

# Konstruktionsmethodik zur Strukturoptimierung generativ zu fertiger Kunststoff-Bauteile

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Ing. Carsten Haugwitz  
geb. am 27.03.1971 in Wolmirstedt

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinrich Grote  
Prof. Dr.-Ing. Thomas Böllinghaus

Promotionskolloquium am 25.09.2017



## **Kurzfassung**

Moderne generative Fertigungsmethoden rücken immer mehr in den Focus der Ingenieure. Durch die Andersartigkeit der Herstellung sind neue Herangehensweisen in der Produktentwicklung erforderlich. Zwar gibt es durch die werkzeuglose Fertigung eine große Freiheit bei der Formgebung und eine schnelle, individualisierte Produktentwicklung, aber die Wirtschaftlichkeit ist oft noch nicht gegeben. Um diese zu verbessern, müssen die Potentiale der generativen Fertigung besser ausgenutzt werden. So ist es nicht zielführend, bestehende Bauteile einfach nachzubauen. Die Bauteile müssen schon in der frühen Phase der Produktentwicklung auf die speziellen Stärken und die auch vorhandenen Schwächen einer generativen Fertigung angepasst werden. Deshalb ist es besonders bei kunststoffverarbeitenden Verfahren nötig, den Schichtverlauf den Belastungen anzupassen, Stützen zu vermeiden und die Bearbeitungszeit zu minimieren.

Als Lösung wird eine Methode vorgestellt, bei der durch geschicktes Teilen von Bauteilen die Stärken generativer Fertigungsverfahren besonders hervortreten. Das anschließende Fügen der Substrukturen und die konstruktiven Sicherungen der Position zueinander werden ebenfalls dargestellt.

## **Abstract**

More and more the focus of modern engineering is on new generative production methods. Due to that fact, it's essential to create new approaches in product development. On one side, the tool-free production offers a huge freedom in shaping and individualized product development, on the other side it's not economically viable to use new production methods yet.

To solve this problem, it's necessary to improve the potentials of generative manufacturing and to gain more benefit from it. It's not a smart idea to rebuild existing components. Even at the beginning of the development of products designers have to think about the strengths and weak points by this kind of manufacturing. It's essential to adjust the layers to the acting forces, to avoid supports and to reduce the machining time.

The following dissertation deals with a solution, in which the strengths of generative manufacturing are explained by clever dividing the components. In conclusion these substructures fit together and get a constructive fuse.

# Inhaltsverzeichnis

1. Einführung.....	1
1.1 Motivation der Arbeit.....	2
2. Stand der Technik.....	4
2.1 Generative Fertigungsverfahren.....	6
2.2 Prozesskette.....	14
2.3 Stützstrukturen.....	15
2.4 Daten und Schnittstellen.....	17
2.5 Probleme und Qualität.....	18
2.6 Anisotropie.....	19
3. Bauteile und Beispiele.....	20
3.1 Ausrichtung Im Bauraum.....	21
3.2 Teilen der Bauteile.....	24
3.3 Wirtschaftlichkeitsrechnung.....	27
3.4 Probleme beim Aufteilen.....	29
4. Konstruktionsmethodik.....	30
4.1 Anforderungsliste.....	31
4.2 Funktionsstruktur.....	33
4.3 Der morphologische Kasten.....	34
4.4. Bewerten der Lösungsvarianten.....	37
5. Fügen und Kleben.....	37
5.1 Grundlagen Kleben.....	37
5.2 Klebstoffe.....	39
5.3 Belastungen der Fügestelle.....	40
6. Zugversuche.....	41
6.1 Erste Testreihe.....	42
6.2 Versuchsdurchführung.....	44
6.3 Zweite Versuchsreihe.....	52

6.4 Dritte Versuchsreihe .....	60
6.4.1 Vermessung der Zugproben .....	62
6.4.2 Fertigung der Proben für die Zugversuche .....	69
6.4.3 Zugversuch der dritten Versuchsreihe .....	72
6.5 Vierte Versuchsreihe .....	79
6.5.1 Vorbereitung der Proben.....	84
6.5.2 Vermessung der tangential positionierten Proben.....	86
6.5.3 Auswertung der Zugversuche .....	88
7. Umsetzung der Konstruktionsmethodik .....	91
7.1 Konstruktionskatalog für geteilte Zugproben.....	91
7.2 Konstruktionskatalog für Hohlzylinder.....	102
7.3 Konstruktionskatalog für geteilte Haken .....	105
8. Kombination von Materialien .....	108
9. Gestaltungsrichtlinien für die generative Fertigung.....	111
10. Fazit .....	115
11. Quellenverzeichnis.....	118
Anhang .....	I

## Abbildungsverzeichnis

Bild 1: US-Patent 4,575,330 [1].....	1
Bild 2: Allgemeines Prinzip der Generativen Fertigung [2] .....	2
Bild 3: Abzugsvolumen mit ansteigenden Fertigungsproblemen .....	3
Bild 4: Definition und Klassifizierung der Urformverfahren [6].....	5
Bild 5: Prinzip der Schichtbauweise a) Konturierte Schichten b) 3D-Objekt erzeugt durch versetzte Schichten [2].....	6
Bild 6: a) Quader als Drahtgitter–Repräsentation b) Isometrische Ansicht .....	7
Bild 7 : a) Quader repräsentiert durch Flächen und Kanten b) teilweise transparent zur 3D-Darstellung .....	7
Bild 8 : Mögliche Klassifikation der Grundprinzipien Generativer Fertigungsverfahren nach Ausgangswerkstoff und physikalischen Prinzipien [8] .....	8
Bild 9: Funktion des Druckkopfs der Objet Eden 330 [9] .....	9
Bild 10: Prinzipdarstellung Poly Jet Modeling [10].....	9
Bild 11 : Poly Jet Bauteil mit wasserlöslicher Stützstruktur.....	10
Bild 12: Laminated Object Manufacturing; Funktionsschema; [2] .....	12
Bild 13: Prinzipdarstellung Stereolithographie [10].....	13
Bild 14: Upskin- und Downskin-Flächen $U$ und $D$ , Upskin- und Downskin-Winkel $\nu$ und $\delta$ [4] .....	15
Bild 15: a) Überhang b) Hohlraum.....	16
Bild 16: a) Inseln b) Plattformabgrenzung .....	16
Bild 17: Sekantenfehler [2].....	17
Bild 18: Treppenstufeneffekt .....	18
Bild 19: Packen von Laser-Sinter-Bauteilen [13] .....	19
Bild 20: Ausrichtung zur Schichtung a) längs b) quer.....	20
Bild 21: Kleiderhaken a) parametrisches Modell in CATIA V5 b) STL-File.....	20
Bild 22: mögliche Ausrichtungen des Kleiderhakens im Bauraum a) waagrecht b) auf Platte c) gekippt d) auf Platte und gekippt.....	22
Bild 23: aufrecht stehender Kleiderhaken.....	24
Bild 24: geteilter Haken.....	25
Bild 25: Teilebenen am Kleiderhaken.....	25
Bild 26: Längsteilung des Kleiderhakens.....	27
Bild 27: Zugproben im Bauraum .....	28
Bild 28: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren [3].....	31
Bild 29: allgemeine Funktionsstruktur für eine Verbindungsstelle.....	33
Bild 30: Klebezonen [24].....	38
Bild 31: Universalprüfmaschine TIRAtest 2835 .....	41

Bild 32: Auszug aus der DIN EN ISO 527 [14] .....	42
Bild 33: Testkörper der ersten Versuchsreihe .....	43
Bild 34: Achsdefinition für Zugproben.....	44
Bild 35: Spannfutter mit Zugprobe.....	45
Bild 36: Protokoll der Zugprobe LOM 1 .....	46
Bild 37: Kraftverlauf der Proben a) Lom2 und b) Lom3 .....	47
Bild 38: a) Proben Lom4, Lom5 und Lom6 mit b) Diagramm (Kraft über Zeit) .....	47
Bild 39: a) Proben Lom8, Lom9, Lom10 mit b) Kraft-Zeit-Diagramm .....	48
Bild 40: a) Probe Lom7 mit b) Kraftverlauf .....	49
Bild 41: Digital Mikroskop Keyence VHX 500 [26] .....	50
Bild 42: Darstellung der Aufnahmen der Zugprobe Lom7.....	51
Bild 43: Prozesskette Vakuumgießen [27].....	53
Bild 44: a) Proben als Positiv mit Einguss b) Vakuumgießkammer c) Silikonform .....	53
Bild 45: vorbereitete Proben für die 2. Versuchsreihe .....	55
Bild 46: Diagramm Zugversuche_2/1 (Objet) .....	55
Bild 47: fehlerhafte Proben aus Epoxidharz .....	56
Bild 48: a) Proben aus Epoxidharz b) Diagramme der Zugversuche .....	57
Bild 49: Silikonform für Proben L1 und L2 .....	59
Bild 50: Zugversuche der L-Reihe a) L1 b) L2 c) Diagramm Kraft über Weg .....	59
Bild 51: Proben L3 und L4 nach dem Zugversuch.....	60
Bild 52: einfache Formen .....	61
Bild 53: einfacher Absatz .....	61
Bild 54: Probenfertigung auf der Objet Eden 330 .....	62
Bild 55: Messvolumen und mit Knetmasse fixierte Zugprobe .....	63
Bild 56: 3D-Scanner mit Drehtisch und Referenzpunkten .....	64
Bild 57: Fehlfarbenbild des Flächenvergleichs der Probe Sp4 .....	65
Bild 58: Flächenvergleich der Proben a) Sp1 b) Sp2 c) Sp3 d) Sp4 .....	66
Bild 59: Flächenvergleich der Proben a) Sp5 b) Sp6 c) Sp7 d) Sp8 .....	67
Bild 60: Flächenvergleich der Proben a) Sp9 b) Sp10 c) Sp11 d) Sp12 .....	68
Bild 61: a) Schwalbenschwanz quer und b) Schwalbenschwanz seitlich.....	68
Bild 62: Abstandshalter .....	69
Bild 63: 18 halbe Proben mit Abstandshaltern und 3 Proben aufrecht stehend .....	70
Bild 64: Ausschnitt aus der Werkstattzeichnung für die Zugproben.....	71
Bild 65: Probenvorbereitung für die 3. Versuchsreihe .....	72
Bild 66: Kraft-Weg-Diagramm der Proben Sp1 bis Sp12.....	74
Bild 67: Versagensstellen der Proben Sp1, Sp3 und Sp4 .....	74
Bild 68: geteilte Probe mit Absatz und Radius.....	75

Bild 69: Schwalbenschwanz a) quer und b) seitlich.....	76
Bild 70: wieder verklebte Proben der St-Reihe.....	78
Bild 71: V-Form (V1), Absatz mit Rippe (R2) und Absatz mit Längsnut (N1) .....	80
Bild 72: gewellter Absatz (W1) und verzahnter Stoß (Z1).....	80
Bild 73: gezackter Absatz (Z2) und gekreuzter Stoß (K1) .....	80
Bild 74: Quader gleichmäßig (S1) .....	81
Bild 75: Pyramidenstumpf gleichmäßig (S3) und Pyramidenstumpf Lochbild (S4) .....	81
Bild 76: Metallproben mit unterschiedlichen Oberflächenrauheiten .....	82
Bild 77: mikroskopische Aufnahmen der Proben a) F3 mit Schleifpapier b) F5 mit Feile c) F8 mit Körner bearbeitet .....	83
Bild 78: Protokoll der Rauheitsbestimmung.....	83
Bild 79: Profilschnitt Probe F8-2.....	84
Bild 80: Bauplattform mit den Proben der 4. Reihe und vier halben Kleiderhaken.....	84
Bild 81: Verklebte Proben und Haken .....	85
Bild 82: Flächenvergleich der Proben a) N1 b) R2 c) W1 .....	86
Bild 83: Flächenvergleich der Proben a) R1 b) S3 c) S4 d) V1 .....	87
Bild 84: Auswertung der Objet-Proben der vierten Testreihe.....	88
Bild 85: Versagensstelle der Objet-Proben im Zugversuch .....	89
Bild 86: Metallproben mit unterschiedlicher Rauheit.....	89
Bild 87: Mixedproben (Metall +Objet) .....	90
Bild 88: Oberflächen der Mixed-Proben und vergrößert M2 .....	90
Bild 89: a) Simulation der Belastungen des Hakens und b) konstruktive Anpassung durch Materialkombination.....	108
Bild 90: Kleiderhaken mit eingeklebter Stahlmutter und Stahldraht .....	109
Bild 91: Flächenvergleich Ring.....	IX
Bild 92: Flächenvergleich STEP -STL .....	X



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften Materialien 3D-Drucker Eden 330 [11] .....	11
Tabelle 2: Vergleich der Positionen im Bauraum.....	23
Tabelle 3: Teilung Kleiderhaken.....	26
Tabelle 4: Kosten für Proben auf Objet Eden 330 [18] .....	29
Tabelle 5: Kostenberechnung .....	29
Tabelle 6: Anforderungsliste Fügestellen .....	32
Tabelle 7: Morphologische Kasten.....	36
Tabelle 8: Bedeutung der Werte nach VDI 2225 .....	37
Tabelle 9: Ergebnisse der Zugversuche_1/1 .....	46
Tabelle 10: Ergebnisse der Zugversuche_1/2.....	48
Tabelle 11: Ergebnisse der Zugversuche_2/2.....	57
Tabelle 12: Proben mit Abstandshalter .....	77
Tabelle 13: verklebte Stöße .....	78
Tabelle 14: Abweichung der verklebten Halbproben (mit seitlicher Führung) .....	87
Tabelle 15: Abweichung der verklebten Halbproben (ohne seitliche Führung) .....	87
Tabelle 16: Konstruktionskatalog für Hohlzylinder.....	102
Tabelle 17: Konstruktionskatalog für geteilte Haken .....	105

## Liste der Abkürzungen

UV - ultraviolett

3D - dreidimensional

CAD - Computer aided Design (computergestütztes Konstruieren)

HSS - High Speed Steel (Schnellarbeitsstahl)

STL - Stereolithography oder Standard Tessellation Language

VDI - Verein Deutscher Ingenieure

DIN - Deutsches Institut für Normung

PJM - Poly Jet Modelling

IMK - Institut für Maschinenkonstruktion

LOM - Laminated Object Manufacturing

SLA - Stereolithography apparatus

GOM - Gesellschaft für optische Messtechnik

RP - Rapid

Prototyping

## 1. Einführung

### 1. Einführung

Im Jahr 1984 meldete der amerikanische Erfinder Charles W. (Chuck) Hull ein Verfahren, das er „Stereolithographie“ nannte, zum Patent an. Die grundlegende Idee bestand darin, mittels ultraviolettem (UV) Licht flüssigen Kunststoff an genau definierten Stellen zu verfestigen. Durch eine gezielte Auslenkung des UV-Strahls und einer absenkbaren Plattform konnten damit dreidimensionale Objekte erschaffen werden.

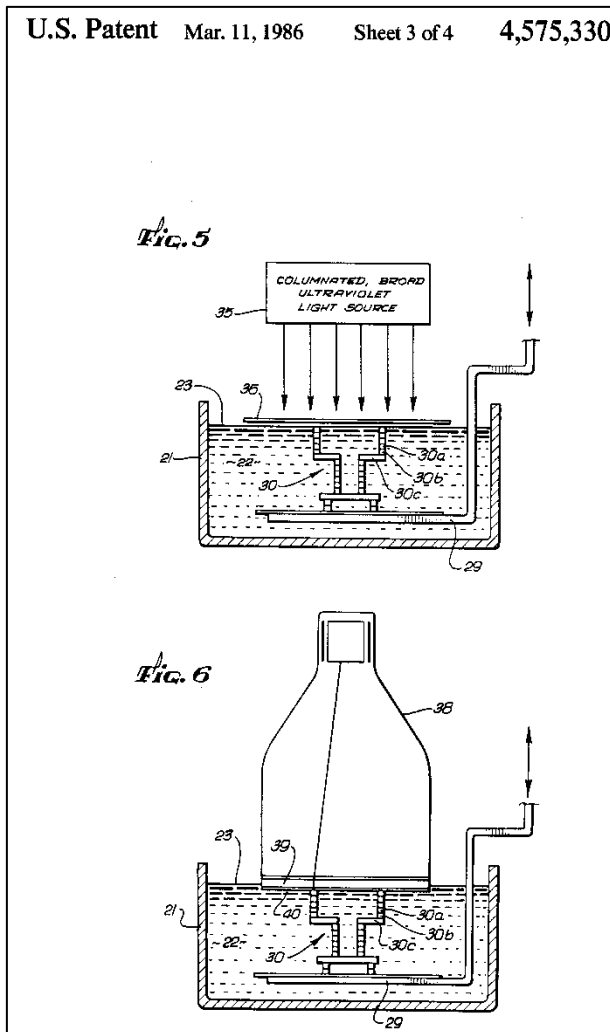


Bild 1: US-Patent 4,575,330 [1]

Im März 1986 wurde ihm das Patent 4,575,330 erteilt. Das war der Beginn der bis heute andauernden Entwicklung von 3D-Druckern, wie sie umgangssprachlich genannt werden. Da die Anlagen zuerst für die Fertigung von Prototypen verwendet wurden, setzte sich der Begriff Rapid Prototyping (RP) durch.

Der Ausgangspunkt ist immer ein dreidimensionales Volumenmodell, das mit Hilfe einer CAD-Software im Computer generiert wird. Ist das Ergebnis ein Modell, bei dem ein eingeschlossenes Volumen durch eine begrenzende Fläche vollständig beschrieben ist, kann die-

ses Modell im Prozess weitergegeben und mittels generativer Fertigung gebaut werden. Dazu rechnet eine Software das Volumenmodell in einen Stapel von Schichtdaten um, die dann von der Rapid Prototyping Anlage als dreidimensionales Objekt gefertigt werden.

