgasatmosphäre geschaffen. Dazu wird das Schutzgas entweder durch eine oder mehrere eigene Düsen bzw. direkt durch die Werkstoffdüse zugeführt. Die Schichtbildung erfolgt durch die Erstarrung des geschmolzenen Werkstoffes aufgrund der Wärmeleitung in das Bauteil. Als Materialien kommen Metalle und Keramiken zum Einsatz. Dabei kann auf eine Vielzahl von Legierungen zurückgegriffen werden. Bei Verwendung von Pulvermaterial kann die Zusammensetzung durch Anpassen der Pulvermischung relativ leicht geändert werden, bei Drahtwerkstoffen muss ein entsprechender Schweißdraht zur Verfügung stehen. Im Gegensatz zu den anderen Verfahren ist dieses nicht auf die schichtweise Abarbeitung des Bauteils begrenzt. Es ist voll 3D-fähig und kann somit einzelne Strukturen zuerst komplett in Z-Richtung fertigen, bevor es die restlichen Schichten fertigt. Außerdem können damit auch Teile von Bauteilen repariert werden. Die erzeugten Bauteile weisen eine hohe Dichte auf (im Allgemeinen 100%), eine mechanische Nachbearbeitung zur Erreichung der gewünschten Oberfläche ist oftmals notwendig. Bei diesem Verfahren spielen die Besonderheiten der Phasenumwandlungen, Schwindungen sowie Abkühlgeschwindigkeiten eine entscheidende Rolle, da das Verfahren mit einer schmelzflüssigen Phase arbeitet.

Deswegen ist eine Prozessüberwachung essentiell. Es wird beispielsweise eine Temperaturregelung verwendet. Daneben muss für eine hohe Genauigkeit auch die Pulverzufuhr zeitlich konstant und exakt einzustellen sein [1, 8].

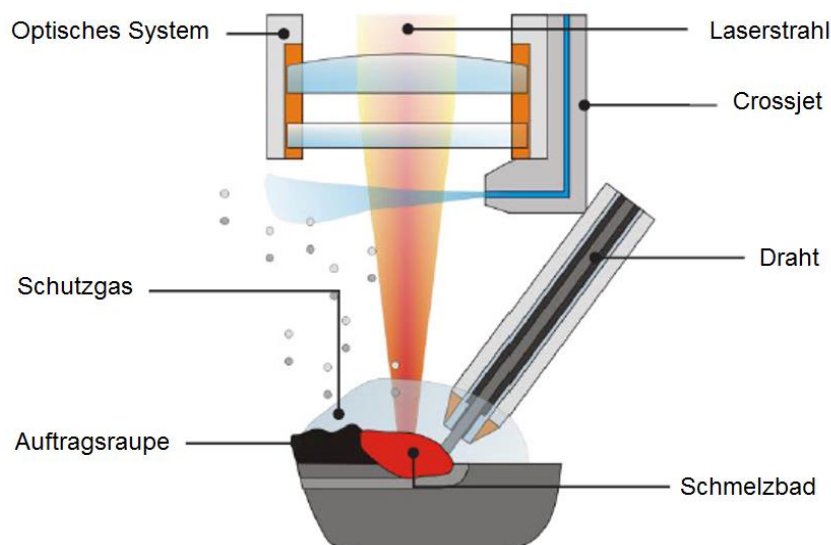


Abbildung 14: Prinzip des Laserauftragsschweißens [8]

2.5.6 Schicht-Laminat-Verfahren (Layer-Laminate-Manufacturing, LLM)

Beim Schicht-Laminat-Verfahren, auch als Laminated Object Manufacturing (LOM) bezeichnet, erfolgt die Bauteilfertigung durch Aneinanderreihung von einzelnen Folienschichten. Diese vorgefertigten Folien werden mittels Laser, Fräser oder Messer zugeschnitten und in die gewünschte geometrische Form gebracht. Danach erfolgt der Zusammenschluss mit der vorherigen Schicht durch Kleben bzw. durch Schweißen. Das Verfahrensprinzip ist in Abbildung 15 ersichtlich.

Es wird nur die Geometrieinformation in der X-Y-Ebene durch den Laser/Fräser oder das Messer erzeugt, in Z-Richtung wird die Geometrie durch das Aneinanderfügen der Folien gebildet. Deshalb handelt es sich nicht um ein generatives Verfahren im herkömmlichen Sinn, sondern es kombiniert ein abtragendes und ein aufbauendes Verfahren. Die Schichtdicke ist von der Dicke der Folie vorgegeben, um welchen nach vollendeter Schicht die Bauplattform gesenkt wird. Es können mit diesem Verfahren viele Materialien wie Kunststoffe, Metalle, Keramiken und Papiere verwendet werden, welche mit Klebstoff zusammengeklebt bzw. zusammengeschweißt werden. Für die Herstellung von Überhängen und dergleichen sind keine Stützen erforderlich, da die abgetrennten Folienreste im Bauraum verbleiben und so das Bauteil abstützen. Diese verbliebenen Reste werden in kleine Quadrate geschnitten, um sie nach der Fertigung besser entfernen zu können.

Vorteilhaft ist beim Schicht-Laminat-Verfahren, dass das konturgebende Werkzeug (Laser/Fräser/Messer) nur den Umfang des Bauteils der jeweiligen Schicht umfahren muss. Bei den herkömmlichen 3D-Druck-Verfahren muss immer das ganze Volumen durch das jeweilige Werkzeug „abgefahren“ werden, daher sind Bauteile mit großem Volumen beim LLM auf die Druckzeit bezogen deutlich im Vorteil. Kleine Bauteile mit geringen Volumen sind hingegen ungünstig und sehr aufwendig in der Fertigung.

Aufgrund der unterschiedlichen Schichten (Folie-Kleber-Folie) sind die mechanischen Eigenschaften von der Belastungsrichtung zur Schicht (quer zur Schicht oder normal zur Schicht) abhängig. Diese Anisotropie ist bei geschweißten Metallteilen nicht vorhanden, da hier die Eigenschaften in allen Richtungen gleich sind [1].

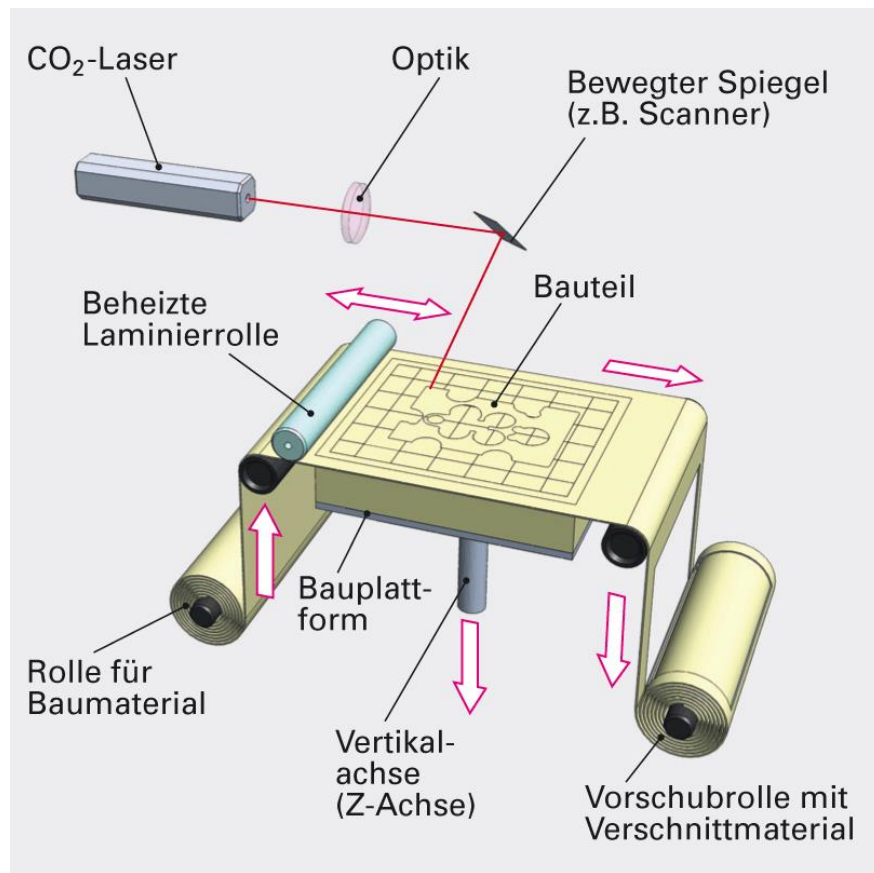


Abbildung 15: Prinzip des Layer-Laminate-Manufacturing [7]

2.5.7 Fused-Deposit-Modeling (FDM)

Dieses Verfahren, welches von der Firma Stratasys entwickelt und patentiert wurde, hat den Namen Fused-Deposit-Modeling von eben dieser Firma erhalten und ist somit ein Markenname. Allgemein wird dieses Verfahren als Fused-Layer-Modeling oder Extrusionsverfahren bezeichnet, wobei sich jedoch der Name FDM etabliert hat und auch in dieser Arbeit verwendet wird.

Die prinzipielle Bauteilerzeugung erfolgt durch Einbringung und Aufschmelzen des drahtförmigen Baumaterials in einer Düse, siehe Abbildung 16. Die Erhitzung des Materials erfolgt dabei auf knapp unterhalb der Schmelztemperatur, bei ABS-Kunststoff ca. 300°C, bei Feingusswachs ca. 68°C. Das Baumaterial liegt meistens in Form von Rollen oder in eigens für die Maschine passenden Kassetten (Cartridges) vor, welche passend in die Maschine eingesetzt werden müssen. Dieses Verfahren ist ebenfalls ein thermisches Verfahren, die Erstarrung erfolgt durch die Wärmeleitung in das Bauteil. Als Materialien kommen grundsätzlich alle aufschmelzbaren Werkstoffe in Frage, neben Kunststoffen auch Metalle und Keramiken. Praktisch werden hauptsächlich Kunststoffe mit dem FDM-Verfahren gedruckt, da bei Metallen oder Keramiken durch die hohe Schmelztemperatur ein höherer bautechnischer Aufwand

bei der Maschine notwendig ist. Es müssen höhere Düsentemperaturen erreicht und diese Wärme auch wieder abgeführt werden. Dazu ist eine Vorheizung und Isolation des Bauraums notwendig.

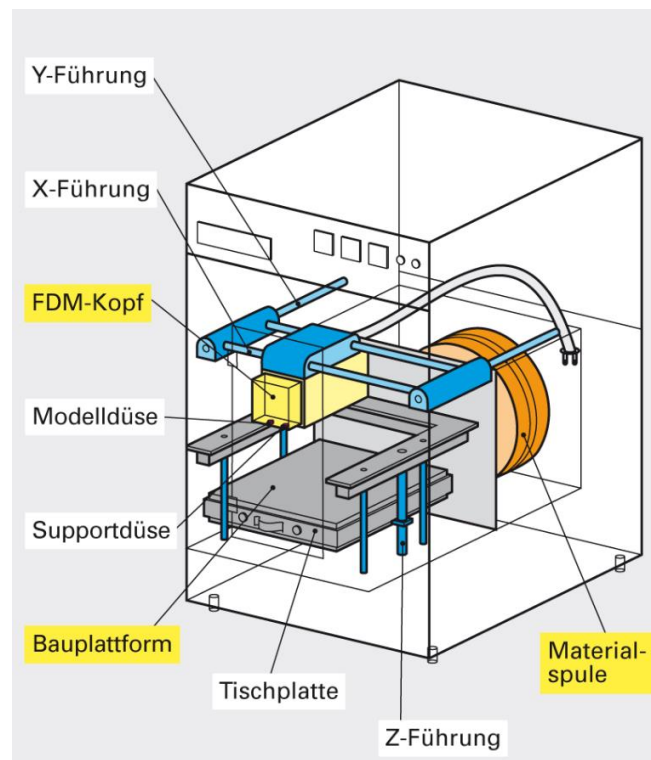


Abbildung 16: Prinzip Fused-Deposit-Modeling [7]

Um eine ausreichende Verbindung zwischen dem extrudierten Material und dem bereits ausgehärteten Bauteil zu erreichen, wird das Material durch die Düse „aufgequetscht“. Dazu muss die Düse stets senkrecht (in der Z-Achse) stehen und in der X-Y-Ebene einen verfahrensbedingten Winkel einschließen. Dadurch entsteht ein elliptischer Querschnitt des Materials und es lässt sich ein Gleichgewicht aus Volumen und Oberflächenkräften einstellen. Nur somit kann eine glatte Oberfläche entstehen. So lassen sich Schichtdicken von 0,127 bis 0,330 mm und Spurbreiten von 0,254 bis 2,54 mm herstellen. Diese unrunder Maße rühren aus der Umrechnung des angloamerikanischen Maßsystems (1 Zoll = 25,4 mm). Die Herstellung kleiner Überhänge kann durch die rasche Abkühlung ohne Stützen erfolgen, größere Überhänge sowie Hinterschnitte sind hingegen nur mit Stützmaterial auszuführen. Billigere Drucker für Einsteiger haben meistens nur eine Düse und müssen somit ohne Stützen auskommen. Bei professionelleren Druckern sind mindestens zwei Düsen vorhanden, welche parallel angeordnet sind, und schnell zwischen Baumaterial und Stützmaterial gewechselt werden kann. Das Stützmaterial ist meistens ein wasserlösliches Wachs vom Typ Polyethylenglykol - dieses wird nach dem Bauprozess entweder mechanisch oder in einer warmen Wasserlösung entfernt. Als Datenschnittstelle kommt wie bei den anderen Verfahren das STL-Format zum Einsatz. Die Dateien werden von der druckereigenen Software gesliced und die Stützstrukturen berechnet. Dort ist die Bewegung der Düse jeder einzelnen Schicht ersichtlich und es lässt sich der komplette Bauprozess optimieren. Zusätzlich wird die geschätzte Bauzeit angegeben.

Als Vorteil des Extrusionsverfahren kann das relativ große Druckvolumen in kurzer Zeit genannt werden. Die Bauteile fallen dabei je nach Einstellung des Füllgrades massiv aus. Bei den meisten Software Programmen (Slicern) können verschiedene Füllgrade eingestellt werden; somit kann bei tragenden Strukturen mehr Material zugeführt und bei einfachen Strukturen Material gespart werden. Durch die Verwendung von mehreren Düsen können theoretisch in der selben Schicht verschiedene Materialien verwendet werden. Die Anzahl der Düsen ist durch die Geometrie der Maschine begrenzt. Es wird das komplette in die Maschine eingebrachte Material für den Bauprozess bzw. für die Stützen verwendet und es fällt kein verunreinigtes oder beschädigtes Restmaterial an. Die Maschinen mit dem FDM-Verfahren sind die Einsteigermodelle für Hobby 3D-Drucker und bereits ab wenigen 100€ zu bekommen. Die Maschinen können auch in Büroumgebungen platziert und betrieben werden.

Bei der Herstellung von kreisrunden Bauteilen wie Wellen, Zylindern, etc. ist es grundsätzlich problematisch, dass der durch die Extrusion gebildete Strang einen Anfang und ein Ende hat. Dieser wird Bindennaht genannt und ist vor allem sichtbar, wenn die Enden jeweils an derselben Stelle liegen, siehe Abbildung 17. Bei der heute verwendeten Software wird dieses Problem durch Veränderung der Anfangsposition der Naht in den einzelnen Schichten vermieden. Das Einführen des drahtförmigen Materials kann auch als Nachteil gesehen werden, da dies oftmals sehr kompliziert zu handhaben ist. Bei den einfachen Rollen muss der Draht händisch eingefädelt werden, die fertigen Kassetten erleichtern dies, sind aber sehr teuer.

Der größte Nachteil dieses Verfahrens ist die Abhängigkeit des Detaillierungsgrades vom Materialquerschnitt des zugeführten Drahtes. Dadurch kann bei Geometrien, die kleiner als die Extrusionsbreite sind, keine Herstellung erfolgen. Dies betrifft feine Schlitzte, aber vor allem feine Rippen, die entweder falsch oder gar nicht gefertigt werden können. Bei den Düsen entstehen möglicherweise Verstopfungen, welche gereinigt werden müssen. Dies erfolgt bei einfachen Maschinen händisch, bei professionelleren Maschinen sind Reinigungsmechanismen vorhanden [1].

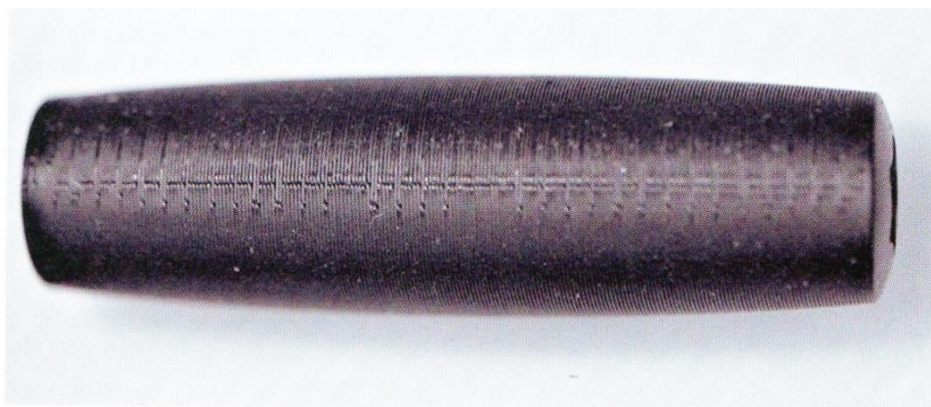


Abbildung 17: Bindennaht beim FDM-Verfahren [1]

2.6 Anwendungsgebiete

Die generativen Fertigungssysteme werden in vielen unterschiedlichen Bereichen eingesetzt. Grundsätzlich wird zwischen einfachen Maschinen, welche bürotauglich oder privat einsetzbar sind, und industriellen komplexen Fertigungsmaschinen

unterschieden. Mit Letzteren können Endprodukte in Massenproduktion oder Prototypen hergestellt werden. Da es unzählige Einsatzgebiete von 3D-Druckern gibt, soll hier nur auf einige Beispiele eingegangen werden, in denen sich die Fertigung mittels 3D-Druck etabliert hat.

2.6.1 Brennerspitzen in Gasturbinen

Die Firma Siemens verwendet Additive Fertigungsverfahren bei der Reparatur von Brennerspitzen, welche in Gasturbinen zum Einsatz kommen. Dieses Bauteil ist in der Turbine genau an dem Punkt, wo das Gasgemisch entzündet wird und ist somit Temperaturen über 1000°C ausgesetzt. Deswegen sind hier Abnützungserscheinungen stark merkbar. Bisher musste zur Wartung die gesamte Spitze herausgeschnitten und danach eine neue eingesetzt werden. Dies hat aufgrund der Materialkosten aber vor allem wegen der langen Wartungsdauer, die viele Zwischenschritte und Prüfungen benötigte, hohe Kosten mit sich gebracht.

Die Idee von Siemens war nun, die Wartung der Brennerspitzen mittels 3D-Druck zu realisieren. Es soll nur noch das beschädigte und abgenutzte Material statt der gesamten Spitze entfernt und danach direkt auf die Spitze gedruckt werden. Zum Einsatz kommt ein 3D-Drucker, der mit dem Laserschmelzverfahren arbeitet. Dieses Verfahren ist notwendig, um das Metallpulver aufzuschmelzen und mit dem bestehenden Bauteil zu verbinden. Der Drucker mit einer Brennerspitze ist in Abbildung 18 ersichtlich. Durch dieses Verfahren können bis zu 90% an Kosten und Wartungszeit eingespart werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass bei bestehenden älteren Systemen Änderungen durchgeführt werden können. Somit können bei Weiterentwicklung der Turbinentechnologie bei notwendigen Wartungsarbeiten Verbesserungen ohne viel Mehraufwand durchgeführt werden [10].



Abbildung 18: Siemens 3D-Drucker mit Brennerspitze im Vordergrund [10]

2.6.2 Wasserpumpenräder in KFZ

Bei der Firma BMW kommen seit einigen Jahren in Rennfahrzeugen der DTM 3D- gedruckte Wasserpumpenräder zum Einsatz. Diese Bauteile sind bei einem Rennen sehr stark belastet (bis zu 70% Volllast) und haben eine komplizierte geometrische Form. Daher hat sich BMW entschlossen, diese Pumpenräder mit selektiven Laserschmelzen zu fertigen. Dadurch ist man nicht auf bestimmte Geometrien beschränkt, welche sonst nur mit erheblichen technischen Aufwand zu fertigen wären. Außerdem fallen dadurch komplexe Werkzeuge wie Gussformen komplett weg. Das Bauteil selber hat durch das Druckverfahren über die gesamte Produktionszeit die gleiche Maßhaltigkeit und die gleichen technischen Eigenschaften. Ein Beispiel des Wasserpumpenrades ist in Abbildung 19 zu sehen [11].



Abbildung 19: Wasserpumpenrad BMW [11]

2.6.3 Medizintechnik

In der Medizintechnik spielen die generativen Fertigungsverfahren eine immer wichtigere Rolle. Da jeder Mensch einzigartig ist und somit keine Körperteile massengefertigt werden können, ist die Flexibilität des 3D-Druckens hier ein besonderer Vorteil.

So wurde beispielsweise bei einem australischen Mann ein Halswirbel durch einen 3D- gedruckten Teil ersetzt. Bei dem Mann wurde Wirbelsäulenkrebs diagnostiziert, woran er qualvoll gestorben wäre. Die Neurochirurgen erstellten einen passgenauen, künstlichen Halswirbel und ersetzten den vom Krebstumor Befallenen. Aufgrund der genauen Fertigung konnte der Halswirbel in einer 15-stündigen komplizierten Operation eingesetzt werden und der Patient kann nun wieder ein normales Leben führen. In Abbildung 20 ist ein Röntgenbild des Patienten zu sehen, worauf der 3D- gedruckte Halswirbel erkennbar ist [12].



Abbildung 20: Röntgenbild zeigt 3D-gedruckten Halswirbel [12]

Der steirische Sondermaschinenbauer HAGE ist ebenfalls in die generative Fertigung eingestiegen. Die Firma hat einen 3D-Drucker entwickelt, mit dem Schädelimplantate gedruckt werden können. Die Implantate wurden bereits erfolgreich an Ratten getestet und mittlerweile wurde eine erste Serie von einem industrietauglichen Drucker ausgeliefert. Mit diesem 3D-Drucker kann das Implantat anhand eines CT-Scans gefertigt werden. Dies kann während der Operation erfolgen, somit kann das gefertigte Implantat sofort eingesetzt werden. Was bisher fünf bis sechs Wochen gedauert hat, kann nun in einigen Stunden erbracht werden. Die Materialkosten sinken ebenfalls von 5000€ auf unter 100€, indem medizinisch zugelassene Kunststoffe zum Einsatz kommen. Ein beispielhaftes Implantat ist in Abbildung 21 zu sehen [13, 14].



Abbildung 21: 3D-gedrucktes Implantat [13]

3 Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist die Konstruktion und Fertigung eines Benchmark-Teils, welches für unterschiedliche Parameter des 3D-Drucks verwendet werden kann. Somit können die unterschiedlichen Druckparameter miteinander verglichen werden. Dieses Benchmark-Teil soll so klein wie möglich sein, um Material und Druckzeit zu sparen, aber möglichst viele Merkmale aufweisen. Als entscheidende Merkmale dienen unterschiedliche übliche Geometrien, die bei Bauteilen vorkommen können. Mithilfe dieses Benchmark-Teiles soll somit überprüft werden, ob der 3D-Drucker mit den jeweiligen Einstellungen jede einzelne Geometrie fehlerlos und mit bestimmten Toleranzen fertigt. Durch das Drucken des Benchmark-Teils bei verschiedenen Parametern, welche in diesem Fall die Düsentemperatur, die Bauraumtemperatur sowie die Ausrichtung sind, können die jeweiligen Grenztemperaturen ausfindig gemacht werden, bei denen gerade noch ein fehlerfreier Druck möglich ist. Wie groß die Unterschiede zwischen den einzelnen Druckergebnissen mit den jeweiligen Parametern sind, wird sich bei der Bewertung der einzelnen Merkmale zeigen. Dazu gibt es für jedes Merkmal mehrere Bewertungskriterien, wie Maße, Lagetoleranzen, Rauheiten oder Druckfehler.

Mit diesem Teil kann auch das Druckergebnis anderer 3D-Drucker und anderer Verfahren verglichen werden. Neben der optischen Überprüfung soll auch eine Festigkeitsüberprüfung möglich sein, wozu ein genormter Zugstab gefertigt wird. Dieser wird mit einer Zugprüfmaschine geprüft und die Festigkeit bestimmt. Auch hier werden wieder unterschiedliche Parameter eingestellt und danach die Ergebnisse verglichen. Mit diesen beiden Benchmark-Teilen können somit Aussagen über die Optik sowie die Festigkeit getätigt werden. Es sollen nach Abschluss der Diplomarbeit die für einen gewünschten 3D-Druck optimalen Parameter für den vorhandenen Drucker bekannt sein.

Um die Messwerte der Rauheiten zu überprüfen, soll zusätzlich eine analytische Vergleichsrechnung durchgeführt werden. Hierzu wird die Oberfläche der Bauteile mathematisch beschrieben und händisch eine Berechnung der Rauheiten durchgeführt. So soll ein Vergleich von gemessenen und gerechneten Werten realisiert und eventuell vorhandene Abweichungen erklärt werden.

4 Methodik

Zu Beginn der Arbeit war es nötig, über den 3D-Druck allgemein sowie über die Einflüsse der verschiedenen Parameter Informationen zu sammeln. Durch Websites und Foren konnte man sich einen guten Überblick schaffen und sich in das Thema einlesen.

Erst danach war es möglich, mit der Überlegung des Benchmark-Teils zu beginnen. Auch hier gibt es ähnliche Teile bereits im Internet, welche als Anregung für die letztendlich verwendeten Geometrien dienten. Das Benchmark-Teil wurde zunächst per Hand skizziert und danach mit dem 3D-Konstruktionsprogramm CATIA V5R21 am PC konstruiert. Dieses Programm wird zwar nicht am Institut verwendet, da der 3D-Drucker aber mittels neutraler STL - Schnittstelle angesteuert wird, war die Wahl des 3D-Programmes nahezu irrelevant. In CATIA wurde das Benchmark-Teil konstruiert, mittels dem internen Rapid Prototyping Modus in ein STL-Format umgewandelt und exportiert. Danach konnte die Datei über das dem Drucker beiliegende Programm auf den 3D-Drucker geladen werden. Dazu wird das Programm CatalystEX verwendet. Dabei wird das Bauteil gesliced, also in die Höhenschichten unterteilt, und auf den 3D-Drucker überspielt. Als Drucker kommt ein Stratasys Dimension SST 1200es zum Einsatz.

Zur Messung der verschiedenen Merkmale kommen die optische sowie die taktile Koordinatenmesstechnik zum Einsatz. Als optische Messmaschine wird das 3D-Oberflächenmessgerät Infinite Focus G4 von der Firma Alicona Imaging GmbH eingesetzt. Damit können hochauflösende zwei- sowie dreidimensionale Bilder aufgenommen und mit der beiliegenden Software IF-Laboratory Measurement 5.1 ausgewertet werden. Für die taktile, das heißt berührende Messtechnik, ist die Maschine DuraMax von der Firma Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH in Verwendung. Hiermit werden verschiedenste Punkte auf der Oberfläche des Bauteils aufgenommen und es können Maße, Lage und Formen bestimmt werden.

Die zur Festigkeitsüberprüfung eingesetzte Maschine ist eine Universalprüfmaschine vom Typ UTS-20 der Firma UTS-Testsysteme. Es können Zug- und Druckkräfte von bis zu 5000 N aufgebracht werden. Auf dem beiliegenden PC können die Messwerte ausgewertet und in einem allgemeinen Format exportiert werden. Dadurch ist eine nachträgliche Weiterverarbeitung und visuelle Aufbereitung möglich.

5 Versuchsträger

Die Hauptaufgabe der Arbeit ist die Erstellung eines Benchmark-Teiles mit verschiedenen geometrischen Merkmalen. Auf diese sowie auf die jeweiligen Bewertungskriterien wird nun eingegangen.

5.1 Benchmark-Teil

Abbildung 22 gibt einen Überblick über das konstruierte Benchmark-Teil. Wie bereits erwähnt, befinden sich markante Geometrien aufgesetzt auf einer Grundplatte. Es sind elf verschiedene Merkmale vorhanden. Die Beschreibung dieser erfolgt in den folgenden Unterkapiteln.

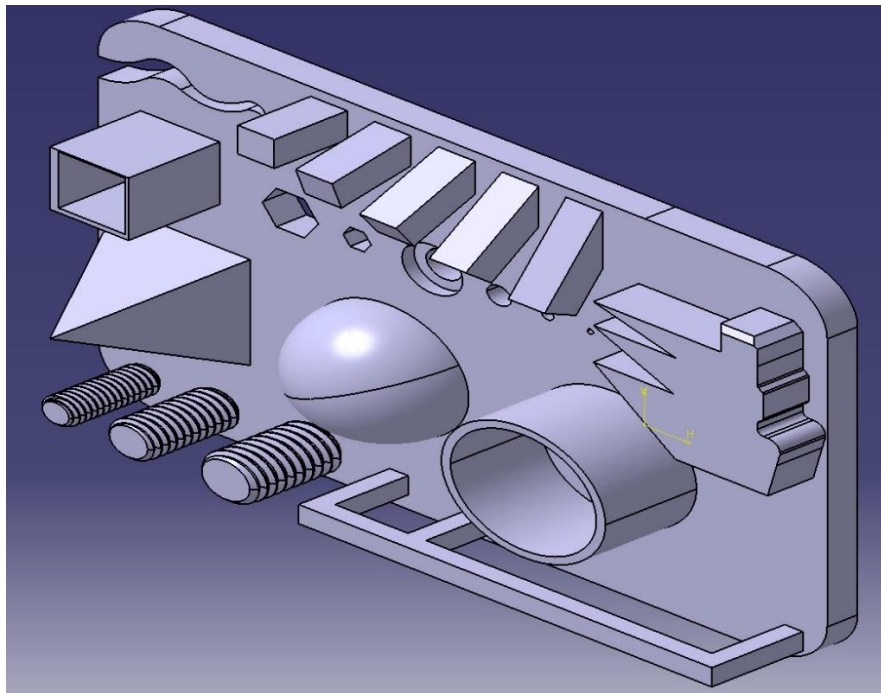


Abbildung 22: Iso-Ansicht Benchmark-Teil

In der folgenden Abbildung 23 wird eine Übersicht über die Merkmale des Benchmark-Teils gegeben. Jedes Merkmal hat zur späteren eindeutigen Unterscheidung ein eigenes Kürzel. Zusätzlich zu den hier ersichtlichen Abkürzungen werden auch Messungen an der Grundplatte vorgenommen. Jedes Merkmal wird außerdem auf eventuelle Druckfehler überprüft, welche ebenfalls für die verschiedenen Drucke bewertet werden.

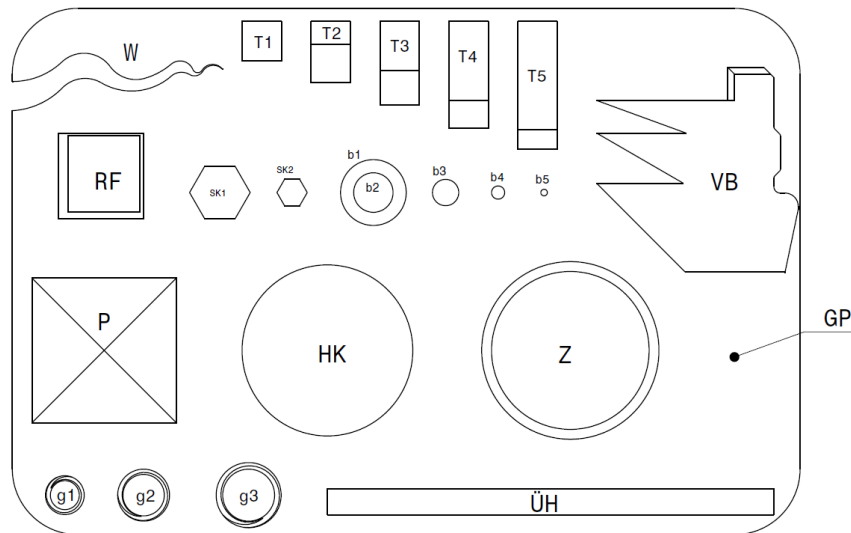


Abbildung 23: Übersicht Benchmark-Teil

Zu den folgenden Kapiteln sei gesagt, dass die Abbildungen Ausschnitte aus Konstruktionszeichnungen sind und deswegen keine Farben und Schattierungen vorhanden sind.

5.1.1 Merkmale

Türme (T1-T5)

Auf der oberen Seite der Grundplatte befinden sich fünf Türme, welche unterschiedlich geneigt sind. Diese sind in 15° - Schritten von 30° bis 90° geneigt, wodurch der Einfluss der jeweiligen Neigung auf das Druckergebnis gemessen werden soll. Es werden die Neigungswinkel, die Rauheiten $R_a/R_z/S_a/S_z$ auf der Oberseite (in Abbildung 24 auf der linken Seite), sowie der Winkel zwischen Seitenfläche und Deckfläche der jeweiligen Türme auf der Oberkante gemessen. Da beim verwendeten 3D-Druckverfahren keine richtige Kante entsteht, wird die erzeugte Abweichung in Form einer Fase bzw. eines Radius gemessen.

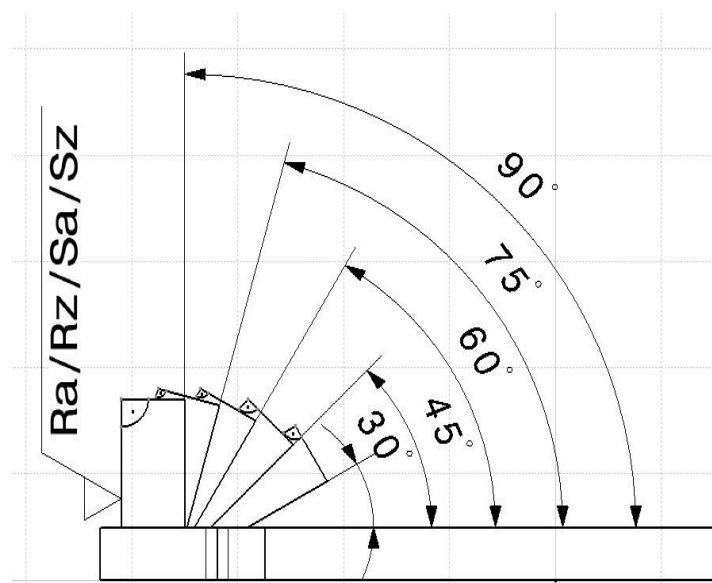


Abbildung 24: Türme

Welle (W)

Links neben den Türmen befindet sich am Rand der Grundplatte eine wellenförmige Tasche mit unterschiedlichen Radien, siehe Abbildung 25. Diese Radien (rw1-rw12) sind nahe der Öffnung groß und werden gegen Ende der Welle sehr klein, die genauen Werte werden nicht angegeben. Neben den einzelnen Radien wird auch noch die sichtbare Länge der Welle (l_w) gemessen. Da der Spalt am Ende sehr fein ist, ist davon auszugehen, dass das vorgegebene Maß von 32 mm bei keinem Druck erreicht wird.

Neben den Geometrien soll zusätzlich noch eine eventuelle Aufwölbung gemessen werden, wozu die Parallelität zwischen Ober- und Unterseite der Welle gemessen wird. Da an dieser Stelle eine große Fläche vorliegt, die dazu noch geschwächt ist, ist die Gefahr der Aufwölbung hier besonders groß.

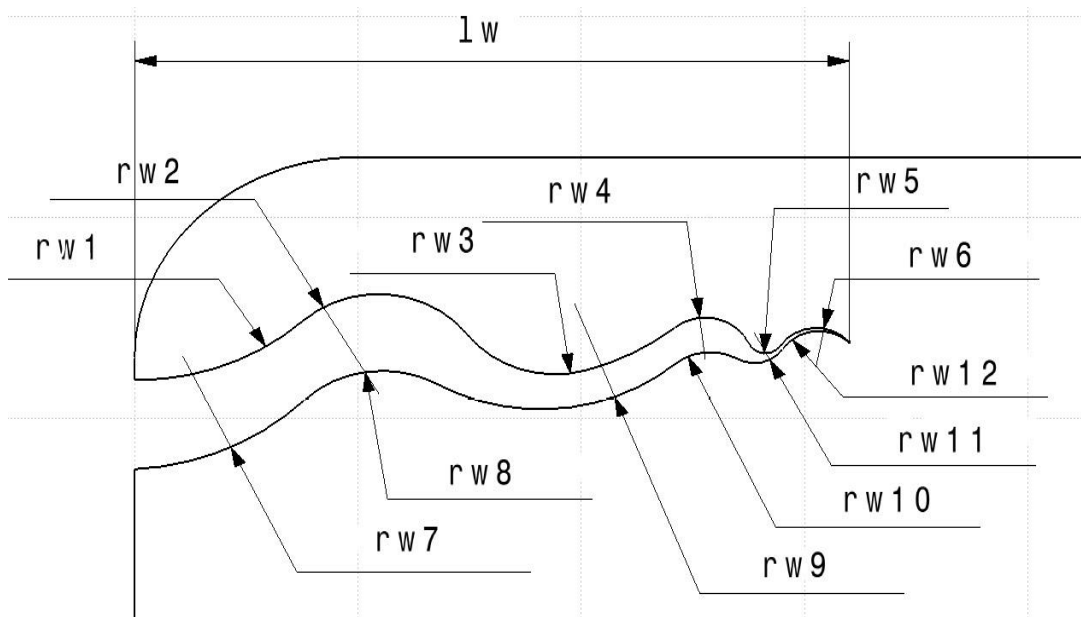


Abbildung 25: Welle

Rauchfang (RF)

Unter dem Rauchfang versteht man einen hohlen Turm mit quadratischem Querschnitt, siehe Abbildung 26. Die Außenwände sind dabei unterschiedlich dick, wobei diese Wandstärken zu messen sind (rf1-rf4). Die Dicken betragen, 0,3 mm, 0,6 mm, 1,0 mm sowie 1,5 mm. Dabei sind besonders die dünnen Wandstärken interessant, da der Drucker begrenzte Spurbreiten bzw. Schichtdicken. Neben den Dicken sind zusätzlich die Rauheiten $R_a/R_z/S_a/S_z$ an der linken Außenwand zu messen. Dies dient zur Ergänzung der Rauheitsmessung der Türme. Aus Platzgründen war es jedoch nicht möglich, an der Seitenfläche die Rauheit zu messen.