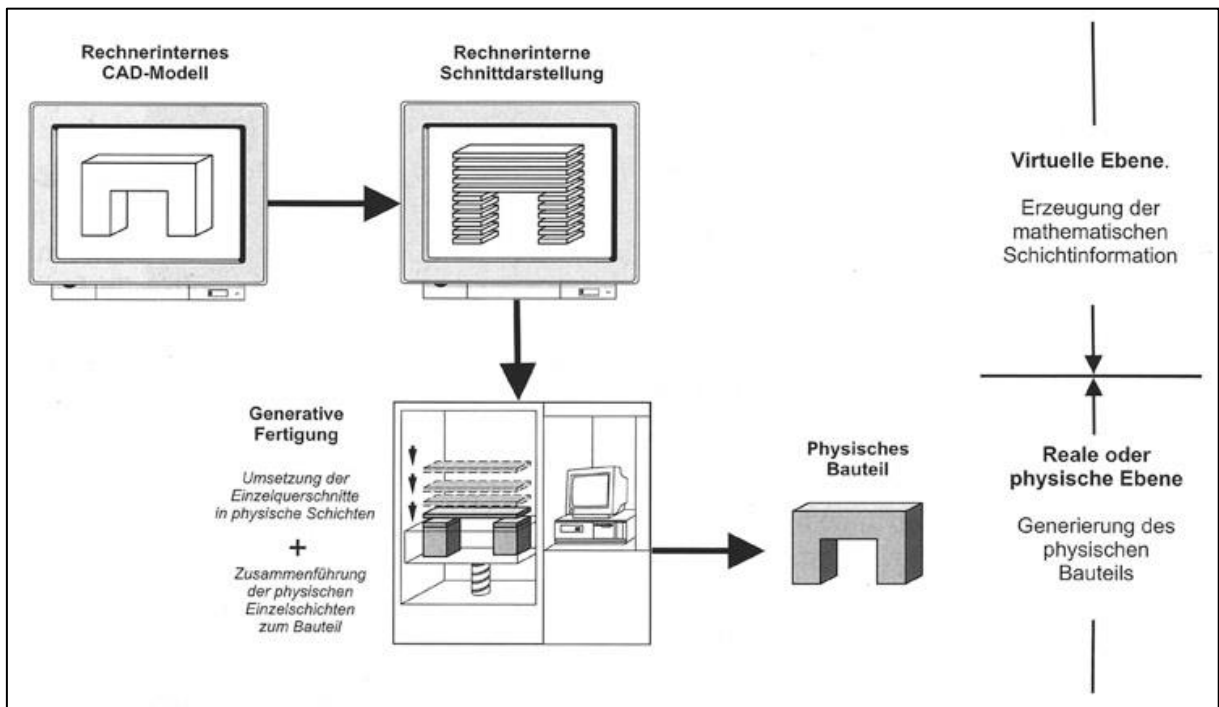


Bild 2: Allgemeines Prinzip der Generativen Fertigung [2]

## 1.1 Motivation der Arbeit

Schon im Studium lernt jeder Ingenieur die Grundregeln des Gestaltens [3]:

- Eindeutig
- Einfach
- Sicher

Eindeutigkeit ist gegeben, wenn die technische Funktion erfüllt ist und das Objekt den Anforderungen entspricht. Auch der Begriff Sicherheit ist leicht zu verstehen und dann eingehalten, wenn Mensch und Umgebung vor Schaden bewahrt werden können.

Die Einfachheit hat sich aber durch die neuen Fertigungsverfahren, die dem Konstrukteur heute zur Verfügung stehen, verändert. Zur Definition des Begriffs „Einfach“ werden Stichworte wie: übersichtlich, schlicht und im technischen Zusammenhang „mit geringem Aufwand“ herangezogen. Die Konstruktionsmethodik sah deshalb einfache Formen vor. Die üblichen Formen basierten auf geometrischen Primitiven wie Quader, Zylinder und Prismen mit ebenen Flächen, geraden Kanten und gleichmäßigen meist rechten Winkeln. Dies ermöglicht eine einfache Fertigung und die Verringerung der Kosten, so dass eine wirtschaftliche Realisierung möglich ist.

## 1. Einführung

Bei Verwendung von additiven Fertigungsverfahren erhöhen sich die Kosten aber selbst bei deutlich erhöhter Komplexität und kleinen Strukturen nicht oder nur unwesentlich. Dazu kommt, dass Geometrien gefertigt werden können, die mit subtrahierenden, also trennenden Fertigungsverfahren nicht herstellbar waren. Als Beispiel sind eine normale Bohrung (geringer Fertigungsaufwand), eine Bohrung mit flachen Boden (nur mit Nacharbeit herstellbar) und ein viereckiges Sackloch in Bild 3 dargestellt.

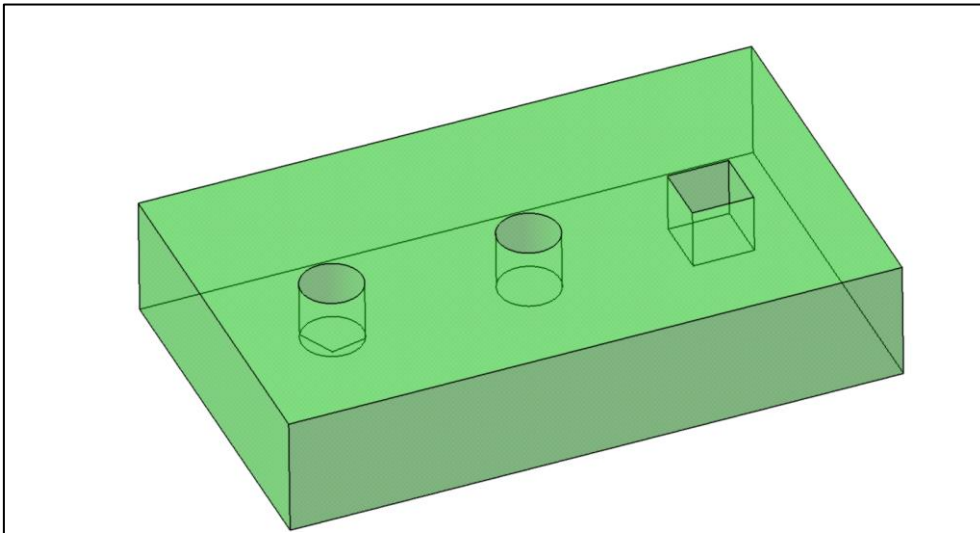


Bild 3: Abzugsvolumen mit ansteigenden Fertigungsproblemen

Die „normale“ Bohrung hat einen Spitzenwinkel ( $118^\circ$  bei HSS-Bohrern für Eisenwerkstoffe) und ist mit geringem Aufwand herstellbar. Die Bohrung mit flachem Boden ist nur mit Nacharbeit herstellbar. Im CAD hingegen ist diese deutlich leichter zu erzeugen (subtrahieren eines Zylinders). Genau so einfach ist es, im CAD das viereckige Sackloch durch Abziehen eines Quaders zu modellieren. Durch trennende Bearbeitungsverfahren ist dieser Hohlraum nicht oder nur mit extremen Aufwand zu fertigen. Mit additiven Fertigungsverfahren ist es jedoch leicht möglich, diese innere Struktur zu generieren. Das bedeutet, dass eine Struktur, die mit herkömmlichen Verfahren nicht einfach ist, mit den generativen Fertigungsverfahren als „Einfach“ zu betrachten ist. Hier ist ein Umdenken erforderlich.

Es ergeben sich natürlich auch Alternativen für die Konstrukteure, die zwar einen etwas erhöhten konstruktiven Aufwand bedeuten, aber durch günstigere Fertigung, verbesserte Eigenschaften (Festigkeit, Masse, Fügbarkeit) und Kombinierbarkeit vom Materialien eine Kostenreduktion mit sich bringen.

Ein weiterer, wenig beachteter Aspekt ist auch, dass sich kurzfristige Änderungen vor Produktionsbeginn nur geringfügig auf die Kosten auswirken. Da die Prozesskette relativ kurz ist (die Datei wird als STL-File gespeichert und in die Software der generativen Fertigungsanla-

ge eingelesen), ist eine Zeichnungserstellung nicht nötig. Es muss auch kein Maschinenbediener in den Prozess eingebunden werden, der über Material, Fertigungslage oder Machbarkeit nachdenkt.

Deshalb sollen in dieser Arbeit Möglichkeiten aufgezeigt werden, Bauteile mit komplexen Strukturen wirtschaftlich zu fertigen und die kostentreibenden Faktoren Bauzeit und Materialverbrauch zu minimieren.

In der VDI 3405 Blatt 3 ist folgender Absatz zu lesen: *Falls Bauteile zu groß für den vorhandenen Bauraum sind, können diese geteilt gebaut und nachträglich gefügt werden. Ein Bauteil wird hierfür in den CAD-Daten in mehrere Einzelteile aufgeteilt. Die gefertigten Einzelteile werden nachträglich wieder mechanisch verbunden.* [4]

Dabei werden mehrere Ansätze verfolgt und wissenschaftlich aufgearbeitet:

1. Aufteilung von Bauteilen
2. Fügen von Substrukturen
3. Kombination von Materialien

Die Verbesserungen dürfen aber nicht die Bauteilgeometrie und die mechanischen Eigenschaften negativ beeinflussen. Deshalb werden die Fügstellen auf geometrische Abweichungen und Festigkeit untersucht, um die Wirksamkeit nachzuweisen. Falls dies gelingt, sollen Gestaltungsrichtlinien erarbeitet und ein Konstruktionskatalog mit den Lösungen aufgestellt werden.

## 2. Stand der Technik

Die generativen Fertigungsverfahren unterscheiden sich grundlegend von den klassischen Verfahren Umformen und Trennen. Am besten lassen sie sich einordnen, wenn man sie zu Urformen zählt und damit die üblichen Einteilungen erweitert. Bei E. Uhlmann ist Urformen wie folgt beschrieben:

*Nach DIN 8580 ist Urformen das Fertigen eines festen Körpers aus formlosem Stoff durch Schaffen des Zusammenhalts. Das Urformen dient also dazu, aus einem zu verarbeitenden Werkstoff in formlosem Zustand einem Teil erstmals eine Gestalt zu geben.* [5] [6]

## 2. Stand der Technik

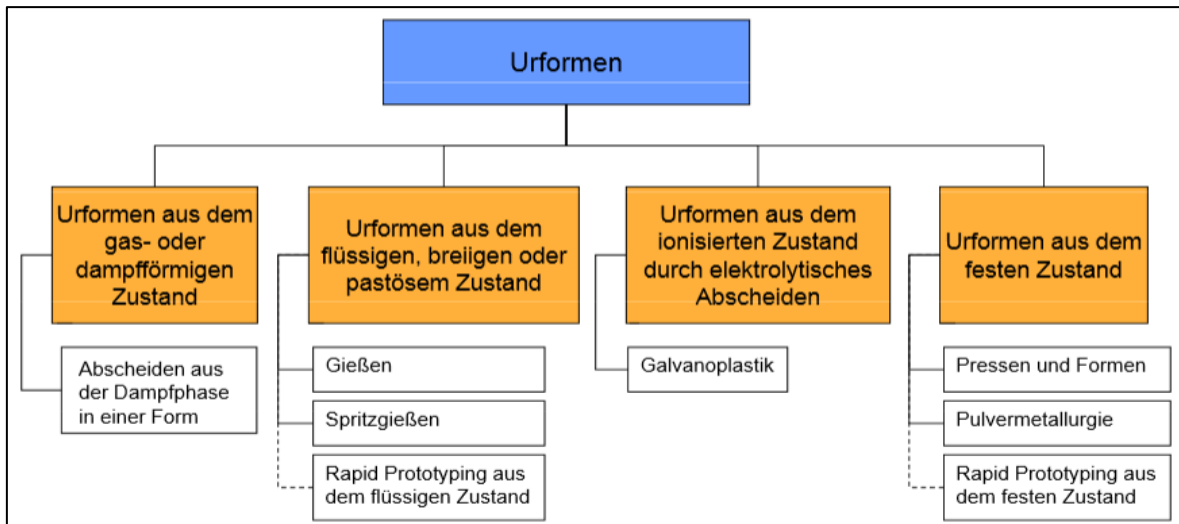


Bild 4: Definition und Klassifizierung der Urformverfahren [6]

Die Bezeichnung ist, obwohl die gleichen Verfahren gemeint sind, oft unterschiedlich. Bedingt durch die ersten Anwendungen zum Bau von Prototypen, wurde der Begriff *Rapid Prototyping* eingeführt. Dieser hatte sich etabliert und wurde lange Zeit als Überbegriff verwendet. Wie ist die Bezeichnung aber, wenn nicht nur Prototypen, sondern viele Teile in Serie gefertigt werden? Im amerikanischen Raum wird als weiter gefasste Benennung *Additive Fertigungsverfahren* (Additiv Manufacturing) benutzt. Ausschlaggebend ist die Zusammenführung von Schichten zu einem Endprodukt.



Bild 5: Prinzip der Schichtbauweise a) Konturierte Schichten b) 3D-Objekt erzeugt durch versetzte Schichten [2]

In dem Fall, der im Bild 5 zu sehen ist, beschreibt der Begriff Additive Fertigung das Verfahren sehr gut. Aber der Stoffzusammenhalt, der in der Definition von Uhlmann als Merkmal ausgemacht wurde, wird hier nicht geschaffen. Auch wenn die Schichten noch verklebt werden, ist es doch nur die Kombination aus Ausschneiden (Trennen) und Fügen. Diese Klassifikation trifft aber auf die meisten der zu beschreibenden Verfahren nicht zu. Deshalb hat sich der Begriff *Generative Fertigungsverfahren* in den letzten Jahren immer mehr durchgesetzt. Dieser meint, dass im Prozess nicht nur die Geometrie, sondern auch der Stoffzusammenhalt und damit die mechanischen Eigenschaften des Objekts generiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird versucht, diesem neuesten Stand Rechnung zu tragen und die Begriffe richtig zu verwenden. Da Zitate und Darstellungen anderer Autoren nicht editierbar sind, werden die Begriffe *Rapid Prototyping*, *Additive Fertigungsverfahren*, und das in der Umgangssprache verwendete *3D-Drucken* als Synonyme für **Generative Fertigungsverfahren** verwendet.

## 2.1 Generative Fertigungsverfahren

Nach Gebhardt sind die Eigenschaften der generativen Verfahren [7] :

- *Die Generierung der Schichtgeometrie erfolgt direkt aus den 3D CAD-Daten.*
- *Es ist kein Einsatz produktspezifischer Werkzeuge notwendig.*
- *Die Erzeugung der mechanisch-technologischen Eigenschaften (Materialeigenschaften) geschieht während des Bauprozesses.*
- *Die Bauteile können grundsätzlich in jeder beliebigen Orientierung gebaut werden (Entfall der Spannproblematik).*
- *Alle heute auf dem Markt befindlichen Maschinen können mit dem gleichen (STL)-Datensatz angesteuert werden.*
- *Generative Fertigungsverfahren gewährleisten damit die direkte Umsetzung der 3D CAD-Daten (des virtuellen Bauteils) in ein physisches Bauteil.*

Um die 3D-Daten zu erzeugen, sind CAD-Programme entstanden. Diese ermöglichen es, dreidimensionale Bauteile virtuell zu erzeugen. Auch hier gab es eine Entwicklung, ehe die heute bestehenden Körpermodellierer mit ihren komplexen Anwendungsgebieten zur Verfügung standen.

Als erstes wurden Zeichenprogramme genutzt und ersetzten die Zeichnung mit einem Bleistift auf einem Blatt Papier. Auch wenn dies einen hohen Aufwand an Schulungen und große Investitionen für Computer und Plotter mit sich brachte, setzten sich diese Programme wegen der guten Änderbarkeit der Zeichnungen schnell durch.



## 2. Stand der Technik

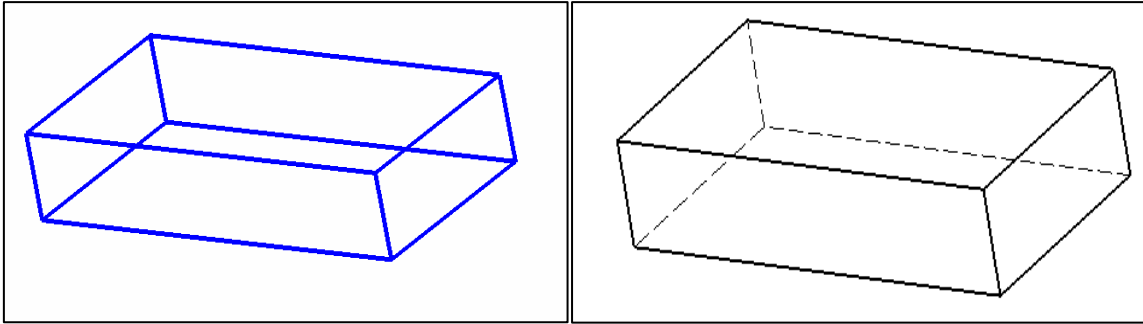


Bild 6: a) Quader als Drahtgitter-Repräsentation b) Isometrische Ansicht

Danach wurden in speziellen 3D-Programmen die Körper als Wireframes (Drahtgitter) abgebildet. Diese Darstellungsform ist jedoch nicht eindeutig. Im Bild 6a) lässt sich nicht sicher zuordnen, welche Ecke vorn ist und damit ist die Lage im Raum in dieser Ansicht indifferent. In einer Zeichnung (Bild 6 b) wurde dieses Problem gelöst, indem den verdeckt liegenden Körperkanten eine andere Linienart (Strichlinie) zugeordnet wurde. Im CAD wurden deshalb nicht nur die Kanten, sondern auch die begrenzenden Flächen mit dargestellt.

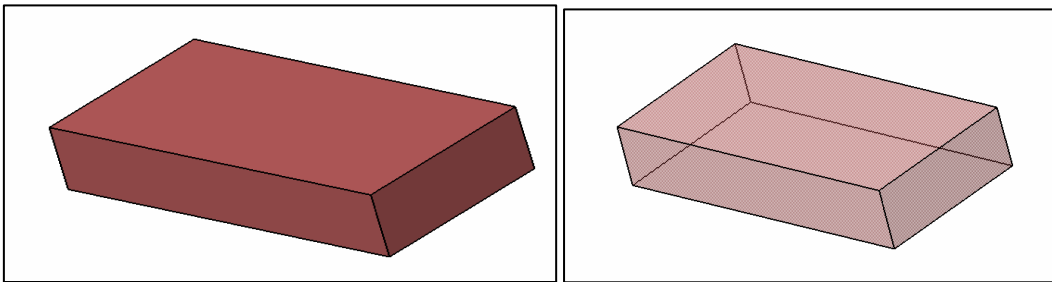


Bild 7 : a) Quader repräsentiert durch Flächen und Kanten b) teilweise transparent zur 3D-Darstellung

Da diese Darstellungsform aber einen großen Rechenaufwand bedeutete, mussten die Computer für solche CAD-Anwendungen außergewöhnlich leistungsfähig sein. Deshalb wurde die Darstellung bis weit in die 2000er Jahr oft vereinfacht, indem Polygonnetze visualisiert wurden. Auf solch einem Polygonnetz basiert auch das bis heute übliche Ausgangsformat \*.STL.

Die STL-Datei wird dann im Prozess an die generative Fertigungsanlage weitergegeben. Diese ist immer an einen Computer gekoppelt. Die meisten Anlagen haben ein eigenes, speziell für die Anlage ausgelegtes Computerprogramm, das je nach Anlagentyp den Datensatz aufbereitet. Dazu wird das Modell virtuell in gleich dicke ebene Schichten geschnitten (Slicing), die in ihrer Dicke vom Verfahren und den Qualitätseinstellungen abhängen. Je nach Verfahren wird für Überhänge eine Stützkonstruktion errechnet. Die Schichten werden in einem automatisierten Bauprozess gefertigt und ergeben ein dreidimensionales Objekt mit

einer Stützstruktur. Danach kann die Stützstruktur entfernt werden und das Bauteil wird gereinigt und gegebenenfalls noch aufbereitet (beschichten/ infiltrieren).