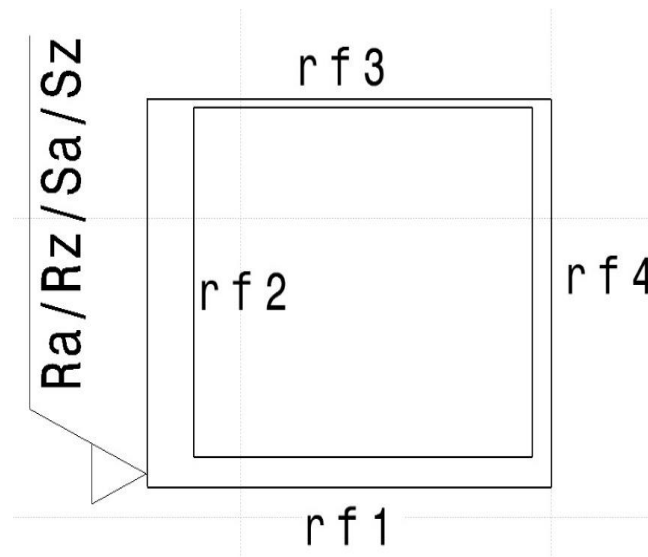


Abbildung 26: Rauchfang

Bohrungen und Sechskant

Als nächste Merkmale befinden sich zwei Sechskant - Löcher sowie fünf Bohrungen in der Grundplatte (Abbildung 27). Zu messen sind die jeweiligen Schlüsselweiten der Sechskante (sksw) und die Durchmesser der Bohrungen (b1-b5). Da Bohrung 1 eigentlich nur eine Senkung ist, ist deren Tiefe ebenfalls auszuwerten. Zusätzlich wird auch noch eine Rundheitsmessung von b1 durchgeführt.

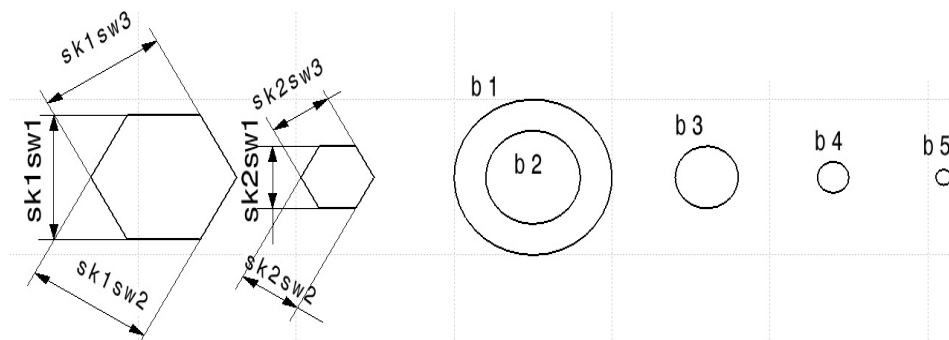


Abbildung 27: Sechskant und Bohrungen

Vermessungsblock (VB)

Auf dem Vermessungsblock (Abbildung 28) befinden sich mehrere verschiedene wesentliche Geometrien. Auf der linken Seite sind drei herausstehende Spitzen mit unterschiedlichen Winkeln, welche zu vermessen sind (sw1-sw3). Dazu sollen auch noch die bei der Fertigung entstehenden Radien gemessen werden, da eine „perfekte“ Spitze nicht möglich ist (r1-r5). An der Oberseite befinden sich drei Fasen (f1-f3), von denen die Höhe sowie der Winkel gemessen werden. Auf der rechten Seite wird die Höhe des Freistichs von beiden Seiten gemessen (h1 und h2) sowie die weiteren Radien (r6-r11). Der Abstand von der unteren Kante bis zum Freistich (lk) sowie der Winkel der unteren Fläche (wk) sind weitere Maße. Zuletzt wird die gesamte Länge (lk) und die Breite des oberen Vorsprungs gemessen (b).

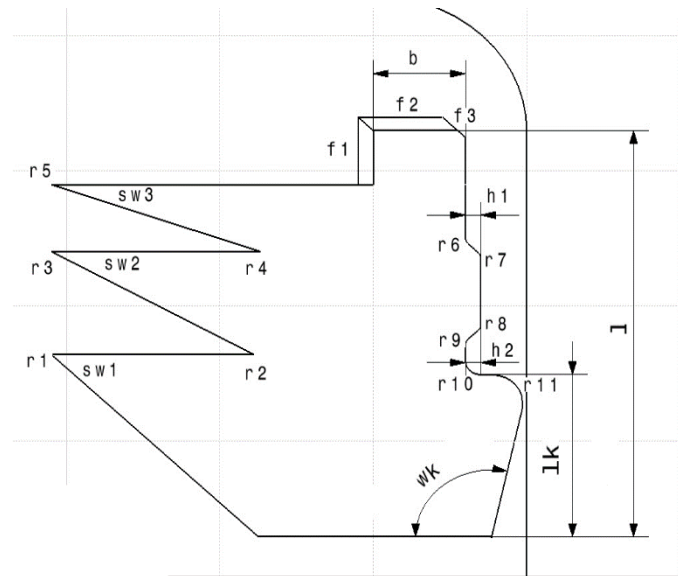


Abbildung 28: Vermessungsblock

Zylinder

Als nächstes Merkmal wird der Zylinder vermessen (Abbildung 29). Dabei sind der Außen- sowie der Innendurchmesser von Bedeutung ($z1$ und $z2$). Zusätzlich werden die Rundheiten der Außenkante und der Innenkante gemessen. Somit sind mit der Rundheitsmessung von Bohrung 1 beide Varianten der kreisförmigen Geometrieerzeugung vorhanden.

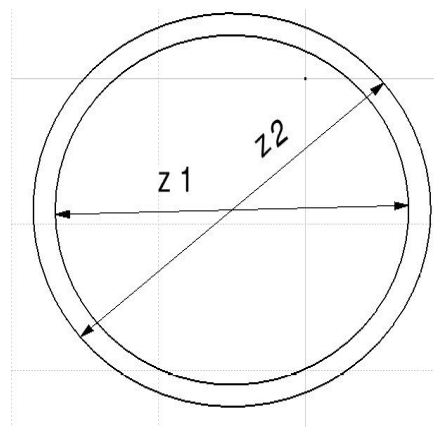


Abbildung 29: Zylinder

Überhang (ÜH)

Der Überhang besteht aus drei Stützen unterschiedlichen Abstands, wodurch sich ein langes und ein kurzes Stück freistehenden Überhangs ergeben, siehe Abbildung 30. Bei diesen soll eine etwaige Durchbiegung festgestellt und vermessen werden. Dazu werden die Ebenheit sowie die Parallelität der Oberkante des Überhangs zur Grundplatte gemessen. Somit kann eine Aussage über eine Durch- oder Aufbiegung getroffen werden.

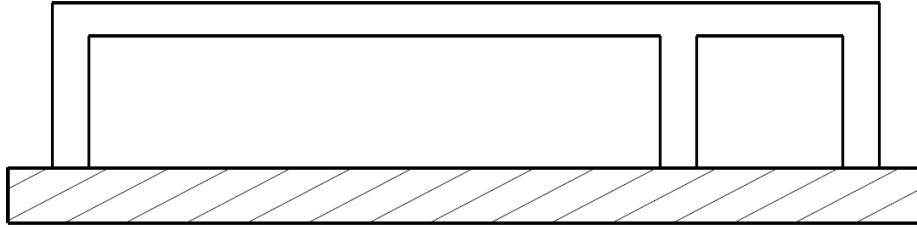


Abbildung 30: Überhang

Gewinde

Auf der Grundplatte sind an der Vorderseite drei nach oben stehende Bolzen mit unterschiedlich großen Gewindegängen angebracht, g1, g2 und g3 in Abbildung 31. Diese metrischen Gewinde mit den Größen M6, M8 und M10 werden mit entsprechenden Gewindelehren auf ihre richtige Form und Steigung überprüft. Zusätzlich wird die Funktion durch handfestes Anziehen von Muttern geprüft.

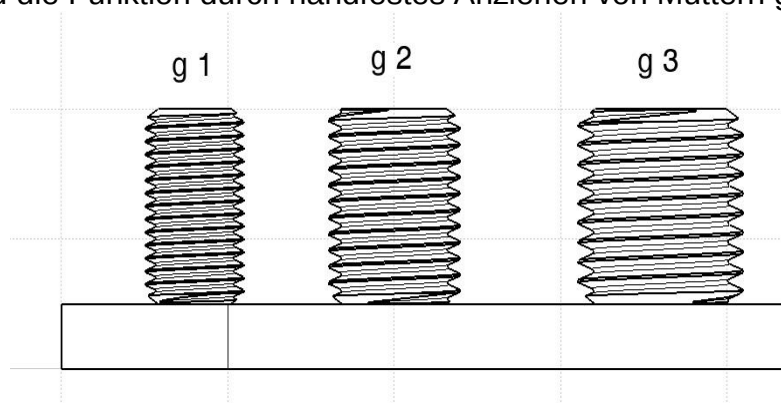


Abbildung 31: Gewinde

Halbkugel (HK)

Bei der Halbkugel steht die optische Bewertung im Vordergrund. Es ist eine viel verwendete Geometrie, daher muss eine fehlerfreie Fertigung überprüft werden. Als Maß wird lediglich der Radius erfasst, für die Oberflächenbewertung kann kein Maß verwendet werden.

Pyramide

Bei der Pyramide spielt wiederum die fehlerfreie Fertigung eine entscheidende Rolle, daher wird die Pyramide wieder optisch überprüft. Daneben werden auch die jeweiligen Seitenlängen ($lp1$ - $lp4$ in Abbildung 32) sowie die Winkel der Schenkel zueinander ($wp1$ und $wp2$) gemessen. Da auch hier keine perfekte Spitze erzeugbar ist, wird der erzeugte Radius der Spitze ebenfalls vermessen.

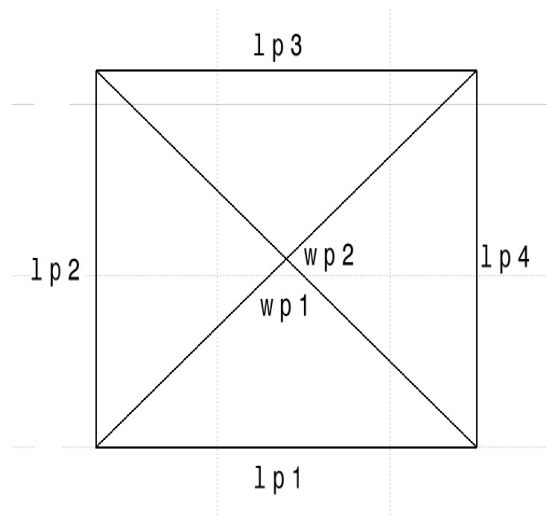


Abbildung 32: Pyramide

Grundplatte (GP)

Um Vergleichswerte mit den vorangegangenen Rauheitsmessungen zu haben, finden auf der Grundplatte ebenfalls Messungen statt. Diese befinden sich an einer definierten Stelle an der rechten oberen Kante, wie in Abbildung 33 ersichtlich. Die Messung der $R_a/R_z/S_a/S_z$ - Werte erfolgt dabei an der Ober- sowie an der Unterseite an derselben Stelle (GPO bzw. GPU). Die an der Unterseite vorhandene Schrift wird ebenfalls überprüft - dies erfolgt wiederum optisch. Zuletzt soll noch eine Aussage über die Ebenheit der Grundplatte getroffen werden.

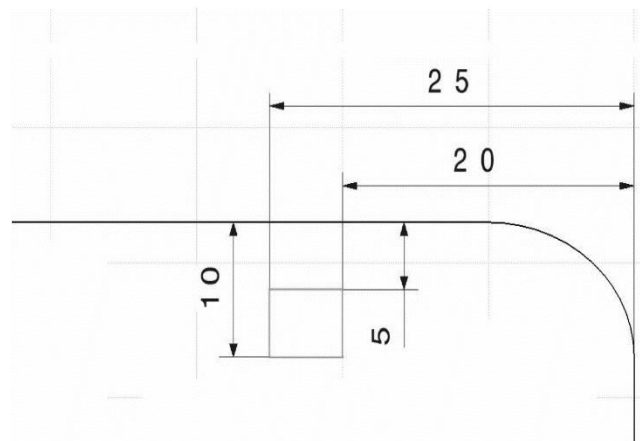


Abbildung 33: Grundplatte

5.1.2 Fertigung Benchmark-Teil

Nachdem die einzelnen Merkmale sowie die verschiedenen Fertigungsparameter feststehen, erfolgt im nächsten Schritt die Fertigung mit dem 3D-Drucker. Wie bereits erwähnt und in Abbildung 34 ersichtlich, kommt der Drucker Stratasys Dimension 1200es zum Einsatz, dieser ist besonders auf Benutzerfreundlichkeit ausgelegt. Diese soll erreicht werden, indem so wenig wie möglich einstellbar ist und mit den herstellerseitigen Einstellungen gedruckt wird. Dem Drucker liegt das Slicerprogramm

CatalystEX bei, womit ein CAD-File (STL-Format) eingelesen, positioniert, gesliced und auf den Drucker überspielt werden kann. Zusätzlich können Grundparameter verändert werden, wie die Schichtstärke und der Füllgrad. Außerdem erhält man Informationen über den aktuellen Druck. Da für die hier notwendigen Parametervariationen jedoch ein stärkerer Eingriff notwendig ist, wird das zusätzliche Programm MaracaEX verwendet. Hiermit lassen sich die gewünschten Veränderungen der Temperaturen vornehmen. Für das Druckmaterial gibt es vom Hersteller vorgefertigte Materialkartuschen, siehe Abbildung 34 rechts, welche eine einfache Handhabung gewährleisten. Beim verwendeten Drucker kann über eine eigene Vorrichtung auch von externen Herstellern gekauftes Material zugeführt werden.



Abbildung 34: Stratasys Dimension 1200es (links); passende Materialkartusche (rechts)

Für den Druck des ersten Benchmark-Teils wurden die standardmäßigen Temperaturen eingestellt, das heißt die Bauraumtemperatur auf 75°C und die Düsentemperatur auf 300°C gesetzt. Die Ausrichtung des Bauteils erfolgte horizontal, die Grundplatte war parallel zur Bauplattform. Die allgemeinen Druckereinstellungen, die bei allen folgenden Drucken gleich blieben, sind ein geringer Füllgrad für Baumaterial sowie Supportmaterial („sparse“) und die Schichtstärke von 0,254 mm. Für dieses Bauteil ergibt sich laut Slicer eine Druckzeit von 3,45 Stunden, wobei die wahre Druckzeit etwas länger dauert. Danach erfolgten weitere Drucke: In der ersten Druckreihe wurde jeweils die Düsentemperatur bei gleichbleibender Bauraumtemperatur um 10°C variiert. Da der Druckbereich 260- 330°C beträgt, hat sich eine Anzahl von acht Drucken und folglich acht Benchmark-Teilen ergeben. In Abbildung 35 ist ein gedrucktes Bauteil von diesen acht Drucken zu sehen.

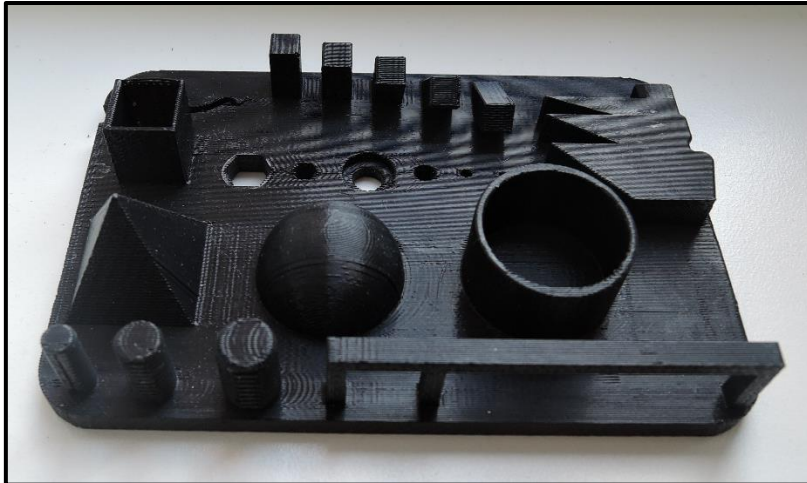


Abbildung 35: Gedrucktes Benchmark-Teil

Von diesen acht Drucken konnten zwei nicht beendet werden, da bei der Drucktemperatur von 330°C die Fehlermeldung mit dem Code 14, 67 auftrat. Diese besagt, dass die Temperatur an der Düse zu hoch ist, wodurch mit dieser Einstellung nicht gedruckt werden kann. Es ergibt sich eine maximale Düsentemperatur von 320°C. Bei 260°C wurde der Druckvorgang ebenfalls abgebrochen - hier war eine Aufwölbung die Fehlerquelle. Dadurch ist auch eine Schädigung der Düse möglich, weshalb der Drucker bei zu großer Wölbung automatisch den Druckvorgang abbricht.

Im nächsten Schritt wurde die Bauraumtemperatur variiert und die Düsentemperatur konstant auf den Standardwert von 300°C eingestellt. Hier konnte jedoch kein sehr großer Bereich eingestellt werden, da die Grenzen vom Drucker und vom Verfahren begrenzt werden. Als minimale Bauraumtemperatur wurde 60°C festgelegt, als Höchsttemperatur 80°C. Das ergab drei Druckvorgänge, da wieder in 10° - Schritten erhöht wurde. Von diesen drei Drucken war einer fehlerhaft, und zwar jener mit einer Bauraumtemperatur von 60°C. Das Ergebnis ist in Abbildung 36 ersichtlich. Das Bauteil hat sich wieder aufgewölbt, diesmal jedoch viel extremer. Dies ist aufgrund der niedrigen Bauraumtemperatur zu hohen Temperaturgradienten im Bauteil zurückzuführen, deshalb beträgt der gewählte Temperaturbereich 70- 80°C. Eine höhere Bauraumtemperatur ist softwaretechnisch nicht möglich.



Abbildung 36: Benchmark-Teil BRT: 60°C, DT: 300°C

Als weiterer Druckparameter wurde die Ausrichtung variiert. Dazu wurde das Bauteil nicht wie zuvor horizontal, sondern vertikal gedruckt. Das Bauteil steht also auf der Vorderkante und wird durch Stützmaterial gestützt. Da hier besonders viel Stützmaterial verwendet wird, dauert der Druck, statt knapp vier, über sieben Stunden. Aufgrund der hohen Druckzeit wurden nicht alle Temperaturbereiche gedruckt, sondern lediglich drei Drucke durchgeführt: Die Standardeinstellungen mit einer Düsentemperatur von 300°C, die untere Grenze mit der Düsentemperatur von 270°C sowie die obere Grenze mit einer Düsentemperatur von 320°C. Die Bauraumtemperatur wurde bei allen Drucken auf 75°C belassen. Diese Drucke waren alle erfolgreich und ohne größere Fehler. Die Unterschiede zu den horizontalen Drucken werden später beschrieben.

5.2 Zugstab

Die Fertigung der Zugproben sowie die Ausführung der Zugversuche wurde nach DIN EN ISO 527 durchgeführt. In dieser Norm wird die Bestimmung der Zugeigenschaften von Kunststoffen geregelt.

5.2.1 Grundlagen Zugversuch

Der Zugversuch ist eine zerstörende Werkstoffprüfung. Das Werkstück wird dazu an beiden Enden eingespannt und durch eine stetig zunehmende Kraft in Werkstücklängsrichtung gezogen, bis es bricht. Das Werkstück hat die Form eines Zugstabes mit rundem oder rechteckigem Querschnitt. Als Messdaten liegen die aufgewendete Kraft sowie die Verlängerung des Bauteils vor. Da die Kraft abhängig von der Querschnittsfläche ist, werden zur besseren Vergleichbarkeit Spannungen und Dehnungen verwendet. Daraus resultiert das allgemein bekannte Spannungs-Dehnungs-Diagramm, durch welches sich viele maßgebliche Werkstoffkenngrößen bestimmen lassen (siehe Abbildung 105). Für die hier verwendeten Versuche werden rechteckige Zugproben nach der Norm ISO 527-2 verwendet - die Maße sind in Abbildung 37 ersichtlich. Es wurde der Probekörpertyp 1A ausgewählt, welcher eigentlich für formgepresste oder spritzgegossene Proben einsetzbar ist. Da die Form 1B für mechanisch hergestellte Proben gültig ist und noch keine Norm für 3D-gedruckte Proben existiert, wird auf den Typ 1A zurückgegriffen.

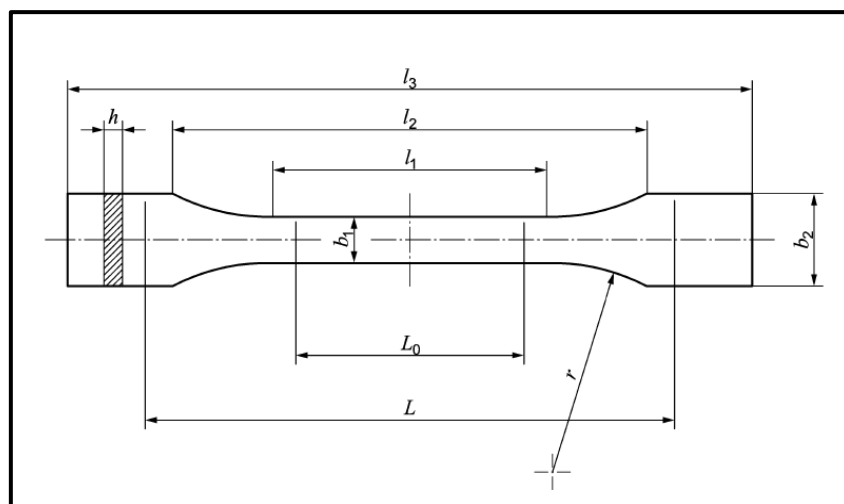


Abbildung 37: Zugprobe nach ISO 527-2 [16]

Tabelle 1: Maße der Zugprobe nach ISO 527-2

Probenkörpertyp		1A	1B
l_3	Gesamtlänge	170	≥ 150
l_1	Länge des engen parallelen Teils	80 ± 2	$60 \pm 0,5$
r	Radius	24 ± 1	$60 \pm 0,5$
l_2	Entfernung zwischen den breiten parallelen Seiten	$109,3 \pm 3,2$	$108 \pm 1,6$
b_2	Breite an den Enden	$20,0 \pm 0,2$	
b_1	Breite des engen Teils	$10,0 \pm 0,2$	
h	Bevorzugte Dicke	$4,0 \pm 0,2$	
L_0	Messlänge (bevorzugt)	$75,0 \pm 0,5$	$50,0 \pm 0,5$
	Messlänge (zulässig auf Anforderung für die Qualitätskontrolle oder wenn festgelegt)	$50,0 \pm 0,5$	
L	Anfangsabstand der Klemmen	115 ± 1	115 ± 1

Die Spannung wird laut ISO 527-1 wie folgt berechnet:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (\text{Gleichung 1})$$

Wobei

σ der betreffende Spannungswert in N/mm² bzw. Megapascal (MPa),
 F die gemessene Kraft in Newton (N) und
 A_0 der Anfangsquerschnitt des Probenkörpers in Quadratmillimeter (mm²) ist.

Wenn für den Probenkörper homogene Dehnungsverteilung vorliegt, lässt sich die Dehnung mit folgender Gleichung berechnen:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (\text{Gleichung 2})$$

Dabei ist

ε der zutreffende Dehnungswert, in Prozent oder als dimensionslose Größe,
 L_0 die Messlänge des Probekörpers in Millimeter (mm) und
 ΔL die Verlängerung des Probekörpers ebenfalls in mm.

Bei den eben genannten Formeln für die technische Spannung und Dehnung wird mit den konstanten Größen des Anfangsquerschnitts A_0 sowie L_0 gerechnet. Dabei bleibt unberücksichtigt, dass sich der Querschnitt und die Länge aufgrund der Krafteinwirkung verändern und somit das Ergebnis beeinflussen. Diese wahren Spannungen und Dehnungen lassen sich jedoch bis zur Zugfestigkeit recht einfach aus dem Zugversuch berechnen. Voraussetzung für die Gültigkeit der folgenden Gleichungen ist die Volumenskonstanz. Es muss das Volumen vor und nach dem Zugversuch gleich sein, also $A_0 \cdot L_0 = A \cdot L$. Damit ergibt sich die wahre Spannung:

$$\sigma_w = \frac{F}{A} = \frac{F * L_1}{A_0 * L_0} = \frac{F}{A_0} * \frac{(L_0 + \Delta L)}{L_0} \quad (\text{Gleichung 3})$$

Zur Berechnung der wahren Dehnung φ wird die differentielle Längenänderung dL des Zugstabes auf die momentane Länge L bezogen und durch Integration aufsummiert:

$$d\varphi = \frac{dL}{L} \quad (\text{Gleichung 4})$$

$$\varphi = \int_{L_0}^{L_1} \frac{dL}{L} = \ln \frac{L_1}{L_0} = \ln \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \quad (\text{Gleichung 5})$$

Diese Berechnung der wahren Spannung und Dehnung ist nur bis zur Höchstkraft F_m zulässig, das heißt bis zu Beginn der Einschnürung der Probe. Für die Berechnung darüber hinaus existiert eine Vielzahl von unterschiedlichen Berechnungsmodellen, auf die hier nicht eingegangen wird.

Aus den gemessenen Spannungs- und Dehnungswerten lässt sich nun das Spannungs-Dehnungs-Diagramm erstellen. Dieses Diagramm gibt Auskunft über mehrere Festigkeitskennwerte des verwendeten Werkstoffes wie Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul, Bruchspannung, Streckgrenze und Dehngrenze. Zum Vergleich der einzelnen Zugproben, welche mit unterschiedlichen Druckparametern gedruckt wurden, werden nur die Zugfestigkeit sowie der E-Modul herangezogen. Der Elastizitätsmodul ist dabei der Proportionalitätsfaktor im Hookeschen Gesetz $\sigma = E * \varepsilon$. Dieses Gesetz beschreibt den linearen Zusammenhang von Spannung und Dehnung im elastischen Bereich. Der E-Modul hat die Einheit einer Spannung, ist aber kein Spannungswert, sondern ein Maß für den Widerstand eines Werkstoffes gegen elastische Verformung. Nach dem elastischen Bereich, also ab einer gewissen Spannung, erfolgt zusätzlich zur elastischen die plastische Verformung. Letztere ist tunlichst zu vermeiden, da sich das Werkstück nach Weglassen der Kraft nicht mehr in die Ausgangsposition zurückformt und die plastische Verformung somit irreversibel ist. Der Übergang von elastischen zur elastisch-plastischen Verformung kann dabei unstetig mit ausgebildeter Streckgrenze, wie es hauptsächlich bei Metallen vorkommt, sowie stetig, wie bei den meisten Kunststoffen, erfolgen. Bei weiterer Krafterhöhung beginnt an dem Punkt der maximalen Kraft F_m , welche der Zugfestigkeit entspricht, die Einschnürung des Zugstabes. Bis zu diesem Punkt verlängert sich die Zugprobe und aufgrund der Volumenskonstanz verringert sich der Querschnitt. Dies wird Gleichmaßdehnung genannt. Ab der Höchstkraft schnürt sich die Probe an einem Punkt immer stärker ein und es sinkt die notwendige Kraft und damit auch die Spannung, bis der Zugstab schließlich bei der Bruchspannung bricht.

5.2.2 Versuchsaufbau

Für den Zugversuch wurde die Universalprüfmaschine vom Typ UTS-20 der Firma UTS-Testsysteme verwendet, siehe (1) in Abbildung 38. Die Maschine verfügt über eine Fahrtraverse, welche über zwei Gewindespindeln bewegt wird. Diese werden über einen Gleichstrommotor angetrieben und es können Zug- und Druckkräfte bis zu 5000 N aufgebracht werden. Zur Auswertung der Messwerte in Echtzeit wird zur Kommunikation zwischen Prüfmaschine und Auswerte-PC (3) ein zusätzlicher Computer, ein sogenannter „Industrial Personal Computer“ (2), kurz IPC, geschaltet. Dieser ist besonders robust und hat anstatt einer herkömmlichen Festplatte einen

„Disc On Chip“-Speicher. Das Senden und Empfangen der Messdaten geschieht dabei mit dem „Real-Time Transport Protocol“, womit die Anforderung an die Echtzeitfähigkeit erfüllt wird. Auf dem handelsüblichen PC werden mit der beiliegenden Software PHOENIX vom Maschinenhersteller die Einstellungen vorgenommen und die Messdaten ausgewertet.

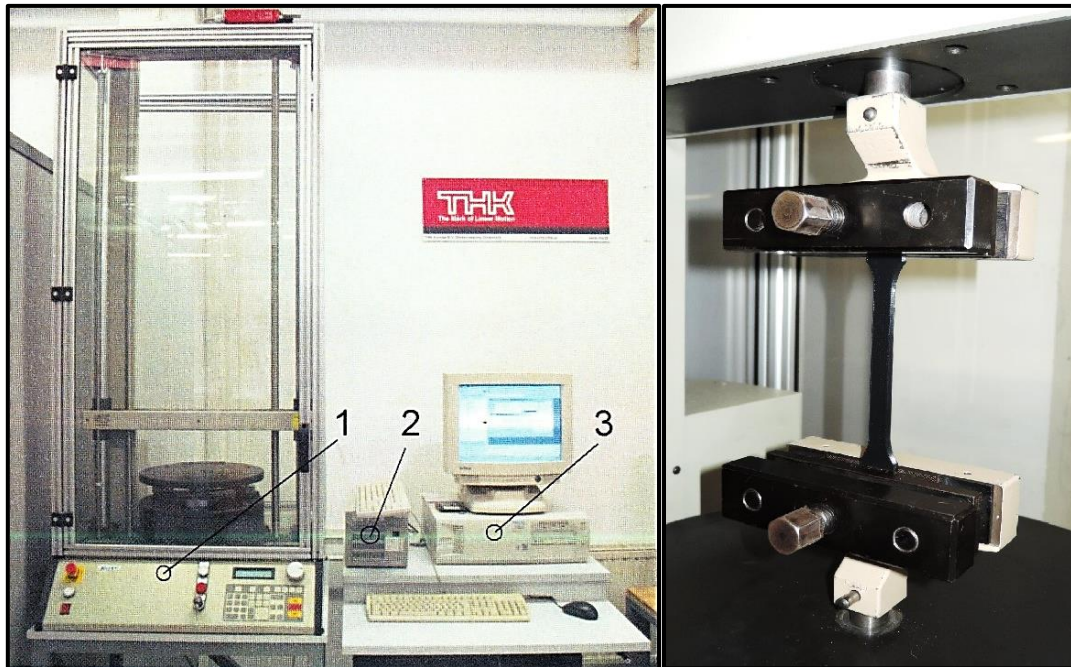


Abbildung 38: Prüfplatz Zugprüfung links; Einspannung rechts [16]

Zur Messung der Kraft sind unter der Grundplatte drei Kraftmessdosen angebracht, welche die aktuell auf die Grundplatte wirkende Kraft messen. Dadurch kann während dem Zugversuch der Verlauf der Kraft bestimmt werden, die gemeinsam mit der Veränderung der Werkstücklänge die Spannung ergibt. Zur Messung der Längenänderung können externe Messeinrichtungen, wie zum Beispiel ein Extensometer, verwendet oder, wie bei der hier verwendeten Maschine, die Traversenposition bestimmt werden. Da sich die Traverse bei Krafteinwirkung verformt, muss diese Verformung in das Ergebnis miteinbezogen werden. Dazu wird bei einem eigenen Probeversuch die Traverse möglichst steif mit der Grundplatte verschraubt und danach ein Zugversuch durchgeführt. Somit ergibt sich ein Verlauf der Durchbiegung der Traverse - dieser Ausgleich kann nun automatisch für den eigentlichen Zugversuch übernommen werden.

Die Einspannung der Zugstäbe erfolgt über eine einfache Spannvorrichtung, welche der Maschine beiliegt. Die Bauteile werden mit Backen gespannt, die Halterung selber ist über Bolzen mit der Grundplatte und der Traverse verbunden (siehe Abbildung 38 rechts). Nach dem nun folgenden Zugversuch liegen als Ergebnisse die jeweiligen Längenänderungen mit den zugehörigen Kräften als Datei vor. Diese Datei kann in einem Tabellenkalkulationsprogramm eingelesen und die wahre sowie die technische Spannung berechnet werden.

5.3 Druckparameter

In dieser Arbeit soll der Einfluss verschiedener Druckparameter auf das Druckergebnis des Benchmark-Teils erfasst werden. Im Folgenden werden diese Parameter beschrieben.

5.3.1 Düsentemperatur

Als Hauptparameter gilt die Düsentemperatur, also die Temperatur, mit der die Düse das Material aufschmilzt. Da hier die Formgebung und die Verbindung mit dem bereits vorhandenen Material erfolgt, ist diese Temperatur für einen erfolgreichen Fertigungsprozess essentiell. Diese ist in erster Linie vom Material abhängig und muss über der Schmelztemperatur liegen. Bei dieser Arbeit wird ausschließlich Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) verwendet, wobei hier der Schmelzpunkt bei 210- 240°C liegt. Polylactid (PLA) wäre die Alternative für das FDM-Verfahren. Dieses Material hat einen deutlich geringeren Schmelzpunkt von 160- 190°C. Da die Temperatur über der Schmelztemperatur liegen muss, ergibt sich für ABS bei dem für diese Arbeit verwendeten Drucker eine Düsentemperatur von ca. 300°C. Da es Ziel ist, die möglichen Grenzen der Temperatur zu finden, wird ein Druckbereich von 260- 330°C gewählt. Dieser wird in 10°C- Schritten durchlaufen und es erfolgt jeweils ein Druck bei gleichbleibender Bauraumtemperatur.

Bei höheren Temperaturen verbindet sich das aktuelle Material besser mit dem bestehenden Werkstück, jedoch ist die Gefahr des Aufwölbens, dem sogenannten Warping, aufgrund der höheren Temperaturgradienten sehr groß. Dem kann mit einer Erhöhung der Bauraumtemperatur entgegengewirkt werden. Bei Senkung der Düsentemperatur sinkt dementsprechend das Risiko des Aufwölbens, jedoch verbinden sich die Bauteilschichten nicht mehr perfekt.

5.3.2 Bauraumtemperatur

Die Bauraumtemperatur beträgt beim verwendeten Stratasys - Drucker standardmäßig 75°C. Diese Temperatur soll Warping verhindern und eine bessere Verbindung der Schichten herstellen. Einfachere Drucker haben meistens keinen beheizten Bauraum, hier wird stattdessen eine beheizte Bauplattform verwendet. Die Bauraumtemperatur wird ebenfalls variiert, wobei hier jedoch nur ein kleiner Bereich von 60- 80°C möglich ist. Auch hier wird wie zuvor bei gleichbleibender Düsentemperatur die Bauraumtemperatur geändert und jeweils ein Benchmark-Teil gedruckt, um die Temperaturgrenzen zu erfahren.

5.3.3 Bauteilausrichtung im Raum

Als weiterer Parameter ist die Ausrichtung des Bauteils im Bauraum zu nennen, da unterschiedliche Ergebnisse entstehen, wenn eine Geometrie horizontal auf der Ebene oder senkrecht auf die Ebene erzeugt wird. Bei letzterer Variante ist die prinzipbedingte Stufung zu beachten, da zum Beispiel bei Bohrungen Stufenversätze entstehen (siehe Abbildung 5). Bei der horizontalen Fertigung entstehen dagegen Probleme bei Kanten und Spitzen, welche grundsätzlich einen oftmals nicht erwünschten Radius aufweisen. Zu der Ausrichtung sei gesagt, dass diese einen entscheidenden Einfluss auf die Druckzeit hat. Aufgrund der automatischen Fertigung des Stützmaterials verdoppelt sich die Druckzeit bei der vertikalen Fertigung des Benchmark-Teils.

5.3.4 Bauteilausrichtung in der Ebene

Dieser Parameter beschreibt die Ausrichtung des Bauteils auf der Bauplattform und wird nur bei den Zugstäben verwendet, da Festigkeitsunterschiede zu erwarten sind. Je nach Ausrichtung ergibt sich aufgrund der unterschiedlichen Winkel eine andere Grundstruktur, welche sich auf die maximalen Festigkeiten auswirken. Dabei werden, wie in Abbildung 39 ersichtlich, die Zugstäbe in unterschiedlichen Winkeln von 0° bis 45° in 15° Schritten gefertigt. Durch die Drehung ist die Ausrichtung der Stränge im Füllbereich, die durch die Schraffur in der Abbildung angedeutet wird, jeweils unterschiedlich. Auf der rechten Seite ist als Beispiel der Zugstab im Winkel von 30° zu sehen. Eine Schicht hat dabei den Winkel des Zugstabes, in diesem Fall 30° , die nächste Schicht steht 90° auf diesen Winkel (in diesem Beispiel 120°). Diese Unterschiede sollen durch den Zugversuch anhand der Festigkeitswerte bestimmt werden. Um ein statistisch relevantes Ergebnis zu erhalten, werden pro Parametereinstellung fünf Drucke gefertigt und vermessen. Damit können die Ergebnisse gemittelt und somit eventuelle „Ausreißer“ erkannt werden. Bei den vertikalen Drucken wurde nur jeweils ein Zugstab gedruckt, da hier die Druckzeit sehr hoch ist.