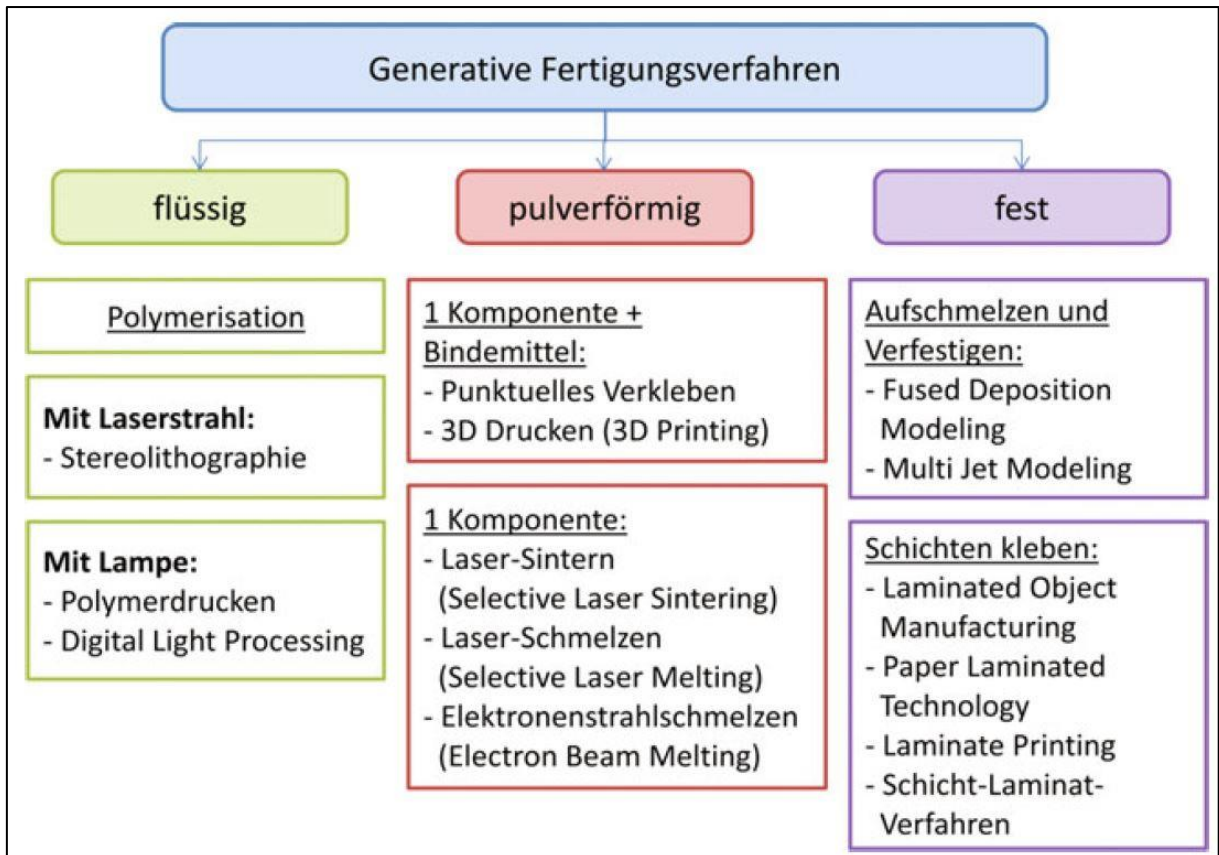


Bild 8 : Mögliche Klassifikation der Grundprinzipien Generativer Fertigungsverfahren nach Ausgangswerkstoff und physikalischen Prinzipien [8]

Wie im Bild 8 zu sehen, werden die verschiedenen generativen Fertigungsverfahren nach dem Aggregatzustand des Objektmaterials bei Raumtemperatur eingeteilt. Es gibt flüssige, pulverförmige und feste Ausgangsmaterialien. Die physikalischen Prinzipien, um den Stoffzusammenhang herzustellen, unterscheiden sich dabei stark voneinander. Bei flüssigen Ausgangsstoffen wird eine chemische Reaktion (Polymerisation) mittels energiereicher Strahlung aktiviert. Dahingegen wird bei festen und pulverförmigen Werkstoffen der Stoffzusammenhalt durch Kleben oder Erstarren nach einem Aufschmelzen erzeugt. Die bei den Untersuchungen verwendeten Verfahren werden detailliert vorgestellt.

### Poly Jet Modeling (PJM)

Die am Institut für Maschinenkonstruktion (IMK) vorhandene Anlage für das Poly Jet Modeling ist die „Objet Eden 330“ der Firma Objet Geometries Ltd.

## 2. Stand der Technik

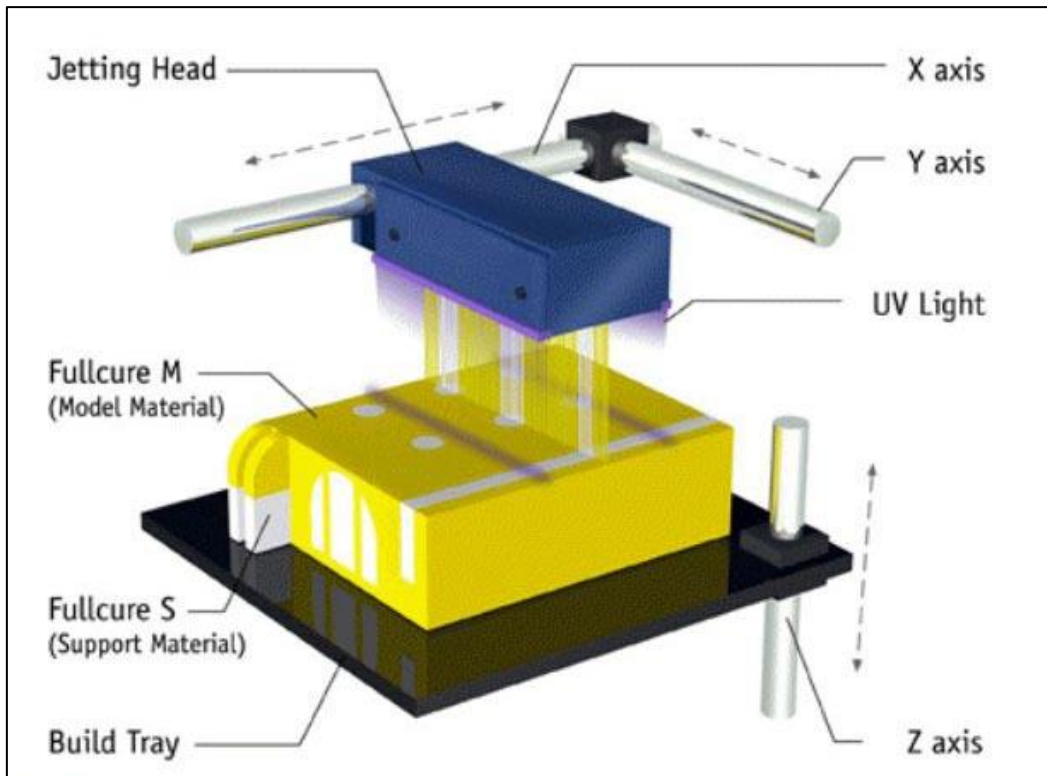


Bild 9: Funktion des Druckkopfs der Objet Eden 330 [9]

Diese verfügt über einen in x- und y-Richtung verfahrbaren, beheizten Druckkopf mit zwei UV-Lampen. Im Druckkopf sind 8 Zeilendruckelemente mit insgesamt 1536 Düsen angeordnet. Diese spritzen entweder ein Fotopolymer auf Acrylharzbasis als Modellmaterial oder ein wasserlösliches, geleeartiges Stützmaterial auf eine absenkbare Plattform.

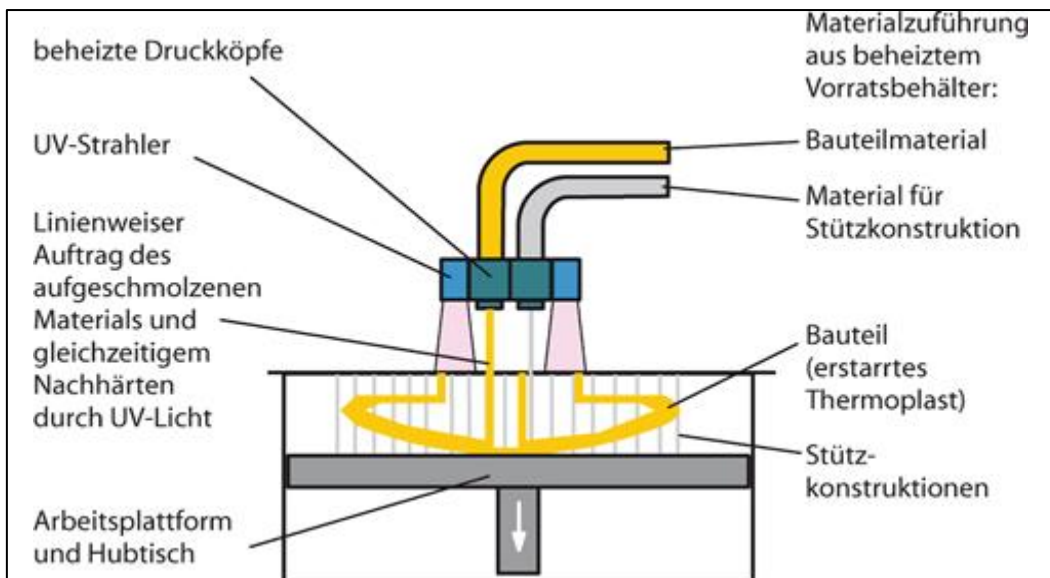


Bild 10: Prinzipdarstellung Poly Jet Modeling [10]

Das Modellmaterial wird dabei sofort durch die am Druckkopf montierten UV-Lampen ausgehärtet. Dabei bilden Fotoinitiatoren Radikale, durch die im Modellmaterial verwendete reaktiven Acrylate in einer Polymerisationsreaktion zu länger-kettigen Molekülen vernetzt werden. Das Stützmaterial kann im gleichen Arbeitsschritt aufgebracht werden, härtet aber nicht aus. Es füllt Hohlräume und unterstützt Überhänge, kann aber nicht so filigran aufgetragen werden, da es weich und elastisch ist. Nach dem Bauprozess wird die Stützstruktur mit einer Natronlauge aufgelöst oder mit einem Wasserstrahl abgespült.



Bild 11 : Poly Jet Bauteil mit wasserlöslicher Stützstruktur

Vorteile:

- Hohe Oberflächenqualität
- Hohe Genauigkeit
- Gute Ausformung komplexer, feiner Strukturen
- Schneller Bauprozess
- Einfaches Entfernen der Stützkonstruktion
- Einfacher Austausch der Materialien durch Kartuschensystem
- Einfache Bedienbarkeit

Nachteile:

- Kunststoff mit geringeren Festigkeitseigenschaften gegenüber Metall
- Temperaturbeständigkeit nur bis 60°C

Technische Daten Objet Eden 330 [11]

- Bauraum: 340 x 330 x 220mm
- Auflösung: x-Achse 42 µm; y-Achse 84 µm; z-Achse 16 µm
- Genauigkeit: 0,1 - 0,2 mm (abhängig von Geometrie und Ausrichtung)

## 2. Stand der Technik

Eine große Stärke dieser Anlage ist der vergleichsweise große Bauraum, der große Modelle ermöglicht. Weiterhin ist die hohe Genauigkeit durch die kleine Schichtdicke von 0,016mm positiv hervorzuheben.

Die Materialwerte sind unter beschrieben und als Maximalwerte zu verstehen. In Versuchen werden die Materialwerte unter realistischen Bedingungen überprüft. Dabei wird die Gleichheit der Eigenschaften in alle Richtungen jedoch angezweifelt, da die Schichten bei Schubspannungen oder schälender Belastung dazu neigen, sich vor Erreichen der Kennwerte zu trennen. Dieser Effekt wird Delaminierung genannt.

Tabelle 1: Eigenschaften Materialien 3D-Drucker Eden 330 [11]

Standard Material (FullCure 720; transparent)		
Zugspannung	60.3	N/mm <sup>2</sup>
Druckspannung	84.3	N/mm <sup>2</sup>
Biegespannung	75.8	N/mm <sup>2</sup>
Bruchdehnung	15-25	%
Zugmodul	2870	N/mm <sup>2</sup>
Biegemodul	1718	N/mm <sup>2</sup>
Härte	83	SHORE D

### LOM (Laminated Object Manufacturing)

LOM ist eines der ältesten generativen Fertigungsverfahren. Dabei werden Papierlagen aufeinander laminiert und mit einem CO<sub>2</sub>-Laser zu einer Modellkontur ausgeschnitten. Die Bauplattform ist in z-Richtung absenkbar und verfährt nach jeder Schicht um den Betrag der Papierdicke mit Kleber nach unten. Der Kleber, der die Schichten zusammenfügt, ist an der Unterseite des Papiers aufgetragen. Das Papier hat eine Schichtdicke von 0,10 mm - 0,25 mm und ist auf Rollen gewickelt. Wie in Bild 12 zu sehen, wird eine Papierlage über die bereits verbaute Form transportiert und darauf geklebt. Der Laser schneidet die Kontur für die entsprechende Schicht aus. Das nicht benötigte Material wird also erstmal mit verbaut und muss anschließend entfernt werden. Damit dies leichter fällt, werden die später zu entfernenden Bereiche vom Laser in Segmente geschnitten. Dadurch ergeben sich Quader, die im anschließenden Entformprozess leichter abgetrennt werden können.

Nachdem eine Lage aufgewalzt wurde, wird diese Lage mit dem Laser geschnitten. Die Walze kann dabei bis zu 400°C aufgeheizt werden. Die hohe Temperatur aktiviert und verflüssigt den Kleber. Der Druck der Walze fügt die Schichten zusammen und verhindert Einschlüsse von Luft. Dass der Laser nicht zu tief in die darunter liegenden Schichten schneidet, wird

durch eine Fokussierung erreicht, die ihren Brennpunkt genau in der zu trennenden Papierlage hat.

Ein Problem der fertigen Modelle ist die Aufnahme von Feuchtigkeit aus der Luft und ein damit verbundenes Aufquellen. Dadurch wachsen die Bauteile besonders in z-Richtung an. Um das Aufquellen zu vermeiden, sollte das Teil nach dem Erkalten schnell entformt und lackiert werden. Besonders gut eignen sich dünnflüssige Lacke, die das Teil bis zu 3mm Tiefe infiltrieren und gleichzeitig verfestigen.

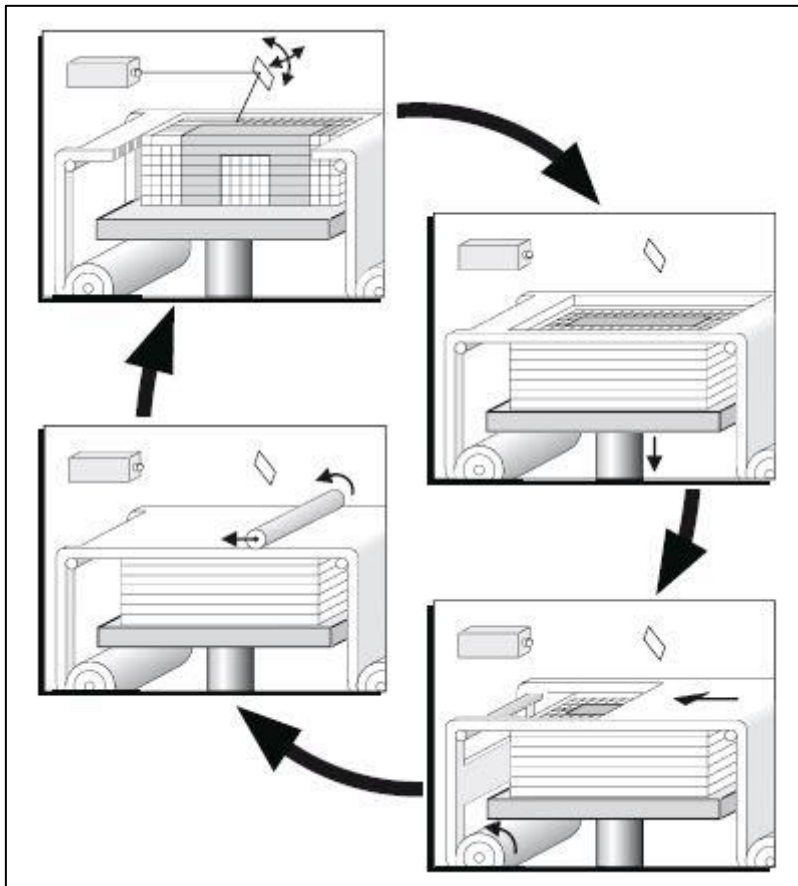


Bild 12: Laminated Object Manufacturing; Funktionsschema; [2]

### Vorteile:

- großer Bauraum, dadurch große Modelle (800 mm x 550 mm x 500 mm)
- leicht zu bearbeitende Bauteile (nachträgliches Bohren und Schleifen möglich)
- mit Holz vergleichbare Werkstoffeigenschaften
- keine zusätzlichen Stützen notwendig

## 2. Stand der Technik

### Nachteile:

- hoher Nachbearbeitungsaufwand
- großer Materialverbrauch
- Maßhaltigkeit in z-Richtung ist schwer zu gewährleisten
- Treppenstufeneffekt durch Papierstärke sehr groß
- dünne hohe Wände neigen zur Delaminierung

### Stereolithographie

Die Stereolithographie (SLA) ist das ursprüngliche generative Fertigungsverfahren. Das Ausgangsmaterial ist ein flüssiges Monomer (Acryl-, Epoxid- oder Vinylether-Basis). Dieses wird mithilfe von ultravioletter Strahlung selektiv verfestigt. Dabei wird eine Bauplattform in einem Behälter mit noch flüssigem Harz positioniert. Diese Bauplattform kann in das Harzbad abgesenkt werden und hat typischerweise Löcher, durch die das Harz über die Plattform fließen kann. Mit einem Wischer wird die Plattform gleichmäßig mit Harz benetzt. Nun fährt der UV-Laser, durch Auslenkung eines Spiegels, die vorher im Slicing-Prozess definierte Kontur ab und verfestigt an diesen Stellen das Harz.

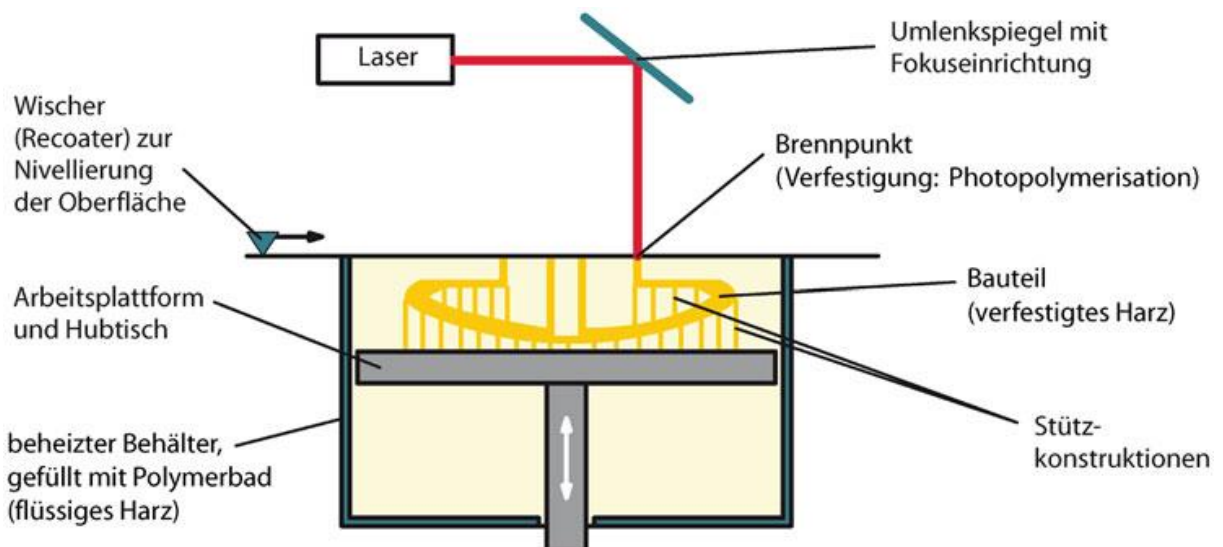


Bild 13: Prinzipdarstellung Stereolithographie [10]

Dabei aktiviert der UV-Laser die chemische Reaktion (Polymerisation) mit einem definierten Durchmesser des Laser und einer vorher berechneten Eindringtiefe der Energie. Die Tiefe ist etwas größer als die eigentliche Schichtdicke, wodurch sich die Schichten verbinden. Dann fährt die Plattform in negative z-Richtung und der Laser fertigt die nächste Schicht. So entstehen das Bauteil und die aus dem gleichen Material gefertigten Stützen. Diese müssen meist in Handarbeit entfernt werden und verursachen oft eine Rauheit der Oberfläche. Im Post-Prozess kann diese nachträglich verbessert werden.