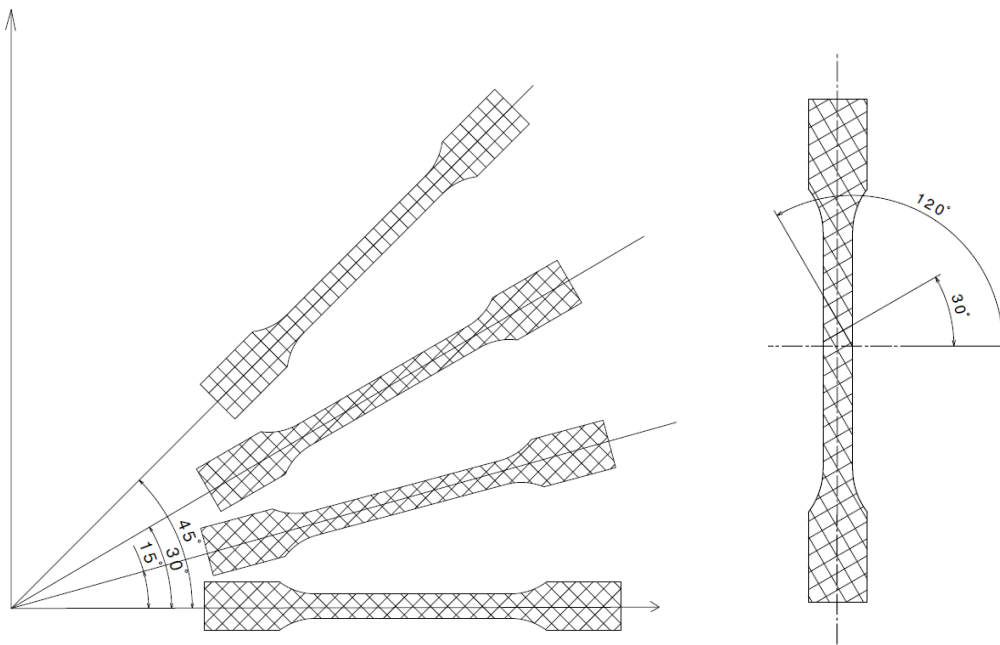


Abbildung 39: Ausrichtung Zugstäbe in der Ebene (links) und einzelner Zugstab im Winkel von 30° gefertigt (rechts)

5.4 Versuchsplan

In der folgenden Tabelle 2 sind alle einzelnen Druckversuche mit den verschiedenen Druckparametern aufgelistet. Somit wird jeder Drucknummer eine spezielle Parametereinstellung zugeteilt. Bei den ersten sechs Drucken erfolgt die Variation der Düsentemperatur, danach wird bei den nächsten zwei Drucken die Bauraumtemperatur variiert. Die Drucke Nummer 9 bis 11 sind vertikal gefertigt, bei den letzten drei Drucken wird die Ausrichtung in der Ebene geändert.

Zu den letzten drei Drucknummern sei gesagt, dass diese nur für die Zugproben gelten. Die Ausrichtung in der Ebene hat nur Einwirkungen bei den Zugstäben, die Benchmark-Teile werden immer in der gleichen Position in der Ebene gedruckt.

Tabelle 2: Druckparameter und Drucknummern

Druck Nr.	Bauraum-Temp.	Düsentemp.	Ausrichtung	Ausrichtung Ebene
1	75	270	horizontal	0°
2	75	280	horizontal	0°
3	75	290	horizontal	0°
4	75	300	horizontal	0°
5	75	310	horizontal	0°
6	75	320	horizontal	0°
7	70	300	horizontal	0°
8	80	300	horizontal	0°
9	75	270	vertikal	0°
10	75	300	vertikal	0°
11	75	320	vertikal	0°
12	75	290	horizontal	15°
13	75	290	horizontal	30°
14	75	290	horizontal	45°

6 Geometrische Vermessung

Neben der Technik des 3D-Druckens spielt die Messtechnik eine weitere wichtige Rolle in dieser Arbeit. Nach der vorangegangenen Fertigung der Teile müssen diese gemessen und ausgewertet werden. Dazu kommen in diesem Falle zwei verschiedene Verfahren zum Einsatz - die optische Messtechnik und die taktil Messtechnik. Auf die Messvorrichtungen sowie auf die jeweiligen Grundlagen wird im folgenden Kapitel eingegangen.

6.1 Grundlagen

Da ein Werkstück nach der Fertigung, wobei das Fertigungsprinzip irrelevant ist, nie hundertprozentig dem Soll entspricht, müssen verschiedene zulässige Abweichungen und Toleranzen festgelegt werden. Von diesen Abweichungen gibt es verschiedene Arten, diese sind Maß-, Rauheits-, Form- und Lageabweichungen. Die einzelnen Arten sind in Abbildung 40 zu sehen. Damit lässt sich ein Werkstück vollständig bemaßen und definieren. Wie grob oder fein die jeweiligen Toleranzen der Maße gewählt werden, hängt vom Einsatzgebiet des Bauteils ab.

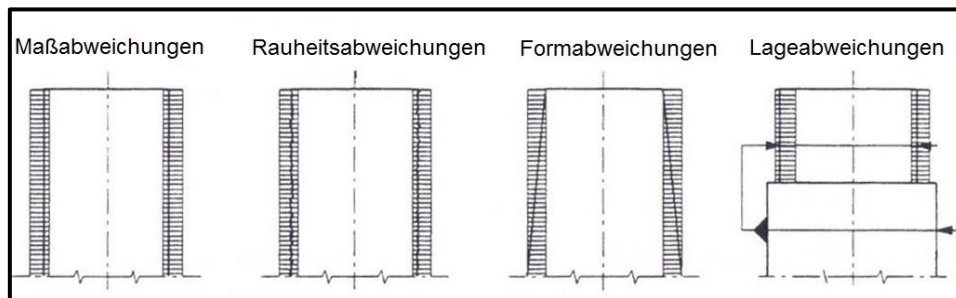


Abbildung 40: Geometrische Abweichungen [17]

In dieser Arbeit spielen alle vier oben genannten geometrischen Abweichungen eine Rolle. Hauptsächlich verwendet werden die Maßabweichungen sowie die Rauheitsabweichungen, da viele Geometrien und Rauheiten vermessen werden. Auf die Rauheitsmessung wird im folgenden Kapitel eingegangen

Zu den vorhandenen Abweichungen sei gesagt, dass diese unterschiedliche Ordnungen haben (siehe Abbildung 41). Dabei ist von besonderer Bedeutung, in welcher Größenordnung man sich bewegt. In der Makrogeometrie wird das Werkstück im Großen betrachtet, wozu Formabweichungen sowie die Welligkeit zählen. Wenn man sich in kleinen Messbereichen bewegt, ist man bei der Mikrogeometrie, wozu der Gitteraufbau und die Gitterstruktur zählen.

Gestaltabweichung (als Profilschnitt dargestellt)	Beispiele für die Art der Abweichung	Beispiele für die Entstehungsursache	
1. Ordnung: Formabweichungen 	Unebenheit <u>Unrundheit</u>	Fehler in den Führungen der Werkzeugmaschine, durch Biegung der Maschine oder de Werkstückes, falsche Entspannung des Werkstückes, Härteverzug, Verschleiß	
2. Ordnung: Welligkeit 	Wellen	Außermittige Einspannung oder Formfehler eines Fräasers, Schwingungen des Werkzeugmaschine oder des Werkzeugs	
3. Ordnung: 	Rau- heit	Rillen	Form der Werkzeugschneide, Vorschub oder Zustellung des Werkzeuges
4. Ordnung: 		Riefen Schuppen Kuppen	Vorgänge der Spanbildung (<u>Reißspan</u> , Scherspan, Aufbauschneide), Werkstoffverformung beim Sandstrahlen, Knospenbildung bei galvanischer Behandlung
5. Ordnung: nicht mehr in einfacher Weise bildlich darstellbar		Gefüge- Struktur	Kristallisationsvorgänge, Veränderung der Oberfläche durch chemische Einwirkung (z.B. Beizen), <u>Korrosionsvorgänge</u>
6. Ordnung: nicht mehr in einfacher Weise bildlich darstellbar	Gitterbau des Werkstoffes	Physikalische und chemische Vorgänge im Aufbau der Materie, Spannungen und <u>Gleitungen</u> im Kristallgitter	
 Übergang der Gestaltabweichung 1. bis 4. Ordnung			

Abbildung 41: Gestaltabweichungen [17]

Je nach geforderter Information können durch passende Filter bei der Rauheitsmessung ungewünschte Ordnungen herausgefiltert werden und damit das Ergebnis auf das Wesentliche beschränken.

6.1.1 Rauheitsmessung

Die Festlegung und Überprüfung der Rauheit von Oberflächen ist besonders wichtig, da sie Reibungsverhalten, Ermüdungsfestigkeit, Verschleißwiderstand sowie das Aussehen von Bauteilen bestimmt. Da die Fertigungskosten für qualitativ höherwertige Oberflächen progressiv steigen, lassen sich durch die Festlegung von Rauheiten oftmals Kosten sparen. Eine allgemein höhere und nur an den Funktionsflächen verminderte Rauheit ist weitaus kostengünstiger als eine durchgängig verminderte Rauheit.

Im Allgemeinen gibt es einige unterschiedliche Möglichkeiten, die Rauheit einer Oberfläche zu messen. Die gängigsten Verfahren sind dabei das Tastschnitt- und das Lichtoptische Verfahren. Beim Tastschnitt Verfahren wird eine Diamant - Tastspitze über das Oberflächenprofil bewegt, welche Erhöhungen und Vertiefungen aufzeichnet. Im Anschluss werden die Gestaltabweichungen erster und zweiter Ordnung herausgefiltert, was den Formabweichungen und der Welligkeit entspricht, um das Rauheitsprofil zu erhalten. Bei diesen verwendeten Hochpassfilter werden die Wellen mit niedrigen Frequenzen abgeschwächt und nur die Hochfrequenten werden zur Auswertung herangezogen. Das Tastschnitt-Verfahren zeichnet sich durch die einfache und schnelle Anwendung aus, jedoch ergibt sich durch die verwendete Diamantspitze ein Informationsverlust. Berücksichtigt werden muss, dass Furchen, die kleiner als die Spitze sind, nicht erkannt werden. Trotzdem ist das Tastschnitt Verfahren noch immer das meist verwendete in der Industrie [17].

In dieser Arbeit wird auf die Verwendung dieses Verfahrens verzichtet, stattdessen wird die Rauheit rein optisch gemessen. Dabei wird das Rauheitsprofil durch das Verfahren der Fokusvariation ermittelt. Bei der optischen Messung ist im Gegensatz zum Tastschnitt-Verfahren kein Informationsverlust bei sachgemäßer Verwendung zu befürchten. Hier ist jedoch auf die Positionierung und die Belichtung Rücksicht zu nehmen. Die Optik sollte unbedingt im rechten Winkel auf die Oberfläche stehen, da sonst etwaige Erhöhungen „Schatten“ werfen können, die nicht erfasst werden und so das Ergebnis verfälschen. Zu helle oder zu dunkle Stellen können ebenfalls zu Informationsverlust führen, daher ist auf die Belichtung und auf die Bildeinstellungen zu achten. Eine genaue Beschreibung des Messaufbaus erfolgt in Kapitel 6.2.1.

Wie vorher bereits kurz beschrieben, muss das Ergebnis der Rauheitsmessung, egal welcher Herkunft, in Rauheit und Welligkeit unterschieden werden. Entscheidend dazu ist die Einzelmessstrecke l_r , auch λ_c genannt, welche den Übergang zwischen Rauheit und Welligkeit nach der Norm DIN EN ISO 4288 definiert. In Abbildung 42 sind die verschiedenen l_r - Werte in Abhängigkeit von der Rauheit der Oberfläche zu sehen. Da die Rauheit erst mit l_r bestimmt werden kann, muss diese zu Beginn geschätzt werden. Dies kann mittels Sichtprüfung, Oberflächen- Vergleichsmustern oder graphischer Auswertung erfolgen. Damit ergibt sich mit der Tabelle in Abbildung 42 ein erster l_r - Wert, mit welchem gemessen und das Ergebnis mit dem geschätzten verglichen wird. Falls man nicht im gleichen Bereich liegt, wird der Wert geändert und erneut gemessen. Unter Einhaltung der Messstrecke erhält man somit eine normgerechte Rauheit, unabhängig von der Art des Verfahrens.

R_a μm	Einzelmessstrecke l_r mm	Meßstrecke l_n mm
$(0,006) < R_a \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < R_a \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < R_a \leq 2$	0,8	4
$2 < R_a \leq 10$	2,5	12,5
$10 < R_a \leq 80$	8	40

R_z ¹⁾ $R_{z1_{\max}}$ ²⁾ μm	Einzelmessstrecke l_r mm	Meßstrecke l_n mm
$(0,025) < R_z, R_{z1_{\max}} \leq 0,1$	0,08	0,4
$0,1 < R_z, R_{z1_{\max}} \leq 0,5$	0,25	1,25
$0,5 < R_z, R_{z1_{\max}} \leq 10$	0,8	4
$10 < R_z, R_{z1_{\max}} \leq 50$	2,5	12,5
$50 < R_z, R_{z1_{\max}} \leq 200$	8	40

¹⁾ R_z wird zugrunde gelegt beim Messen von R_z, R_v, R_p, R_c und R_t .
²⁾ $R_{z1_{\max}}$ wird zugrunde gelegt beim Messen von $R_{z1_{\max}}, R_{v1_{\max}}, R_{p1_{\max}}$ und $R_{c1_{\max}}$.

Abbildung 42: Messbedingungen Rauheitsmessung [18]

Nachdem das Oberflächenprofil gemessen und gefiltert wurde, kann mit der Auswertung begonnen werden. Es gibt eine hohe Anzahl von verschiedenen Kenngrößen, jedoch werden nur die bei der Probenauswertung verwendeten erläutert. Als wichtigster Vergleichswert der Rauheitsmessung dient der Mittenrauwert R_a . Dieser ist der arithmetische Mittelwert des Absolutwertes der Abweichung Y entlang der Messstrecke (siehe Abbildung 43, [17])

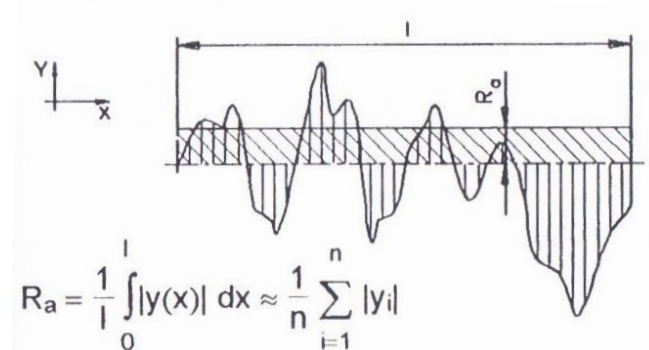


Abbildung 43: Mittenrauwert R_a [17]

Als weitere Kenngröße liegt die gemittelte Rautiefe R_z vor, welche auf zwei unterschiedliche Arten definiert werden kann. Bei der Zehn-Punkt-Methode wird der arithmetische Mittelwert aus je fünf Werten von Profilsitzen und Profiltiefen gebildet. Dabei kann das Ergebnis durch dem Profil überlagerte Unregelmäßigkeiten und starke Welligkeiten verfälscht werden. Deswegen greift man oftmals auf die Fünf-Teil-Messstrecken-Methode zurück, siehe Abbildung 44. Hierzu wird die Messstrecke in fünf gleich lange Teil-Messstrecken aufgeteilt und für jede einzelne die maximale Profilhöhe bestimmt. Danach erfolgt die Bildung des arithmetischen Mittelwerts [17].

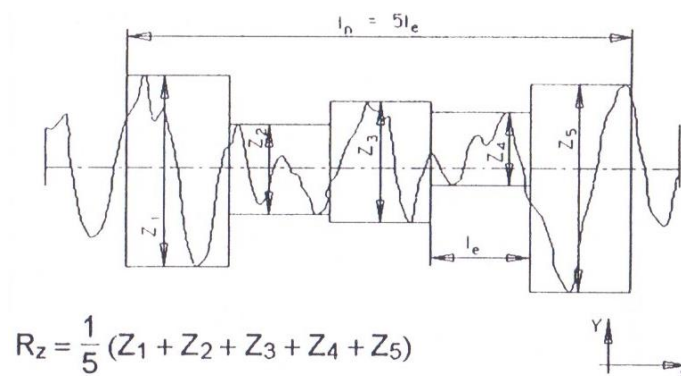


Abbildung 44: Rautiefe R_z nach der Fünf-Teil-Messstrecken-Methode [17]

Die beiden genannten Messwerte R_a und R_z werden jeweils entlang einer Linie auf der Oberfläche gemessen. Diese Messstrecke kann zwar beliebig lang sein, es kann aber nie die gesamte Oberfläche erfasst werden. Damit geht immer ein Informationsverlust einher, da die Möglichkeit besteht, dass die nicht erfassten Stellen das Ergebnis ändern. Im Normalfall ist davon auszugehen, dass die Oberfläche gleichmäßig und unter Einhaltung der genormten Messstrecke der Fehler vernachlässigbar ist. Bei optischen Verfahren ist es jedoch relativ einfach möglich, die gesamte Oberfläche zu vermessen und auszuwerten. Dazu gibt es die Kenngrößen S_a und S_z , welche äquivalent zu den vorhergenannten R_a und R_z sind, jedoch erfolgt die Berechnung über

die gesamte Oberfläche. Dadurch können auch ungleichmäßige Oberflächen fehlerfrei bewertet werden.

6.1.2 Form- und Lagetoleranzen

Nach der Bestimmung der Maß- und Rauheitsabweichungen erfolgt als nächstes die Messung der Lage- und Formabweichungen. Da das Bauteil aus verschiedenen Formelementen besteht, welche wiederum nicht geometrisch ideal herzustellen sind, müssen auch hier Toleranzen angegeben werden.

Die Formtoleranzen geben dabei eine zulässige Abweichung des Bauteils von seiner idealen Form an. Sie beziehen sich in der Regel auf ein Formelement und bestimmen die Toleranzzone, innerhalb welcher sich das Bauteil bewegen muss. Dazu gehören Eigenschaften wie Geradheit, Ebenheit, Rundheit und Zylinderform. Die Lagetoleranzen hingegen sind Richtungs-, Orts- oder Lauftoleranzen. Sie geben die geometrisch zulässigen Abweichungen zweier oder mehrerer Elemente zueinander an. Dabei wird ein Element als Bezugselement festgelegt, wobei aber auch mehrere Elemente gewählt werden können. Zu diesen zählen die Richtungstoleranzen Parallelität, Rechtwinkeligkeit und Neigung sowie die Ortstoleranzen Position, Konzentrität, Koaxialität. Durch die Lagertoleranz wird die Lage zwischen Elementen bestimmt und, wenn keine Formtoleranz angegeben ist, kann die Form beliebig sein.

Wie zuvor werden im Weiteren nur die in dieser Arbeit verwendeten Form- und Lagetoleranzen beschrieben. Die Formtoleranz Rundheit gibt Informationen über die Rundheit von Bohrungen und Wellen. Wie in Abbildung 45 ersichtlich, wird die Toleranzzone von zwei konzentrischen Kreisen mit dem Abstand t begrenzt. Das Maß t gilt als entscheidender Wert für die Aussagekraft der Rundheit. Im Beispiel in der Abbildung muss jeder achsnormale Kreis am Zylinder innerhalb eines Kreises mit der Breite 0,03 mm liegen [17].

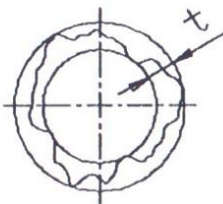
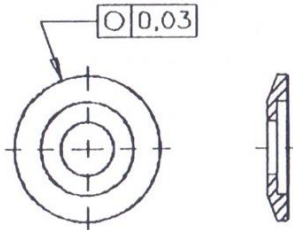
Symbol	Tolerierte Eigenschaft	Toleranzzone	Zeichnungsangabe
	Rundheit		

Abbildung 45: Formtoleranz Rundheit [17]

Als weitere Formtoleranz wird die Ebenheit genannt, siehe Abbildung 46. Hier ist die Toleranzzone von zwei parallelen Ebenen mit dem Abstand t begrenzt. Der Wert t gibt Aussage über die Ebenheit - je größer dieser ist, umso unebener ist die Oberfläche. Das Beispiel gibt eine Fläche an, die von zwei parallelen Ebenen mit dem Abstand von 0,08 mm begrenzt wird [17].

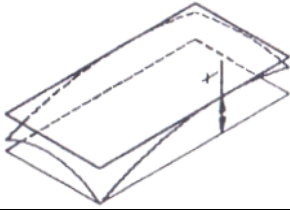
Symbol	Tolerierte Eigenschaft	Toleranzzone	Zeichnungsangabe
	Ebenheit		

Abbildung 46: Formtoleranz Ebenheit [17]

Die Parallelität ist die einzig verwendete Lagetoleranz für das Benchmark-Teil. Die Toleranzzone wird von zwei parallelen Ebenen, die zur Referenzoberfläche parallel sind, mit dem Abstand t gebildet. Ein hoher Wert von t ergibt hier ebenfalls eine schlechte Parallelität. In der folgenden Abbildung 47 ist als Beispiel eine Oberfläche zu sehen, die innerhalb zwei zur Referenzfläche parallelen Ebenen mit der Breite 0,01 mm liegen muss [17].

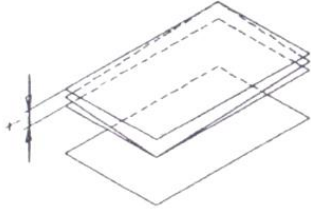
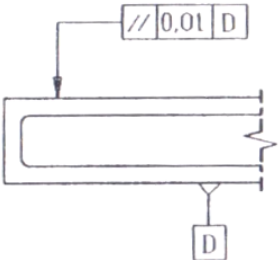
Symbol	Tolerierte Eigenschaft	Toleranzzone	Zeichnungsangabe
	Parallelität		

Abbildung 47: Lagetoleranz Parallelität [17]

6.1.3 Koordinatenmesstechnik

Die Koordinatenmesstechnik ist ein vielseitig einsetzbares Messverfahren zur punkweisen Vermessung einer Werkstückoberfläche. Die einzelnen Oberflächenpunkte werden danach mit mehreren Zwischenschritten zur Ist-Gestalt zusammengefügt. Die Aufnahme der Messpunkte kann dabei mit Berührung (taktile) sowie berührungslos (optische Sensoren) erfolgen. In dieser Arbeit wird nur auf ersteres eingegangen, da die hier verwendete Maschine mit berührender Antastung arbeitet. Wie in Abbildung 48 ersichtlich, werden die Messpunkte durch mathematische Modelle miteinander verknüpft und ergeben somit ein „numerisches Bild“ des Bauteils. An diesem Geometrieelement können nun verschiedenste Messungen vorgenommen werden [19].

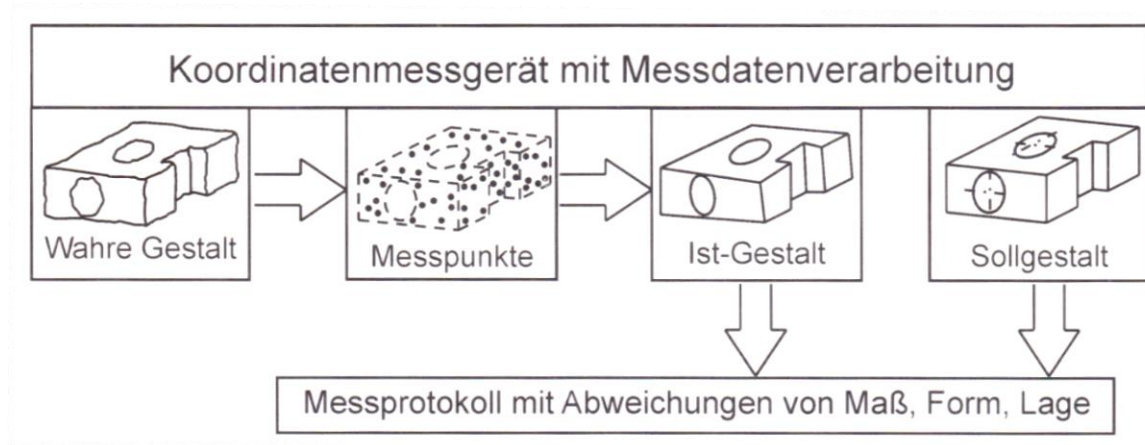


Abbildung 48: Grundprinzip Koordinatenmesstechnik [19]

Mit der Koordinatenmesstechnik lassen sich neben Maßen, Abständen und Winkel auch Formabweichungen und Lagebezeichnungen messen. Sie eignet sich zur Einzelmessung sowie für die Messung kleiner und mittlerer Serien. Komplexe Bauteile wie Turbinenschaufeln, Getriebe- und Motorgehäuse, Zahn- und Schneckenräder sowie Gewindespindeln lassen sich überprüfen.

Das Tastelement am Messkopf ist üblicherweise eine Kugel, weswegen das Messergebnis kein wahres Bild von der Werkstückoberfläche ist. Die Koordinaten der gemessenen Punkte liegen vor der Oberfläche, daher muss der Tastkugelmittelpunkt äquidistant in die Werkstückoberfläche hinein verschoben werden. Zusätzlich muss die Tasterradiuskorrektur zur Kompensation der Abplattung des Tastkörpers sowie der Durchbiegung des Tasterschafts durch die Messkraft berücksichtigt werden. In Abbildung 49 ist ein typisches taktils Messkopfsystem zu sehen. Es ist die Kugel als Tasterelement ersichtlich, welche über eine Verlängerung und ein Tasterwechselsystem - was oftmals zur Vermeidung von Beschädigungen magnetisch arbeitet, mit dem Messkopf und der Pinole verbunden ist [19].

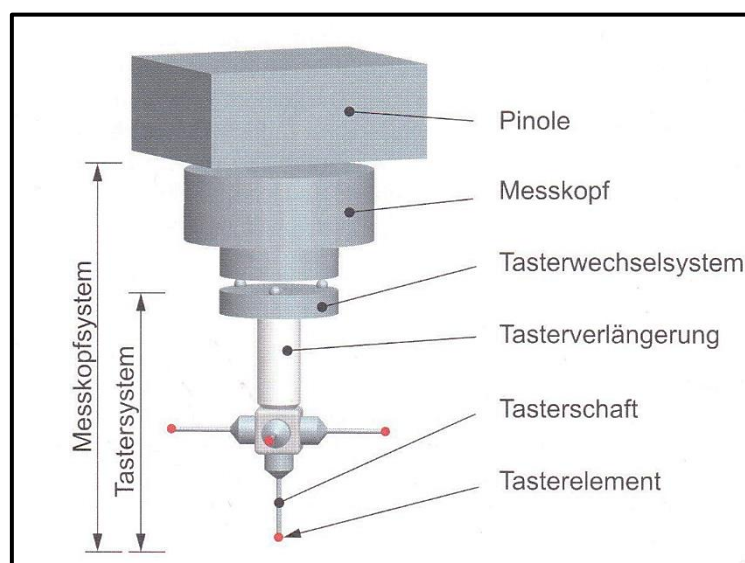


Abbildung 49: Messkopf für die taktile Messung [19]

6.2 Messmittel (Messaufbau)

Nachdem kurz auf die Grundlagen eingegangen wurde, werden nun der Aufbau der Messungen und die Durchführung beschrieben. Es kommen grundsätzlich zwei Messarten zum Einsatz - die optische Messtechnik sowie die Koordinatenmesstechnik (taktile). Zur Überprüfung der Gewinde wurde zusätzlich eine Steigungslehre verwendet, wobei diese keiner der vorhergenannten Techniken zuzuordnen ist.

6.2.1 Optische Messtechnik

Zur Messung der meisten Maße des Benchmark-Teils wird die optische Messtechnik verwendet. Dazu wird das optische 3D-Oberflächenmessgerät Infinite Focus G4 von der Firma Alicona Imaging GmbH verwendet. In Abbildung 50 sind die Maschine sowie die technischen Daten zu sehen. Mit dem Messgerät können neben beliebigen Geometrien auch Oberflächenrauheiten gemessen werden. Die Maschine besitzt fünf verschiedene Objektive, mit denen je nach Anwendung eine bis zu 100-fache Vergrößerung eingestellt werden kann. Für eine optimale Belichtung steht ein digital steuerbares LED Ringlicht zur Verfügung. Die Steuerung und Auswertung erfolgt mit der mitgelieferten Software IF-Laboratory Measurement 5.1. Zur Bildverbesserung kann zusätzlich ein Polarisator zugeschaltet werden. Aufgrund der Filterung durch polarisierte elektromagnetische Wellen kann die Oberfläche besser sichtbar gemacht werden. Die Wirkung ist abhängig vom verwendeten Werkstoff.

Technische Daten	
Bezeichnung	Optisches 3D-Oberflächenmessgerät
Hersteller	Alicona Imaging GmbH
Messprinzip	Fokus-Variation
Messsystem	Optisch, berührungsloses 3-dimensionales Messen
Max. vertikale Auflösung	10 nm (100x Objektiv)
Max. laterale Auflösung	0,44 µm (100x Objektiv)
Min. messbarer Radius	1 µm (100x Objektiv)
Revolver	5 Objektive (5x/10x/20x/50x/100x)
Messbereich X/Y/Z	100/100/100 mm
Messvolumen	1 dm ³
Max. Werkstückmasse	20 kg
Probenoberfläche	Oberflächentopographie Ra über 10 nm, feste Oberfläche
Technische Details	· IF-Real3DRotationUnit zur Kompletterfassung von Bauteilen · Digital steuerbares LED Ringlicht

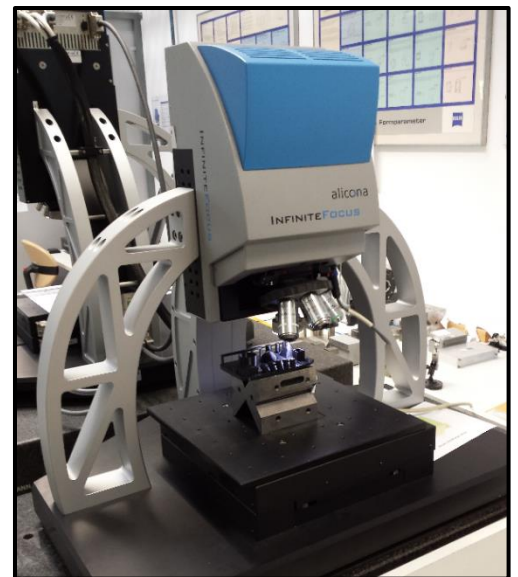


Abbildung 50: Alicona Infinite Focus G4

Für die Messung des Benchmark-Teils wurde das Objektiv mit der 5-fachen und somit der kleinsten Vergrößerung verwendet, da hier vergleichsweise große und grobe Oberflächen vorliegen. Die vertikalen und lateralen Auflösungen, das heißt die Schrittweiten, mit denen die Bilder aufgenommen werden, sind mit 9 bzw. 15 Mikrometer ebenfalls relativ hoch. Durch die Wahl der gröberen Einstellungen kann neben Einsparung von Speicherplatz vor allem die Messzeit verringert werden. Dies ist hier besonders wichtig, da große Oberflächen vermessen werden und der Faktor Zeit eine entscheidende Rolle spielt. Bei diesem Messgerät besteht die Möglichkeit, dreidimensionale Datensätze für die Rauheitsmessung sowie für Profilschnitte und Konturmessungen, aber auch zweidimensionale Bilder zu erzeugen. Dabei wird

versucht, Letzteres zu verwenden, da hier eine erhebliche Einsparung der Messzeit möglich ist.

Für die Rauheitsmessung der Türme, bei der die Rauheitsmessung an der hinteren bzw. oberen Kante stattfindet, muss das Benchmark-Teil für eine ordnungsgemäße Messung entsprechend den jeweiligen Neigungswinkeln der Türme geneigt sein. Dazu wurde eine Halterung konstruiert und anschließend mit dem 3D-Drucker ausgedruckt, siehe Abbildung 51. Mithilfe dieser sind verschiedene Positionen des Bauteils definiert, womit die Oberflächen der Türme in die Horizontale gesetzt werden. Die Stabilisierung des Benchmark-Teils auf der Halterung erfolgt mithilfe eines Gummiringes, welche auf der Rückseite der Halterung eingehakt werden kann. Bei der Rauheitsmessung wird laut Abbildung 42 bei der größten Messbedingung ein λ_c - bzw. l_r -Wert von 8 mm gewählt, da die Oberfläche in keinem Fall feiner als 10 μm ist. Die zugehörige Profilbreite für die Messung der Werte R_a und R_z wurde mit 5 μm festgelegt. Messungen auf der Unterseite des Bauteils sind ebenfalls möglich, dazu wird das Benchmark-Teil gewendet, auf die Kopfseite der Halterung gelegt und mit den schiefen Türmen beim Stutzen eingehakt.

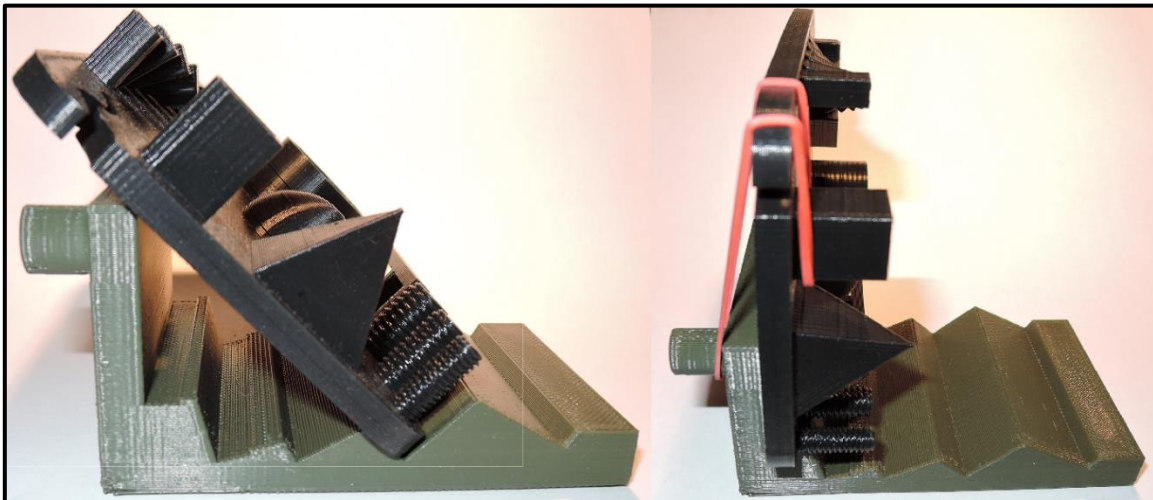


Abbildung 51: Halterung Benchmark-Teil mit Bauteil in zwei verschiedenen Positionen

6.2.2 Taktile Messtechnik

Als Koordinatenmessgerät kommt am Institut die taktile, also berührend arbeitende, Maschine der Firma Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH zum Einsatz. Die Maschine vom Typ DuraMax ist in Abbildung 52 mit den dazugehörigen technischen Daten zu sehen. Vorteil von diesem Messtyp im Gegensatz zur optischen Messtechnik ist die schnelle Messung und Auswertung bei relativ geringen Datengrößen. Es müssen lediglich die zu messenden Ebenen und ein Nullpunkt definiert werden. Für die Tasterradiuskorrekturen fährt zu Beginn der Tastkopf entlang eines Referenzelements, was in diesem Fall eine Kugel darstellt (siehe Abbildung 53 in der linken, hinteren Ecke). Nachdem die Programmierung erfolgt ist, kann der Ablauf für alle Teile wiederholt werden. Dazu wurde eine fixe Einspannung aufgebaut, siehe Abbildung 53, wo das Benchmark-Teil auf einem festgespannten Tisch gegen einen Anschlag gedrückt und mit einer Schraube festgehalten wird. Mit dieser

Spannvorrichtung kann jedes einzelne Teil positioniert und mit dem gleichen Programm vermessen werden.