## 2.2 Prozesskette

Der gesamte Prozess der generativen Fertigung wird in der VDI 3405 [4] in drei wesentliche Prozessschritte unterteilt:

- Pre-Prozess
- In-Prozess
- Post-Prozess

Dabei werden die Daten über Schnittstellen und das daraus entstandene Bauteil übergeben.

### **Pre-Prozess**

Der Pre-Prozess umfasst alle vorbereitenden Tätigkeiten, um das Bauteil generativ fertigen zu können. Dazu zählen die 3D-Modellerstellung, die Datenkonvertierung und das Erzeugen der Hilfsgeometrien. Dies kann in vom Prozess abhängigen oder neutralen Systemen erfolgen. Die Anordnung der Bauteile hängt stark vom Bauraum und den anlagenspezifischen Bedingungen ab. Deshalb wird die Positionierung meist mit einer zum Fertigungssystem gehörenden Software realisiert, die auf einem Rechner installiert ist, der direkt mit der Anlage kommuniziert. Diese Software ermittelt z.B. den Materialverbrauch und ob das vorhandene Material ausreicht, um die Bauteile komplett zu erstellen. Ebenso steuert sie die Prozessparameter wie Temperatur und Schichtdicke. Daraus kann dann in einem Prozess, der Slicen genannt wird, der Stapel von zu fertigenden Schichtdaten generiert werden.

### **In-Prozess**

Der In-Prozess beschreibt die eigentliche generative Fertigung der Bauteile aus dem Schichtdatensatz. Die im Pre-Prozess definierten Fahrbahnen (ähnlich der Fräsbahnen bei einer spanenden Bearbeitung) werden sequentiell abgefahren. Die z-Achse wird je nach Fertigungsmethode durch eine absenkbare Plattform, einen vertikal verfahrbaren Düsenkopf oder eine ähnlich wirkende Einrichtung realisiert. In diesem Schritt wird neben der Bauteilgeometrie auch die Hilfsgeometrie gefertigt. Dabei werden der Stoffzusammenhalt sowie die Bauteileigenschaften generiert.

Das abschließende Entnehmen aus dem Bauraum zählt auch noch zum In-Prozess.

### **Post-Prozess**

Der Post-Prozess beinhaltet alle Arbeitsschritte nach dem Entnehmen der Bauteile aus dem Bauraum der Fertigungsanlage. Dazu zählen das Säubern und Entfernen der Hilfsgeometrie, aber auch das Abkühlen und Trocknen.



## 2. Stand der Technik

Bei manchen Verfahren wird die Oberfläche mit Chemikalien infiltriert, um bessere Eigenschaften wie Festigkeit oder Härte zu erzielen. Auch mechanische Verfahren zur Oberflächenverbesserung, wie Schleifen oder Polieren, kommen zum Einsatz.

In vielen Fällen werden die Bauteile mit klarem oder farbigem Lack überzogen, um sie widerstandsfähiger gegen Umwelteinflüsse zu machen.

### 2.3 Stützstrukturen

Um dreidimensionale Objekte fertigen zu können, ist oft nicht nur das reine Modell zu fertigen. In fast allen Fällen ist außer der Objektgeometrie auch noch eine Hilfsgeometrie in Form von Stützen notwendig. Nur bei pulververfestigenden Verfahren kann das Pulverbett die Aufgaben der Stützkonstruktion mit übernehmen. Die Stützkonstruktion wird meist von einer speziell an die Maschine angepasste Software errechnet. Dabei wird zwischen interner und externer Stützstruktur unterschieden. Externe Stützen beginnen auf der Bauplattform und schließen mit dem anderen Ende am Bauteil an. Interne Stützen beginnen und enden jeweils am Bauteil.

Eine Stütze ist theoretisch immer notwendig, wenn die Flächennormale eines Dreiecks im STL-Datensatz einen Winkel kleiner als  $90^\circ$  mit der Basis (hier unsere Bauplattform) beträgt.

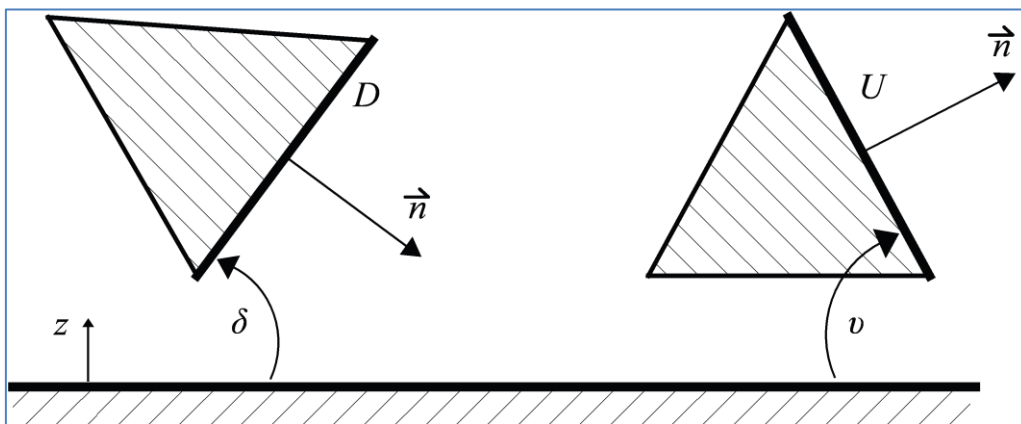


Bild 14: Upskin- und Downskin-Flächen  $U$  und  $D$ , Upskin- und Downskin-Winkel  $\nu$  und  $\delta$  [4]

Ist der Winkel zwischen  $45^\circ$  und  $90^\circ$ , kann die Struktur auch selbsttragend sein. Das heißt, die untere Schicht kann einen kleinen Überhang tragen und je nach Schichtdicke ergibt sich eine Stufe, die keine Unterstützung benötigt. Diese Eigenschaft ist vom Material, dem Fertigungsverfahren und den eingestellten Prozessparametern abhängig.

Es gibt mehrere Gründe, eine Stützstruktur an einem Bauteil zu fertigen:

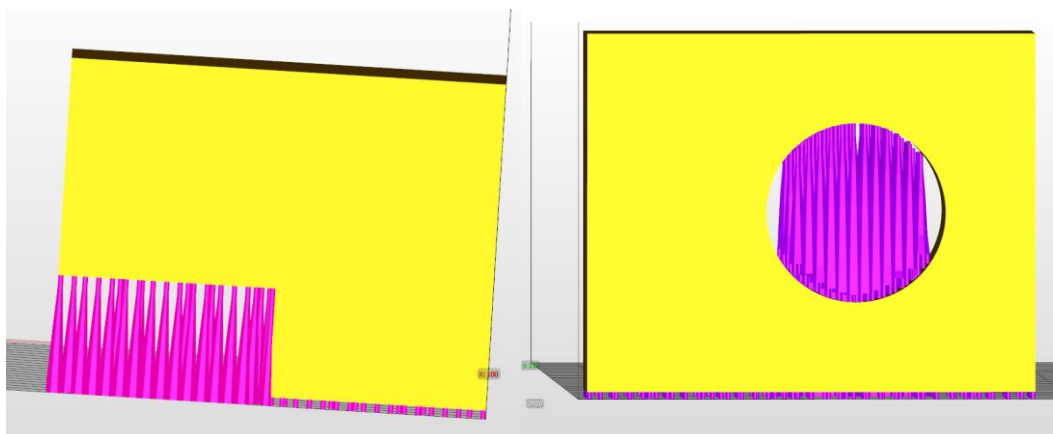


Bild 15: a) Überhang b) Hohlraum

- Unterstützen von Überhängen oder Hohlräumen

Am Beispiel in Bild 15 ist gut zu erkennen, dass die Fläche, die nicht auf der Plattform liegt, ohne Stützstruktur nicht zu fertigen ist. Wenn der Druckkopf in der Höhe des Überhanges das Material spritzen sollte, würde es nicht an der berechneten Stelle bleiben, sondern nach unten auf die Plattform fallen. Ähnlich verhält es sich bei Hohlräumen, die bestimmte geometrische Ausprägungen haben oder eine bestimmte Größe überschreiten.

- Seitliches Abstützen vom dünnwandigen hohen Rippen oder Wänden  
Um dünne hohe Rippen abzusichern, können Stützen gefertigt werden, die solche Strukturen im Bauprozess und bei Nachbearbeitungsschritten stabilisieren
- Verbesserungen von Prozessparametern (z.B. die Oberflächenqualität)
- Halten von Strukturen die sich erst später vereinigen (Inseln)  
Zur Verbesserung der Lage-Abweichungen bei Inseln können Stützen helfen, die Toleranzen verringern.

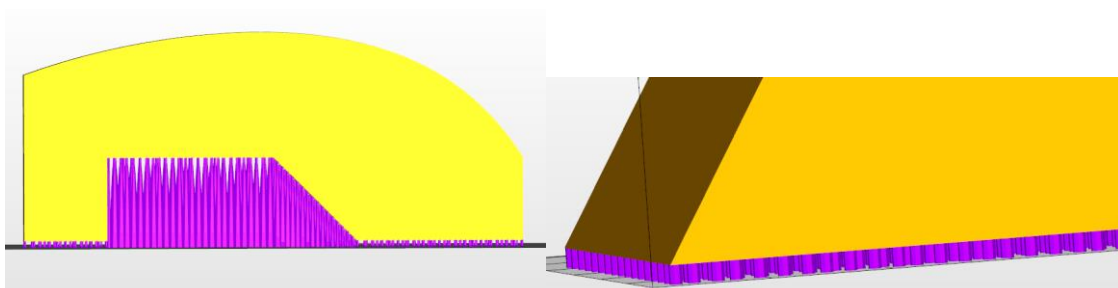


Bild 16: a) Inseln b) Plattformabgrenzung

## 2. Stand der Technik

- Abtrennung des Modells von der Bauplattform

Da bei der mechanischen Abtrennung des Modells von der Bauplattform die Oberfläche des Bauteils beschädigt werden könnte, wird eine Supportschicht unter dem Bauteil gefertigt.

### 2.4 Daten und Schnittstellen

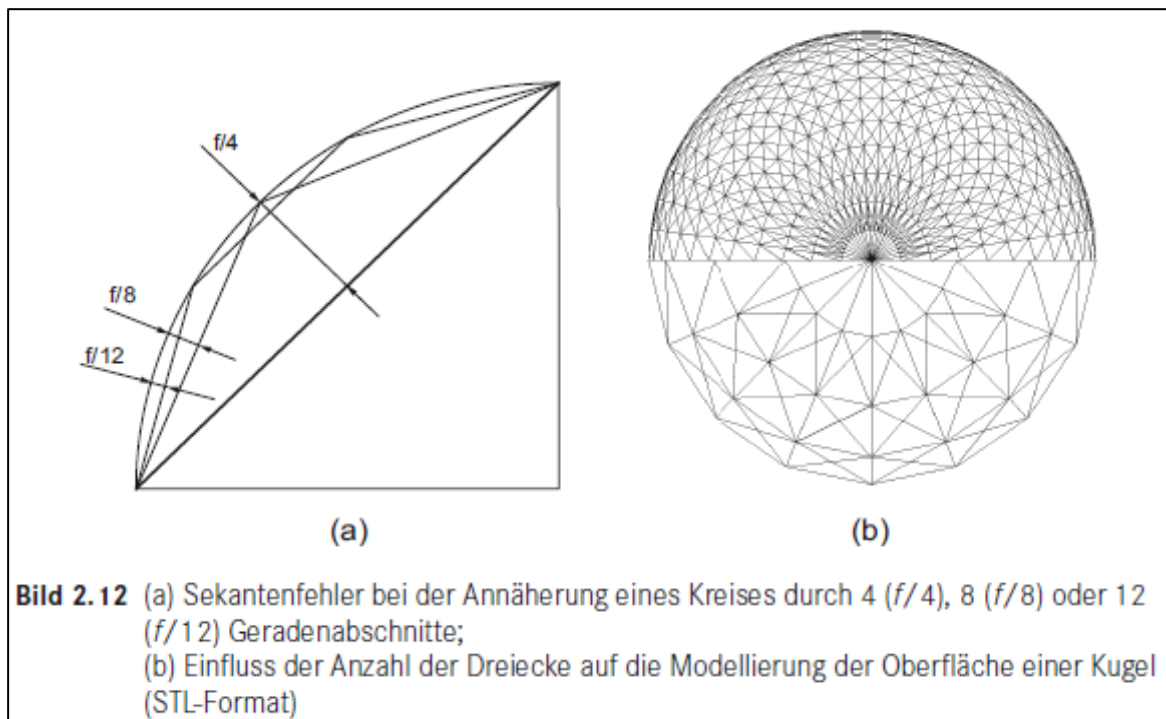
Die Schnittstelle STL (Standard Transformation Language) ist ein Datenformat, mit dem die Oberfläche eines Bauteils annähernd beschrieben wird. Dazu werden auf der Oberfläche Dreiecke erzeugt und die Eckpunkte und der Normalenvektor in das STL-File geschrieben.

Als Beispiel ist hier die Beschreibung eines Dreiecks zu sehen:

```
facet normal 1.478649e-001 -2.499819e-001 9.568935e-001
  outer loop
    vertex -8.506143e+000 1.332069e+001 1.598079e+001
    vertex -7.487340e+000 1.370548e+001 1.592388e+001
    vertex -7.577277e+000 1.387011e+001 1.598079e+001
  endloop
endfacet
```

Die Datei kann im ascii-Format oder binär gespeichert werden. Ascii kann mit einem normalen Editor gelesen und verändert werden. Binäre Dateien lassen sich nur mit einem Interpreter einlesen.

Bei ebenen Körpern kann die Geometrie so fast fehlerfrei beschrieben werden. Aber schon bei einem Zylinder können ebene Dreiecke die Oberfläche nicht genau abbilden. Es kommt zu einem Sekantenfehler (Bild. 17), der durch die Erhöhung der Anzahl der Stützpunkte auf



**Bild 2.12** (a) Sekantenfehler bei der Annäherung eines Kreises durch 4 ( $f/4$ ), 8 ( $f/8$ ) oder 12 ( $f/12$ ) Geradenabschnitte;  
(b) Einfluss der Anzahl der Dreiecke auf die Modellierung der Oberfläche einer Kugel (STL-Format)

dem Kreis reduziert werden kann. Dadurch kommt es wiederum zu einer Vergrößerung des STL-Files und verlängerten Rechenzeiten.

STL ist leider nicht standardisiert (nicht einmal der Name) und im Datensatz kommt es zu erheblichen Datenredundanzen [12], da für jedes Dreieck die Eckpunkte mitgeschrieben werden. Diese sind aber auch die Eckpunkte der benachbarten Dreiecke, so dass fast jeder Punkt dreimal beschrieben wird. Außerdem wird der Normalenvektor mitgeschrieben, der sich aber aus den drei Punkten errechnen lässt, wenn diese in der richtigen Reihenfolge abgespeichert werden und die Richtung über die Rechte-Hand-Regel definiert wird.

## 2.5 Probleme und Qualität

Durch die Fertigung von Schichten kommt es aber auch zu Problemen. Zum einen wird der Schichtstapel nicht aus der originalen, im CAD-Programm erstellten Geometrie erzeugt, sondern aus einem mittels Tesselierung konvertierten Datensatz.

Danach wird in einem Slicing-Prozess das Modell virtuell in gleich dicke Schichten geschnitten, die von der generativen Fertigungsanlage gefertigt werden sollen. Hierbei kommt es wiederum zu Abweichungen von der originalen Geometrie, weil eine Schicht an den Rändern in z-Richtung gerade nach oben zeigt. Dieser Treppenstufeneffekt ist im Bild 18 zu sehen. Es zeigt, dass gerade bei Konturen, die in einem Winkel von  $45^\circ$  zur Bauplatzform verlaufen, der Effekt am stärksten auftritt. Verläuft die Geometrie genau in z-Richtung oder in einem kleinen Winkel dazu, wie im Bild 18 am rechten Bildrand zu sehen, ist dieser Effekt deutlich kleiner.

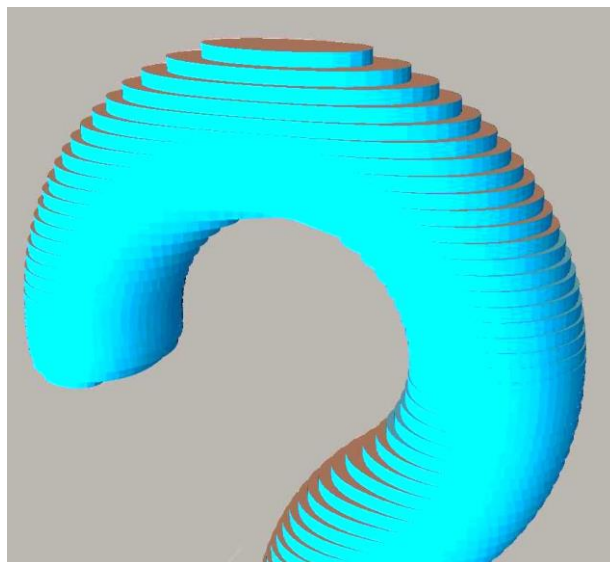


Bild 18: Treppenstufeneffekt

## 2. Stand der Technik

Dieser Effekt kann durch genaue Verfahren, die eine kleine Schichtdicke herstellen können, gering gehalten werden. Aber bei generativen Fertigungsanlagen, die beispielsweise nach dem LOM-Prinzip arbeiten, ist dieser Stufeneffekt durch die Papierdicke besonders groß.