Technische Daten	
Bezeichnung	3D-Koordinatenmessgerät
Hersteller	Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH
Grundbauart	Ausleger
Sensorik	VAST XXT, passiver Scanning-Messkopf
Messsystem	Taktil – berührendes Messen
Längenmessabweichung	2,4 + L/300 in μm
MPE E nach DIN EN ISO 10360-2 Für E (μm) bei 18,0 - 22,0 °C)	
Messbereich X/Y/Z	500/500/500 mm
Messvolumen	125 dm ³
Max. Werkstückmasse	100 kg
Kleinster Tasterkugeldurchmesser	0,3 mm
Technische Details	· Scanningmessrate bis zu 500 Punkte /s. · Tasterlänge axial 30 – 125 mm, radial bis zu 40 mm, · Max. Tastermasse = 10g · Tasterwechselmagazin inkl. 3 Tasterablagen, Temperaturstabil messen bis +30 °C



Abbildung 52: Zeiss DuraMax

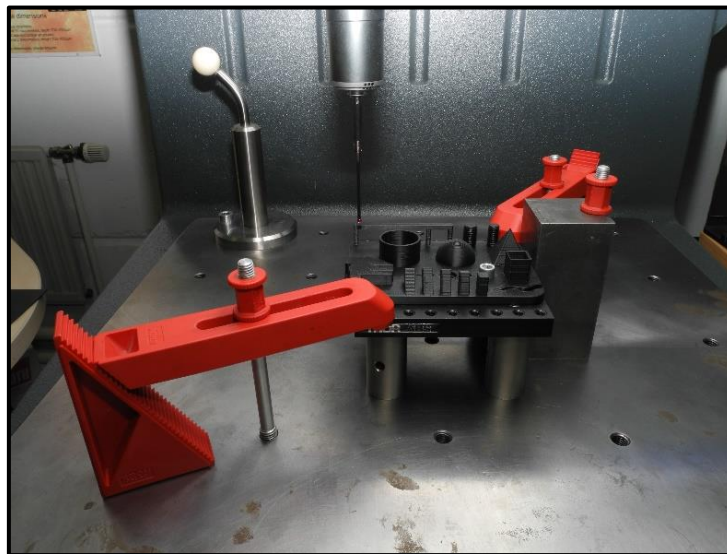


Abbildung 53: Messaufbau Koordinatenmessgerät

Bei dem zu messenden Benchmark-Teil werden die Winkel der Türme, die Ebenheit der Grundplatte, der Außen- und Innendurchmesser des Zylinders und die Parallelitäten von der Brücke zur Referenzfläche Grundplatte sowie von der Wellenober- zur Wellenunterseite gemessen. Die Messprotokolle werden im PDF Format für jede Messung einzeln ausgegeben und beinhalten neben den Messdaten auch graphische Darstellungen.

6.3 Ergebnisse optische Messungen

Im Folgenden wird auf die Messergebnisse der einzelnen Messwerte eingegangen. Es erfolgt immer ein Vergleich der unterschiedlichen Parameter, welche jeweils in eigenen Diagrammen aufgetragen werden. In Tabelle 2 sind die einzelnen Druckparameter mit

den zugehörigen Drucknummern ersichtlich. Um einen besseren Vergleich der Ergebnisse zu haben, ist bei den geometrischen Maßen der absolute Fehler, das heißt die Differenz von Ist- und Sollmaß, angegeben.

6.3.1 Resultate Türme

Die Türme sind besonders aussagekräftig, weshalb bei dieser Geometrie eine Vielzahl von Messungen durchgeführt wurde. Im ersten Diagramm in Abbildung 54 sind die absoluten Fehler der Neigungswinkel der Türme zu sehen. Auf der linken Seite sind die Fehler über die Drucktemperatur aufgetragen, in den Graphen sind die betragsmäßigen Werte der Türme 1-5 für beide Ausrichtungen durch Mittelung zusammengefasst. Die horizontalen Drucke weisen bei steigender Drucktemperatur einen leichten Trend nach oben auf, die Parameterabhängigkeit ist jedoch nur gering. Bei den vertikalen Drucken zeigt sich, dass die Fehler mit höherer Temperatur kleiner werden. Wie auf der rechten Seite der Abbildung ersichtlich, ist der Fehler bei 75°C am geringsten, ein Trend ist nicht ersichtlich. Hier wurden ebenfalls die betragsmäßigen Fehler der fünf Türme gemittelt. Die Fehler der Winkel sind allgemein sehr gering, das Druckergebnis ist sehr gut.

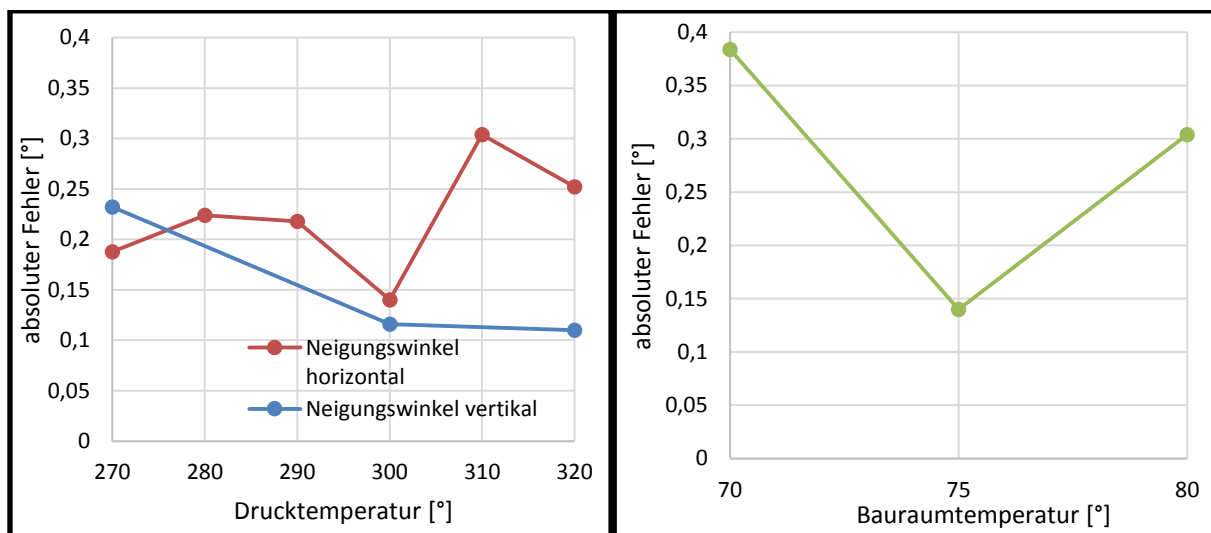


Abbildung 54: Fehler Neigungswinkel der Türme in Abhängigkeit der Temperaturen

In Abbildung 55 sind die absoluten Fehler der Kantenwinkel in Abhängigkeit der Temperaturen aufgetragen. Die Kanten sollten theoretisch einen Winkel von 90° haben, die Abweichungen von diesem Sollmaß sind in den Diagrammen angegeben. Auch hier sind links die Ergebnisse aller Türme zusammengefasst und für beide Ausrichtungen angegeben. Es zeigt sich horizontal ein fallender und vertikal ein leicht steigender Trend mit höherer Temperatur. Die absoluten Fehler sind deutlich größer wie zuvor bei den Neigungswinkeln. Die Abhängigkeit von der Bauraumtemperatur zeigt auf der rechten Seite einen ähnlichen Effekt, eine fallende Tendenz bei steigender Temperatur sowie größere Werte. Man kann somit zusammenfassen, dass die Kantenwinkel deutlich ungenauer gefertigt werden, was auf die Bahnaufbereitung rückzuführen ist. Die Abhängigkeit von den Druckparametern ist jedoch nur gering.

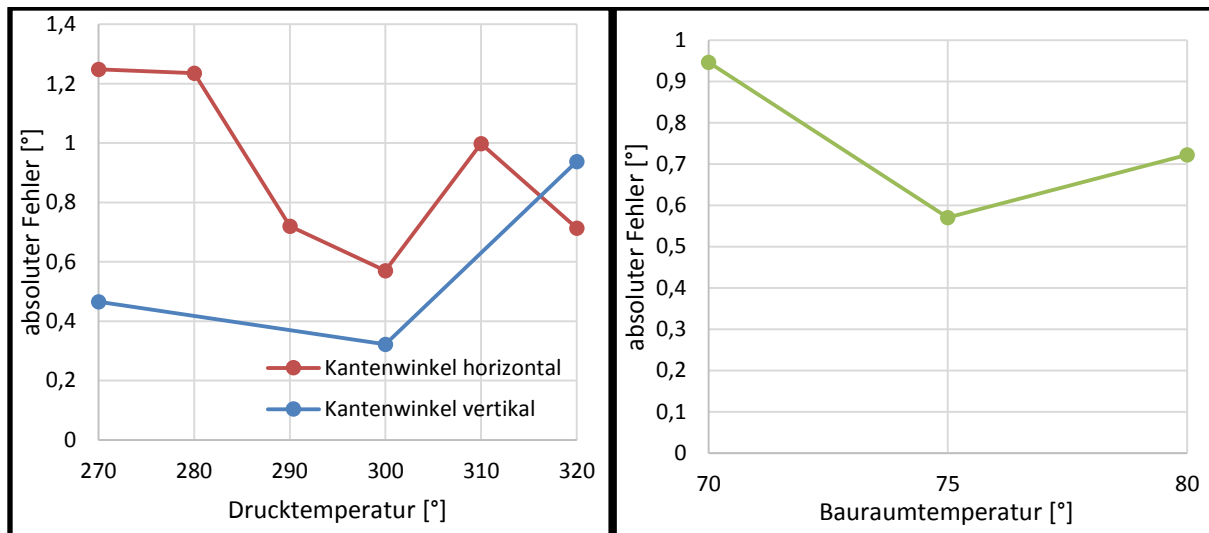


Abbildung 55: Fehler Kantenwinkel in Abhängigkeit der Temperaturen

Als Nächstes erfolgt die Bewertung der Kanten der Türme. Da verfahrenstechnisch keine perfekte Kante hergestellt werden kann, ist immer eine Verrundung bzw. eine Fase vorhanden. Diese Abweichungen wurden durch einen Kreis bzw. durch eine Fase angenähert und gemessen. In Abbildung 56 sind die Fasen bzw. Radian in Abhängigkeit der Drucktemperatur angegeben. Es erfolgt eine Trennung der Ausrichtungen im Bauraum, dazu sind im linken Diagramm die Ergebnisse vom horizontalen, im rechten Diagramm vom vertikalen Druck aufgetragen. Beim horizontalen Druck wurde bei Turm 1 der Radius vermessen, die Kanten der restlichen Drucke wurden durch Fasen angenähert. Es ist keine Abhängigkeit der Drucktemperatur zu erkennen, da die Fehler über alle Temperaturen nahezu konstant sind. Die Fehler selbst schwanken jedoch in einem großen Bereich. So ist der Radius des ersten Turmes mit ca. 0,2 mm sehr klein, die Fase des zweiten Turms mit über 1,4 mm deutlich größer. Die restlichen Türme liegen dazwischen. Beim vertikalen Druck auf der rechten Seite zeigt sich ebenfalls keine klare Temperaturabhängigkeit der Radian. Die Radian der einzelnen Türme sind deutlich feiner als bei der horizontalen Fertigung. In Abbildung 57 ist auf der rechten Seite ein Vergleich der Kanten zu sehen. Hier erkennt man, dass der horizontale Schichtaufbau bei Turm 1 eine deutlich feinere Kante als bei Druck 4 erzeugt. Beim vertikalen Druck ist optisch kein großer Unterschied zu erkennen, was durch die Messergebnisse bestätigt wird.

Der Effekt der Bauraumtemperatur ist im Diagramm auf der linken Seite in Abbildung 57 aufgetragen, wobei sich ebenfalls der gleiche Verlauf wie zuvor bei der Drucktemperatur zeigt. Die jeweiligen Werte weichen deutlich voneinander ab, es ist keine Temperaturabhängigkeit vorhanden. Die Unterschiede der Kanten sind folglich nur von der Ausrichtung des Bauteils abhängig, wobei hier die vertikale Bauweise zu bevorzugen ist.

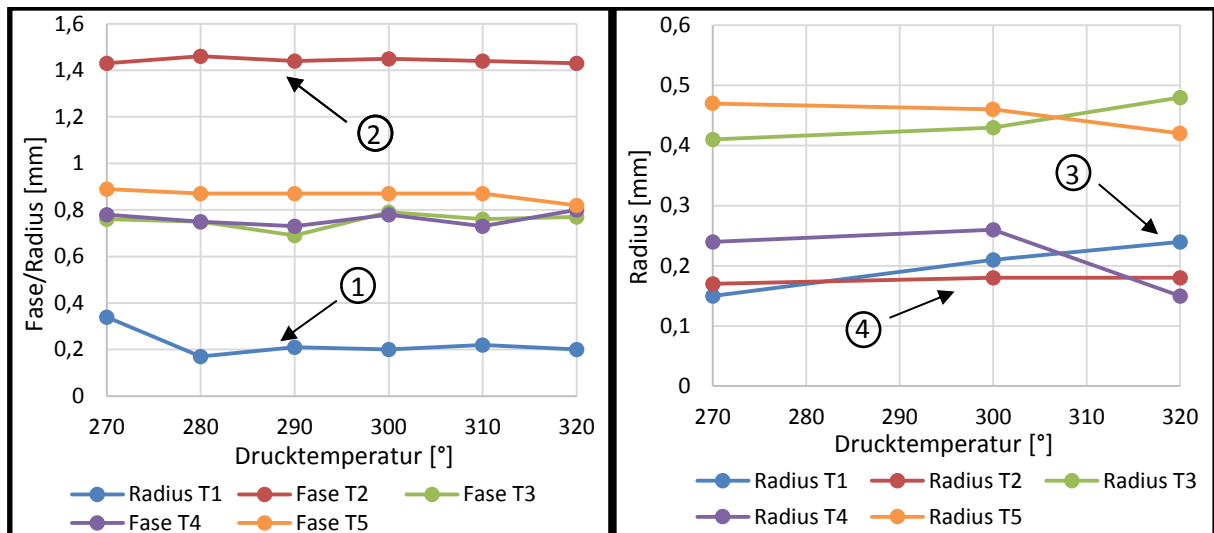


Abbildung 56: Fasen/Radien in Abhängigkeit der Drucktemperaturen; links - horizontal; rechts - vertikal

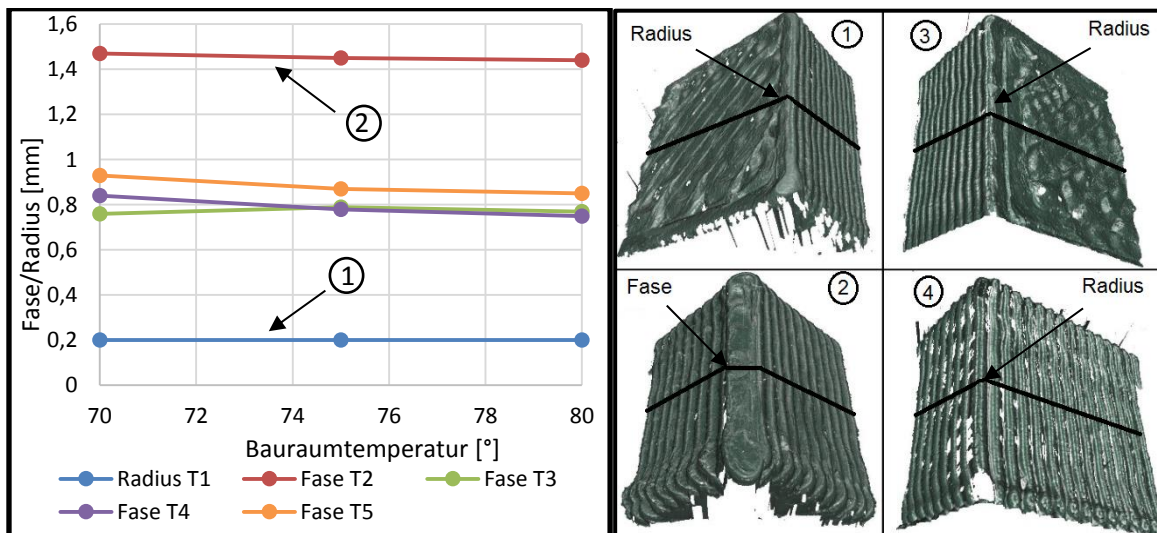


Abbildung 57: Fasen/Radien in Abhängigkeit der Bauraumtemperaturen (links); Vergleich der Kanten mit unterschiedlicher Ausrichtung (rechts)

Neben den Messungen der Geometrien wurde bei den fünf Türmen die Rauheit der Oberseite gemessen. Dabei wurden die Profilrautiefen R_a und R_z bzw. die Flächenrautiefen S_a und S_z gemessen. In Abbildung 58 sind die Messergebnisse der R_a -Werte in Abhängigkeit von der Drucktemperatur zu sehen. Im linken Diagramm sind die Werte der horizontalen Drucke aufgetragen, rechts sind die vertikalen Drucke zu angegeben. Es sind keine deutlichen Temperaturabhängigkeiten zu erkennen, lediglich bei 320°C sinkt bei den horizontalen Drucken bei allen Türmen die Rauheit. Der wesentliche Unterschied zeigt sich aufgrund der Ausrichtung beim Vergleich der beiden Diagramme. Es verschieben sich die Rauheiten aller Türme zu anderen Werten hin, wobei Turm 1 vertikal die feinste aller gemessenen Oberflächen hat. Turm 2 hat hingegen die größte Oberfläche, die anderen Türme bewegen sich in den selben Bereichen wie die horizontalen Drucke. Die Flächenrauheitswerte S_a verhalten sich gleich. Diese haben lediglich einen um 5-10 μm höheren Wert, weshalb sie hier nicht extra dargestellt werden. Neben den Druckparametern zeigt sich eine Abhängigkeit

der Rauheit von den Neigungswinkeln der Türme. Mit steigenden Winkel erhöht sich bei den horizontal gedruckten Bauteilen der R_a - Wert.

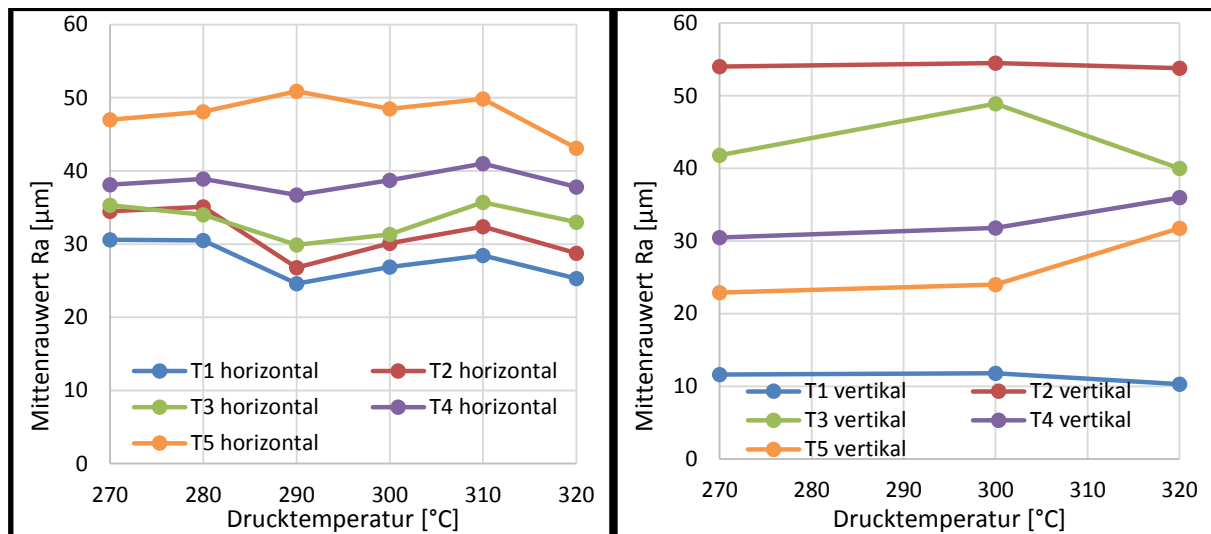


Abbildung 58: Mittenrauheit R_a in Abhängigkeit der Drucktemperatur; links - horizontal; rechts - vertikal

Die R_z -Werte haben einen ähnlichen Verlauf, jedoch liegen sie in einem höheren Wertebereich. Dabei ist bei der unteren Abbildung bei Turm 3 und 5 ein Maximum von knapp 300 μm zu sehen, das Minimum von unter 100 μm wurde bei Turm 1 gemessen. Die Messergebnisse der Flächenmessung haben sehr große Werte bis zu 700 μm , verhalten sich jedoch gleich den Ergebnissen der R_z -Messung, weshalb diese auch nicht im Diagramm angegeben werden.

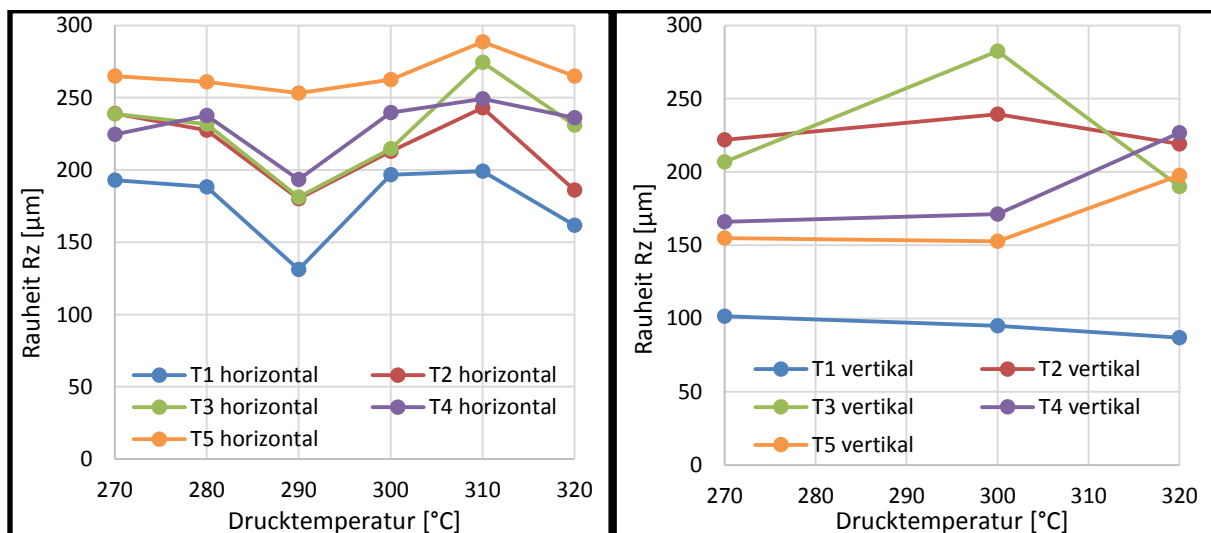


Abbildung 59: Rauheit R_z in Abhängigkeit der Drucktemperatur; links - horizontal; rechts - vertikal

Die Abhängigkeiten der Bauraumtemperatur sind in Abbildung 60 aufgetragen. Hier zeigt sich für den R_a - sowie für den R_z - Wert ein leicht abfallender Verlauf bei

steigender Temperatur. Die Größenordnungen sind dabei ähnlich den vorherigen horizontalen Ergebnissen.

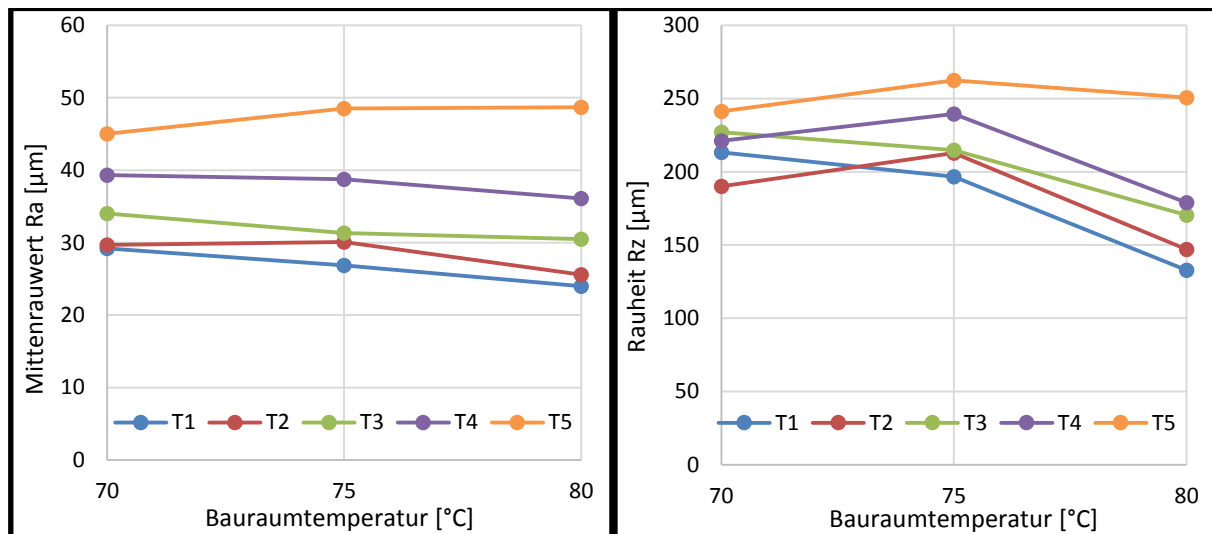


Abbildung 60: Rauheiten in Abhängigkeit der Bauraumtemperatur: R_a links; R_z rechts

Zur Darstellung der Abhängigkeit der Neigungswinkel ist in Abbildung 61 der Mittenrauwert R_a bei den standardmäßigen Druckeinstellungen (Düsentemperatur: 300°C , Bauraumtemperatur: 75°C , Ausrichtung: horizontal) über dem Winkel der Türme aufgetragen. Erkennbar ist die steigende Rauheit bei Erhöhung des Neigungswinkels des Turmes.

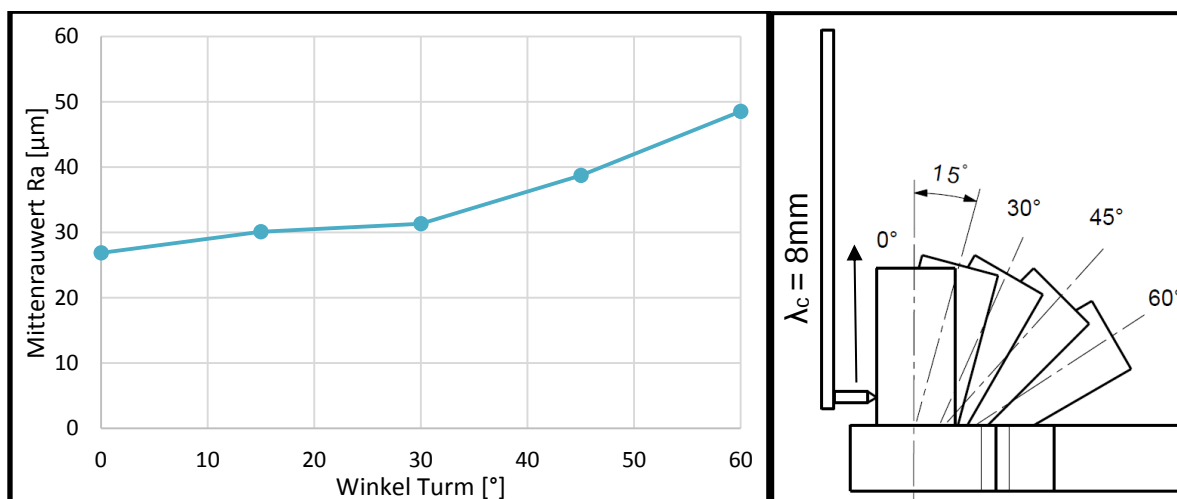


Abbildung 61: Mittenrauwert in Abhängigkeit vom Winkel bei DT: 300°C links; Messaufbau mit verschiedenen Turmneigungen rechts

Das Druckergebnis der Türme ist im Allgemeinen sehr gut. Bei zwei Drucken (Druck Nummer 2 und 6) steht ein Faden des Druckmaterials weg, was jedoch nur ein minimaler Druckfehler ist. Bei Druck Nummer 7 sind die untersten Schichten aufgrund der Aufwölbung der Grundplatte fehlerhaft.

6.3.2 Resultate Welle

Bei der Welle war die Vermessung der Radien sowie der Länge das Ziel. Die einzelnen Radien (rw1-rw12, siehe Abbildung 25) wurden aus einem zweidimensionalen Bild durch Einpassen von Kreisen herausgemessen. Die Messergebnisse sind in Abbildung 62 zu sehen. Oben sind die horizontalen, unten die vertikalen Drucke aufgetragen. Bei ersterem zeigen sich keine deutlichen Abhängigkeiten von den Druckparametern. Nur der Radius „rw6“ zeigt einen negativen Trend auf und hat überdurchschnittlich große Abweichungen. Dies ist dadurch zu erklären, dass der Radius am Ende der Welle ist, welcher teilweise nicht mehr ordentlich gefertigt wurde und dadurch schwierig zu messen ist. Der Radius „rw5“ ist der kleinste Radius in der Welle, wodurch sich hier kleine Fehler prozentuell deutlicher auswirken und darum auch größere Abweichungen auftreten. Die restlichen Radien liegen in einem Fehlerbereich von $\pm 10\%$, was in Anbetracht des Messverfahrens akzeptabel ist. Bei den vertikalen Drucken zeigen sich vor allem bei der niedrigsten Temperatur höhere Abweichungen, die mit steigender Temperatur abnehmen. Die durchschnittlichen Fehler sind größer als bei den horizontalen Teilen, was an den schwierigeren Messbedingungen liegt. Aufgrund der größeren Oberfläche konnten die zur Messung verwendeten Kreise nur ungenau angepasst werden. Der Unterschied der beiden Wellen ist in Abbildung 63 ersichtlich.

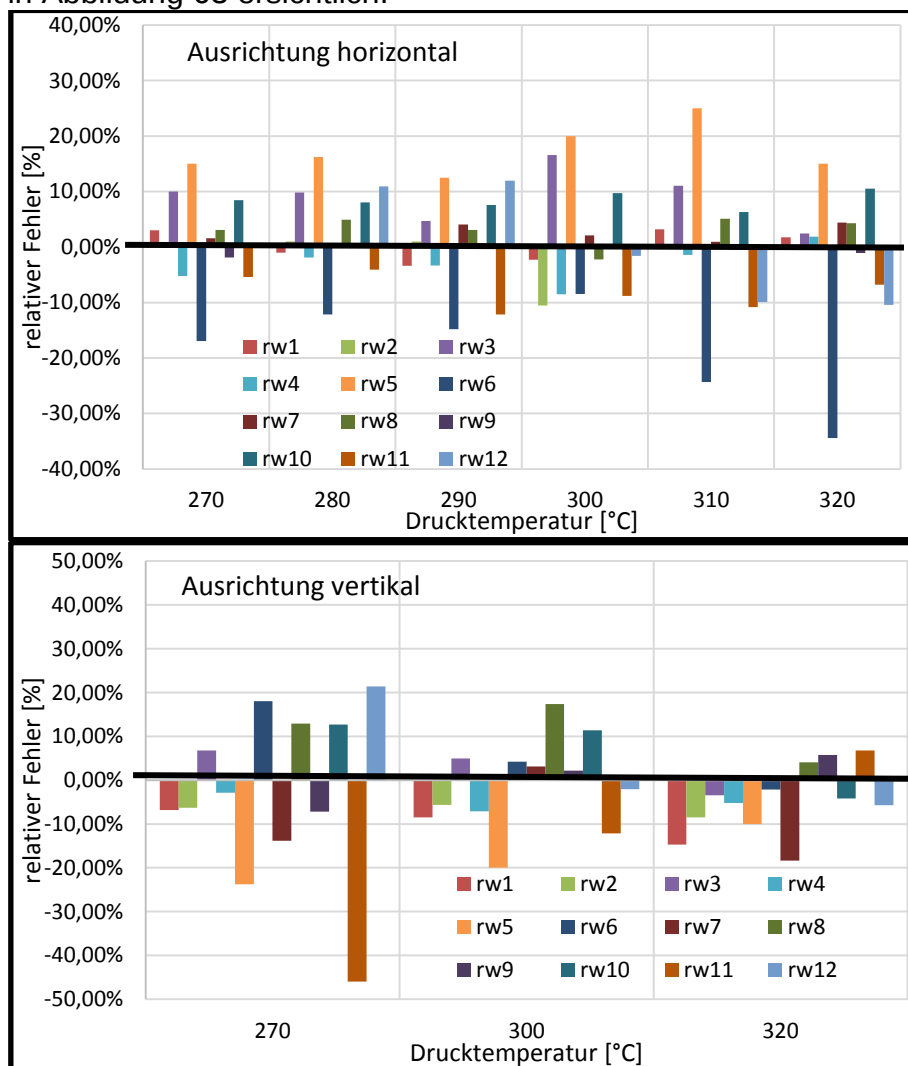


Abbildung 62: Relativer Fehler in Abhängigkeit der Drucktemperatur; horizontal oben; vertikal unten

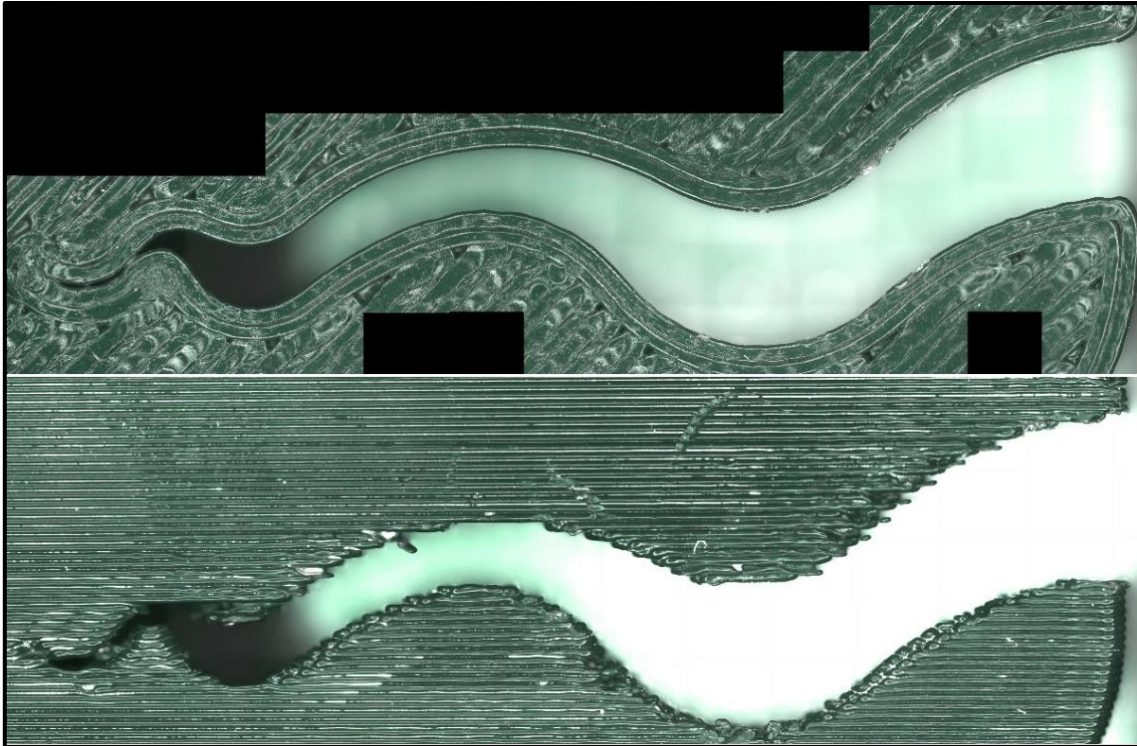


Abbildung 63: Vergleich Welle; horizontal oben; vertikal unten

Die relativen Fehler in Abhängigkeit von der Bauraumtemperatur sind in Abbildung 64 aufgetragen. Hier zeigen sich deutliche Ausschläge bei der niedrigsten Temperatur. Dies ist auf die Aufwölbung der Grundplatte rückzuführen, da diese nahe der Welle am Größten ist und somit die Maße beeinflusst. Der weitere Verlauf ist nahezu konstant, einige Radien weisen eine positive Steigung mit höherer Bauraumtemperatur auf, andere eine negative.

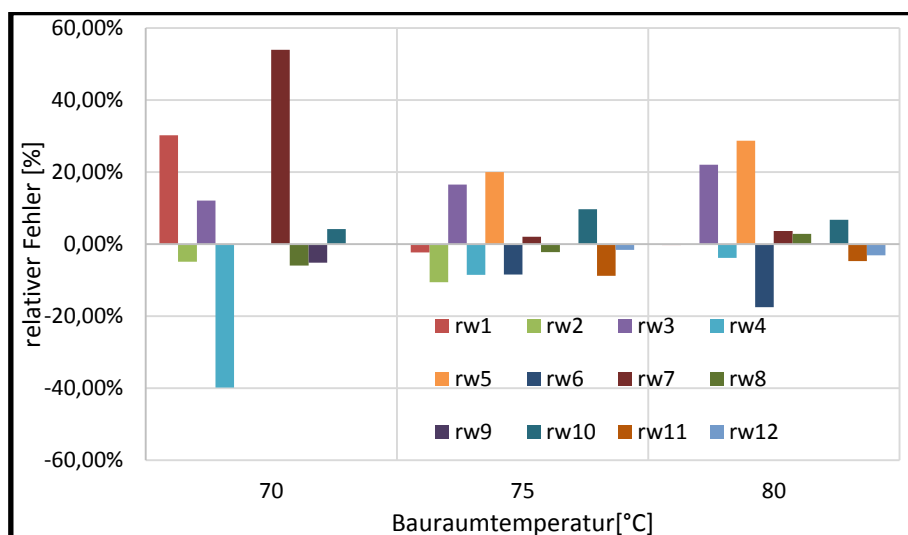


Abbildung 64: Relativer Fehler in Abhängigkeit der Bauraumtemperatur

Der Verlauf der Länge der Welle (l_w) ist in Abhängigkeit der beiden Temperaturen in Abbildung 65 abgebildet. Die Messung erfolgte dabei bis zu dem Punkt, an dem die oberste Schicht keinen sichtbaren Spalt aufweist. Bei den Drucktemperaturen sind

beide Ausrichtungen aufgetragen. Hier zeigt sich jedoch ein gegengleicher Effekt: horizontal nimmt die Länge mit steigender Drucktemperatur ab, vertikal steigt die Länge mit der Temperatur. Die Verringerung der Länge lässt sich damit erklären, dass durch die höhere Temperatur die Schichten besser verschmolzen sind und somit die Welle kürzer ist. Vertikal zeigt sich ein gegenteiliger Effekt, was auf den geänderten Schichtaufbau und das dabei verwendete Stützmaterial rückzuführen ist. Im rechten Diagramm ist in Abhängigkeit der Bauraumtemperatur ein steigender Verlauf zu sehen, jedoch kommt der Ausschlag bei 70°C aufgrund der Aufwölbung der Grundplatte zustande, wodurch die Welle deutlich kürzer ausfällt.