### 2.6 Anisotropie

In der Regel wird davon ausgegangen, dass die Werkstoffe, die bei den generativen Verfahren verwendet werden, isotrope Eigenschaften aufweisen. Deswegen können sie im Bauraum in jeder möglichen Ausrichtung angeordnet werden. Im Bild 19 ist ein Beispiel zu sehen, wie möglichst viele Bauteile in einem Bauraum positioniert werden. Dabei sind noch die Hauptachsen (x-, y-, z-Richtung) eingehalten. Zur Lösung solcher Probleme gibt es spezielle Computerprogramme, bei denen die unterschiedlichen Technologieparameter eingestellt werden können. In diesem Fall ist keine Hilfsstruktur notwendig, da beim Laser-Sintern das Pulverbett die stützende Funktion mit übernimmt. Eine andere Lösung könnte sich ergeben, wenn die Bauteile eine Stützstruktur benötigen. Hierbei kann noch eingestellt werden, ob interne Stützen (Stützen, die sich innerhalb eines Bauteils oder sogar auf andere Bauteile abstützen) erlaubt sind oder minimiert werden sollen.

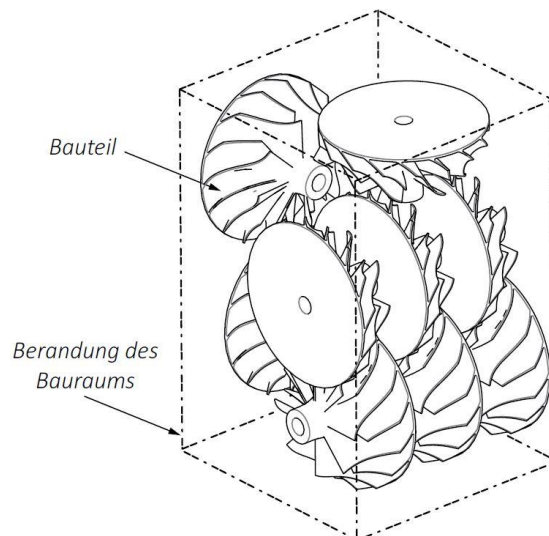


Bild 19: Packen von Laser-Sinter-Bauteilen [13]

Die Zugversuche zeigten aber, dass die Isotropie nicht immer anzunehmen ist. Beim Laminated Object Manufacturing (LOM) werden Papierschichten miteinander verklebt. Wird die Zugprobe genau parallel zur Laminierrichtung aufgebaut, entstehen komplette Papierschichten die eine Zugfestigkeit von 80-90 N/mm<sup>2</sup> aufweisen. Dazu wurden Probekörper nach DIN 527 Typ 1B [14] hergestellt und Zugversuche durchgeführt.

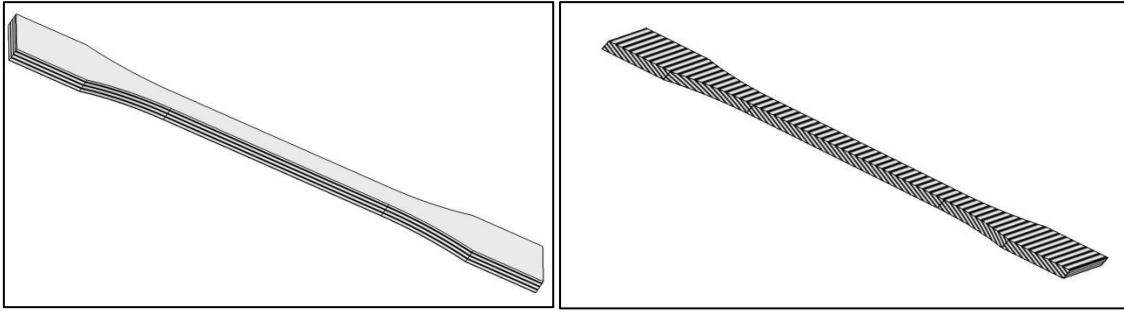


Bild 20: Ausrichtung zur Schichtung a) längs b) quer

Wird die Probe jedoch in einer anderen Richtung im Bauraum positioniert, werden die Schichten in einem bestimmten Winkel zur Längsrichtung der Probe angeordnet. Da hierbei die Zugspannungen nicht von einer kompletten Papierlage aufgenommen werden, sondern die Klebeschicht beansprucht wird, kommt es zu einem Abfallen der Zugfestigkeit auf Werte zwischen 1 bis 3 N/mm<sup>2</sup> [15]

### 3. Bauteile und Beispiele

Der Kleiderhaken ist ein Bauteil, das oft als Beispiel für additive Fertigung [16] benutzt wird. Das Bauteil setzt sich aus einer Grundplatte, einem Schaft und dem Haken zusammen. Die Platte nimmt die Kräfte auf und dient der Befestigung des Kleiderhakens an der Wand. Dazu sind drei Bohrungen in die Grundplatte eingebracht, die jeweils über eine Senkung verfügen.

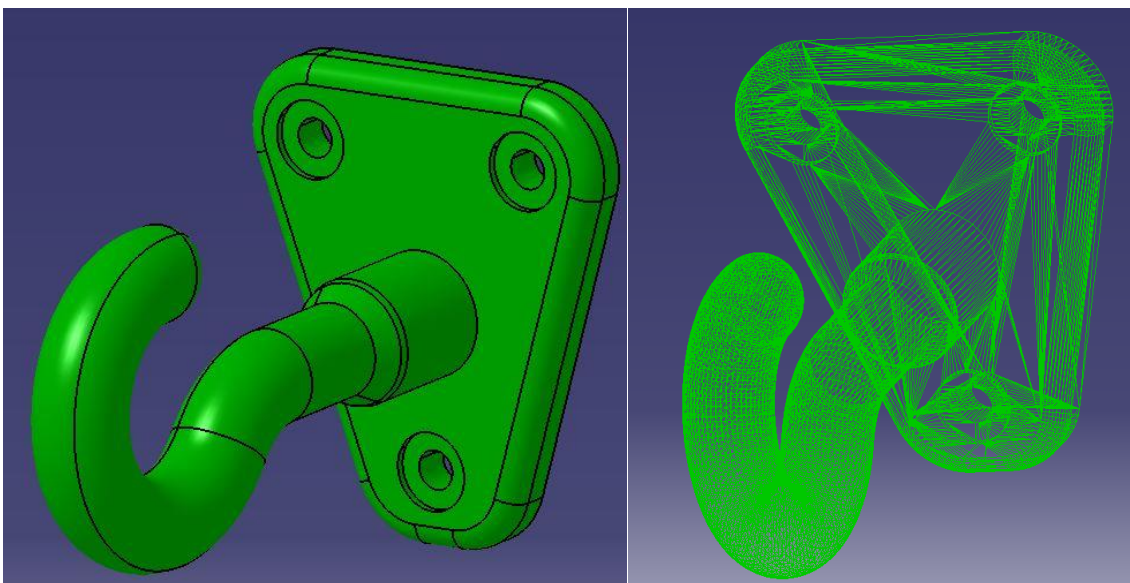


Bild 21: Kleiderhaken a) parametrisches Modell in CATIA V5 b) STL-File

Da die maximalen Biegespannungen infolge einer am Haken angreifenden Kraft (Gewichtskraft eines angehängten Kleidungsstücks plus Eigengewicht des Hakens) direkt vor der

### 3. Bauteile und Beispiele

Grundplatte zu erwarten ist, wurde der eigentliche Haken mit einem Schaft versehen. Dieser soll die gefährdete Stelle verstärken und die Kräfte in die, als steifer zu erwartende, Grundplatte ableiten.

Mit dem üblichen Fertigungsverfahren, würde dies Bauteil wahrscheinlich durch Gießen hergestellt werden. Dazu müsste eine Form gebaut werden (bei Sandguss auch Positiv-Modelle zum Abformen der Kavitäten im Formsand) und mit Metall gefüllt werden. Vorher muss die Ebene der Formtrennung und das Angusssystem definiert werden.

Nach dem Erstarren sind mehrere Schritte zur Nacharbeit nötig:

- das Entnehmen aus der Form
- Säubern vom Sand
- Abtrennen des Angusssystems
- Bearbeiten der Platte (Ebenheit)
- Bohren und Senken
- Ggf. Bearbeiten der Oberfläche

Für den Fall, dass eine große Stückzahl des Bauteils gefertigt werden soll, bietet sich Spritzgießen als Verfahren an. Hierbei wird eine Kunststoffmasse aus einem Granulat verflüssigt und unter hohem Druck in eine metallische Form gepresst. Der Kunststoff erstarrt meist in mehreren Kavitäten gleichzeitig, so dass viele Teile produziert werden können. Die Herstellkosten für das aufwendige Spritzgusswerkzeug amortisieren sich aber erst bei einigen tausend gefertigten Bauteilen. Für Einzelteile, Prototypen und Funktionsmuster eignet sich die generative Fertigung besser.

#### 3.1 Ausrichtung Im Bauraum

Nachdem das Bauteil im CAD erstellt wurde (Bild 21), wird eine STL-Datei abgeleitet, die an die Software der generativen Fertigungsanlage übergeben wird. In dieser Software ist die Bauplattform zu sehen und wie das Bauteil darin liegen wird.

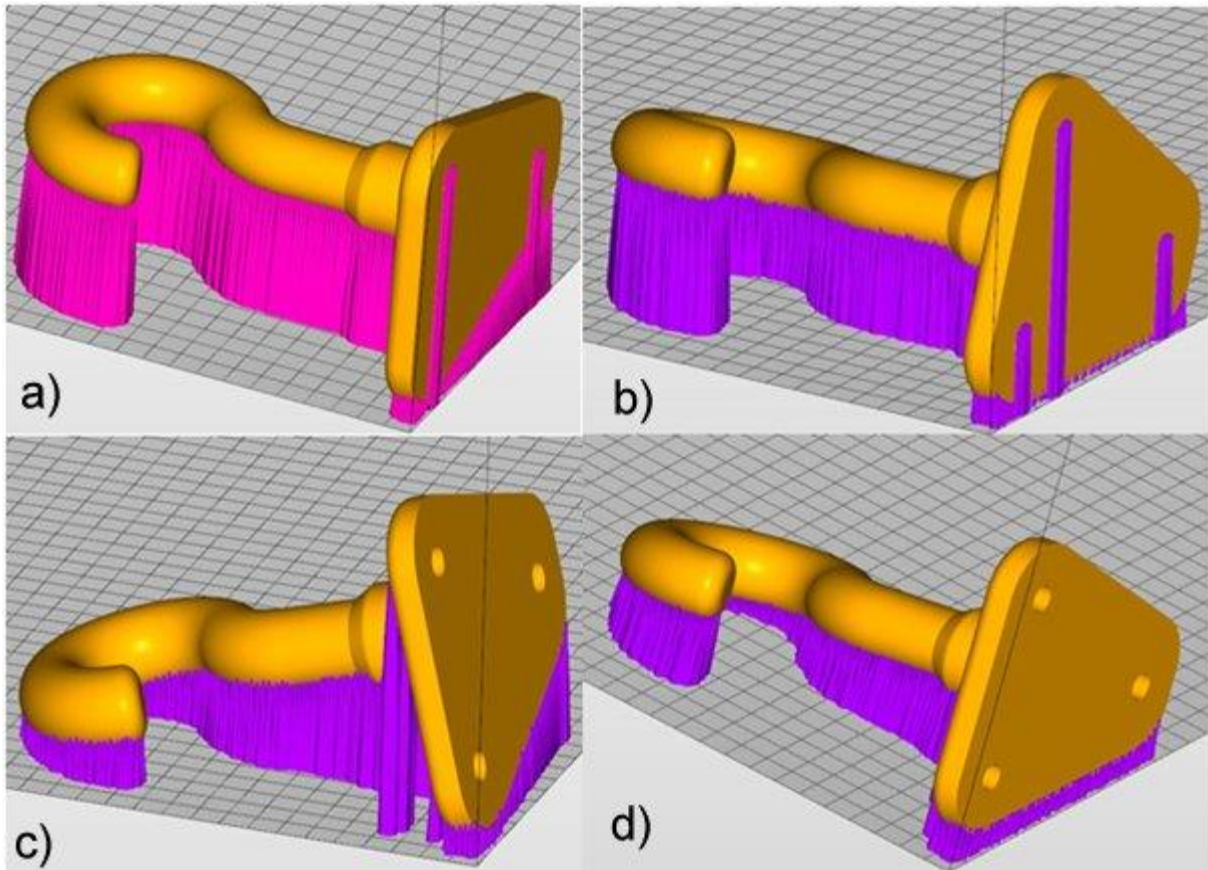


Bild 22: mögliche Ausrichtungen des Kleiderhakens im Bauraum a) waagrecht b) auf Platte c) gekippt d) auf Platte und gekippt

Die Funktion zur automatischen Ausrichtung legte das Bauteil mit dem Haken und Schaft waagrecht zur Bauplattform (Bild 22/a). Haken und Schaft müssen komplett unterstützt werden. Da die Grundplatte schräg ist, muss auch die Schräge der Grundplatte unterstützt werden. Dies verbraucht zusätzlich zum Modellmaterial Stützmaterial, wodurch die Kosten für das Bauteil steigen.

Unter der Voraussetzung, dass die Belastungen klein sind, wurden die Position und die Ausrichtung des Bauteils im Bauraum verändert, um eine Verringerung des für zusätzliche Stützstrukturen verwendeten Materials zu erreichen.

Dabei wurde das Bauteil um die Achse des Schafts gedreht, bis die Grundplatte parallel zur Bauplattform liegt (Bild 22/b). Nun musste an dieser Stelle nur noch das Stützmaterial verbaut werden, dass nötig ist, um das Bauteil von der Plattform zu lösen.

Im zweiten Versuch wurde das Bauteil auf den Haken gekippt, um die Stützen an der Stelle des Bauteils zu minimieren. Hierbei mussten aber Teilbereiche der Grundplatte unterstützt werden (obere Ecke der Grundplatte siehe Bild 22/c). Im letzten Schritt wurden beide Dre-

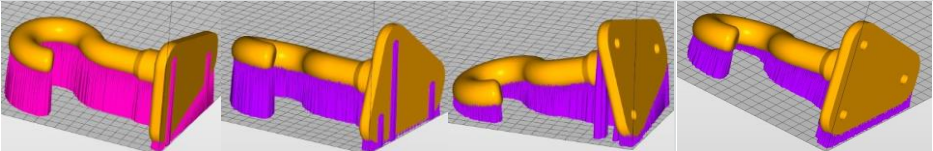


### 3. Bauteile und Beispiele

hungen kombiniert, so dass das Bauteil auf der Seite der Grundplatte lag und der Haken den minimalen Abstand zur Bauplattform hatte (Bild 22/d).

Für alle vier möglichen Ausrichtungen wurde der Bau-Job virtuell gestartet, um Materialverbrauch und Bauzeit berechnen zu können.

Tabelle 2: Vergleich der Positionen im Bauraum



Modellvolumen= 27,03 cm<sup>3</sup>

	KL_Haken_waagerecht	KL_auf_SF_liegend	KL_auf Haken_liegend	KL_auf_Haken+SF_liegend
Anzahl Slices (0,025mm)	2124	2071	2088	2140
Höhe total (mm)	53,1	51,77	52,2	53,5
Bearbeitungszeit	6h 43min	6h 33min	6h 37min	6h 46min
Volumen gesamt (cm <sup>3</sup> )	115,55	68,96	58,09	48,99

Der Vergleich zeigt, dass die Bauzeit kaum verringert werden konnte, da diese hauptsächlich von der Anzahl der zu fertigenden Schichten abhängt. Der Unterschied beträgt nur 13 min bei einer Gesamtbauzeit von über 6,5 Stunden.

Aber das Stützmaterial konnte durch diese Veränderung drastisch reduziert werden. Das für den eigentlichen Kleiderhaken verwendete Modellmaterial hatte ein Volumen von 27,03 cm<sup>3</sup> und kann nicht verringert werden.

Bei der automatischen Ausrichtung wurden insgesamt 115,55 cm<sup>3</sup> Material verbaut. Das entspricht einem Materialeinsatz von 88cm<sup>3</sup> für die Stützen.

Durch die Drehung auf die Seitenfläche, musste diese nicht mehr unterstützt werden und die Stützen für den Haken konnten kürzer ausgeführt werden. Das eingesetzte Material verringerte sich auf ca.69 cm<sup>3</sup>. Davon wurden ca. 42cm<sup>3</sup> für die Stützen gebraucht. Die Ersparnis ist 52% für Stützmaterial. Das Kippen auf den Haken reduzierte die Stützen auf ein Volumen von 31 cm<sup>3</sup>, was einer Reduzierung um 65% entspricht. Durch die Kombination beider Drehungen wurde beide Reduzierungen vereinigt und das Stützmaterial auf 22cm<sup>3</sup> verringert. Die Einsparung liegt damit bei 75% des Stützmaterials.

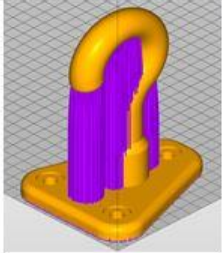
	
Modellvolumen= 27,03 cm <sup>3</sup>	
	<b>KL_auf_Platte_stehend</b>
Anzahl Slices (0,025mm)	3368
Höhe total (mm)	84,2
Bearbeitungszeit	10 h 40min
Volumen gesamt (cm <sup>3</sup> )	79,62

Bild 23: aufrecht stehender Kleiderhaken

Eine andere Ausrichtung im Bauraum hat sich als noch ungünstiger ergeben, da sowohl Bauzeit als auch Materialeinsatz deutlich anstiegen. Wird der Kleiderhaken einfach auf die Grundplatte gestellt und gefertigt, müssen relativ lange Stützen unter dem Bogen generiert werden und die verwendete Materialmenge steigt an (Bild 23). Durch die große Anzahl an Schichten bei dieser Ausrichtung in Z-Richtung erhöht sich auch die Bauzeit beträchtlich. Deshalb wurde bei den Untersuchungen nach anderen Wegen gesucht, die kostentreibenden Faktoren zu senken.

### 3.2 Teilen der Bauteile

Besonders beim Bauteil Kleiderhaken wird schnell klar, dass eine Teilung des Bauteils dazu führen kann, die Stützen zu minimieren. Außerdem können die dann zu fertigenden Teilstücke flach und dicht im Bauraum angeordnet werden, um die Anzahl der Schichten und damit die Bauzeit gering zu halten.

Dieses Teilen der Bauteile bedingt aber eine konstruktive Anpassung. Dazu wird im CAD-System das Bauteil gesplittet und zwei STL-Files an den Rechner der generativen Fertigungsanlage übergeben. Bei sehr komplizierten Bauteilen kann es auch sinnvoll sein, das Bauteil in mehr als zwei Teile zu zerlegen. In jedem Fall müssen die aufgeteilten Substrukturen anschließend gefügt werden, um das Endteil zu erhalten. Auf das Fügen und die speziellen Anforderungen an die zu fügenden Flächen, wird im Abschnitt *4. Fügen und Kleben* eingegangen.

### 3. Bauteile und Beispiele

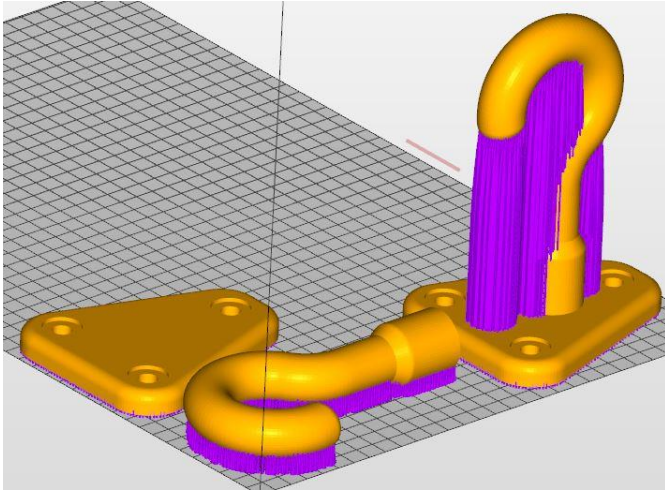


Bild 24: geteilter Haken

Wenn die Entscheidung, das Bauteil mittels generativer Fertigung herzustellen, getroffen wurde und das Bauteil nach den Anforderungen der Funktionserfüllung konstruiert wurde, sollte der Konstrukteur also über fertigungsgerechte Anpassungen nachdenken.

Im Bild 25 ist der als Beispiel dienende Kleiderhaken zu sehen. Wenn dieser aufgeteilt werden soll, sind folgende Teilebenen denkbar.

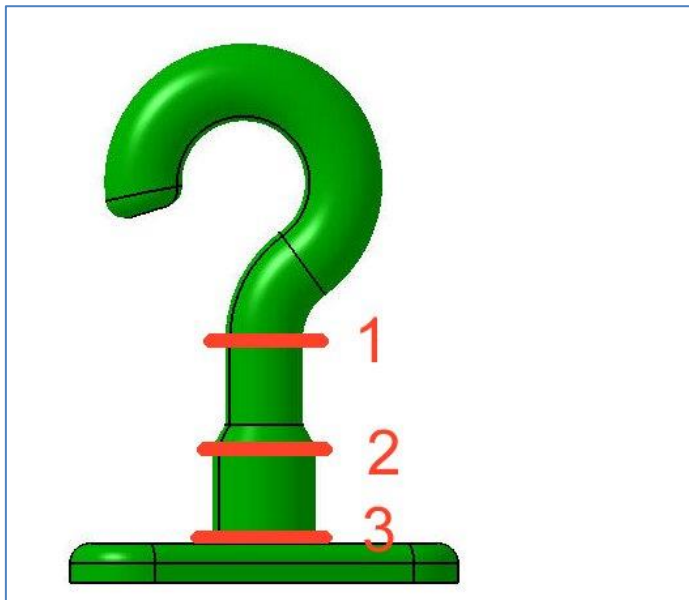


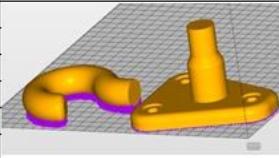
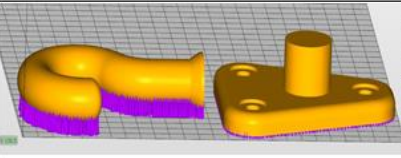
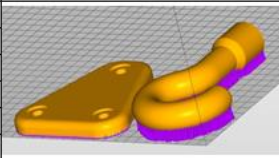
Bild 25: Teilebenen am Kleiderhaken

1. Teilebene am Haken
2. Teilebene über dem Schaft
3. Teilebene unter dem Schaft

Bei der Teilung in der Ebene 1, wird das Bauteil unter dem Bogen des Hakens geteilt. Dadurch verbleibt der Schaft mit Verstärkung an der Grundplatte. Der Vorteil ist, dass der verbleibende Teil keine Überhänge mehr aufweist und deshalb ohne Stützen gefertigt werden kann. (Die Stützen unter den Bauteilen, die zur Abtrennung der Bauteile von der Bauplattform dienen, werden im weiteren nicht betrachtet, da sie immer vorkommen und nur geringfügig beeinflusst werden können.)

Der abgeteilte Bogen kann nun flach auf die Bauplattform gelegt werden und benötigt nur geringfügig längere Stützen, dort wo der Kreis seitlich abgestützt werden muss.

Tabelle 3: Teilung Kleiderhaken

A	B	C	D
Modellvolumen 27,03 cm <sup>3</sup>	<b>Teilebene 1</b>	<b>Teilebene 2</b>	<b>Teilebene 3</b>
			
Slices (0,025mm)	1514	834	674
Total High (mm)	37,85	20,85	16,85
Bauzeit	4h 48min	2h 38min	2h 8min
Total Volume (cm <sup>3</sup> )	29,03	29,93	30, 12

Wird der Kleiderhaken in der Teilebene 2 (siehe Bild 25 geteilt, verbleibt der Schaft am Haken und nur die Verstärkung wird mit der Grundplatte gefertigt. Der Bogen mit Schaft ist damit etwas länger und die Unterstützung verbraucht mehr Material. Dieser Mehrverbrauch ist aber sehr gering. Das gefertigte Gesamtvolumen steigt von 29,03 cm<sup>3</sup> auf 29,93 cm<sup>3</sup>, also um 0,9 cm<sup>3</sup>. Dafür verringert sich die Bauzeit von 4h 48min auf 2h 38min. Dies ist auf die geringere Fertigungshöhe und damit der verminderten Anzahl zu generierender Schichten (von 1514 auf 834 Schichten) zurückzuführen. Damit geht die Bauzeit um 45 % zurück und der Materialverbrauch steigt nur um 3%. Dieser Effekt kann noch vergrößert werden, wenn die Teilungsebene noch weiter nach unten gelegt wird. Werden Haken (mit Schaft und Verstärkung) und Grundplatte komplett voneinander getrennt (Teilungsebene 3) kann der komplette Haken flach auf die Bauplattform gelegt werden. Damit ist die Grundplatte des Kleiderhakens sogar flacher als der Haken selbst und es müssen nur noch 674 Schichten gefertigt werden. Damit sinkt die Bauzeit auf 2h 8min und der Materialverbrauch durch die vergrößerte zu unterstützende Fläche steigt nur um 0,19 cm<sup>3</sup>. Die Zeitersparnis im Vergleich zur Teilung in der Ebene 1 beträgt demnach 56%.

### 3. Bauteile und Beispiele

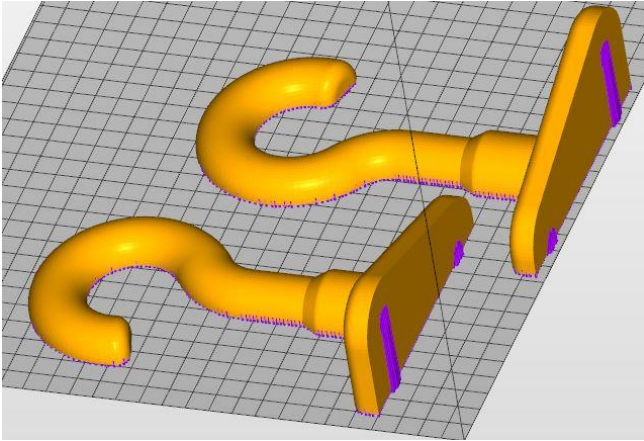


Bild 26: Längsteilung des Kleiderhakens

Beim Aufteilen gibt es auch eine Möglichkeit, die nicht sofort ins Auge fällt, aber trotzdem betrachtet werden sollte. Die Alternative ist eine komplette Längsteilung des Bauteils (Bild 26) in zwei symmetrische Hälften. Die Hälften können auf die Teilungsebene gelegt werden und dann ohne Stützen für den Haken gefertigt werden. Nur in den Löchern muss etwas Stützmaterial verbaut werden.

#### 3.3 Wirtschaftlichkeitsrechnung

Bei einer Berechnung der Herstellungskosten von generativ gefertigten Bauteilen ist immer das Fertigungsverfahren ausschlaggebend. Einige Verfahren sind kostengünstiger als andere, bringen aber Bauteileigenschaften mit sich, die nicht den Anforderungen entsprechen. Es kann nicht verallgemeinert werden, dass Bauteile mit höheren Herstellungskosten bessere Eigenschaften ausweisen. Durch die ständige Weiterentwicklung der Anlagen und der Materialien sind neuere Anlagen oft günstiger als ältere.

Grundsätzlich lassen sich aber folgende Dinge verallgemeinern, die bei gleichen Bauteilabmessungen gelten:

- Je weniger Stützmaterial eingesetzt wird, desto geringer sind die Herstellungskosten (Dabei muss die Prozessstabilität gewährleistet sein, so dass die gefertigte Geometrie innerhalb der geforderten Toleranzen liegt.)
- Je geringer die Höhe des Bauteils im Bauraum und damit die Anzahl der zu fertigenden Schichten ist, desto geringer die Bauzeit und die davon abhängigen Maschinenkosten

Die Kosten setzen sich aus den Materialkosten und den Herstellungskosten zusammen. Bei den Materialkosten ist zuerst das eigentliche Baumaterial zu nennen. In der Regel kann dies leicht im CAD-System oder dem Rechner, der die generative Fertigungsanlage steuert, berechnet werden. Die Menge an eingesetztem Stützmaterial lässt sich im CAD-System nicht sehen. Da die Stützen erst nach der Übergabe mittels STL-Datei an den Fertigungsrechner virtuell generiert werden, muss die Abschätzung des Supportmaterials hier erfolgen.

Zu diesen Materialkosten kommen ggf. noch Kosten für Negativformen wie Abguss-Silikon, Gips o.ä. hinzu. Auch Trennmittel, Klebstoffe oder Formmassen müssen mit in die Kalkulation einfließen.

Bei den Herstellungskosten sind die Stundensätze für die mitunter relativ teuren Anlagen zu berücksichtigen. Dabei bleibt es oft nicht nur bei den Kosten für die generative Fertigungsanlage, sondern die Wasserstrahlanlage zur Reinigung oder die Vakuumgießanlage zum Entgasen der Komponenten verursachen auch Kosten. Diese sind aus anteiliger Abschreibung der Anschaffungskosten, Energiekosten und Wartungskosten [17] abzuschätzen. Weiterhin sind die Personalkosten zu den Herstellungskosten zu zählen. Die Zeit, die ein technischer Mitarbeiter zum Einlesen der Daten, Positionieren der Teile im Bauraum, Generieren der Stützstrukturen und dem Slicen benötigt, sind im Pre-Prozess zusammengefasst. Der In-Prozess, der die Bauteilgenerierung beinhaltet, muss nur überwacht werden. Dabei ist für das Entnehmen und das zum Post-Prozess gehörende Reinigen in die Zeit einzubeziehen.

#### Beispiel für die Kostenberechnung

Die Berechnung soll an einen Beispiel verdeutlicht werden. Die im Abschnitt 6.4.1 beschriebenen Proben wurden auf der Objet Eden 330 gefertigt.

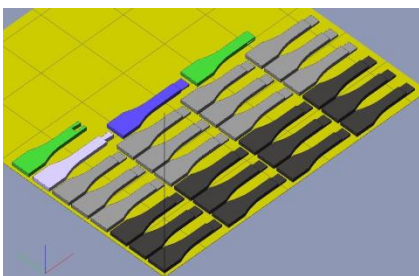


Bild 27: Zugproben im Bauraum

- 28 halbe Proben
- 186 g Modellmaterial (Full Cure 720)
- 109 g Supportmaterial (Full Cure 705)
- 2h 5min Bearbeitungszeit

### 3. Bauteile und Beispiele

Tabelle 4: Kosten für Proben auf Objet Eden 330 [18]

Materialkosten		
Modellmaterial	Full Cure 720 (2kg)	408 €
Supportmaterial	Full Cure 705 (2kg)	206 €
Herstellungskosten		
Objet Eden 330	Stundensatz	40 €
Wasserstahlanlage	Stundensatz	20 €
techn. Mitarbeiter	Stundensatz	65 €

Die Preise für die Materialien konnten aus den Lieferunterlagen [18] entnommen werden. Die Stundensätze für Anlagen sind schwerer abzuschätzen. Deshalb wurde auf Erfahrungen am IMK zurückgegriffen und die Werte, die Kuhlmann [17] ermittelt hat, wurden übernommen.

Tabelle 5: Kostenberechnung

Materialkosten		
186 g Full Cure 720	204€ x 0,186	37,94 €
109g Full Cure 705	103€ x 0,109	11,22 €
Herstellungskosten		
2h 5 min (Objet Eden 330)	2,083 x 40€	83,22 €
20 min(Wasserstahlanlage)	0,33 x 20€	6,66 €
1,5 h (techn. Mitarbeiter)	1,5 x 65€	97,50 €
	Summe	236,54 €

Die reinen Materialkosten sind mit 49,16 € für 28 halbe Proben berechnet wurden.

Die Herstellungskosten sind deutlich höher, da hier der Stundensatz für die Anlagen und den techn. Mitarbeiter aufgeführt werden. Damit steigen die Gesamtkosten auf 236,54 €.

### 3.4 Probleme beim Aufteilen

Beim Aufteilen von Bauteilen ergeben sich einige Aspekte, die im Folgenden untersucht werden müssen:

- Kann die Position der zu fügenden Teilstücke sichergestellt werden?
- Ist die Maßhaltigkeit der Einzelteile gegeben, so dass die Fügestellen aufeinander passen?
- Wie sollten die Oberflächen beschaffen sein und welche Ausrichtung sollte die Fuge haben?

- Welche maßliche Ausdehnung hat die Klebestelle?
- Wie dick sollte der Klebstofffilm sein?
- Wie sollte die Ausrichtung der Schichten bei anisotropen Werkstoffen gewählt werden?
- Welche Ausrichtung sollte der Klebstofffilm bezüglich einer auftretenden Belastung haben?

Der Sinn des Aufteilens ist es, die generative Fertigung zu optimieren und Kosten zu senken. Wenn Teile konstruktiv aufgeteilt und danach gefügt werden, muss die Lage der Bauteile zueinander genau sein. Da die Teilstücke nach dem Fügen ein Gesamtteil bilden, das vor allem funktionelle Zwecke erfüllt und konstruktive Aspekte berücksichtigt, darf sich die Außenform nicht von der vorher ungeteilt entworfenen Lösung unterscheiden.

Deshalb müssen Grenzen definiert werden, um die qualitative Anforderung „Lage der Teilstücke zueinander soll genau sein“ messbar zu machen und in eine quantitative Forderung zu überführen.

Die genauen Werte für eine erlaubte Abweichung unterscheiden sich je nach Anwendung stark voneinander. Hier kann nur eine allgemeine Grenze definiert werden.

Da die generativ hergestellten Bauteile oft als Prototypen und Demonstrationsmodelle dienen, wird die Tastschwelle herangezogen. In der Literatur finden sich viele verschiedene Aussagen zu fühlbaren Höhenunterschieden. In der Regel kann ein Mensch mit sensiblen Fingerspitzen Erhebungen zwischen 20- 30 µm ertasten [19]. Unter Werkstatt-Bedingungen ist eine Stufe von 100µm mit bloßen Auge und den Fingerspitzen beim darüberstreichen realistisch feststellbar. Ein doppelt so großer Wert (0,2mm) wird dann als Obergrenze festgelegt.

*Damit wird die Anforderung definiert, dass ein Höhenunterschied von 0,1 mm als sehr gut bewertet wird und 0,2 mm die größte akzeptierte Abweichung beträgt.*

## 4. Konstruktionsmethodik

Die Entwicklung neuer technischer Systeme ist eine der Standardaufgaben für Ingenieure, noch häufiger sind Anpassungs- und Variantenkonstruktionen. Bei diesen Aufgaben kann der Konstrukteur auf die VDI 2221 [20] zurückgreifen, die ein generelles Vorgehen beim Entwickeln von technischen Produkten definiert.

Darin wird das Vorgehen in 7 Arbeitsschritte strukturiert, die sequenziell abgearbeitet werden sollen. Diese Schritte sind in dem allgemein bekannten Schema in Bild 28 zusammengefasst.



## 4. Konstruktionsmethodik

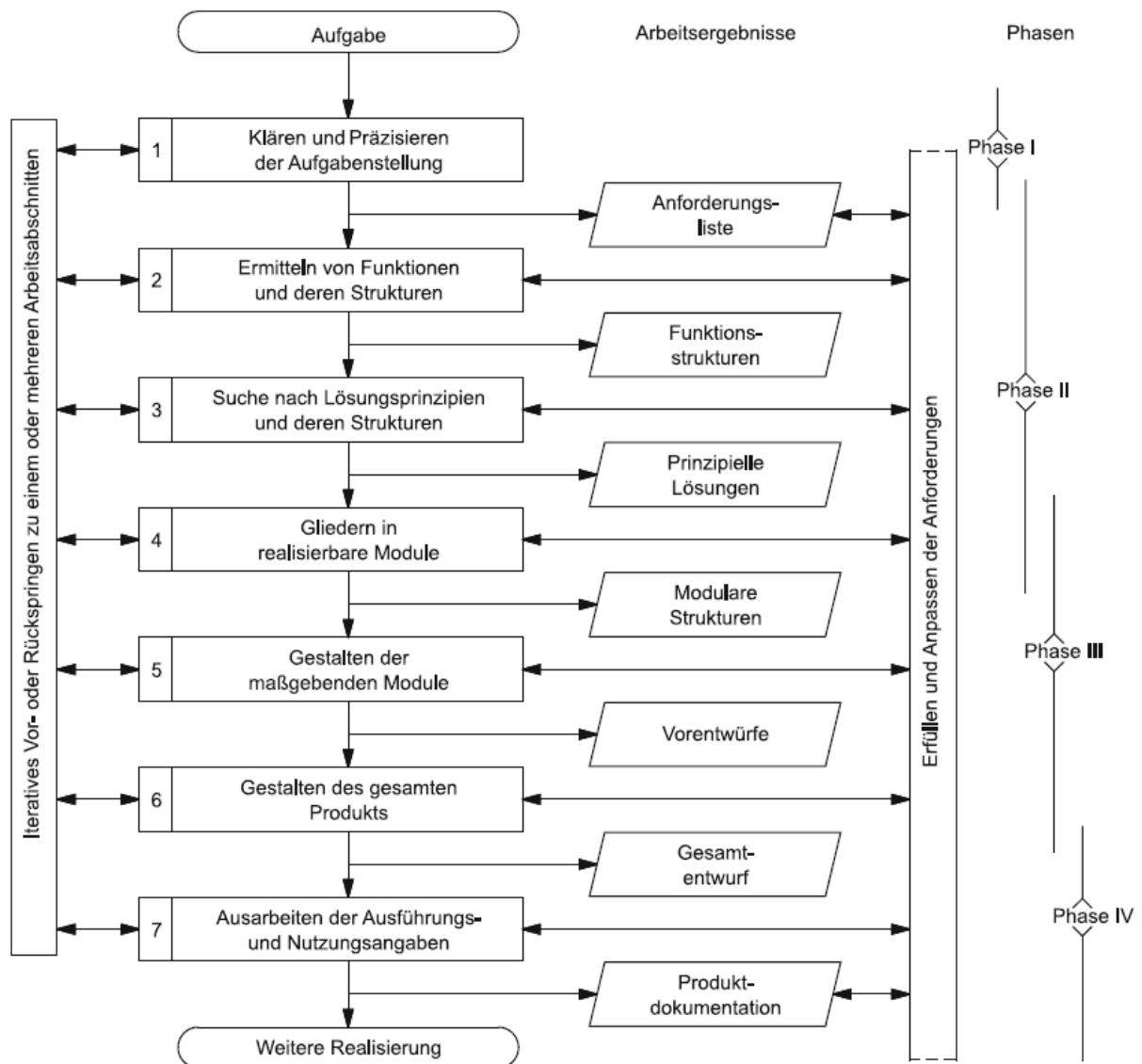


Bild 28: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren [3]

### 4.1 Anforderungsliste

Der erste Schritt ist die Aufgabenpräzisierung, die den konstruktiven Rahmen abstecken soll. Die sich daraus ergebene Anforderungsliste „enthält die Ziele und Bedingungen (Anforderungen) der zu lösenden Aufgabe in Form von Forderungen und Wünschen,“ [21] und stellt sie in tabellarischer Form zusammen.