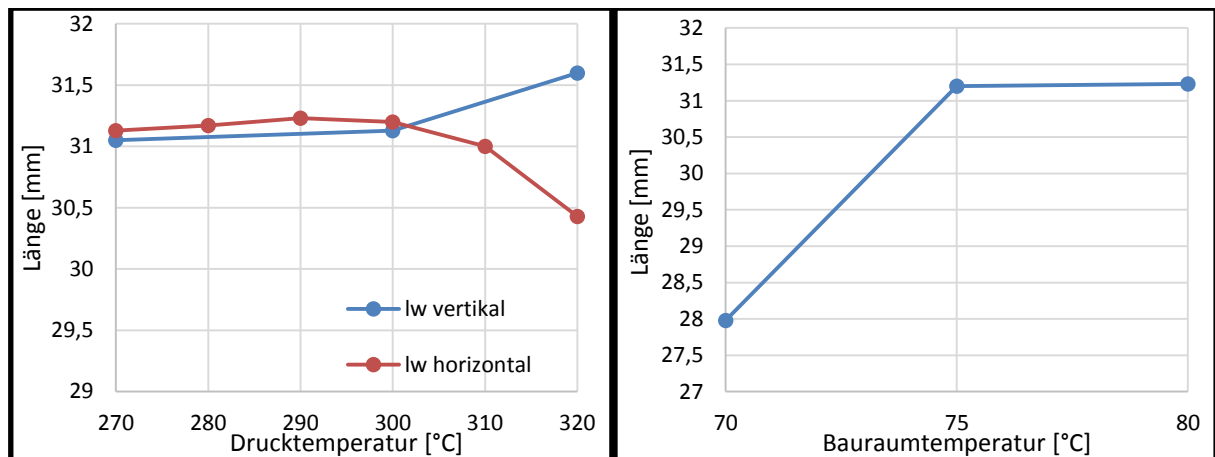


Abbildung 65: Länge der Welle in Abhängigkeit der Temperaturen

In Abbildung 66 sind die Parallelitäten über die Temperaturen aufgetragen. Auf der linken Seite sind die horizontalen und vertikalen Parallelitäten in Abhängigkeit der Drucktemperatur zu sehen. Horizontal zeigt sich zu Beginn ein fallender Verlauf, ein Minimum bei 290°C und danach ein steigender Verlauf. Der vertikale Verlauf ist annähernd gespiegelt - hier steigt zuerst die Kurve und fällt anschließend wieder ab. Das Diagramm in Abhängigkeit der Bauraumtemperatur auf der rechten Seite zeigt eine geringere Parallelität mit steigender Temperatur. Der hohe Wert bei 70°C ist ebenfalls auf die Aufwölbung rückzuführen.

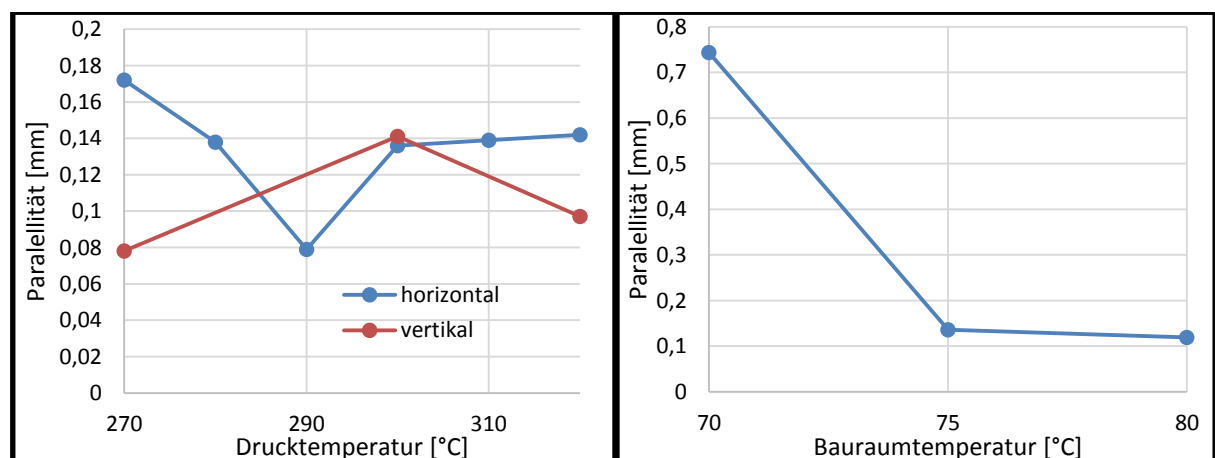


Abbildung 66: Parallelität der Welle in Abhängigkeit der Temperaturen

Die gemessenen Druckergebnisse der Welle sind somit teilweise abhängig von den Druckparametern. Die Ausrichtung des Bauteils hat Einfluss auf die Oberfläche sowie auf das Aussehen, wobei deutlich die horizontale Ausrichtung zu bevorzugen ist.

6.3.3 Resultate Rauchfang

Als weiteres Merkmal wird der Rauchfang beschrieben. Dieser besteht aus vier Seitenwänden unterschiedlicher Wandstärke. Die absoluten Fehler (Istwert – Sollwert) der Dickenmessung sind in Abbildung 67 zu sehen, welche wiederum anhand der Ausrichtung unterteilt sind. Bei der horizontalen Fertigung zeigen sich keine Abhängigkeiten der Drucktemperatur, jedoch sind deutliche Fehler vorhanden. So weisen die Dicken „rf3“ und „rf4“ größere Fehler auf, welche auf das Verfahren selbst bzw. auf die Druckeinstellungen rückzuführen sind. Grund dafür ist die Spurbreite, also die Breite eines Stranges, welche fix vorgegeben ist. Diese beträgt 0,5 mm, daher können die kleinsten Wandstärken mit 0,3 mm und 0,6 mm nicht maßgetreu gefertigt werden. Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 68 zwei in unterschiedlicher Ausrichtung gedruckte Türme abgebildet. Auf der linken Seite erkennt man beim horizontalen Druck den Schichtaufbau der einzelnen Wände. Bei den dünnen Wänden ist jeweils eine Spurbreite vorhanden, bei den weiteren zwei bzw. drei Spurbreiten. Dadurch sind die größeren Dicken maßgenauer als die Dünneren gefertigt.

Bei der vertikalen Fertigung zeigen sich ebenfalls nur geringe Abhängigkeiten von der Drucktemperatur. Die Fehler sind bei „rf1“ und „rf4“ wiederum höher, was in Abbildung 68 bei der linken sowie der oberen Wand ersichtlich ist. Letztere hat ein Sollmaß von 0,6 mm und wurde mit zwei Spurbreiten gefertigt, was einer Dicke von ca. 1 mm entspricht und somit den gemessenen Fehler erklärt. Die Dicke „rf1“ sollte eine Dicke von 1 mm aufweisen, jedoch weisen die vorliegenden Ergebnisse einen Fehler von 0,1 mm auf. Dieses Maß sollte theoretisch genauer sein, da mit der Schichtstärke von 0,254 mm das Sollmaß von 1 mm gut erreichbar sein sollte. Der Fehler ist somit nicht aufgrund der Bahnaufbereitung aufgetreten.

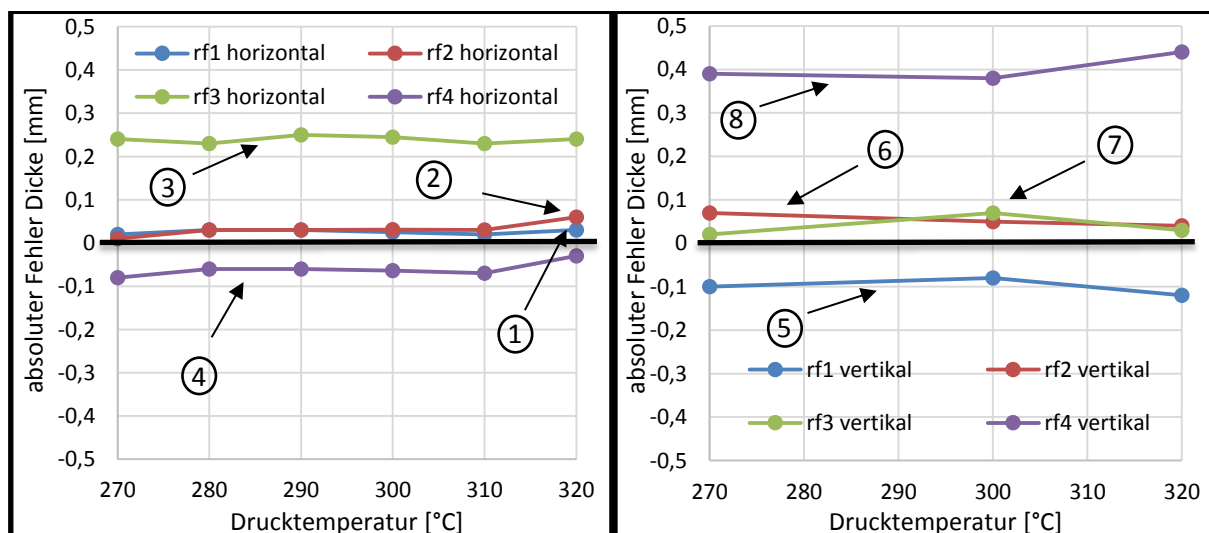


Abbildung 67: Fehler der Dicke in Abhängigkeit der Drucktemperatur; horizontal links; vertikal rechts

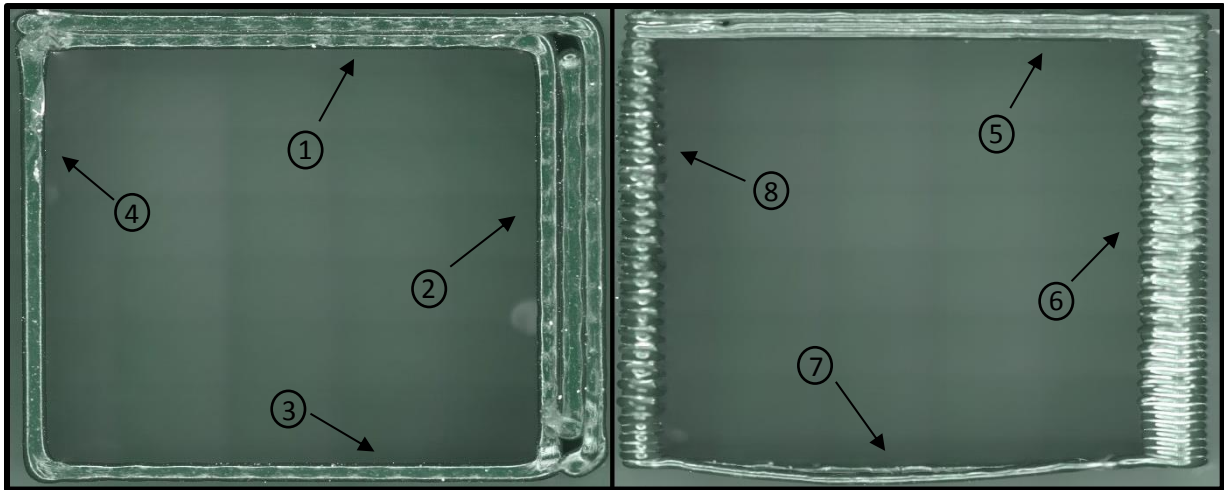


Abbildung 68: Unterschied Ausrichtung Rauchfang; horizontal links; vertikal rechts

In Abbildung 69 sind die Abhängigkeiten der Bauraumtemperatur aufgetragen. Dabei zeigt sich auf der linken Seite bei der Dicke keine Parameterabhängigkeit. Die Fehler sind wie zuvor bei der Drucktemperatur im gleichen Größenbereich und auf die gleichen Gründe ruckzuführen. Im rechten Diagramm sind zusätzlich die Rauheiten in Abhängigkeit der Bauraumtemperatur aufgetragen. Hier wurden an der oberen Außenfläche die $R_a/R_z/S_a/S_z$ - Werte gemessen. Diese lassen sich mit den Ergebnissen der Türme vergleichen. Die Werte des Rauchfangs liegen etwas darunter. Zusätzlich sind die Flächenrauheitswerte S_a und S_z angegeben, welche aufgrund der Mittelung über die ganze Fläche deutlich höher sind.

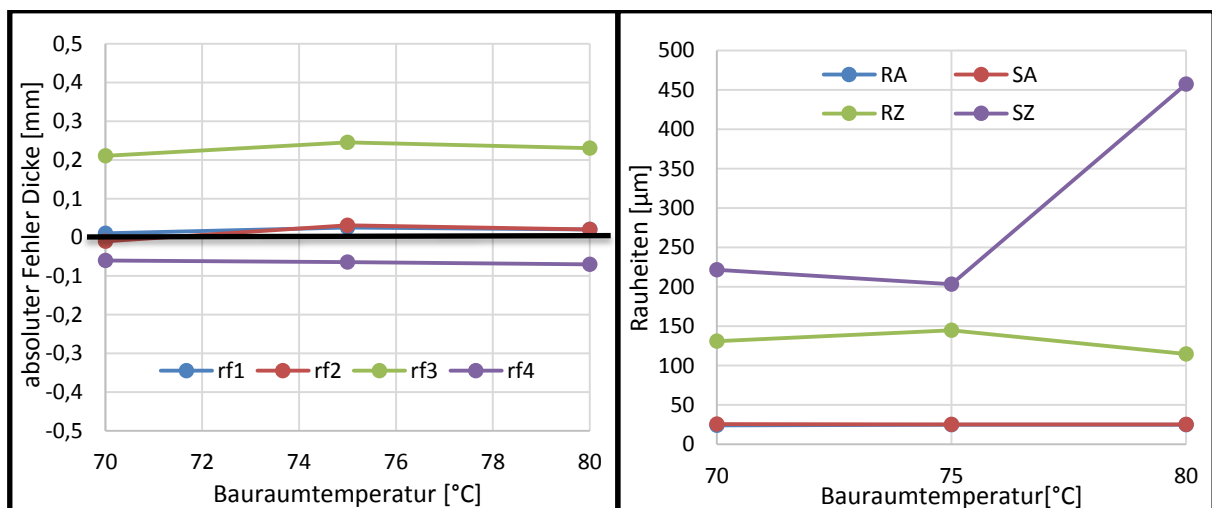


Abbildung 69: Abhängigkeiten der Bauraumtemperatur: Fehler der Dicke links; Rauheiten rechts

Die Rauheiten abhängig von der Drucktemperatur sind in Abbildung 70 ersichtlich. Bei den horizontalen Ergebnissen ist keine Abhängigkeit der Temperaturen auszumachen, da die Werte in ähnlichen Größenbereichen wie zuvor bei der Bauraumtemperatur liegen. Vertikal zeigen sich kleine Abhängigkeiten der Drucktemperatur, da die R_a - und R_z - Messwerte mit höherer Temperatur leicht an steigen. Die S_z - Werte sinken hingegen mit höherer Temperatur.

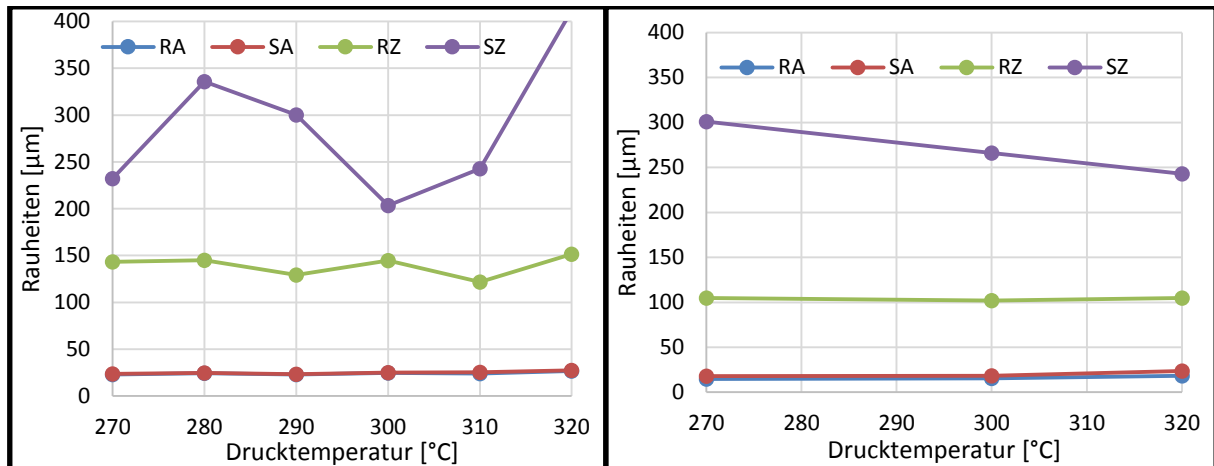


Abbildung 70: Rauheiten in Abhängigkeit der Drucktemperatur; horizontal links; vertikal rechts

Als Druckfehler seien kleine Löcher in der obersten Schicht bei den horizontal gedruckten Bauteilen genannt, welche aber kein großes Problem darstellen. Wie auch in Abbildung 68 rechts gut sichtbar, ist die Vorderkante bei den vertikalen Drucken nach außen gewölbt. Dies geschieht aufgrund der dünnen Wandstärke durch Wärmespannungen und ist eher unvorteilhaft.

6.3.4 Resultate Bohrungen und Sechskant

Bei den Bohrungen sowie bei den Sechskanten wurden jeweils die Durchmesser und die Schlüsselweite sowie die Tiefe von Bohrung 1 gemessen. In den folgenden beiden Abbildungen sind wieder jeweils die absoluten Fehler angegeben. In Abbildung 71 sind die Abhängigkeiten von der Drucktemperatur zu sehen, wobei sich horizontal sowie vertikal keine Abhängigkeiten der Temperatur zeigen. Die Größen der Fehler unterscheiden sich jedoch deutlich - hier hat die vertikale Fertigung klar höhere Werte. Die Fehler haben allesamt ein negatives Vorzeichen mit maximalen Werten von 0,3 mm. Begründen lassen sich diese Fehler auf die grobe Oberfläche, welche durch den vertikalen Schichtaufbau entsteht. Dazu wird in Abbildung 72 ein Vergleich der Geometrien in unterschiedlicher Ausrichtung gegeben. Zusätzlich sind die Konturen der Sollwerte durch Linien angedeutet. Horizontal zeigt sich eine glatte Kontur, vertikal dagegen ist nur eine grobe Kontur vorhanden. Die einzelnen Schichten schließen nicht gleichmäßig ab und verfälschen so die Maße.

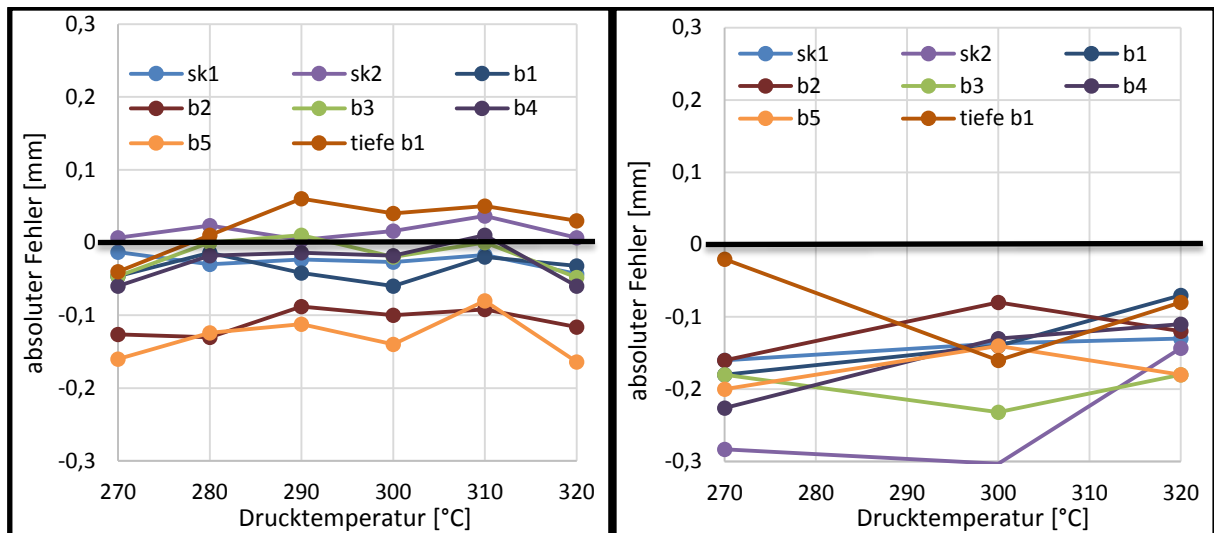


Abbildung 71: Absolute Fehler der Bohrungen und Sechskante abhängig von der Drucktemperatur; horizontal links; vertikal rechts

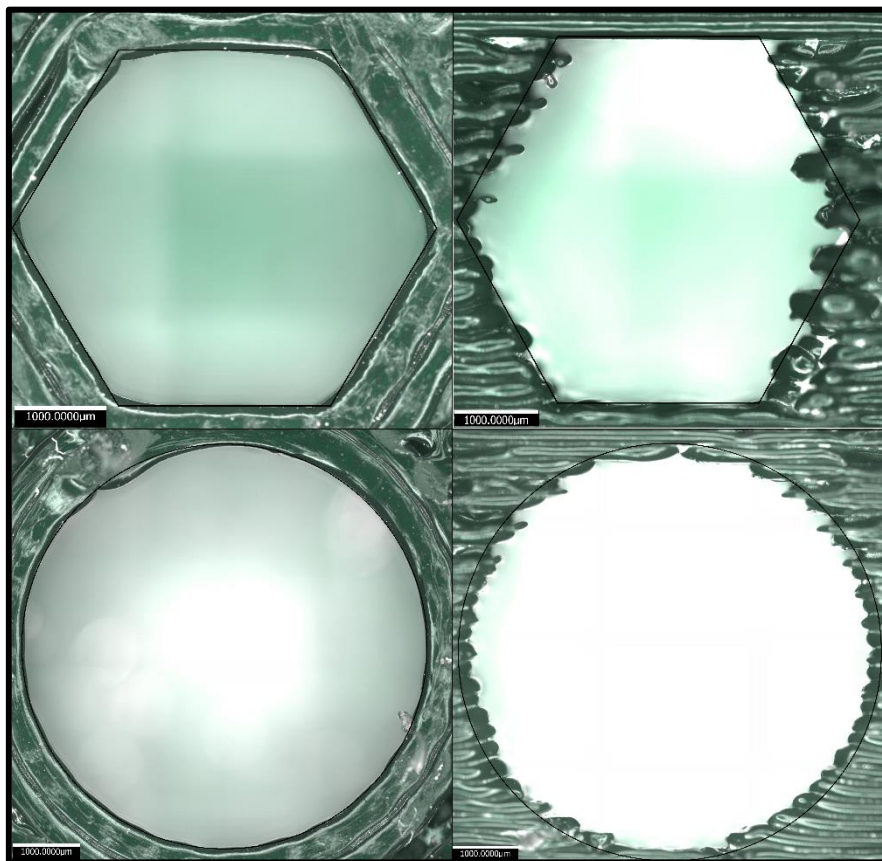


Abbildung 72: Sechskant und Bohrungen; horizontal links; vertikal rechts

In Abbildung 73 sind die absoluten Fehler in Abhängigkeit der Bauraumtemperatur abgebildet. Hier ergibt sich ein steigender Verlauf mit steigender Temperatur. Da jedoch beim ersten Druck mit 70°C die Aufwölbung der Grundplatte wieder Einfluss hat, muss nicht unbedingt von einer Parameterabhängigkeit gesprochen werden.

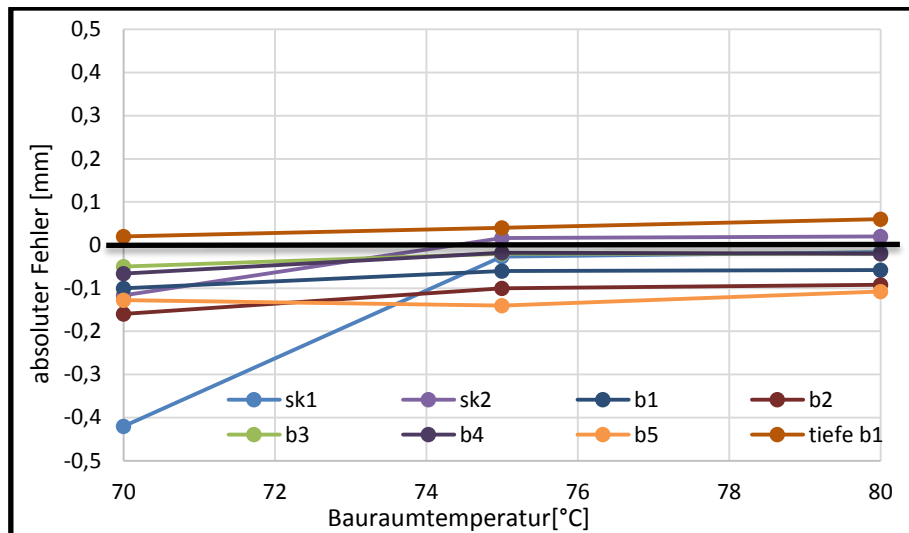


Abbildung 73: Absolute Fehler der Bohrungen und Sechskante abhängig von der Bauraumtemperatur

In Abbildung 74 und Abbildung 75 sind die Messergebnisse der Rundheit aufgetragen. Als Messwerte liegen hier der RON_a - Wert sowie der RON_t - Wert vor, welche ähnlich den Rauheitsmesswerten sind. Es wird dazu ein Rauheitsprofil entlang des Durchmessers erstellt und arithmetisch gemittelt (RON_a) oder der maximale Höhenunterschied (RON_t) berechnet. Die Ergebnisse liegen bei beiden Temperaturen in einem kleinen Bereich und weisen keine besonderen Abweichungen auf. Vertikal ergeben sich geringfügig höhere Rundheiten, welche auf die grobe Oberfläche zu schließen sind. RON_t - Die Werte sind deutlich größer als die Mittelwerte und weisen eine höhere Schwankungsbreite auf. Hier zeigt sich eine fallende Tendenz bei steigender Bauraumtemperatur, die Drucktemperatur hat in beiden Ausrichtungen keinen klaren Einfluss.

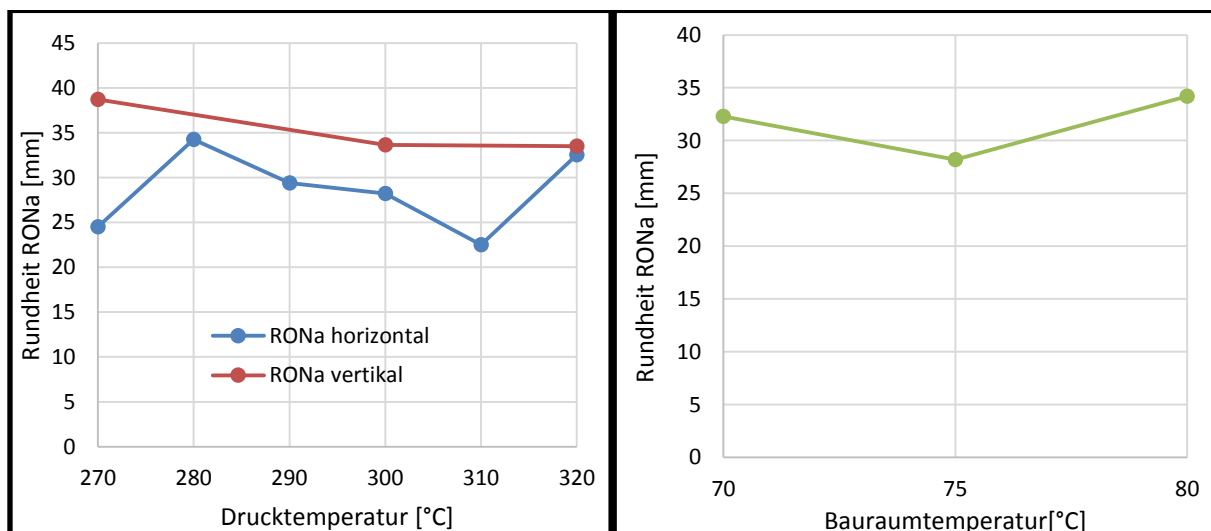


Abbildung 74: Rundheiten RON_a - Bohrung 1 in Abhängigkeit der Temperaturen

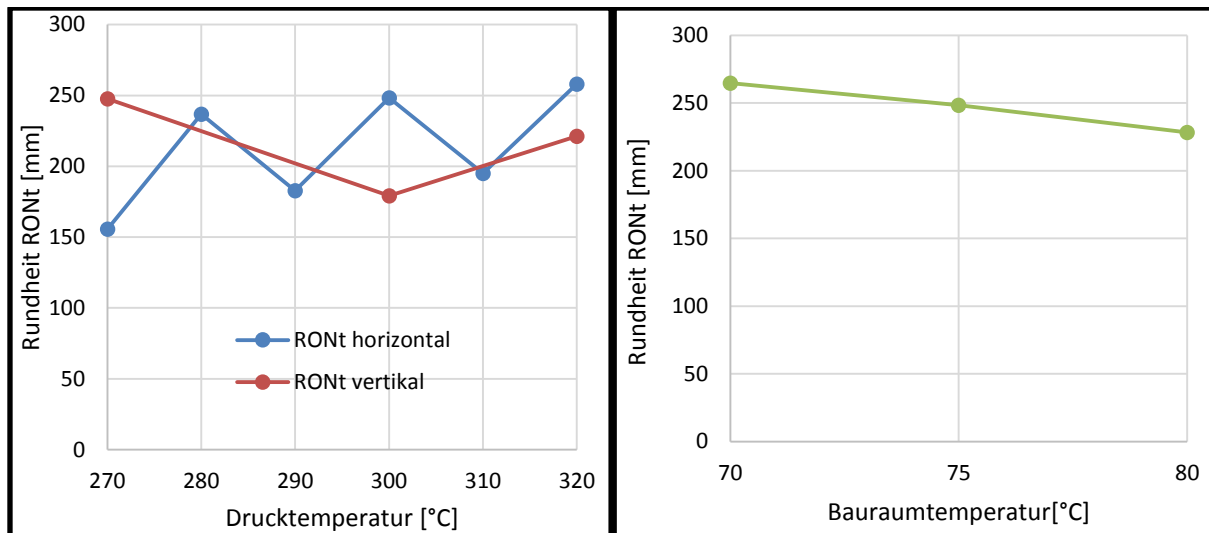


Abbildung 75: Rundheiten RON_t - Bohrung 1 in Abhängigkeit der Temperaturen

6.3.5 Resultate Vermessungsblock

Auf dem Vermessungsblock befinden sich sehr viele Geometriemerkmale, daher liegen entsprechend viele Ergebnisse vor. Diese werden hier nicht alle angegeben, es werden lediglich die gemessenen Radien gezeigt und es wird auf die auftretenden Abweichungen eingegangen. In Abbildung 76 sind die Radien der Spitzen des Blockes, welche mit „außen“ bezeichnet sind, sowie die innenliegenden Radien zwischen den Spitzen („innen“) über die Temperaturen aufgetragen. Im linken Diagramm sind wiederum beide Ausrichtungen eingetragen, wobei hier ein Einfluss der Druckparameter erkennbar ist. So nehmen die innenliegenden Radien sowie der vertikale äußere mit steigender Drucktemperatur zu, der horizontale äußere sinkt hingegen leicht bei höherer Temperatur. Beim horizontalen Druck ist der äußere Radius deutlich größer als die restlichen Radien, dies ist in Abbildung 77 gut ersichtlich. Durch die Bahnaufbereitung bei dieser Ausrichtung ergibt sich ein größerer Radius, vertikal hingegen können feinere Radien erzeugt werden. Dieses Ergebnis zeigt sich auch bei den restlichen Radien auf der linken Seite des Blockes. Kleine Radien sind vertikal besser als horizontal gefertigte, die größeren sind in beiden Ausrichtungen kein Problem. So sind die beiden Radien oberhalb des Freistiches auf der linken Seite mit 1 und 2 mm parameterunabhängig und bei allen Drucken sehr genau (maximal 5% Abweichung). Die Bauraumtemperatur hat keinen Einfluss auf die Ergebnisse. Auf den unteren Bildern in Abbildung 77 ist eine 3D-Vergrößerung der unteren Kante mit den Fasen erkenntlich. Hier zeigt sich, dass die rechte Fase bei der vertikalen Fertigung ein Radius ist und so fehlerhaft gefertigt wurde. Dieser Effekt tritt nur bei den vertikalen Drucken auf, dafür ist bei diesen Drucken die breitere Fase auf der linken Seite genauer ausgeführt. Bei horizontaler Ausrichtung ist diese Fase etwas abgerundet und daher nicht exakt. Die weiteren Maße wie die Spitzenwinkel, die Gesamtlänge, die Tiefe des Freistiches sowie Winkel und Länge der oberen geneigten Kante weisen keine Abhängigkeit von den Druckparametern auf und weichen nur minimal vom Sollwert ab. Allgemein muss erwähnt werden, dass die vertikal gefertigten Bauteile überraschend gut sind und in Bezug auf kleine Radien sogar besser als die Horizontalen. Letzere haben, wie auf der Abbildung ersichtlich, auf der Oberseite an einigen Stellen kleine Löcher die nicht ganz ausgefüllt worden sind. Diese sind noch als Druckfehler anzuführen.

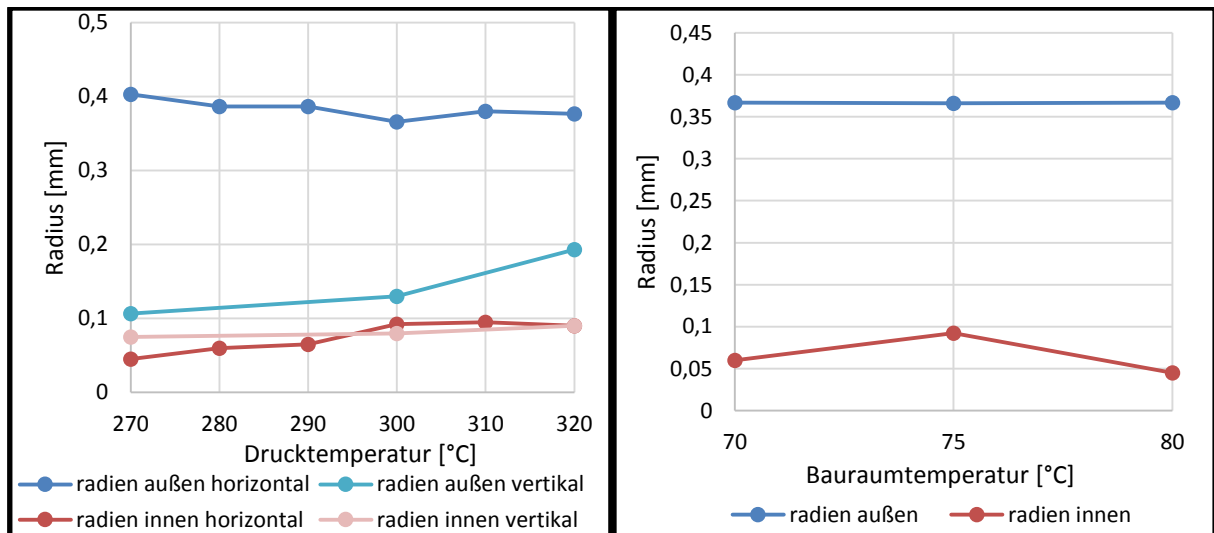


Abbildung 76: Vergleich der Außen- und Innenradien am Vermessungsblock abhängig von den Druckparametern

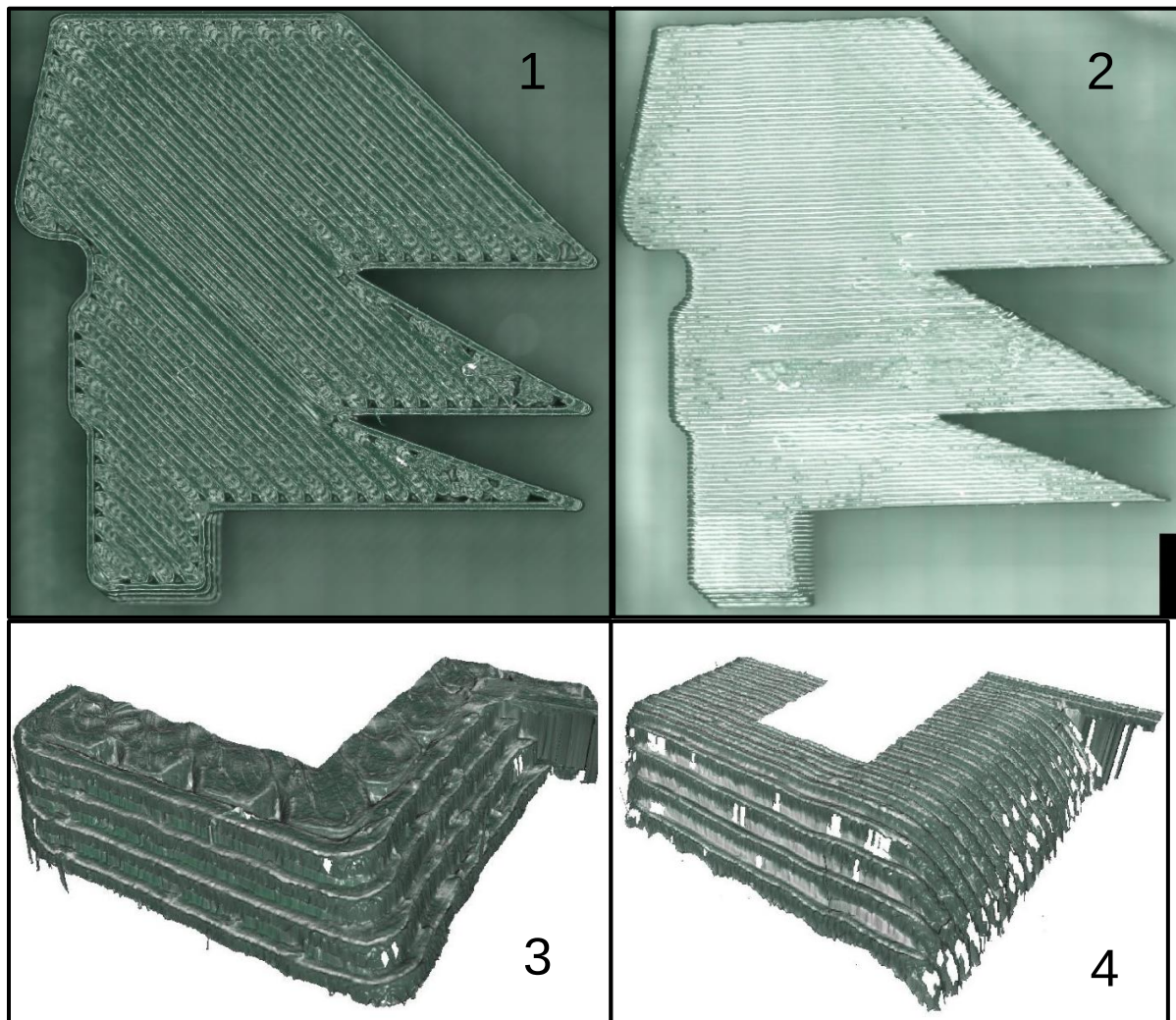


Abbildung 77: Vermessungsblock horizontal (1); Vermessungsblock vertikal (2); Fasen horizontal (3); Fasen vertikal (4)

6.3.6 Resultate der Zylinder

Der Außen- sowie der Innendurchmesser wurden auf zwei Arten gemessen: optisch sowie taktil. Damit kann ein Vergleich der Messverfahren durchgeführt werden. In Abbildung 78 sind auf der linken Seite die absoluten Fehler aufgetragen, welche keine Abhängigkeiten von der Drucktemperatur aufweisen. Die Fehler der vertikalen Drucke sind rechts zu sehen. Es zeigt sich bei den Fehlern der Außendurchmesser ein abfallender Trend mit steigender Drucktemperatur. Zwischen Außen- und Innendurchmesser sind ebenfalls Unterschiede vorhanden, welche sich durch die Unregelmäßigkeiten der Oberflächen erklären lassen. Durch den vertikalen Schichtaufbau ist keine klare Kontur vorhanden, bei der Innenfläche kommt durch das Stützmaterial zusätzlich eine schlechtere Fläche zustande. Dies zeigt sich bei den absoluten Fehlern sowie in der Abbildung 79, wo ein Vergleich der horizontalen und vertikalen Ausrichtung gegeben wird.

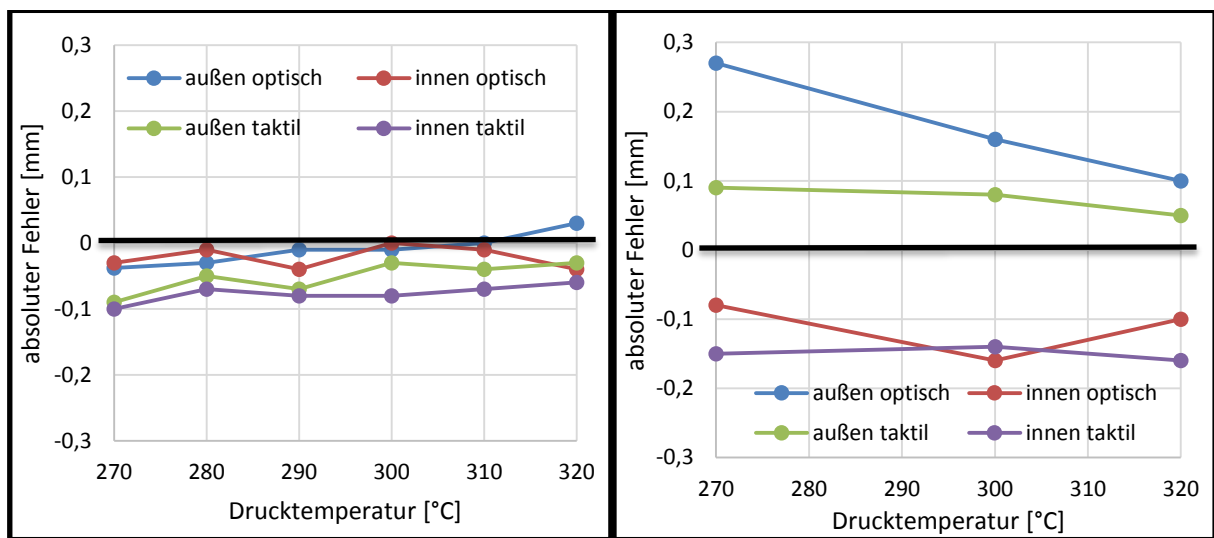


Abbildung 78: Fehler des Zylinderdurchmessers außen und innen in Abhängigkeit der Drucktemperatur, horizontal links; vertikal rechts

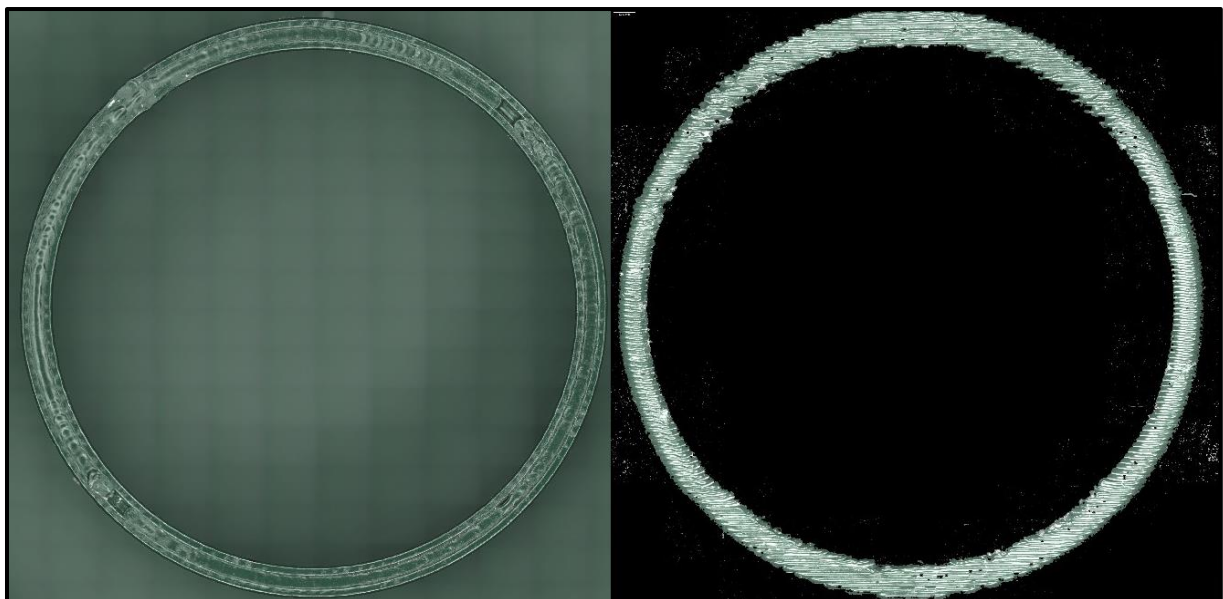


Abbildung 79: Zylinder vertikal links; Zylinder horizontal rechts

Die Rundheiten wurden ebenfalls vom Außen- und Innenzylinder gemessen und die Ergebnisse sind für beide Ausrichtungen in Abbildung 80 sowie Abbildung 81 abgebildet. Es sind keine deutlichen Parameterabhängigkeiten zu erkennen, lediglich die RON_a - Werte der horizontalen Bauweise fallen leicht bei steigender Drucktemperatur. Außerdem steigen vertikal die äußeren Rauheiten mit der Temperatur leicht an, die innenliegenden Rauheiten sinken hingegen. Zwischen den Ausrichtungen zeigt sich ein großer Unterschied. Grund dafür ist, wie zuvor bei den Durchmessern, die grobe Oberfläche bei den vertikalen Drucken. Die Innenkontur ist dabei durch das Stützmaterial deutlich schlechter, woraus höhere Rundheitswerte resultieren.

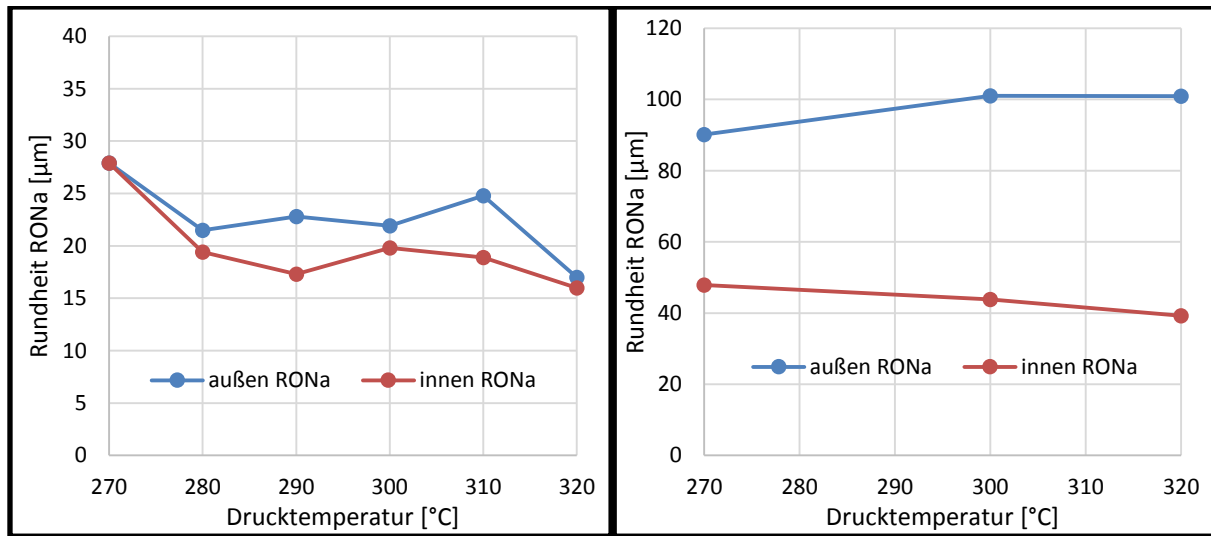


Abbildung 80: Rundheiten RON_a vom Zylinder in Abhängigkeit der Drucktemperatur horizontal (links) und vertikal (rechts)

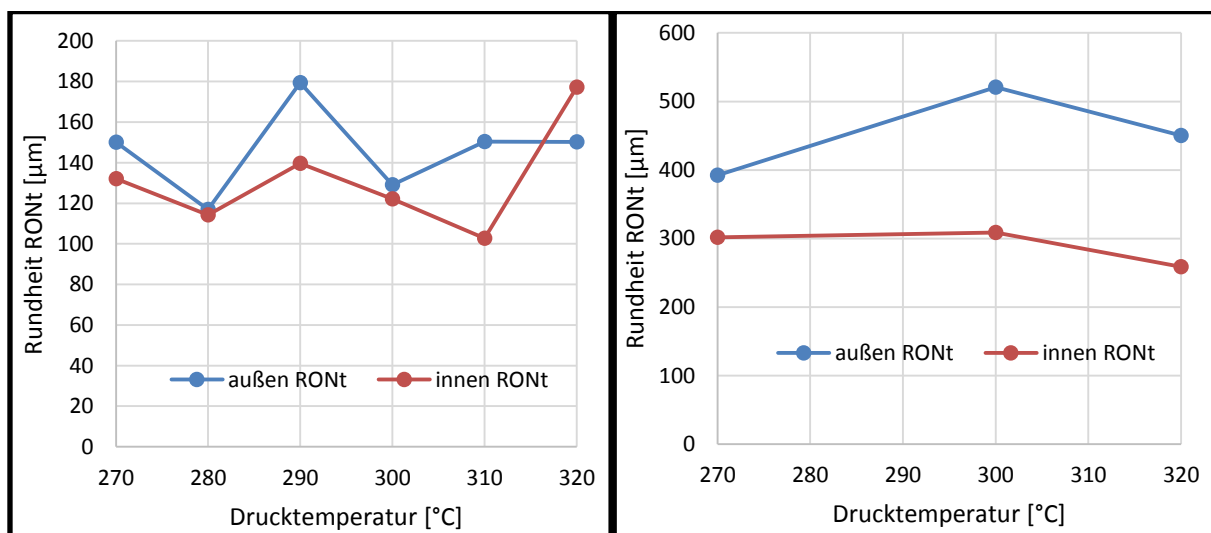


Abbildung 81: Rundheiten RON_t vom Zylinder in Abhängigkeit der Drucktemperatur horizontal (links) und vertikal (rechts)

Die absoluten Fehler sowie Rundheiten in Abhängigkeit der Bauraumtemperatur, wie in Abbildung 82 ersichtlich, weisen keine besonderen Auffälligkeiten auf. Die Fehler

und Rundheiten sind im selben Größenbereich wie die horizontalen Drucke zuvor und weisen keine Parameterabhängigkeit auf.

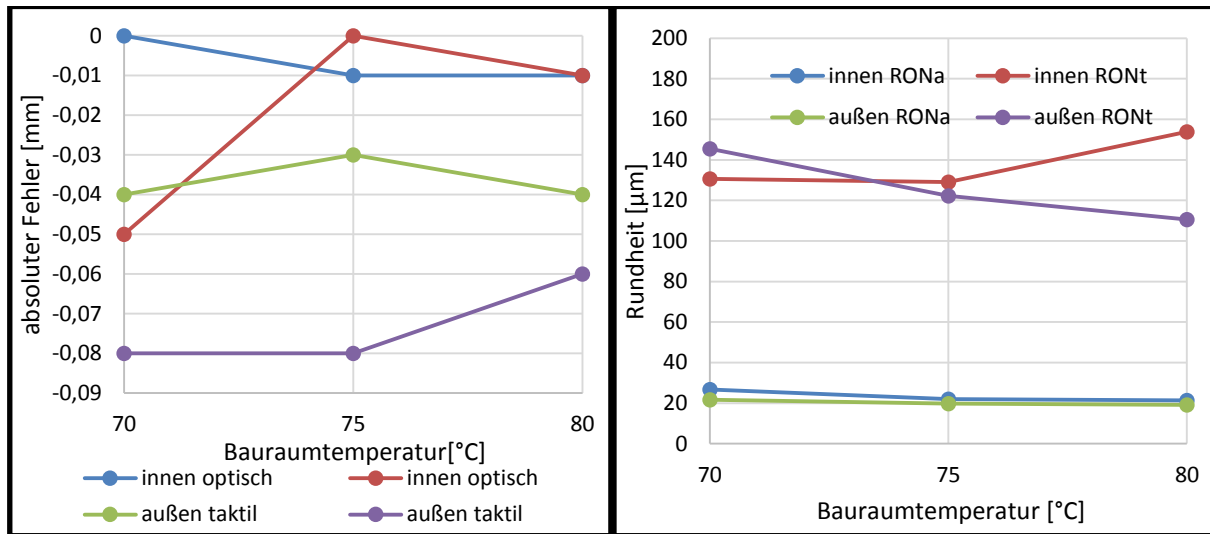


Abbildung 82: Fehler und Rundheit in Abhängigkeit der Bauraumtemperatur

6.3.7 Resultate Überhang

Der Druck eines Überhangs ist besonders heikel, wenn kein Stützmaterial vorhanden ist. Da dies beim vorliegenden Drucker nicht vorliegt, ist der Druck grundsätzlich möglich. Dennoch sind kleine Unregelmäßigkeiten aufgetreten, so ist bei Druck Nummer 2 eine komplette Stütze weggebrochen. Hier muss es einen Fehler bei der Verbindung von Stütze und Grundplatte gegeben haben. Als Messwert wurden die Ebenheit des Überhangs selber sowie die Parallelität vom Überhang gegenüber der Grundplatte gemessen. In Abbildung 83 sind die Messergebnisse aufgetragen. Links beide Ausrichtungen über die Drucktemperatur, rechts in Abhängigkeit der Bauraumtemperatur. Man erkennt deutlich den Ausschlag bei der Drucktemperatur von 280°C. Bei der abgebrochenen Stütze hat sich der Überhang deutlich nach oben gewölbt, wie man in Abbildung 84 erkennt. Die Bauraumtemperatur hat Einfluss auf die Parallelität, da diese mit steigender Temperatur sinkt. An den Stützen sind auch bei den meisten Drucken in mehreren Lagen leichte Fehler zu erkennen. Diese entstehen durch die Verbindung von Stütz- zu Baumaterial, welche nicht ordentlich voneinander getrennt sind. Die Höhe des Überhangs wurde ebenfalls gemessen, dieser Wert stimmt bei allen Drucken sehr gut mit dem Sollwert von 15 mm überein. Lediglich Druck Nummer 2 hat hier wegen der fehlenden Stütze größere Abweichungen.

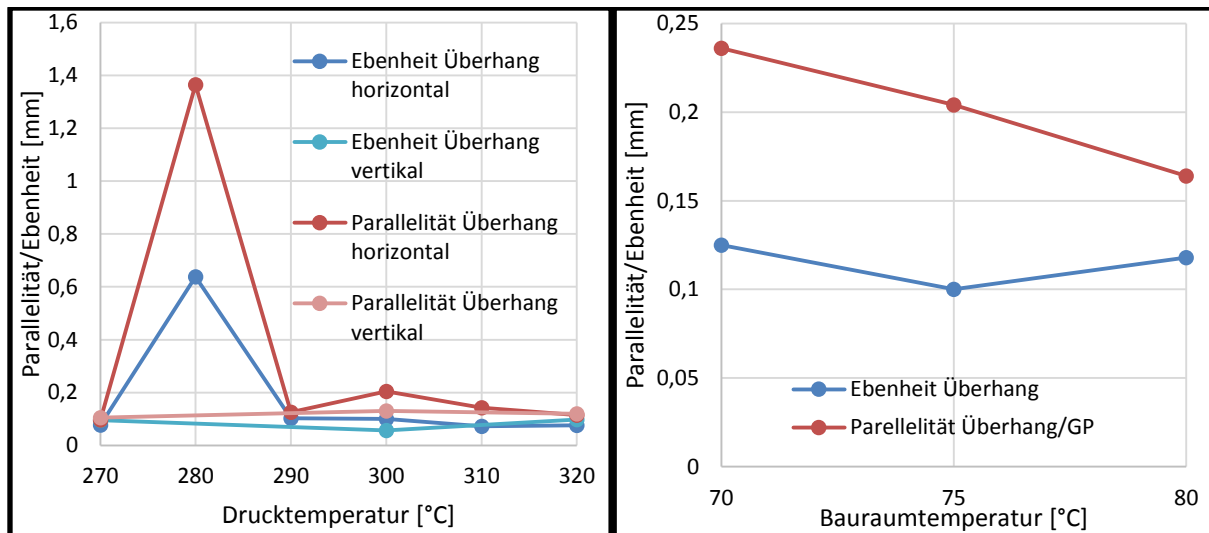


Abbildung 83: Überhang Parallelität und Ebenheit in Abhängigkeit der Druckparameter

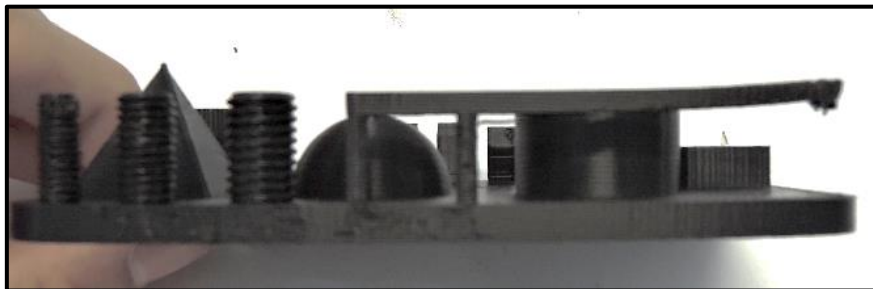


Abbildung 84: Abgebrochene Stütze bei DT: 280°C, BRT: 75°C

6.3.8 Resultate der Gewinde

Die einzelnen Gewindegänge wurden neben der optischen Überprüfung auf die ordentliche Funktion getestet. Dazu wurden zunächst mit einer Steigungslehre der richtige Gewindevorlauf und die richtige Steigung getestet. Hierbei konnten nur bei den vertikalen Drucken große Abweichungen festgestellt werden. Wie in Abbildung 85 abgebildet, weisen die Gewindegänge zwischen den horizontalen und vertikalen Drucken große Unterschiede auf. Der vertikale Druck weist eine Abflachung an einer Seite auf, weshalb hier kein ordentliches Gewinde vorliegt. Das Gewinde des horizontalen Drucks sieht optisch normal aus, auch die Steigung ist in Ordnung. Um die Funktion zu überprüfen, wurden die Gewinde zusätzlich mit Muttern getestet, welche ohne großen Kraftaufwand mit der Hand festgedreht werden sollen. Dies konnte bei allen Gewindegrößen nur teilweise und mit bereits größerem Kraftaufwand erfolgen, weshalb alle Gewinde nicht akzeptabel sind. In diesem Fall muss man also resümieren, dass kein Gewinde optimal gefertigt wurde, jedoch könnte man durch Anpassen der 3D-Daten wahrscheinlich ein funktionierendes Gewinde 3D-drucken.

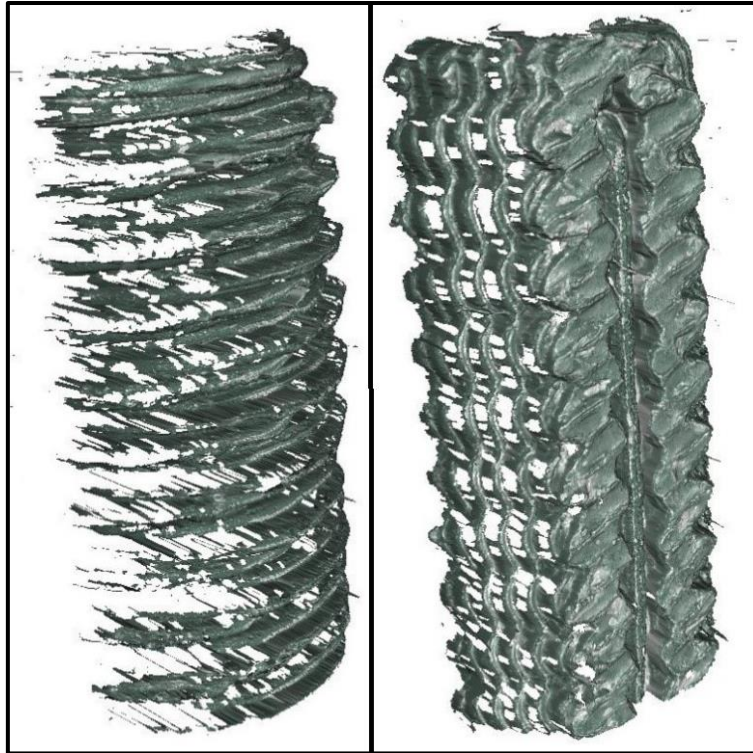


Abbildung 85: Gewinde horizontal (links) und vertikal (rechts)

6.3.9 Resultate für die Halbkugel

Die Halbkugel dient zur optischen Überprüfung der Oberfläche, da außer dem Kugelradius keine Werte gemessen wurden. Die absoluten Fehler der Kugelradien sind in Abbildung 86 aufgetragen. Hier zeigt sich eine Schwankungsbreite von 0,4 mm, was ein merkbarer Unterschied ist. Es sei jedoch dazu gesagt, dass der Radius durch eine Anpassung des 3D-Bildes an die Kugel gemessen wurde und durch die Stufenform eine Abweichung entstehen kann. Bei den vertikalen Drucken ergibt sich mit steigender Drucktemperatur ein geringerer Fehler, bei den weiteren Ergebnissen zeigt sich keine Abhängigkeit der Druckparameter. Bei der Halbkugel war hauptsächlich die ordentliche und fehlerfreie Fertigung zu überprüfen, welche bei allen Drucken sehr gut gelungen ist. Der einzige optische Unterschied ist wiederum bei den verschiedenen Ausrichtungen zu erkennen, siehe in Abbildung 87. Man erkennt hier die fertigungsbedingten Stufungen, die vor allem bei der horizontalen Fertigung unerwünschte Unebenheiten in der Mitte der Halbkugel hervorrufen. Die Oberfläche in der Mitte der Halbkugel ist somit bei vertikaler Ausrichtung besser, jedoch treten dieselben Abstufungen an den Rändern der Halbkugel oben und unten auf. Diese sind in der Abbildung nur teilweise zu erkennen, da hier das Bild aufgrund komplexer Lichtbedingungen nicht optimal aufgenommen werden konnte. Man kann somit zusammenfassen, dass die Kugel im Großen und Ganzen keine großen Probleme beim Drucken macht.

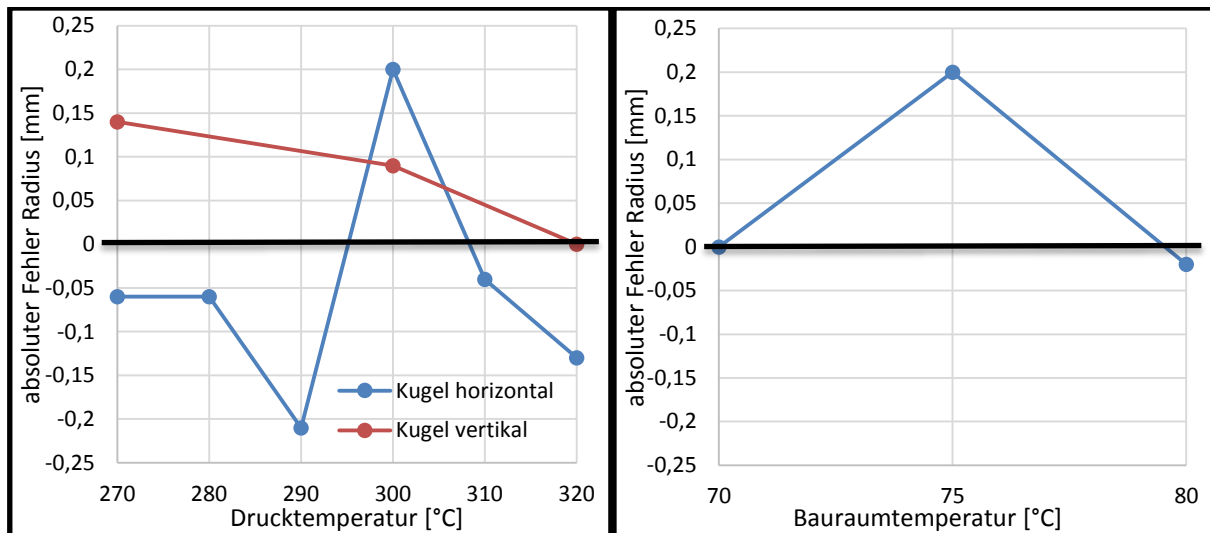


Abbildung 86: Absoluter Fehler Radius in Abhängigkeit der Temperaturen

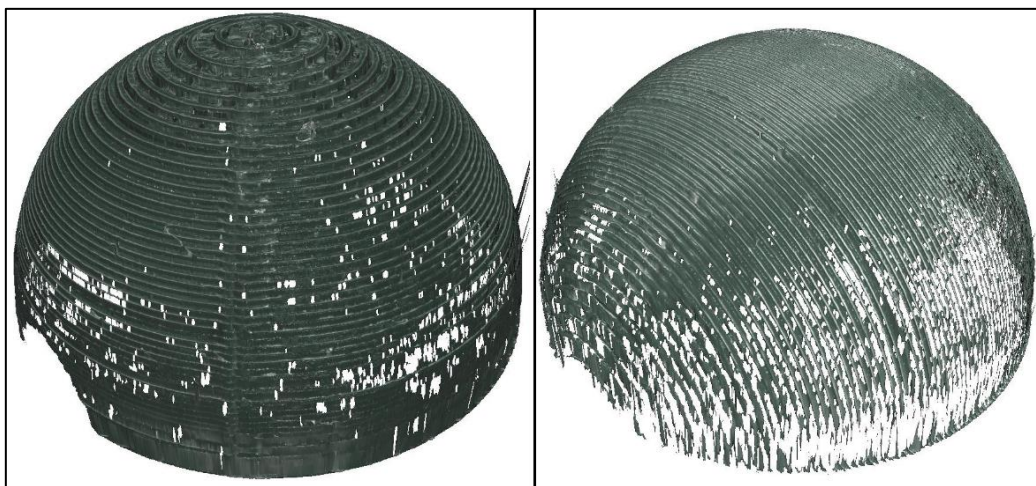


Abbildung 87: Halbkugel horizontal (links) sowie vertikal (rechts)

6.3.10 Resultate der Pyramide

Bei der Pyramide liegen als Messwerte die Seitenlängen sowie die Winkel der gegenüberliegenden Seitenflächen vor. Die absoluten Fehler der Kantenlängen sind in Abbildung 88 für beide Ausrichtungen abgebildet (lp1-lp4) und weisen deutliche Unterschiede auf. So ist bei den horizontalen Ergebnissen nur eine kleine Streuung und keine Temperaturabhängigkeit zu sehen. Die vertikalen Drucke haben größere Abweichungen und eher den Trend zu kleineren Fehlern bei höherer Temperatur. Die Größe der Fehler kann man damit begründen, dass bei der vertikalen Fertigung kein feiner Übergang von Pyramide zu Grundplatte ausmachbar und somit die Messung der Längen schwierig ist. Der Unterschied von vertikalen zu horizontalen Bauteilen ist in Abbildung 89 zu erkennen. Die bessere Druckvariante ist eindeutig das horizontal gefertigte Bauteil, da hier nur die ausgeprägte Spitze als Qualitätsminderung auszumachen ist. Diese hat einen Radius von ungefähr 0,5 mm, was der Spurweite entspricht.

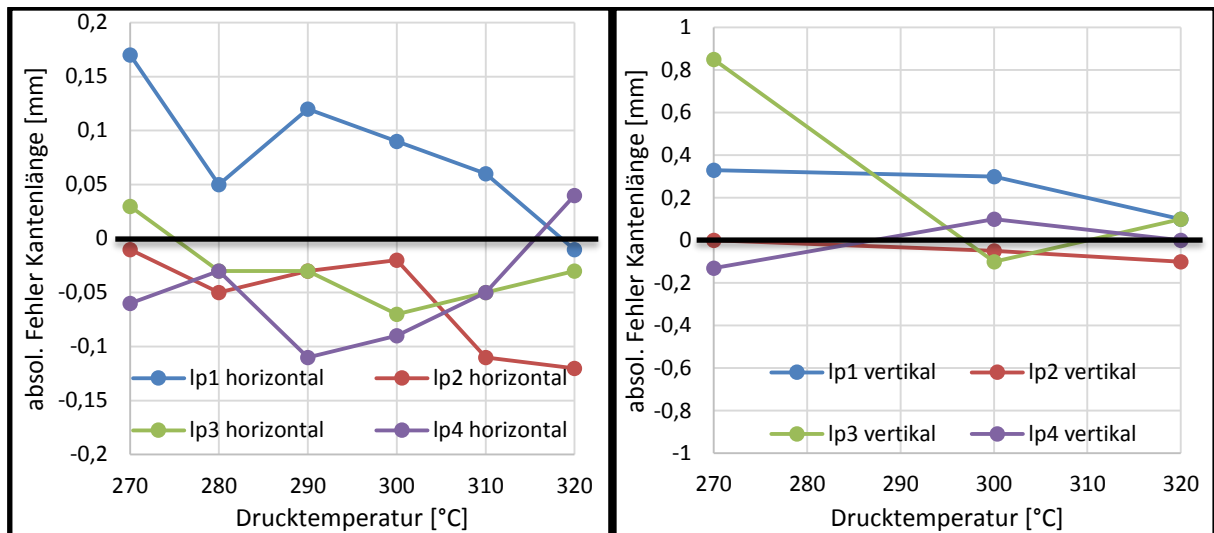


Abbildung 88: Absoluter Fehler Kantenlänge in Abhängigkeit der Drucktemperatur

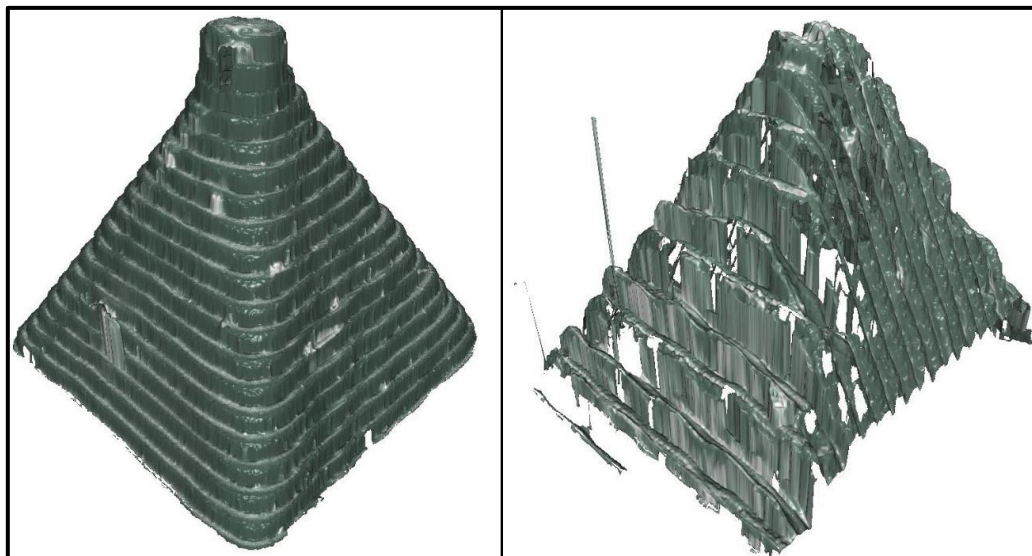


Abbildung 89: Pyramide horizontal (links) und vertikal (rechts)

Ein Einfluss der Bauraumtemperatur ist in Abbildung 90 nicht zu erkennen. Die größere Abweichung der Länge „lp4“ ist auf die Aufwölbung der Grundplatte rückzuführen. Die restlichen Längen weisen keine großen Fehler auf und sind unabhängig von der Temperatur.

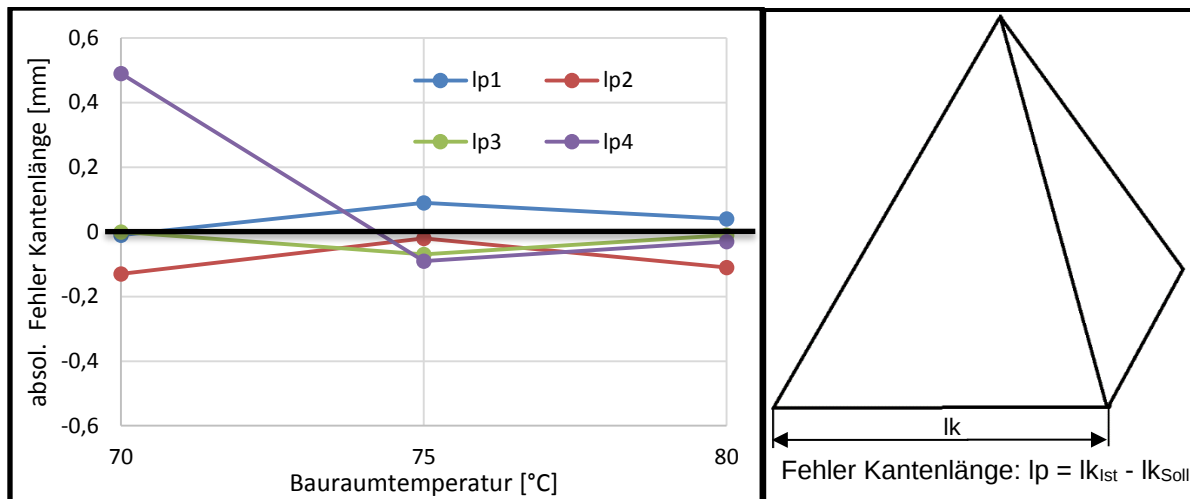


Abbildung 90: Absoluter Fehler Kantenlänge in Abhängigkeit der Bauraumtemperatur

Zusätzlich zu den Längen wurden auch noch die Winkel der Pyramide, das heißt die Winkel der gegenüberliegenden Seitenflächen zueinander (wp1, wp2), gemessen. Bei den Ergebnissen zeigt sich in Abbildung 91 wieder eine relativ deutliche Streuung, eine Parameterabhängigkeit ist jedoch nicht auszumachen.