An dieser Stelle werden die Anforderungen an Fügestellen gesammelt, die durch generative Fertigungsverfahren hergestellt werden. Da kein direkter Entwicklungsauftrag vorliegt, sind die Spalten für Termin und Verantwortliche noch nicht gefüllt. Diese Liste soll dabei helfen, die von außen einwirkenden Einflüsse durch Abstraktion und Idealisierung zu erkennen.

Tabelle 6: Anforderungsliste Fügestellen

Otto-von-Guericke Universität Magdeburg		<b><u>Anforderungsliste für:</u></b>  generativ gefertigte Fügestellen	Blatt 1 Seite 1
Änderungen	F/W	Anforderungen	Verantw.
		<p><b><u>Geometrie:</u></b> Geometrie der Bauteile bleibt erhalten</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Größte erlaubte Abweichung 0,2 mm</li> <li>• Abweichung unter 0,1mm</li> </ul> <p>F Gerundete Kehlen der Innenkontur W Schichtausrichtung beachten W möglichst große Fläche beim Verkleben</p> <p><b><u>Kräfte:</u></b> F nur statisch W dynamisch vermeiden (max. Kraft, Häufigkeit des Auftretens) W Schwingungen und schlagartige Belastung vermeiden W Innere Kräfte vermeiden</p> <p><b><u>Material:</u></b> Papier Polymere auf Acrylharzbasis Epoxidharze</p> <p>Zugfestigkeit zwischen 20 N/mm<sup>2</sup> und 80N/mm<sup>2</sup> anisotrope Eigenschaften</p> <p><b><u>Stoffe</u></b> F Umgebungsstoffe in Fügestelle vermeiden (Staub, Flüssigkeiten, Schmierstoffe) F Farb- oder Oxidschichten entfernen oder anschleifen</p> <p><b><u>Sicherheit:</u></b> F beim Umgang mit Chemikalien Herstellerangaben beachten F Arbeitsräume gut belüften</p> <p><b><u>Ergonomie:</u></b> F Formgestaltung eindeutig wählen W Positionierung vorsehen (Anschlag, Profil, Verzahnung, usw.)</p> <p><b><u>Montage:</u></b> F Bauteile vorher Trocknen und Reinigen F Verarbeitungszeiten beachten</p> <p><b><u>Fertigung</u></b> F generative Fertigung W Bauraum einhalten W Nacharbeit minimieren</p> <p><b><u>Gebrauch</u></b> Einsatztemperaturen der Polymere und Klebstoffe zw. -20 und 120°C</p> <p><b><u>Kosten</u></b> W wenig Stützen W geringe Höhe in z-Richtung</p>	

Die Anforderungsliste wird zwar zu Beginn des Entwicklungsprozesses aufgestellt, sollte aber konstruktionsbegleitend weiter gepflegt werden, um durch eine Konkretisierung den Erkenntnisgewinn zu dokumentieren.

Später sollte immer wieder überprüft werden, ob alle Forderungen eingehalten werden oder sich im Laufe der Entwicklung auch die Anforderungen geändert haben. Die Anforderungslist-

#### 4. Konstruktionsmethodik

te ermöglicht auch die Abstraktion im fortgeschrittenen Entwicklungsprozess und führt zu gedanklichen Schleifen, die helfen, das Produkt zu verbessern.

Im Weiteren liefert die Anforderungsliste die Kriterien zum Bewerten der Lösungskombinationen, die sich aus der Variation der gegliederten Module ergeben.

### 4.2 Funktionsstruktur

In der Regel wird nach der Anforderungsliste die Funktionsstruktur gebildet. Dabei kann im ersten Schritt eine Funktionsliste erstellt werden, die offensichtliche Funktionen zusammenfasst. Oft ist es hilfreich, eine Recherche zum Stand der Technik durchzuführen und nach vorhandenen Lösungen zu suchen, die dem Entwicklungsziel ähnlich sind. Durch Analyse jedes einzelnen vorhandenen geometrischen Elements, kann dessen Funktion erkannt werden.

Mögliche Fragen sind:

- Welche Funktion hat ein geometrisches Objekt?
- Welche Funktion darf es nicht haben?
- Welche Funktion entfällt, wenn dieses Objekt fehlt?

Nun ist zu hinterfragen, ob diese Funktion auch für das zu entwickelnde System wichtig ist. Wenn diese Funktion erfüllt werden muss, soll nicht die geometrische Ausprägung einfach übernommen werden, sondern die Funktion wird in die Funktionsliste übernommen und durch Abstraktion nach verschiedenen Lösungsvarianten gesucht.



Bild 29: allgemeine Funktionsstruktur für eine Verbindungsstelle

Ist die Funktionsliste vollständig, kann mithilfe der Einteilung in Stofffluss, Energiefluss und Signalfluss, nach der in „Konstruktionslehre“ [3] aufgestellten Methodik, die Funktionsstruktur aufgestellt werden. Dabei ist die Systemgrenze wichtig und damit die Definition, was zum

entwickelnden System gehört und welche Elemente als gegeben angesehen werden (z.B. Anschraubpunkte mit definiertem Gewinde).

Im hier beschriebenen Fall ist die Funktionsstruktur sehr allgemein gehalten, da es sich nur um einen kleinen Teilbereich des Gesamtsystems handelt. Die Hauptfunktionen sind die feste Verbindung und die Einhaltung der Position der gefügten Teilstrukturen.

Erst im Kontext des Gesamtsystems wird diese Teilfunktion verständlicher und sollte in die Gesamtfunktion integriert werden.

### 4.3 Der morphologische Kasten

In der Praxis hat sich die Gliederung der Wirkprinzipien in einem Ordnungsschema bewährt. Dazu werden für die Teilfunktionen, die sich aus der Konkretisierung der Funktionsstruktur ergeben, Lösungsprinzipien gesucht. Die Teilfunktionen sollen sich dabei aus der Anforderungsliste und der Funktionsstruktur ergeben. Oft wird an diese Stelle schnell klar, für welche Probleme eine Lösung gesucht wird und welche Bedingungen nicht geändert werden sollten. Hier ergeben sich gedankliche Schleifen die zur Aktualisierung der Anforderungsliste und Anpassung der Funktionsstruktur führen können.

Das Ordnungsschema nach Zwicky wird „Morphologischer Kasten“ [22] genannt. Dabei wird eine Tabelle aufgestellt, in der die Teilprobleme die Zeilen bilden. In einem kreativen Prozess sollten für die Teilprobleme mehrere Lösungsprinzipien gefunden werden. Dazu eignen sich besonders intuitiv betonte Lösungsfindungsmethoden. Wenn diese Methode in einem Team angewendet wird, ist sie besonders effektiv, da sich durch die Vielzahl von Ideen eine große Lösungswolke ergibt.

Die Ideen der Beteiligten werden als Stichpunkte oder kleine Skizzen in den Morphologischen Kasten eingetragen. Die Anzahl sollte über die der banalen Lösungsprinzipien hinausgehen. Dadurch wird jeder Teilnehmer zum Finden unkonventioneller Lösungen geleitet.

Anschließend sind die Lösungen zusammen zu tragen und gleiche Lösungen zu streichen. Dabei wird durch das Erklären der Ideen eine große Vielfalt erzeugt und verschiedene Sichtweisen auf das gleiche Merkmal lassen das Problem deutlicher werden.

Die entstandene Lösungswolke muss dann auf Verträglichkeit der gefundenen Lösungsprinzipien geprüft werden und die Kombination verschiedener Teillösungen ergibt eine mögliche Variante für die Gesamtlösung.

Im vorliegenden Fall wurden Lösungen für die geometrische Ausprägung einer geteilten Fügestelle gesucht. Dabei sollte als erstes eine Grundform festgelegt werden. Das Ergebnis hängt stark von der Denkweise der Teilnehmer ab, da die Richtung der Grundform nicht vor-






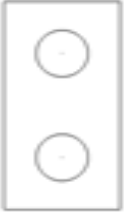
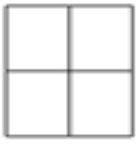

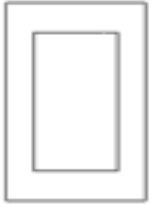


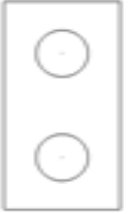
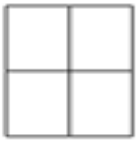

#### 4. Konstruktionsmethodik

gegeben ist. Darum wurde anschließend eine Spezifikation in tangential, transversal und axial eingeführt. Die Achsdefinition ist in Bild 34 zu sehen.

Da alle Elemente auch mehrfach nebeneinander vorkommen können, wurde die Anzahl noch in die Variantenbildung einbezogen. Da auch Negativ-Formen, die vom Klebstoff befüllt werden und dann einen Formschluss bilden, berücksichtigt werden sollten, ist die Zeile „Negativ-Struktur“ eingeführt wurden.

In der Regel werden die Lösungspfade, die eine der Varianten ergeben, farblich markiert. Darauf wurden hier bewusst verzichtet, da die Anzahl der Varianten sehr hoch ist und die Markierungen unübersichtlich werden.

Tabelle 7: Morphologische Kasten

Nr.	Grundform	1	2	3	4	5	6
		rund	Dreieck	Viereck	Trapez	Welle	Treppe
Tangential		Absatz	Schräg	Gewellt	Schwalbenschwanz	Haken	
Transversal							
Axial							
Anzahl	1	2	3	4	5		
Negativ-Struktur	Zylinder	Quader	Pyramide	Halbkugel			

## 5. Fügen und Kleben

### 4.4. Bewerten der Lösungsvarianten

Grundsätzlich gibt es zwei bewährte Methoden zur Bewertung von Lösungsvarianten [23]:

- die Nutzwertanalyse
- die Bewertung nach VDI 2225

Die Nutzwertanalyse ist durch eine Gewichtung der Kriterien, nach denen bewertet wird, gekennzeichnet. Dabei werden die Gewichte mittels Zielsystem gefunden und ergeben in der Summe 1 oder 100%.

Für die Kriterien können dann 0-10 Punkte vergeben werden, wobei 0 Punkte eine unbrauchbaren Lösung und 10 Punkte die Ideallösung bedeutet.

Bei der Bewertung nach VDI 2225 ist nur eine Werteskala von 0-4 Punkten vorgesehen und die Kriterien werden gleich stark gewählt.

Tabelle 8: Bedeutung der Werte nach VDI 2225

<b>++</b>	ideal	<b>4</b>
<b>+</b>	gut	<b>3</b>
<b>o</b>	neutral	<b>2</b>
<b>-</b>	nur bedingt geeignet	<b>1</b>
<b>--</b>	keine Eignung	<b>0</b>

Da die Werte von 0-4 gedanklich nicht leicht abzuschätzen sind, ist eine Einordnung nach Tab. 7 oft hilfreich. Dabei werden ++ für die Ideallösung vergeben, o für eine neutrale Bewertung und - - für eine unbrauchbare Lösung. Durch + und - ergeben sich noch Abstufungen von den Extremwerten.

In der Regel eignet sich die Methode nach VDI 2225 für kleinere Probleme, während komplexere Lösungsvarianten mit der Nutzwertanalyse bewertet werden.

## 5. Fügen und Kleben

### 5.1 Grundlagen Kleben

Kleben gehört zu den Fertigungsverfahren der Hauptgruppe Fügen. Dabei werden mindestens zwei Oberflächen durch einen Stoffschluß miteinander verbunden. Dazu wird ein Klebstoff auf die zu fügenden Flächen aufgebracht. Dieser Klebstoff haftet an der äußersten Schicht der Oberfläche der Fügeteile. Dieses Anhaften wird Adhäsion genannt.

## Adhäsion

Der Effekt der Adhäsion entsteht durch die Randschichtmoleküle der Oberfläche. Innerhalb eines festen Stoffes sind die Bindungskräfte zwischen den Molekülen ausgeglichen und sorgen dafür, dass der Stoffzusammenhalt bestehen bleibt. Am Rand hingegen sind diese Bindungskräfte frei. Der Wirkungsbereich der Adhäsion ist nur sehr kurz und liegt deutlich unter den Längenbereichen der Oberflächenrauheiten. Deshalb können diese Kräfte ohne den Klebstoff als Verbindungsmittel nicht wirksam werden. Der Klebstoff muss darum sehr dicht an die Moleküle der Fügeflächen heran und diese sehr gut benetzen.

Eine weitere Voraussetzung ist eine saubere Oberfläche, die frei von trennenden Schichten wie Oxiden, Fett oder Staub ist. Deshalb sollten Oberfläche vorbehandelt und gereinigt werden. Am häufigsten ist eine mechanische Vorbehandlung wie Schleifen oder Bürsten zu finden. Hierdurch soll die Oberfläche aufgeraut werden, was eine Vergrößerung der Klebefläche mit sich bringt.

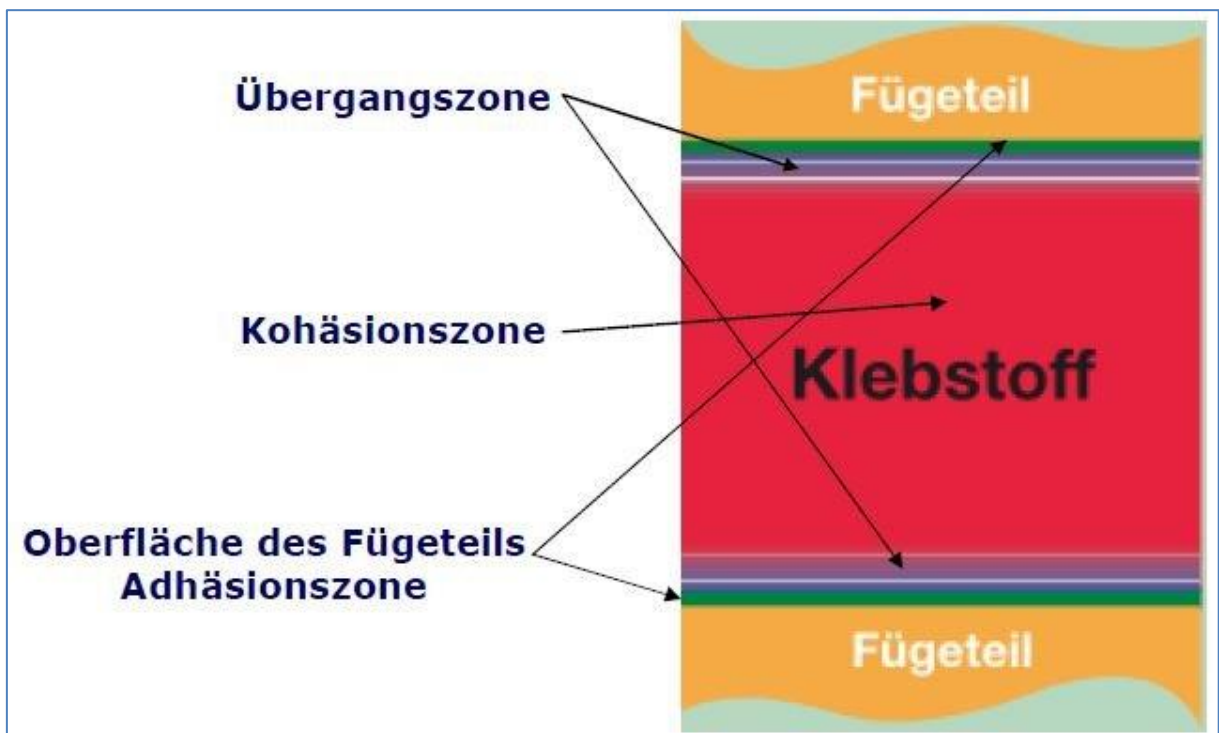


Bild 30: Klebezonen [24]

## Kohäsion

Während Adhäsion den Zusammenhalt zwischen unterschiedliche Stoffen beschreibt, ist die Kohäsion der Zusammenhalt innerhalb eines Stoffes (fest oder flüssig). Hiermit ist bei einem Klebstoff die Eigenfestigkeit nach dem vollständigen Aushärten gemeint.



## 5. Fügen und Kleben

### 5.2 Klebstoffe

Heutzutage verwendete Klebstoffe sind fast immer synthetische Polymerwerkstoffe mit einem ähnlichen chemischen Aufbau wie übliche Kunststoffe. Daher sind auch mechanische, chemische und physikalische Eigenschaften, die sich nach dem Aushärten ausbilden, vergleichbar.

Nach dem Prinzip der Aushärtung unterscheiden sich drei Arten von Klebstoffen [25]:

#### - physikalisch härtende Klebstoffe

Bei dieser Klebstoffgruppe wird das fertige Polymer in die Klebefuge gebracht. Hierzu werden vorher physikalische Verfahren angewendet, um den Klebstoff verarbeitbar zu machen. Danach verfestigt sich der Klebstoff im Spalt und verbindet die zu fügenden Teile.

Eine übliche Methode ist das Auflösen von Komponenten des Klebstoffs und das anschließende Verfestigen, indem das Lösungsmittel verdampft. Dabei sollte mindestens eine der Fügeflächen porös und diffusionsoffen sein, damit die Dämpfe entweichen können. Diese Art Klebstoff eignet sich gut zum Verkleben von geschlossenen Oberflächen mit porösen Materialien (Metall mit Holz, Glas mit Pappe, Keramik mit Baumwolle).

Eine andere Möglichkeit ist das Erhitzen und Erstarren eines Klebstoffs. Zuerst wird der Klebstoff erhitzt bis die Schmelztemperatur überschritten ist, um die Schmelze im Klebespalt einzubringen. Beim Abkühlen erstarrt der Klebstoff und verbindet die Teile. Das Verfahren ist durch die handelsüblichen Heissklebepistolen bekannt geworden.

Die physikalisch härtenden Klebstoffe lassen sich durch wiederholtes Hinzufügen von Lösungsmittel oder erneutes Erwärmen oft wieder lösen.

#### - chemisch aushärtende Klebstoffe

Der Klebstoff wird in die Klebefuge eingebracht und eine chemische Reaktion (z.B. Polymerisation, Polyaddition, Polykondensation) bewirkt das Aushärten und die Verbindung mit der Füge teiloberfläche. Die Aktivierung der chemischen Reaktion kann durch Kontakt (Ver mischen zweier Komponenten), Wärmezufuhr, Luftfeuchtigkeit oder bestimmte Strahlung, z.B. ultraviolettes Licht, erfolgen.

Oft bestehen diese Reaktionsklebstoffe aus zwei Komponenten, einem Grundstoff (Binder) und einem Katalysator (Härter) und werden deshalb Zwei-Komponenten-Kleber genannt. Durch das Verhältnis von Binder zu Härter kann die Reaktion zeitlich gesteuert werden. Die Zeit, die zum Verarbeiten zur Verfügung steht, wird Topfzeit genannt und ist nicht die Zeit der Aushärtung. Meist beträgt die Topfzeit ungefähr 20 min bis 60 min und die Aushärtzeit liegt

bei 4h bis 24h. Diese Zeiten können nicht nur durch die Härtermenge, sondern auch durch die Temperatur bei der Verarbeitung beeinflusst werden. Zu dieser Gruppe der Klebstoffe gehören die Epoxidharz- und die Polyesterklebstoffe.