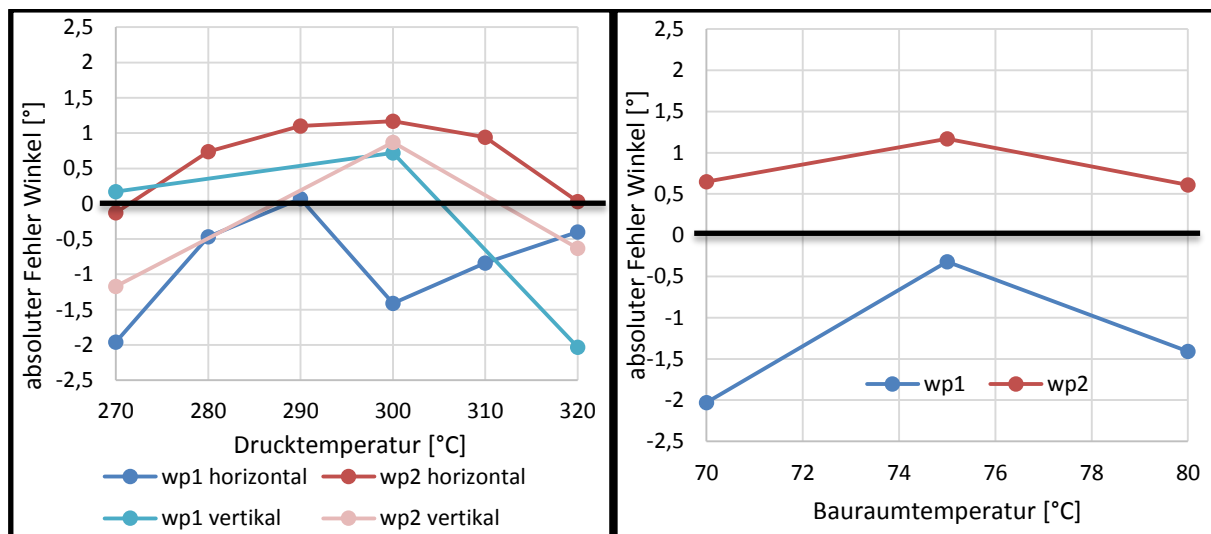


Abbildung 91: Absoluter Fehler Winkel in Abhängigkeit der Druckparameter

6.3.11 Resultate der Grundplatte

Die Grundplatte ist die Verbindung aller vorhergenannten Geometrien und somit nicht als eigenes Merkmal vorgesehen. Da sie aber perfekt für die Rauheitsmessung verwendet werden kann, wurde zum Vergleich an der Ober- und Unterseite die Rauheit gemessen. Auch hier wurden die Werte der Profilrautiefen R_a und R_z bzw. der Flächenrautiefen S_a und S_z gemessen. Wie in Abbildung 92 zu sehen, sind bei der horizontalen Fertigung auf der linken Seite die Mittenrauwerte an der Oberseite deutlich geringer als an der Unterseite. Außerdem ist eine Temperaturabhängigkeit vorhanden. An der Unterseite der Grundplatte entsteht durch die Verbindung mit dem Stützmaterial eine gröbere Oberfläche, die mit steigender Temperatur feiner wird. Zum besseren Verständnis ist in Abbildung 93 ein Vergleich der Schrift an der Unterseite dargestellt. Der oberste Druck mit niedriger Drucktemperatur und horizontaler

Ausrichtung weist keine gute Verbindung zwischen den einzelnen Schichten auf, dadurch entstehen Spalte und somit höhere Rauheiten. Die Schrift sowie die Oberflächen sind optisch bei höherer Temperatur und vertikaler Ausrichtung besser. Dies zeigt sich auch in den Messergebnissen. So sind die Rauheiten an der Oberseite und beim vertikalen Druck deutlich geringer, außerdem nehmen sie mit steigender Temperatur leicht zu. Bei der vertikalen Ausrichtung ist zudem nur ein geringer Unterschied zwischen Ober- und Unterseiten festzustellen.

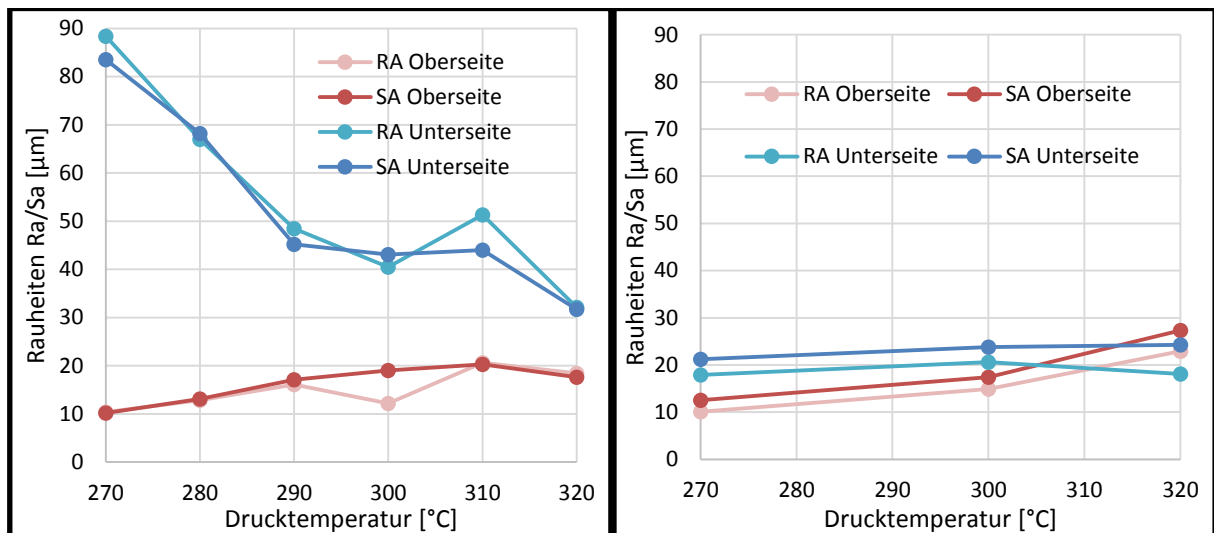


Abbildung 92: Rauheiten R_a/S_a in Abhängigkeit der Drucktemperatur horizontal (links) und vertikal (rechts)

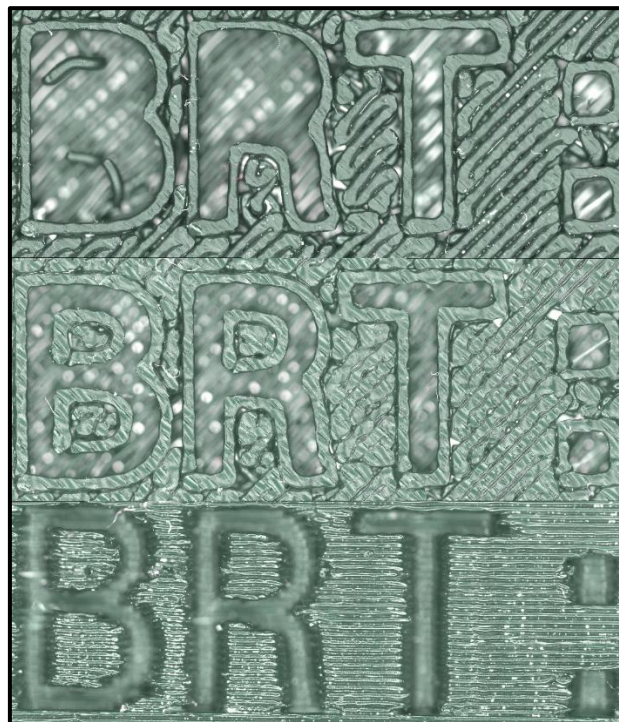


Abbildung 93: Beschriftung der Grundplatte an der Unterseite: Niedrige Düsentemperatur (oben), hohe Düsentemperatur (mitte) sowie vertikale Ausrichtung (unten)

Die Bauraumtemperatur, wie in Abbildung 94 zu sehen, hat auf die Rauheiten an der Oberseite ähnlichen Einfluss, da die R_a - und S_a - Werte mit höherer Temperatur steigen. Die Unterseite hat wieder deutlich größere Rauheiten, jedoch liegt kein klarer Trend vor. Auf der rechten Seite sind die Rauheiten R_z und S_z abgebildet, welche deutlich über den vorher genannten liegen. Die Tendenzen sind ähnlich wie zuvor, bei steigender Bauraumtemperatur steigen die Rauheiten an der Oberseite, an der Unterseite liegt eine eher fallende Tendenz vor.

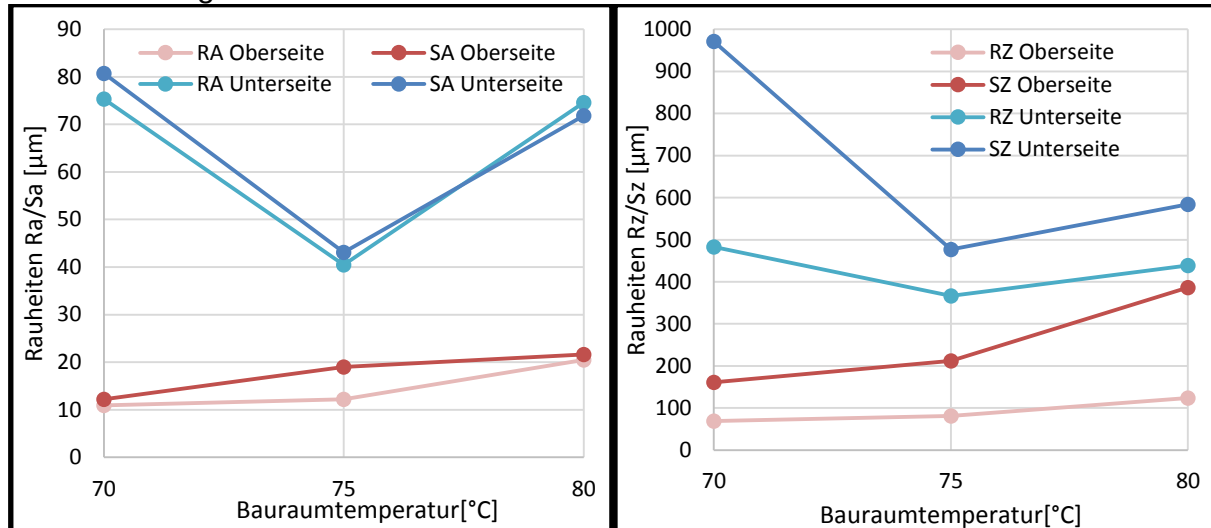


Abbildung 94: Rauheiten $R_a/S_a/R_z/S_z$ in Abhängigkeit der Bauraumtemperaturen

Der Einfluss der Drucktemperatur auf die R_z - und S_z - Werte ist in Abbildung 95 zu sehen. Horizontal sind wie bei den Mittenrauwerten gegengleiche Tendenzen zu erkennen. Vertikal sind die Ergebnisse deutlich geringer, ein klarer Trend ist nicht bestimmbar.

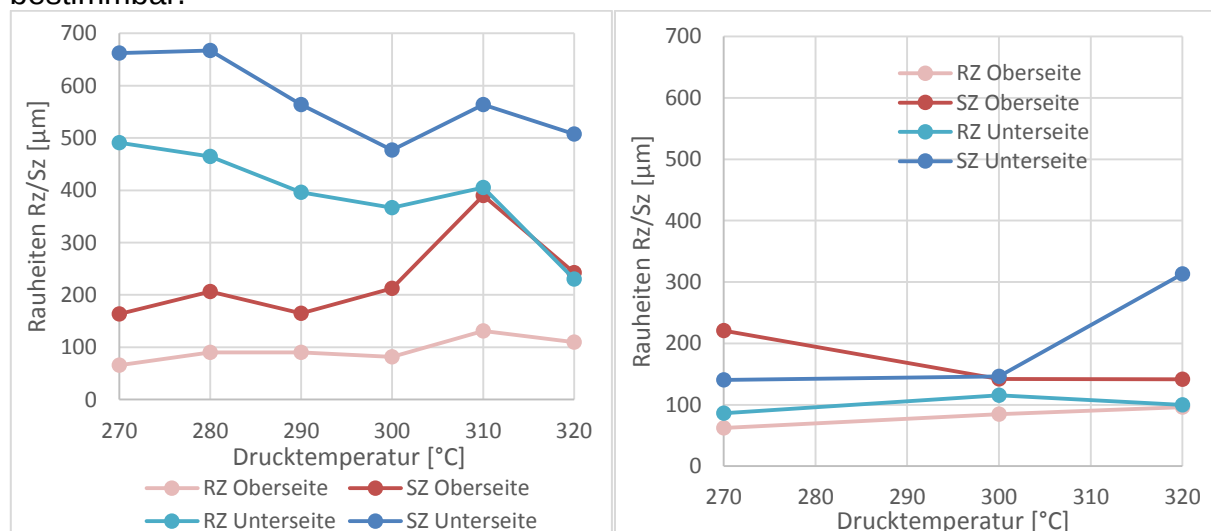


Abbildung 95: Rauheiten R_z/S_z in Abhängigkeit der Drucktemperatur horizontal (links) und vertikal (rechts)

Als weiteres Maß wurde noch die Ebenheit der Grundplatte gemessen, wobei es keine Parameterabhängigkeiten gibt. Bis auf die Aufwölbung vom Druck Nummer 7 sind die Ergebnisse sehr ähnlich mit einem Maximum von 0,23 mm. Die Grundplatte ist somit sehr eben.

7 Analytische Vergleichsrechnung

Zusätzlich zu den Messergebnissen soll die Rauheit durch ein analytisches Vergleichsmodell bestimmt werden. Dadurch können eventuell vorhandene Druckunregelmäßigkeiten anhand der Abweichungen erkannt werden. Der Vergleich erfolgt dabei an den Türmen, da hier ebenfalls die Winkelabhängigkeit miteinbezogen werden kann.

Die theoretische Oberflächenform kann durch eine Aneinanderreihung von gleich großen Halbkreisen angenähert werden, die abhängig von den einzelnen Winkeln unterschiedlich versetzt sind. Um die Form sowie die Größe der Kreise zu erkennen, wurde die Grundplatte eines fehlgeschlagenen Druckes aufgeschnitten und optisch durch Einpassen von Kreisen vermessen. Das Ergebnis ist in Abbildung 96 zu sehen. Hier zeigen sich die einzelnen Halbkreise mit einem durchschnittlichen Radius von 154 μm . Dieser wird in den folgenden Berechnungsmodellen verwendet.

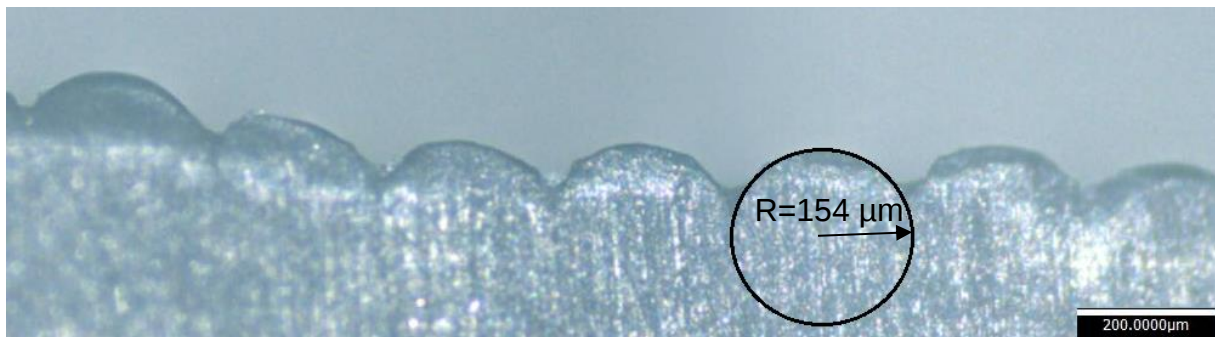


Abbildung 96: Schnitt durch die Grundplatte

Da bei der oberen Abbildung nur eine gerade Fläche erkennbar ist, wurde zur Überprüfung der schiefen Flächen das optisch gemessene Rauheitsprofil herangezogen. Durch einen Profilschnitt in der Software sind die Oberflächen der Türme 1 bis 3 in Abbildung 97 abgebildet.

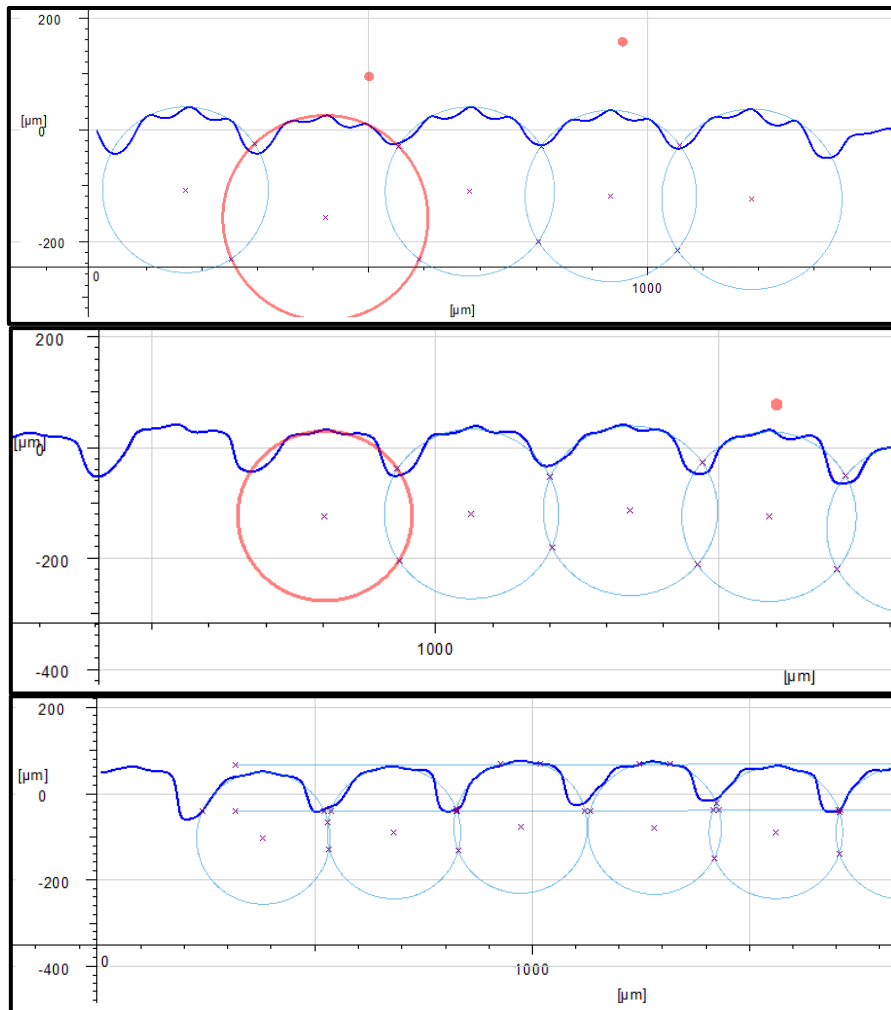


Abbildung 97: Oberflächenprofil Türme 1 (oben) bis 3 (unten)

Hier zeigen sich doch deutliche Abweichungen der idealen Halbkreisform, weshalb die Annäherung modifiziert werden muss. Als Profil, wie in Abbildung 98 ersichtlich, wurde ein Kreisbogen mit dem Grundradius von $154\text{ }\mu\text{m}$ gewählt, der von zwei gegengleichen Kreisbögen mit einem Radius von $60\text{ }\mu\text{m}$ abgegrenzt wird. Da das Profil periodisch fortläuft, ist die Beschreibung dieses Profils ausreichend, um eine Rauheitsmessung durchzuführen.

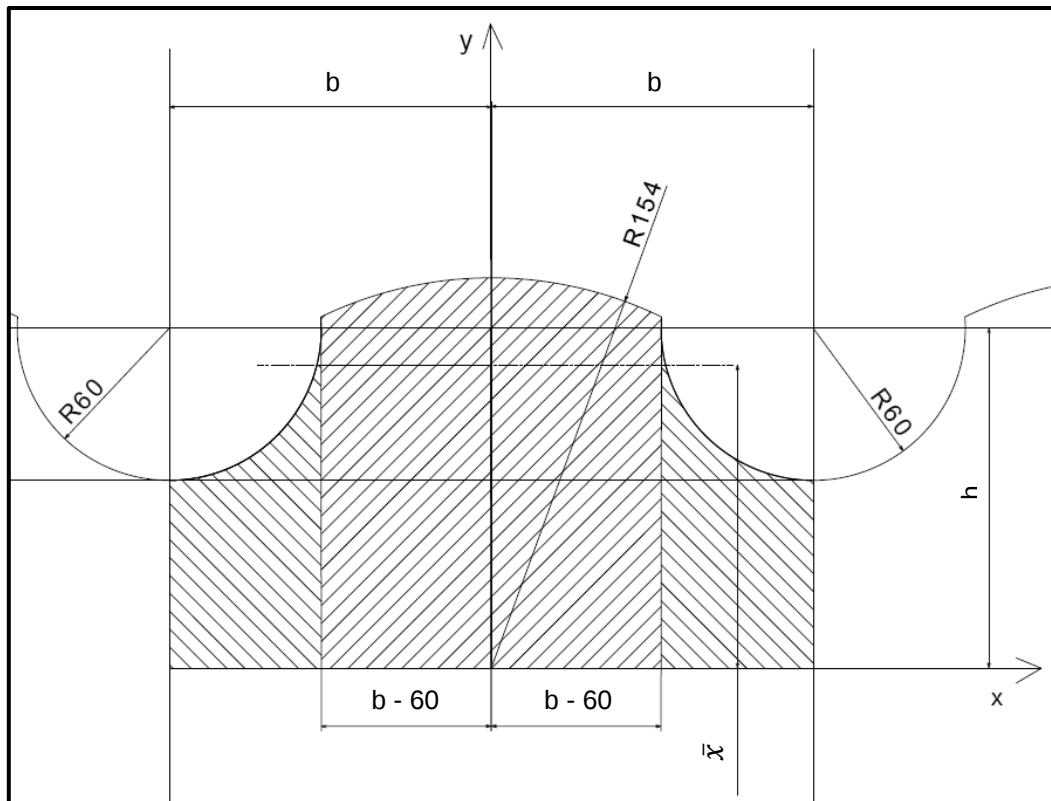


Abbildung 98: Profil Türme 1 bis 3

Bei den unterschiedlichen Winkeln ändert sich jeweils die Breite des Profils, da die Schichtstärke auf die geneigte Achse projiziert wird. Deswegen ist die Breite als Variable dargestellt. Diese errechnet sich durch einfache Trigonometrie, zur Übersicht ist in Abbildung 99 eine Skizze dargestellt. Die Ankathete des Winkels Alpha ist aufgrund der Schichtstärke des 3D-Druckers bekannt und mithilfe des Neigungswinkels der Türme wird auf die gesuchte Breite mit folgender Formel umgerechnet:

$$2b = \frac{254}{\cos(\alpha)} \quad (\text{Gleichung 6})$$

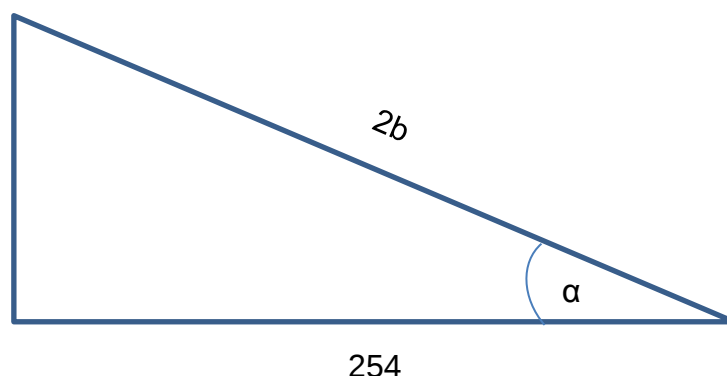


Abbildung 99: Berechnung der Profilbreite

Als weiterer Berechnungsparameter geht die Größe „h“ in die Berechnungen mit ein. Diese ist die Lage der Mittelpunkte der beiden Halbkreise und wird wie folgt mit dem pythagoräischen Lehrsatz berechnet:

$$h = \sqrt{154^2 - (b - 60)^2} \quad (\text{Gleichung 7})$$

Für die Rauheitsmessung ist es zunächst notwendig, eine Mittellinie zu berechnen. Dies erfolgt mit der Methode der kleinsten Quadrate, wozu nach folgenden Formeln die schraffierten Flächen in Abbildung 98 integriert werden und der arithmetische Mittelwert gebildet wird.

$$y_1 = \int_{-b}^{-b+60} |-\sqrt{60^2 - (x+b)^2} + h| dx \quad (\text{Gleichung 8})$$

$$y_2 = \int_{-b+60}^{b-60} |\sqrt{154^2 - x^2}| dx \quad (\text{Gleichung 9})$$

$$\bar{x} = \frac{1}{2b} * (2 * y_1 + y_2) \quad (\text{Gleichung 10})$$

Die erste Formel berechnet die Fläche des Kreisbogens in der Mitte, die zweite Formel die Fläche unter den anderen beiden Kreisbögen. Durch Mittelung in der dritten Formel ergibt sich die Höhe der gemittelten Ausgleichsgerade, anhand dieser nun die Rauheitsmessung erfolgt. Es wird der Koordinatenursprung auf diese Linie gelegt, siehe Abbildung 100, und es wird von hier an mit den folgenden Formeln erneut integriert und gemittelt.

$$y_3 = \int_{-b}^{-b+60} |-\sqrt{60^2 - (x+b)^2} - (h - \bar{x})| dx \quad (\text{Gleichung 11})$$

$$y_4 = \int_{-b+60}^{b-60} |\sqrt{154^2 - x^2} - \bar{x}| dx \quad (\text{Gleichung 12})$$

$$R_a = \frac{1}{2b} * (2 * y_3 + y_4) \quad (\text{Gleichung 13})$$

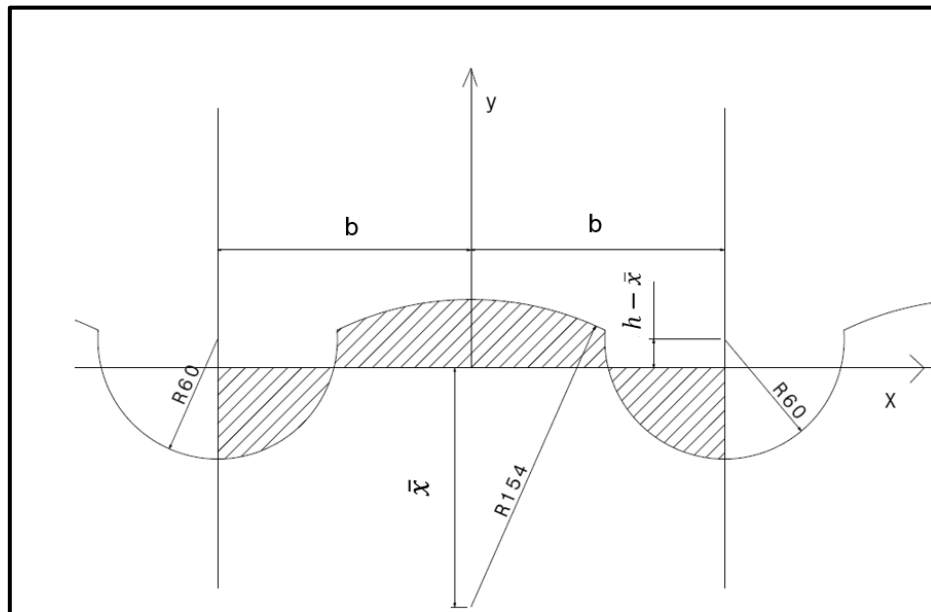


Abbildung 100: Berechnung der Rauheit der Türme 1 bis 3

Der R_z Wert ergibt sich durch Berechnung des maximalen Höhenunterschiedes von Ober- zu Unterkante mit folgender Formel:

$$R_z = 154 - \sqrt{154^2 - b^2} \quad (\text{Gleichung 14})$$

Diese Formeln gelten für die Türme eins bis drei, also für die Neigungswinkel 0-30°. Die Türme vier und fünf weisen hingegen ein leicht abgeändertes Profil auf, siehe Abbildung 101. Hier liegen nicht mehr ausschließlich Kreisformen vor, sondern es treten auch gerade Flächen auf. Daher wird das Profil mit einem Halbkreis und einer Geraden angenähert.

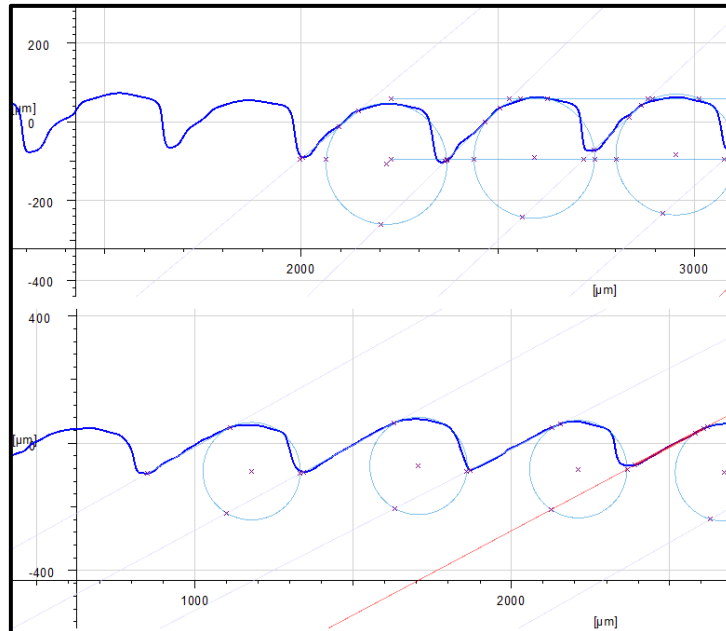


Abbildung 101: Oberflächenprofil der Türme 3 (oben) und 4 (unten)

Das zur Berechnung verwendete Profil des Turms 5 ist in Abbildung 102 zu sehen. Hier sind bereits die zur Rauheitsmessung notwendigen Flächen ausgehend von der Mittellinie schraffiert.

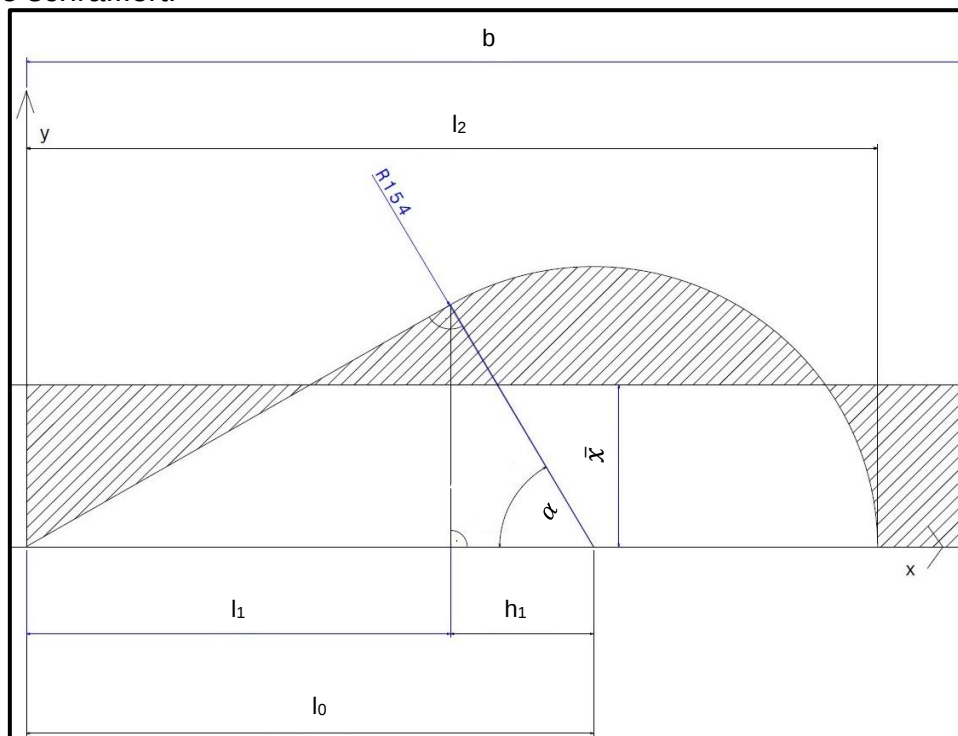


Abbildung 102: Berechnung Rauheit analytisch T4 und T5

Die Berechnung erfolgt wieder ähnlich wie zuvor. Zunächst werden einige Hilfsvariablen benötigt, welche geometrische Zusammenhänge beschreiben.

$$l_0 = \frac{154}{\cos(\alpha)} \quad (\text{Gleichung 15})$$

$$h_1 = \sqrt{154^2 - (154 * \sin(\alpha))^2} \quad (\text{Gleichung 16})$$

$$l_2 = l_0 + 154 \quad (\text{Gleichung 17})$$

$$l_1 = l_0 - h_1 \quad (\text{Gleichung 18})$$

$$k = \frac{\sqrt{154^2 - h_1^2}}{l_1} \quad (\text{Gleichung 19})$$

Dabei ist k die Steigung der Gerade. Zur Berechnung der Rauheit müssen zwei Fälle unterschieden werden. Diese sind abhängig von den Längen b und l_2 . Ist b kleiner als l_2 , wie bei Turm 4, liegen als Funktion nur die Gerade sowie der Kreis vor. Bei Turm 5, wie in Abbildung 102 dargestellt, ist b größer als l_2 und es ist nach dem Kreis noch eine zusätzliche Gerade vorhanden. Die Formeln lauten für beide Fälle wie folgt:

b < l_2 :

$$\bar{x} = \frac{1}{2b} \left(\int_0^{l_1} k * x \, dx + \int_{l_1}^{l_2} |\sqrt{154^2 - (x - l_0)^2}| \, dx \right) \quad (\text{Gleichung 20})$$

$$R_a = \frac{1}{2b} \left(\int_0^{l_1} |k * x - \bar{x}| \, dx + \int_{l_1}^{l_2} |\sqrt{154^2 - (x - l_0)^2} - \bar{x}| \, dx \right) \quad (\text{Gleichung 21})$$

bzw. b > l_2 :

$$\bar{x} = \frac{1}{2b} \left(\int_0^{l_1} k * x \, dx + \int_{l_1}^{l_2} |\sqrt{154^2 - (x - l_0)^2}| \, dx + \int_{l_2}^{2b} 0,0001 \, dx \right) \quad (\text{Gleichung 22})$$

$$R_a = \frac{1}{2b} \left(\int_0^{l_1} |k * x - \bar{x}| \, dx + \int_{l_1}^{l_2} |\sqrt{154^2 - (x - l_0)^2} - \bar{x}| \, dx + \int_{l_2}^{2b} |-\bar{x}| \, dx \right) \quad (\text{Gleichung 23})$$

Als Rauheit R_z ergibt sich bei T4 und T5 mit dem Radius, was der maximalen Höhe entspricht, ein konstanter Wert von 154 μm . Somit gibt es einen Winkel, ab dem die Rauheit einen konstanten Wert hat. Die analytischen Ergebnisse von R_z sind in Abbildung 103 dargestellt. Es liegt nur eine geringe Schwankung vor, die Werte liegen zwischen 68 μm des ersten und den 154 μm des fünften Turmes. Die gemessenen Werte weisen hingegen weitaus höhere Schwankungen auf, von 150 bis 500 μm , daher sind die Ergebnisse nicht miteinander vergleichbar. Der Unterschied ist darauf zurückzuführen, dass das wahre Profil ungleichmäßiger ist und somit deutlich größere Höhenunterschiede vorliegen, welche rechnerisch nicht erfasst wurden.

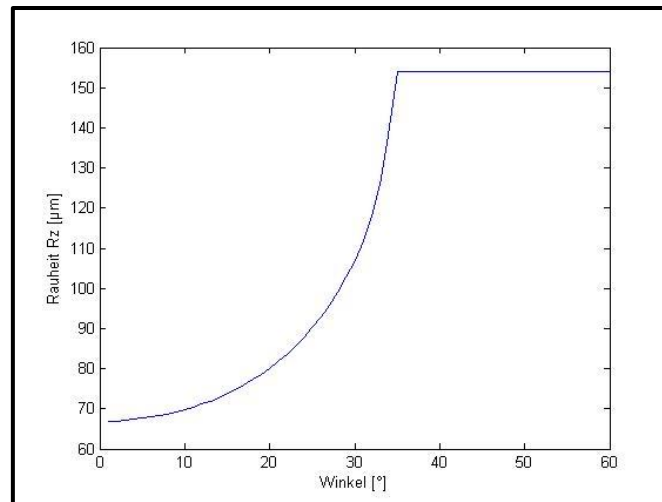


Abbildung 103: Analytische Rauheit R_z in Abhängigkeit des Turmwinkels

Die gemittelten Rauheitswerte, also die R_a -Werte, sind theoretisch und praktisch sehr ähnlich. Dazu sind in Abbildung 104 auf der linken Seite die Messergebnisse sowie die analytischen Ergebnisse des Mittenrauheits der Türme 1 bis 5 aufgetragen. Es zeigt sich, dass die Werte keine großen Abweichungen aufweisen und somit die Annäherung der Profile zulässig ist. Lediglich bei Turm Nummer 3 gibt es eine etwas größere Abweichung. Diese lässt sich damit erklären, dass hier genau die Grenze der beiden Berechnungsmodelle liegt und ein Sprung bei den Ergebnissen vorliegt. In Abbildung 104 ist auf der rechten Seite der genaue Verlauf ersichtlich. Hier ist die Rauheit in Abhängigkeit der Neigungswinkel der Türme aufgetragen. Durch Auswertung der vorher genannten Formeln konnte mit dem Programm Matlab die Rauheit für alle Winkel von 0-60° berechnet werden. Bei 30°, also Turm 3, ist der eben genannte Sprung zu erkennen. Bis auf diesen Sprung ist ein klarer Verlauf zu erkennen, der nur gering von den Messwerten abweicht.

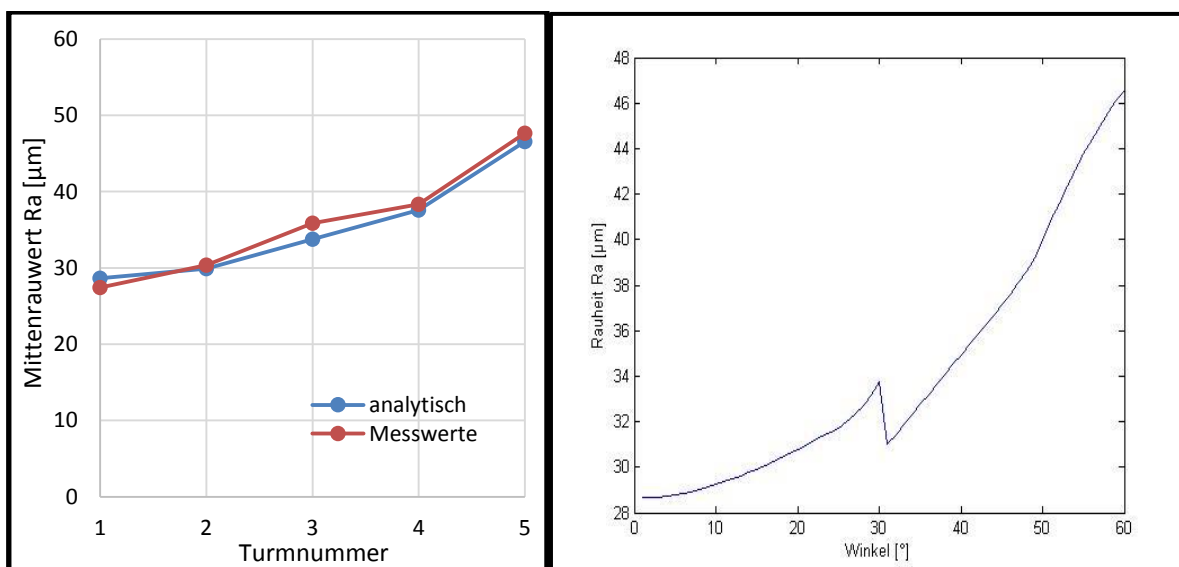


Abbildung 104: Vergleich Mittenrauwerte R_a (links) und Ergebnisse der analytischen Berechnung in Abhängigkeit des Turmwinkels (rechts)

8 Zugprüfung

Bei der Auswertung der ersten Zugversuche konnte man ein Muster erkennen, da alle Zugproben an derselben Stelle gerissen sind. Aufgrund dieser Erkenntnis wurde ein Fehler im Schichtaufbau gefunden, da jede Schicht vom selben Punkt aus gestartet wurde, welcher genau in der Rissstelle liegt. Daher ist bei den ersten Drucken eine „Sollbruchstelle“ vorgelegen und die Drucke mussten wiederholt werden. Nach erneutem Druck und der daraus folgenden Auswertung kann nun ein Vergleich der beiden Bauteile erfolgen. In Abbildung 105 sind jeweils die technische sowie die wahre Spannung beider Druckverfahren aufgetragen. Unter „alt“ sind die ersten Drucke mit dem falschen Schichtbeginn aufgetragen, bei den anderen beiden liegt der Schichtbeginn am Rand bei der Einspannung.

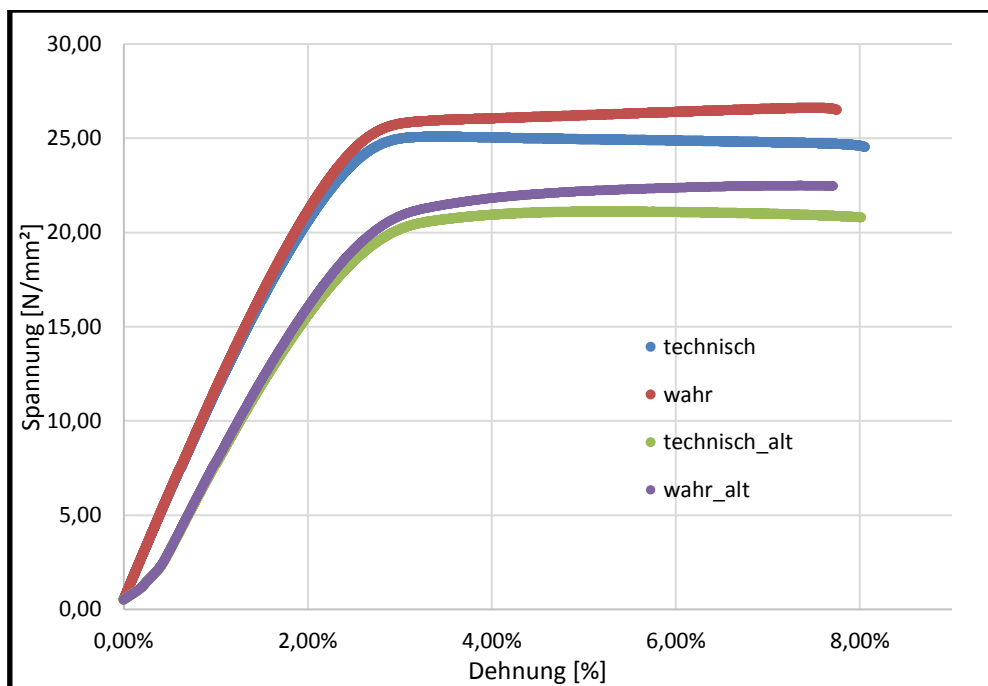


Abbildung 105: Vergleich alter/neuer Druck DT:300°C, BRT: 75°C

Der richtige Schichtbeginn hat eine sehr positive Auswirkung auf die Festigkeit, da eine deutliche Festigkeitssteigerung auszumachen ist. Zusätzlich ist zu erkennen, dass die wahren Spannungen gegen Ende des Versuchs immer weiter von den technischen abweichen, da diese aufgrund der Querschnittsänderung immer größer werden. Da die Zugfestigkeit anhand der technischen Spannung ermittelt wird, ist ab hier nur mehr diese in Verwendung. In Abbildung 106 sind die Spannungs-Dehnungs-Diagramme aller Drucke dargestellt. Oben die Abhängigkeiten der Temperaturen, unten die vertikalen sowie die in der Ebene verdrehten Drucke. Man erkennt die Unterschiede der einzelnen Druckparameter, da vor Allem die vertikalen Drucke sowie die in der Ebene gedrehten Drucke abweichen. Die Versuche mit unterschiedlichen Drucktemperaturen sind hingegen alle sehr ähnlich und weichen nur minimal voneinander ab. Im elastischen Bereich ist der Verlauf aller Kurven nahezu ident, was bedeutet, dass der Elastizitätsmodul weitestgehend unabhängig von den Druckparametern ist.

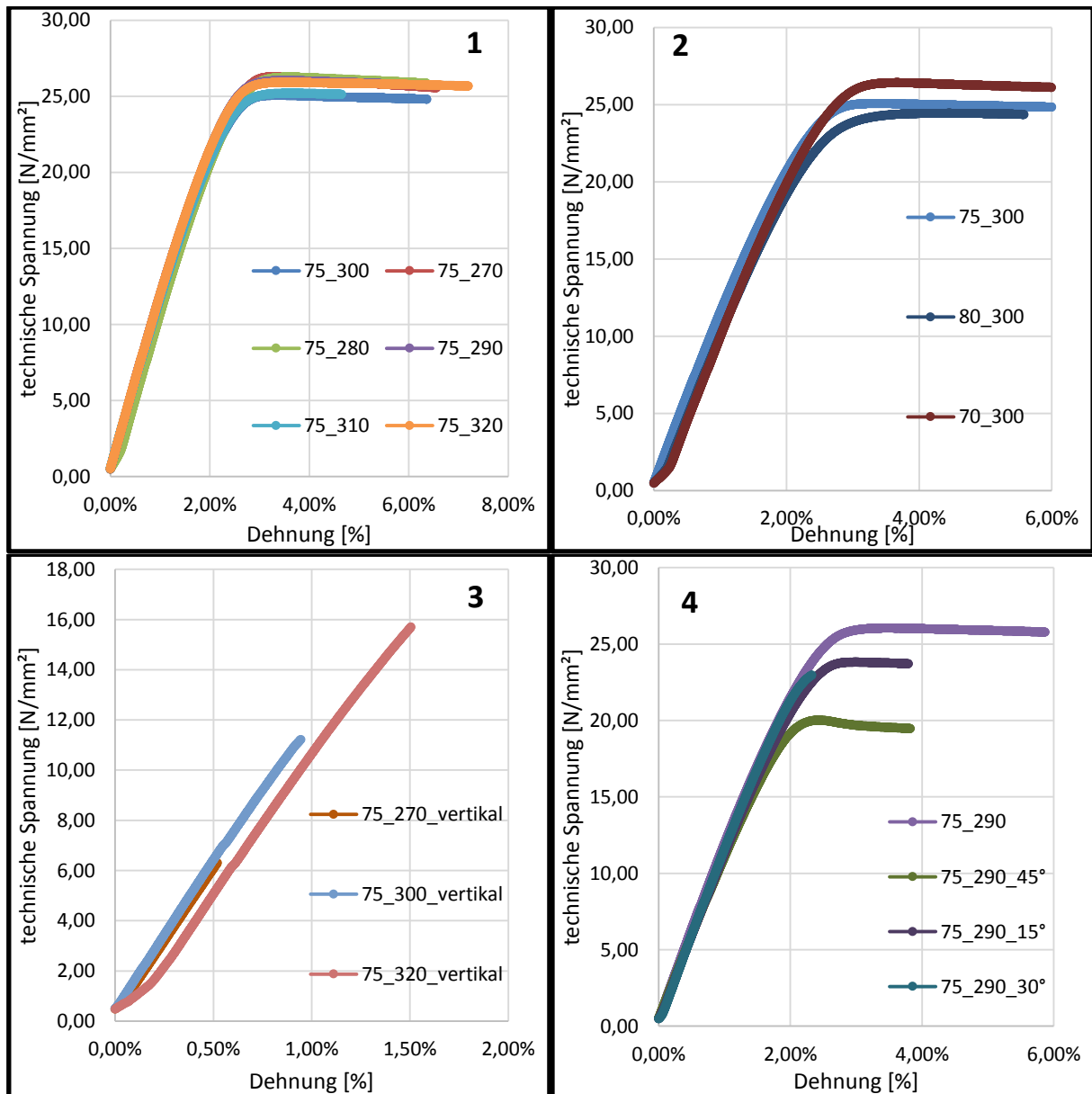


Abbildung 106: Übersicht der Spannungs-Dehnungs-Diagramme in Abhängigkeit der Druckparameter: Drucktemperatur (1), Bauraumtemperatur (2), Ausrichtung im Bauraum (3) und Ausrichtung in der Ebene (4)

Als maximaler Festigkeitswert wird standardmäßig die Zugfestigkeit verwendet. Diese gibt die Spannung bei der höchsten aufgetragenen Kraft an, womit sich sehr gute Vergleiche herstellen lassen. In den folgenden Diagrammen sind jeweils die Zugfestigkeiten in Abhängigkeit der Druckparameter aufgetragen. Da es sich bei den Ergebnissen um Mittelungen von fünf Messungen handelt, werden zusätzlich die Standardabweichungen in Form von Balken angegeben.

Zu Beginn sind in Abbildung 107 die Zugfestigkeiten in Abhängigkeit der Drucktemperatur aufgetragen. Dabei zeigen sich keine großen Unterschiede, das Maximum liegt mit $26,71 \text{ N/mm}^2$ bei 290°C . Man kann somit zusammenfassen, dass die Drucktemperatur keine Auswirkung auf die Festigkeit des Bauteils hat.

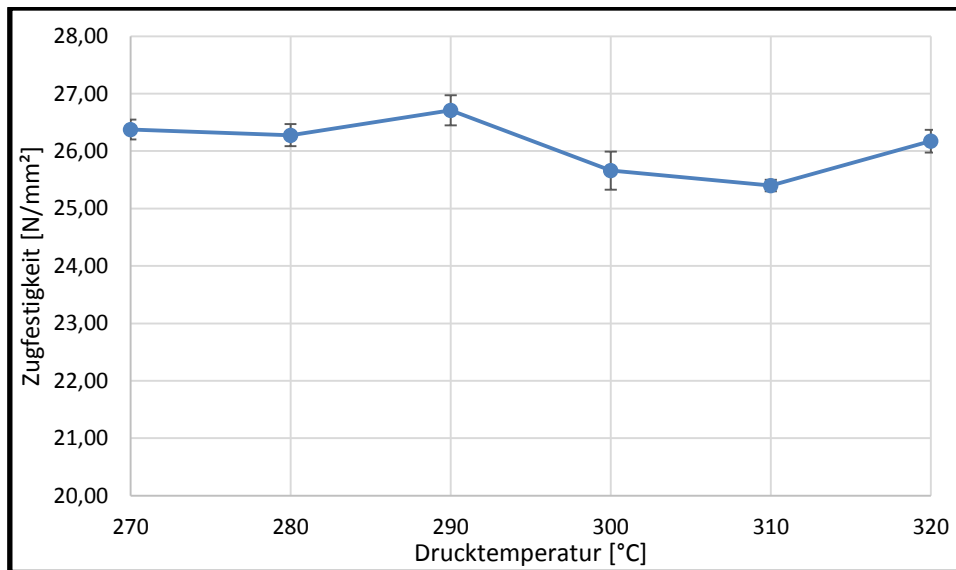


Abbildung 107: Zugfestigkeit in Abhängig von Drucktemperatur

Als nächster Parameter wird die Bauraumtemperatur behandelt, die Zugfestigkeiten sind in Abbildung 108 zu sehen. Auch hier zeigen sich keine großen Unterschiede. Die Zugfestigkeiten nehmen mit steigender Bauraumtemperatur leicht ab, somit kann hier von einer geringen Parameterabhängigkeit gesprochen werden.

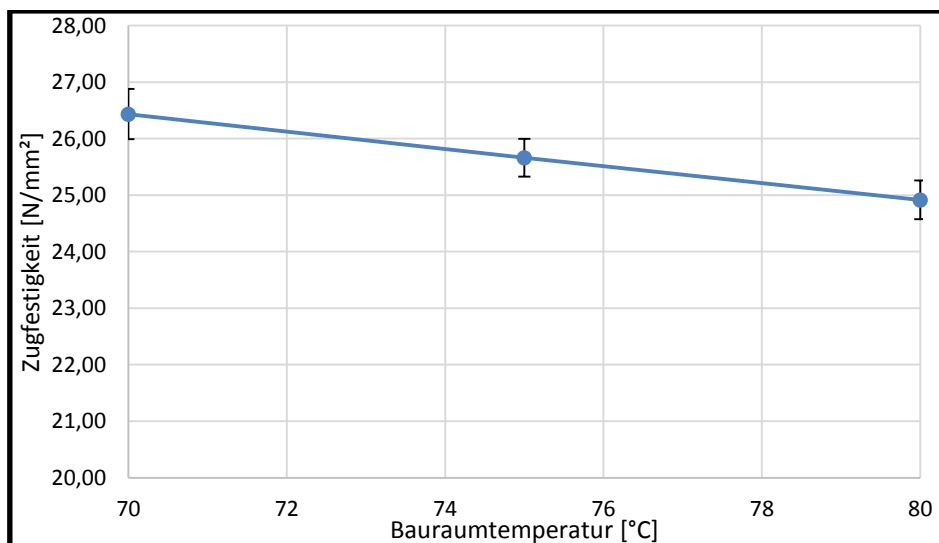


Abbildung 108: Zugfestigkeit in Abhängigkeit von Bauraumtemperatur

Bei den nächsten Druckparametern, den Drucken in vertikaler Ausrichtung, zeigt sich ein deutlicher Abfall der Zugfestigkeiten. Hier wird die Festigkeit nicht durch das Material bestimmt, sondern durch den Zusammenhalt zwischen den einzelnen Schichten. Dieser ist bei höherer Drucktemperatur verbessert, weshalb sich ein steigender Verlauf der Zugfestigkeit bei steigender Drucktemperatur zeigt, siehe Abbildung 109 links. Auf der rechten Abbildung ist der Unterschied von der horizontalen zur vertikalen Bruchstelle zu sehen. Man erkennt hier einerseits die einzelnen gebrochenen Fäden des horizontalen Druckes auf der linken Seite sowie die gelöste Schicht auf der rechten Seite. Bei der vertikalen Ausrichtung wurde nur jeweils ein Bauteil gedruckt, wodurch hier keine Standardabweichung angegeben ist.

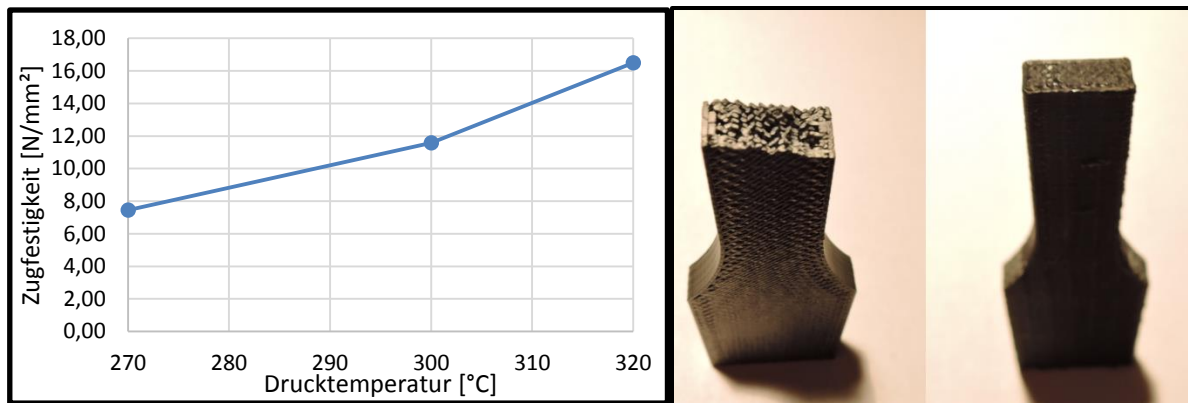


Abbildung 109: Zugfestigkeit vom vertikalen Druck in Abhängigkeit von Drucktemperatur (links) und Vergleich der Bruchstelle horizontal/vertikal (rechts)

Zuletzt ist in Abbildung 110 der Vergleich der Zugfestigkeiten in Abhängigkeit von der Ausrichtung in der Ebene zu sehen. Wie zu erwarten, liegt der höchste Wert bei 0°, da hier die Füllbahnen um 45° zur Zugrichtung versetzt sind und somit in Richtung der maximalen Schubspannung liegen. Mit zunehmenden Winkel dreht sich der Schichtaufbau, wie in Abbildung 39 sowie auf der rechten Seite in Abbildung 110 angedeutet, bis bei 45° jeweils eine Schicht abwechselnd in Zugrichtung und parallel zur Zugrichtung liegt. Durch diese Anisotropie ergibt sich eine deutliche Parameterabhängigkeit, welche bei auf Zug belasteten Bauteilen beachtet werden muss.

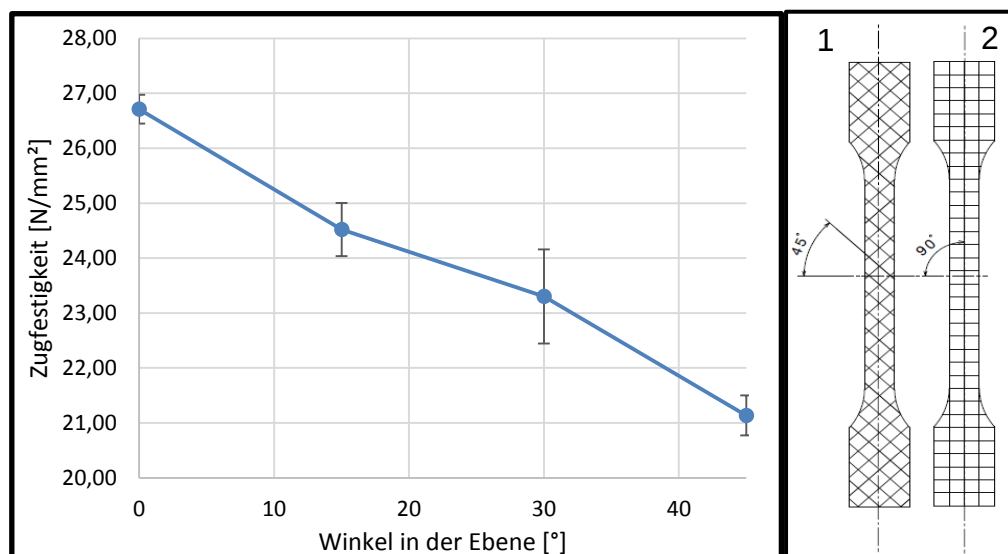


Abbildung 110: Zugfestigkeit in Abhängigkeit von Ausrichtung in der Ebene links; Zugstäbe im ebenen Winkel von 0° (1) und 45° (2) rechts

9 Zusammenfassung

Nach Abschluss aller Messungen werden alle Ergebnisse zusammengefasst. Die Benchmark-Teile wurden auf Optik, Form und Maße überprüft. Die Temperaturen, sowohl Drucktemperatur als auch die Bauraumtemperatur, haben nur geringen Einfluss auf die messbaren Werte, haben jedoch in Kombination mit der Bauplattform einen großen Einfluss auf den generellen Druck. Dabei stellt vor allem die Aufwölbung des Bauteils das größte Problem dar, weshalb dieses unbedingt zu vermeiden ist. Dazu müssen klar die standardmäßigen Temperaturen bevorzugt werden, da bei den niedrigeren Temperaturen leichter der Effekt der Wölbung auftritt. Es hat sich gezeigt, dass der Haupteinfluss auf die geometrische Genauigkeit und Oberflächenqualität die Ausrichtung des Bauteils im Bauraum ist. Dabei ist generell keine Vorzugsrichtung auszumachen, da diese geometrieabhängig ist. Deswegen muss besondere Sorgfalt auf die Druckplanung gelegt werden.

Die Festigkeitsmessung von den horizontalen Zugstäben zeigt ebenso keine große Abhängigkeit von der Temperatur. Bauraum- und Drucktemperatur haben nur minimalen Einfluss auf das Druckergebnis. Die Ausrichtungen im Bauraum sowie in der Ebene haben dagegen mehr Wirkung auf die Festigkeit. Vertikal zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit von der Drucktemperatur. Es besteht wieder die Notwendigkeit einer sorgfältigen Druckplanung. So ist darauf zu achten, dass die Hauptbelastung horizontal bei 0° Drehung erfolgt und die Belastung vertikal am geringsten ist. Unabhängig der Druckparameter muss auf den Start- und Endpunkt des Schichtaufbaus geachtet werden. Liegt dieser immer an der kritischen Stelle, ist eine Schwächung vorhanden. Nicht untersucht wurde die Ausrichtung in der Ebene mit einer Variation der Drucktemperatur. Hier gibt es eine mögliche zusätzliche Abhängigkeit.

Zusammenfassend kann somit abgeschlossen werden, dass das beste Druckergebnis mit einer Düsentemperatur von 290°C, einer Bauraumtemperatur von 75°C sowie in vertikaler Ausrichtung mit 0° Drehung in der Ebene zustande kommt. Hier ist die Festigkeit knapp am höchsten und auch die Benchmark-Teile sind hierbei ohne Probleme gefertigt worden.

Um den 3D-Druck - Prozess produktionstechnisch effizient und optimal zu planen, müssten noch viele weitere Parameter getestet und optimiert werden. Dazu zählen unter anderem verschiedene Materialien, Ausfüllgrade der einzelnen Schichten, Vorschubgeschwindigkeiten sowie externe Kühlungen. Durch ein richtiges Zusammenspiel dieser, sowie der getesteten Druckparameter, könnten viele weitere Aussagen über die Abhängigkeit vom Druckergebnis getroffen werden.

10 Literaturverzeichnis

- [1] Gebhardt A.:
Generative Fertigungsverfahren
Carl Hanser Verlag, 2013
- [2] tu-dresden.de [Online]
Available: https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ifwww/psv/ressourcen/dateien/lehre/skripte_pm/vogenfert?lang=de. [Zugriff am 12.3.2016]
- [3] Breuninger J., Becker R., Wolf A., Rommel S. , Verl A.:
Generative Fertigung mit Kunststoffen
Springer, 2013
- [4] „Wikipedia“ [Online]
Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Stratasys>. [Zugriff am 21 April 2016]
- [5] Christian Pickert M. W.:
Additive Fertigungsverfahren: CEDIFA Arbeitsbericht 1, 2013
- [6] Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung: Additive Fertigung: Der Weg zur individuellen Produktion, 2015
- [7] Uwe B., Andreas H., Dietmar S.:
Additive Fertigungsverfahren : Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing
Verl. Europa-Lehrmittel, 2013
- [8] Locke F.:
Fertigungsverfahren 5
Springer, 2015
- [9] Fastermann P.:
3D-Druck/Rapid Prototyping
Springer, 2012
- [10] eos.info [Online]
Available: <http://www.eos.info/presse/kundenreferenzen/siemens>. [Zugriff am 1.7.2016]
- [11] factorynet.at, 15.2.2016, [Online]
Available: <https://factorynet.at/a/3d-druck-aktuelle-anwendungsbeispiele?img=10446>. [Zugriff am 1.7.2016]

- [12] 3d-grenzenlos.de, 23.2.2016, [Online]
Available: <https://www.3d-grenzenlos.de/magazin/forschung/halswirbel-aus-dem-3d-drucker-27160673.html>. [Zugriff am 4.7.2016]
- [13] factorynet.at, 15.2.2016, [Online]
Available: <https://factorynet.at/a/3d-druck-aktuelle-anwendungsbeispiele?img=10448>. [Zugriff am 4.7.2016]
- [14] orf.at, 29.1.2016, [Online]
Available: <http://steiermark.orf.at/news/stories/2754826/>. [Zugriff am 4.7.2016]
- [15] „DIN EN ISO 527-2: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen“
- [16] Wiedler M.:
PHOENIX UTS Testsystem Instandsetzung und Inbetriebnahme der Universalprüfmaschine UTS-20, 2012
- [17] Osanna P., Krsek A., Prostrednik D., Kuric I.:
Qualität und Fertigungsmeßtechnik, 1998
- [18] DIN EN ISO 4288:1998, Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren; Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit
- [19] Keferstein C. P.:
Fertigungsmesstechnik
Vieweg+Teubner, 2011

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einteilung der generativen Fertigungsverfahren [2]	9
Abbildung 2: Produktentwicklungsphasen nach VDI 2221 [1]	10
Abbildung 3: Schema Lasersinteranlage 1977 [3]	11
Abbildung 4: Prinzip Schichtbauverfahren [5]	12
Abbildung 5: Stufenschichtung am Beispiel einer Bohrung: (a) in der Schichtebene; (b) senkrecht zur Schichtebene [1]	13
Abbildung 6: Datenwege 3D-Druck [1]	14
Abbildung 7: Dreieckelement mit zugehörigen ASCII Code [1]	16
Abbildung 8: CAD - Modell mit zugehöriger Triangulation	16
Abbildung 9: Übersicht der generativen Fertigungsverfahren [6]	17
Abbildung 10: Prinzip der Stereolithographie [7]	18
Abbildung 11: Prinzip beim selektiven Lasersintern/Laserschmelzen [7]	20
Abbildung 12: Prinzip beim Verfahren 3D-Printing [8]	21
Abbildung 13: Prinzip beim Multi-Jet-Modeling [7]	22
Abbildung 14: Prinzip des Laserauftragsschweißens [8]	23
Abbildung 15: Prinzip des Layer-Laminate-Manufacturing [7]	24
Abbildung 16: Prinzip Fused-Deposit-Modeling [7]	25
Abbildung 17: Bindennaht beim FDM-Verfahren [1]	26
Abbildung 18: Siemens 3D-Drucker mit Brennerspitze im Vordergrund [10]	27
Abbildung 19: Wasserpumpenrad BMW [11]	28
Abbildung 20: Röntgenbild zeigt 3D-gedruckten Halswirbel [12]	29
Abbildung 21: 3D-gedrucktes Implantat [13]	29
Abbildung 22: Iso-Ansicht Benchmark-Teil	32
Abbildung 23: Übersicht Benchmark-Teil	33
Abbildung 24: Türme	33
Abbildung 25: Welle	34
Abbildung 26: Rauchfang	35
Abbildung 27: Sechskant und Bohrungen	35
Abbildung 28: Vermessungsblock	36
Abbildung 29: Zylinder	36
Abbildung 30: Überhang	37
Abbildung 31: Gewinde	37
Abbildung 32: Pyramide	38
Abbildung 33: Grundplatte	38
Abbildung 34: Stratasys Dimension 1200es (links); passende Materialkartusche (rechts)	39
Abbildung 35: Gedrucktes Benchmark-Teil	40
Abbildung 36: Benchmark-Teil BRT: 60°C, DT: 300°C	40
Abbildung 37: Zugprobe nach ISO 527-2 [16]	41
Abbildung 38: Prüfplatz Zugprüfung links; Einspannung rechts [16]	44
Abbildung 39: Ausrichtung Zugstäbe in der Ebene (links) und einzelner Zugstab im Winkel von 30° gefertigt (rechts)	46
Abbildung 40: Geometrische Abweichungen [17]	48
Abbildung 41: Gestaltabweichungen [17]	49
Abbildung 42: Messbedingungen Rauheitsmessung [18]	50
Abbildung 43: Mittenrauwert R_a [17]	51
Abbildung 44: Rautiefe R_z nach der Fünf-Teil-Messstrecken-Methode [17]	51

Abbildung 45: Formtoleranz Rundheit [17]	52
Abbildung 46: Formtoleranz Ebenheit [17]	53
Abbildung 47: Lagetoleranz Parallelität [17]	53
Abbildung 48: Grundprinzip Koordinatenmesstechnik [19]	54
Abbildung 49: Messkopf für die taktile Messung [19]	54
Abbildung 50: Alicona Infinite Focus G4	55
Abbildung 51: Halterung Benchmark-Teil mit Bauteil in zwei verschiedenen Positionen	56
Abbildung 52: Zeiss DuraMax	57
Abbildung 53: Messaufbau Koordinatenmessgerät	57
Abbildung 54: Fehler Neigungswinkel der Türme in Abhängigkeit der Temperaturen	58
Abbildung 55: Fehler Kantenwinkel in Abhängigkeit der Temperaturen	59
Abbildung 56: Fasen/Radien in Abhängigkeit der Drucktemperaturen; links - horizontal; rechts - vertikal	60
Abbildung 57: Fasen/Radien in Abhängigkeit der Bauraumtemperaturen (links); Vergleich der Kanten mit unterschiedlicher Ausrichtung (rechts)	60
Abbildung 58: Mittenrauwert R_a in Abhängigkeit der Drucktemperatur; links - horizontal; rechts - vertikal	61
Abbildung 59: Rauheit R_z in Abhängigkeit der Drucktemperatur; links - horizontal; rechts - vertikal	61
Abbildung 60: Rauheiten in Abhängigkeit der Bauraumtemperatur: R_a links; R_z rechts	62
Abbildung 61: Mittenrauwert in Abhängigkeit vom Winkel bei DT: 300°C links; Messaufbau mit verschiedenen Turmneigungen rechts	62
Abbildung 62: Relativer Fehler in Abhängigkeit der Drucktemperatur; horizontal oben; vertikal unten	63
Abbildung 63: Vergleich Welle; horizontal oben; vertikal unten	64
Abbildung 64: Relativer Fehler in Abhängigkeit der Bauraumtemperatur	64
Abbildung 65: Länge der Welle in Abhängigkeit der Temperaturen	65
Abbildung 66: Parallelität der Welle in Abhängigkeit der Temperaturen	65
Abbildung 67: Fehler der Dicke in Abhängigkeit der Drucktemperatur; horizontal links; vertikal rechts	66
Abbildung 68: Unterschied Ausrichtung Rauchfang; horizontal links; vertikal rechts	67
Abbildung 69: Abhängigkeiten der Bauraumtemperatur: Fehler der Dicke links; Rauheiten rechts	67
Abbildung 70: Rauheiten in Abhängigkeit der Drucktemperatur; horizontal links; vertikal rechts	68
Abbildung 71: Absolute Fehler der Bohrungen und Sechskante abhängig von der Drucktemperatur; horizontal links; vertikal rechts	69
Abbildung 72: Sechskant und Bohrungen; horizontal links; vertikal rechts	69
Abbildung 73: Absolute Fehler der Bohrungen und Sechskante abhängig von der Bauraumtemperatur	70
Abbildung 74: Rundheiten RON_a - Bohrung 1 in Abhängigkeit der Temperaturen	70
Abbildung 75: Rundheiten RON_t - Bohrung 1 in Abhängigkeit der Temperaturen	71
Abbildung 76: Vergleich der Außen- und Innenradien am Vermessungsblock abhängig von den Druckparametern	72
Abbildung 77: Vermessungsblock horizontal (1); Vermessungsblock vertikal (2); Fasen horizontal (3); Fasen vertikal (4)	72

Abbildung 78: Fehler des Zylinderdurchmessers außen und innen in Abhängigkeit der Drucktemperatur, horizontal links; vertikal rechts	73
Abbildung 79: Zylinder vertikal links; Zylinder horizontal rechts	73
Abbildung 80: Rundheiten RON_a vom Zylinder in Abhängigkeit der Drucktemperatur horizontal (links) und vertikal (rechts)	74
Abbildung 81: Rundheiten RON_t vom Zylinder in Abhängigkeit der Drucktemperatur horizontal (links) und vertikal (rechts)	74
Abbildung 82: Fehler und Rundheit in Abhängigkeit der Bauraumtemperatur	75
Abbildung 83: Überhang Parallelität und Ebenheit in Abhängigkeit der Druckparameter	76
Abbildung 84: Abgebrochene Stütze bei DT: 280°C, BRT: 75°C	76
Abbildung 85: Gewinde horizontal (links) und vertikal (rechts)	77
Abbildung 86: Absoluter Fehler Radius in Abhängigkeit der Temperaturen	78
Abbildung 87: Halbkugel horizontal (links) sowie vertikal (rechts)	78
Abbildung 88: Absoluter Fehler Kantenlänge in Abhängigkeit der Drucktemperatur	79
Abbildung 89: Pyramide horizontal (links) und vertikal (rechts)	79
Abbildung 90: Absoluter Fehler Kantenlänge in Abhängigkeit der Bauraumtemperatur	80
Abbildung 91: Absoluter Fehler Winkel in Abhängigkeit der Druckparameter	80
Abbildung 92: Rauheiten R_a/S_a in Abhängigkeit der Drucktemperatur horizontal (links) und vertikal (rechts)	81
Abbildung 93: Beschriftung der Grundplatte an der Unterseite: Niedrige Düsentemperatur (oben), hohe Düsentemperatur (mitte) sowie vertikale Ausrichtung (unten)	81
Abbildung 94: Rauheiten $R_a/S_a/R_z/S_z$ in Abhängigkeit der Bauraumtemperaturen	82
Abbildung 95: Rauheiten R_z/S_z in Abhängigkeit der Drucktemperatur horizontal (links) und vertikal (rechts)	82
Abbildung 96: Schnitt durch die Grundplatte	83
Abbildung 97: Oberflächenprofil Türme 1 (oben) bis 3 (unten)	84
Abbildung 98: Profil Türme 1 bis 3	85
Abbildung 99: Berechnung der Profilbreite	85
Abbildung 100: Berechnung der Rauheit der Türme 1 bis 3	86
Abbildung 101: Oberflächenprofil der Türme 3 (oben) und 4 (unten)	87
Abbildung 102: Berechnung Rauheit analytisch T4 und T5	87
Abbildung 103: Analytische Rauheit R_z in Abhängigkeit des Turmwinkels	89
Abbildung 104: Vergleich Mittenrauwerte R_a (links) und Ergebnisse der analytischen Berechnung in Abhängigkeit des Turmwinkels (rechts)	89
Abbildung 105: Vergleich alter/neuer Druck DT:300°C, BRT: 75°C	90
Abbildung 106: Übersicht der Spannungs-Dehnungs-Diagramme in Abhängigkeit der Druckparameter: Drucktemperatur (1), Bauraumtemperatur (2), Ausrichtung im Bauraum (3) und Ausrichtung in der Ebene (4)	91
Abbildung 107: Zugfestigkeit in Abhängig von Drucktemperatur	92
Abbildung 108: Zugfestigkeit in Abhängigkeit von Bauraumtemperatur	92
Abbildung 109: Zugfestigkeit vom vertikalen Druck in Abhängigkeit von Drucktemperatur (links) und Vergleich der Bruchstelle horizontal/vertikal (rechts)	93
Abbildung 110: Zugfestigkeit in Abhängigkeit von Ausrichtung in der Ebene links; Zugstäbe im ebenen Winkel von 0° (1) und 45° (2) rechts	93

Formelverzeichnis

Gleichung 1	42
Gleichung 2	42
Gleichung 3	43
Gleichung 4	43
Gleichung 5	43
Gleichung 6	85
Gleichung 7	86
Gleichung 8	86
Gleichung 9	86
Gleichung 10	86
Gleichung 11	86
Gleichung 12	86
Gleichung 13	86
Gleichung 14	86
Gleichung 15	88
Gleichung 16	88
Gleichung 17	88
Gleichung 18	88
Gleichung 19	88
Gleichung 20	88
Gleichung 21	88
Gleichung 22	88
Gleichung 23	88