Eine andere Untergruppe der Reaktionsklebstoffe sind die Ein-Komponenten-Klebstoffe. Diese oft als Sekundenkleber oder Superkleber bekannten Klebstoffe sind Cyanacrylate, die als zweite Komponente die Feuchtigkeit der Bauteile oder der Luft nutzen. Durch die Feuchtigkeit wird ein Katalysator aktiviert, der innerhalb von Minuten oder sogar nur Sekunden eine Aushärtung des Klebstoffs bewirkt.

Reaktionsklebstoffe bilden duroplastische Verbindungen. Diese sind also nicht mehr verformbar oder aufschmelzbar.

#### - sich nicht verfestigende Klebstoffe

Diese Sonderformen der Klebstoffe werden Haftklebstoffe genannt. Bei diesen funktioniert das Haften ohne Verfestigungsmechanismus (dauerklebrig). Bekannt ist die Anwendung als Beschichtung von Klebesteifen, wobei der Haftklebstoff auf ein Trägermaterial aufgebracht wird.

Bei den nachfolgend beschriebenen Versuchen wurden drei Arten von Klebstoff eingesetzt:

- Zwei-Komponenten-Polyesterklebstoff
- Zwei-Komponenten-Epoxidharzklebstoff
- Sekundenkleber (Cyanacrylat)

### 5.3 Belastungen der Fügestelle

In der Regel werden geklebte Fugen mit Zugspannungen belastet. Druckspannungen sind seltener zu finden und Schubspannungen sind durch die kleinen Abstände der Fügeteiloberflächen als Scherspannungen zu berücksichtigen.

In jedem Fall sollten Schälbeanspruchungen vermieden werden, da hierbei der offene Kleberand belastet wird. Die äußere Faser kann durch die Spannungsspitzen leicht überlastet werden, was zum Einreißen führt. In der Folge kann die geringere Fläche den Spannungen nicht widerstehen. Nach einem schnellen Rissfortschritt kommt es zum Abriss und dem Versagen der Fügestelle.

Da konstruktiv bedingt die Klebefuge bei axialer Belastung auf Zugspannung beansprucht wird, sollte die Fuge durch längs zu Belastungsrichtung verlaufende Flächen vergrößert wer-

## 6. Zugversuche

den. Diese Bereiche werden auf Scherung belastet, wobei die vergrößerte Fläche die Spannungen verringert.

## 6. Zugversuche

Die Zugversuche wurden innerhalb der Fakultät für Maschinenbau der Otto-von-Guericke-Universität durchgeführt. Dazu wurden die Prüfmöglichkeiten im Institut für Werkstoff- und Fügetechnik genutzt.

Die eingesetzte Materialprüfmaschine ist eine TIRAtest 2825 der Firma Tira GmbH. Dabei handelt es sich um eine zweisäulige elektromechanische Tischprüfmaschine. Da die maximale Prüfkraft dieser Universal Zug- und Druckprüfmaschine bei 25 kN liegt, ist sie ausreichend für die Versuche an Kunststoffen. Da die erwarteten mechanischen Eigenschaften der bei der additiven Fertigung eingesetzten Materialien ähnlich denen von Kunststoff sind, wurde die Eignung für die Versuche im Vorfeld positiv abgeschätzt.



Bild 31: Universalprüfmaschine TIRAtest 2835

Die Zugprüfversuche wurden nach den in der Norm DIN EN ISO 527 [14] festgelegten Prüfbedingungen durchgeführt. Die Raumtemperatur lag bei ca. 20°C und die Vorschubgeschwindigkeit bei 5 mm/min.

### Prüfkörper nach DIN EN ISO 527

Der Prüfkörper vom Typ 1B wurde für die Versuche ausgewählt. Dieser weist eine Gesamtlänge von 150 mm und eine Dicke 4 mm auf. Die Breite beträgt an den Einspannstellen 20 mm und 10 mm an der Prüfstelle. Die gerade Länge der Prüfstelle ist 60 mm und geht mit einem großen Radius (R 60) zur Einspannstelle über.

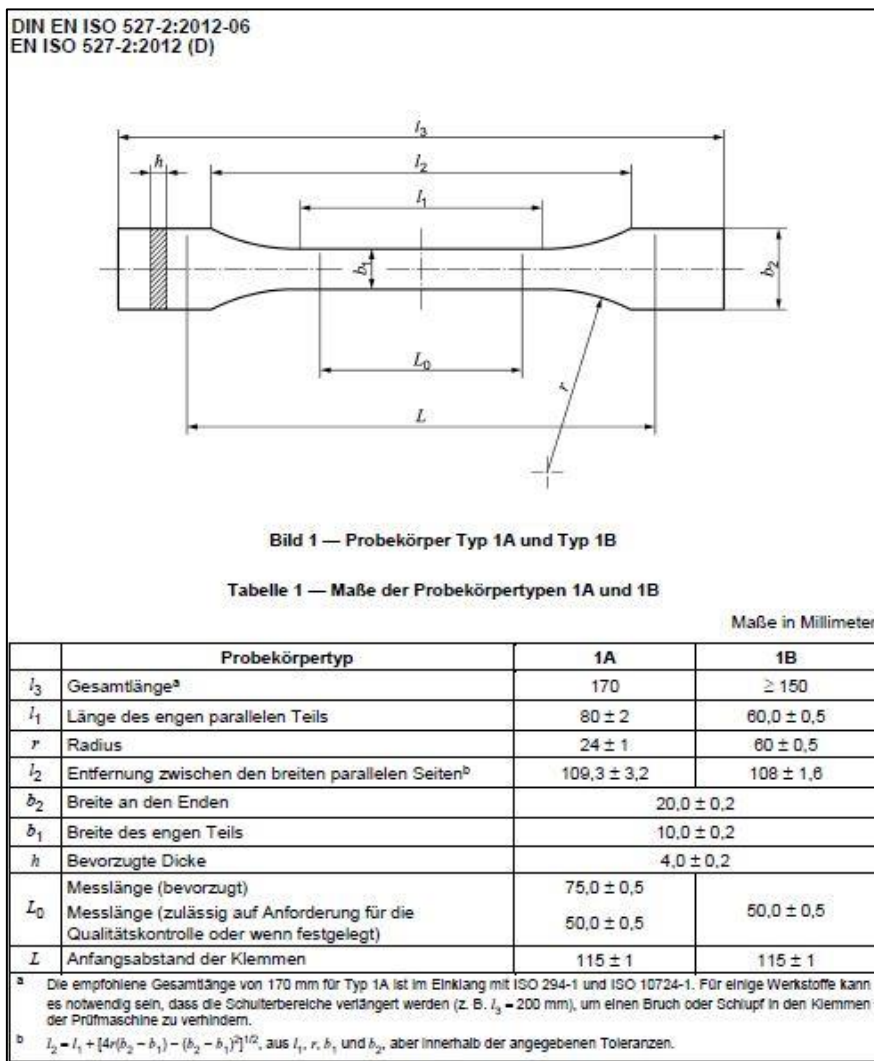


Bild 32: Auszug aus der DIN EN ISO 527 [14]

## 6.1 Erste Testreihe

Die Zugversuche sollten die Materialeigenschaften der mittels LOM (Laminated Object Manufacturing) erstellten Prüfkörper ermitteln. Dazu wurden die im CAD erstellten STL-Files an den Rechner der LOM-Anlage übergeben und 10 Proben gleichzeitig gefertigt.

## 6. Zugversuche

Als Ausgangsmaterial für die Proben wurde *VarioPaper plus* mit einer Dicke von 0,15 mm verwendet. Da die Probe eine Gesamtdicke (hier die Höhe) von 4mm haben sollte, ergeben sich 26,66 Schichten. Die Anlage kann aber nur ganze Schichten fertigen. Bei 26 Schichten ergibt sich also eine Höhe von 3,9 mm. Werden 27 Schichten übereinander gelegt beträgt die Höhe der Probe 4,05 mm. Da die Maschine aber den idealen Wert nicht überschreitet, wurden 26 Lagen gefertigt. Diese Rasterung der Maße ist bei zukünftigen Anwendungen der LOM-Anlage immer zu berücksichtigen.

Um einen statischen Mittelwert bilden zu können, wurden je drei Proben für eine Messung benutzt.

- 3 Proben wurden nur lackiert, um das Eindringen von Feuchtigkeit, z.B. aus der Luft zu verhindern. Durch Feuchtigkeit quellen die Proben auf und der Einfluss auf den verwendeten Klebstoff ist nicht vorhersagbar. (Lom1, Lom2, Lom3)
- 3 Proben wurden einseitig mit Glasfasern verstärkt und diese mit Polyesterharz fixiert. (Lom4, Lom5, Lom 6)
- 3 Proben wurden beidseitig mit Glasfasern verstärkt und die Glasfasern wurden mit Polyesterharz fixiert. (Lom8, Lom9, Lom10)
- 1 Probe wurde mittig gespalten und in der Mitte der Probe wurde eine Schicht Glasfasern einlaminieren (Lom7)

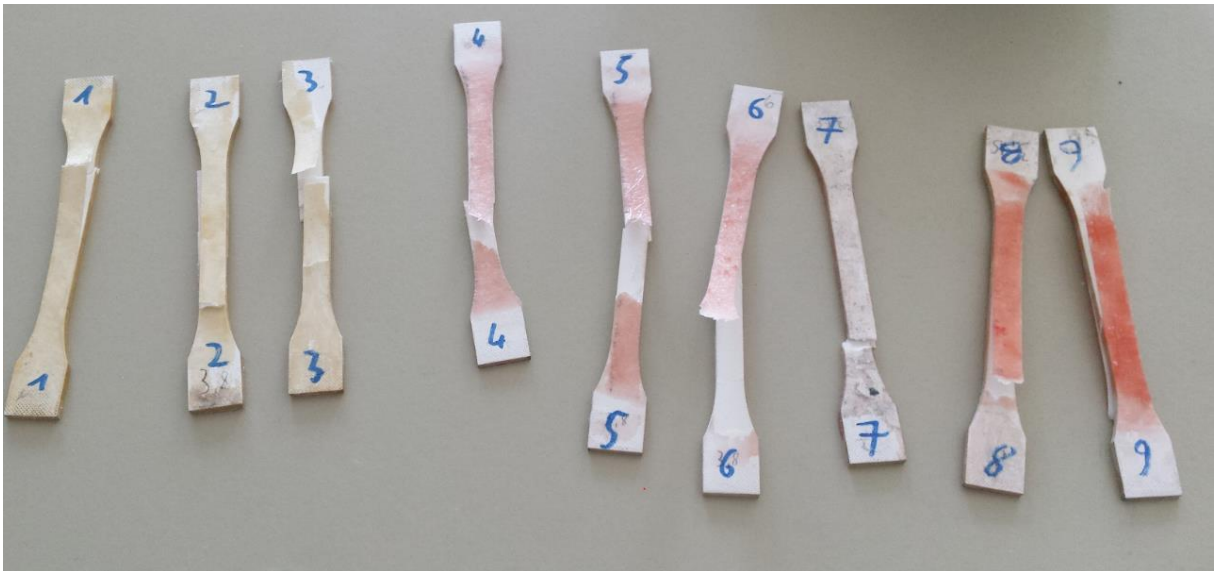


Bild 33: Testkörper der ersten Versuchsreihe

Da 10 Proben gefertigt wurden, aber nur 3 x 3 Proben benötigt wurden, konnte eine Probe für ein etwas ungewöhnliches Experiment genutzt werden. Dabei wurde die Probe 7 in der Mitte

entlang der Papierlage aufgetrennt und Glasfasern zwischen die Papierschichten laminiert. Auch hier wurden die Fasern in Polyesterharz eingelegt und damit die geteilte Probe wieder zusammen geklebt.

Das Ziel der Zugversuche war, die Zugfestigkeit zu ermitteln. Die Versuche mit den Probekörpern, die ein- bzw. beidseitig mit Glasfasern belegt waren, sollten zeigen, ob sich bei den Zugversuchen verbesserte Festigkeitseigenschaften ergeben.

Die Festigkeitseigenschaften spielen eine besonders große Rolle, wenn die Bauteile als Prototypen dienen, die auch mechanische Einflüsse zu ertragen haben. Besonders bei Funktionsmustern für Durchströmversuche, Modellen zur Abschätzung der Ergonomie und Haptik oder Einbaumuster zur Ermittlung der Montagereihenfolge sind Belastungen nicht auszuschließen. Hier sollte die Vorzugsrichtung beachtet werden, solange sie nicht der Entformbarkeit oder Wirtschaftlichkeit entgegen läuft.

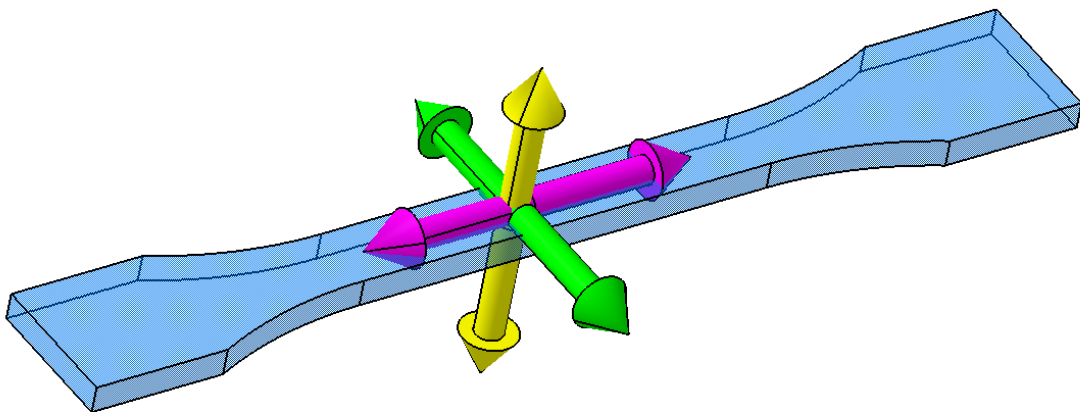


Bild 34: Achsendefinition für Zugproben

Um im Folgenden einen einheitlichen Sprachgebrauch zu gewährleisten, werden die Achsen der Standard-Zugprobe definiert:

Pink - axial

Grün - tangential

Gelb - transversal

## 6.2 Versuchsdurchführung

Nachdem die Proben auf der LOM gefertigt wurden sind, wurden sie entformt und gereinigt. Danach wurden sie vermessen:

## 6. Zugversuche

- Höhe: 3,8 mm (Abweichung > 0,1mm).
- Gewicht: 8,2 g (Abweichung > 0,1g)
- Breite: 10,0 mm - 10,3 mm

Da die Zugspannungen vergleichbar sein sollten, wurden die Abmessungen 3,8 mm x 10 mm = 38 mm<sup>2</sup> zugrunde gelegt.

Die Zugspannung wurde mit  $\sigma = \frac{F}{a}$  berechnet.

Die Proben wurden oben und unten in ein Spannfutter eingespannt und mit einer Vorspannung von 10 N belegt. Die Vorspannung führt zu einem Festziehen des Spannfutters, das über einen selbstverstärkenden Mechanismus verfügt.



Bild 35: Spannfutter mit Zugprobe

Anschließend wurde der Versuch gestartet und die Proben mit einer Vorschubgeschwindigkeit von  $\frac{1}{12}$  mm/s auseinander gezogen. Dabei wurden Zeit (s), Traversenweg (mm), Kraft (N) und Dehnung (mm) aufgezeichnet. Mit Eingabe des Wertes für die Fläche (38 mm<sup>2</sup>) konnte auch die Zugspannung in N/mm<sup>2</sup> protokolliert werden.

### Auswertung der Zugversuche

Die Proben Lom1, Lom2 und Lom3 waren lackiert und da zwei Proben zum Anfertigen einer Silikonform als Positivkörper dienten, waren die Proben Lom2 und Lom3 noch mit einem dünnen Silikonfilm bedeckt.

## Zugproben nach DIN 527 Typ 1B

Dicke: 3.8mm      Gewicht: 8,2g

### Lom 1: Lackiert

- Abriss am oberen Ende des Parallelen Dehnungsbereichs
- gerade waagrecht durchgerissen
- gering gezackte Bruchstelle
- äußere Lamelle zuerst gerissen.

Max. Kraft:            2811,91 N  
Max. Spannung:      73,99 N/mm<sup>2</sup>

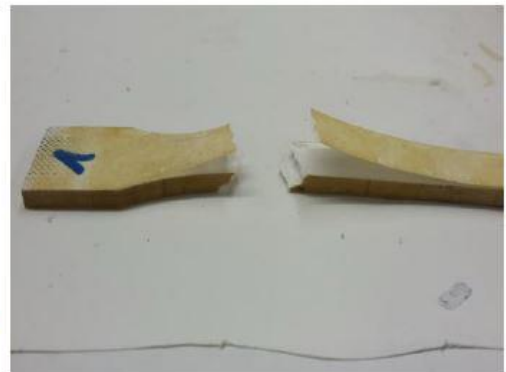
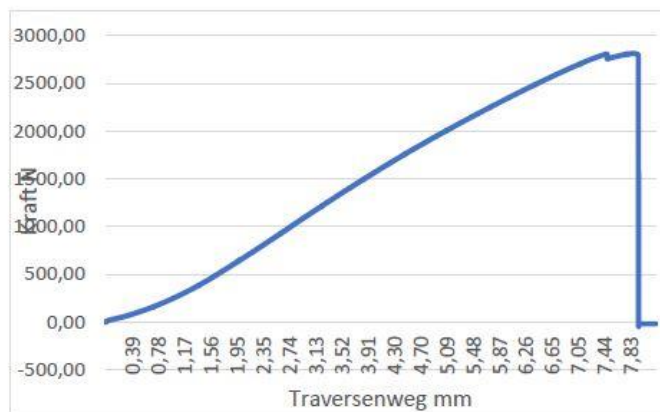


Bild 36: Protokoll der Zugprobe LOM 1

Im Protokoll wurde die Probe beschrieben, das Versagen charakterisiert, ein Diagramm und ein Bild eingefügt (siehe Bild 36).

Die Ergebnisse der Zugversuche der ersten drei Proben waren relativ gleichmäßig und ergaben eine max. Zugspannung von durchschnittlich 73,75 N/mm<sup>2</sup>.

Tabelle 9: Ergebnisse der Zugversuche\_1/1

	max. Kraft (N)	max. Zugspannung (N/mm <sup>2</sup> )	Traversenweg (mm)	Zeit (s)
Lom1	2811,9	73,99	7,88	94,5
Lom2	2785,8	73,31	8,1	97
Lom3	2810,8	73,97	6,78	81,3

Dabei war auffällig, dass der Kraftverlauf bei allen drei Versuchen einen negativen Sprung aufweist und dann bis zu max. Spannung weiter ansteigt. Dies ist durch den laminaren Aufbau der Proben zu erklären. Zuerst reißt die äußere lackierte Schicht, da der Lack eine Verprödung des sonst elastischeren Grundmaterials bewirkt.



## 6. Zugversuche

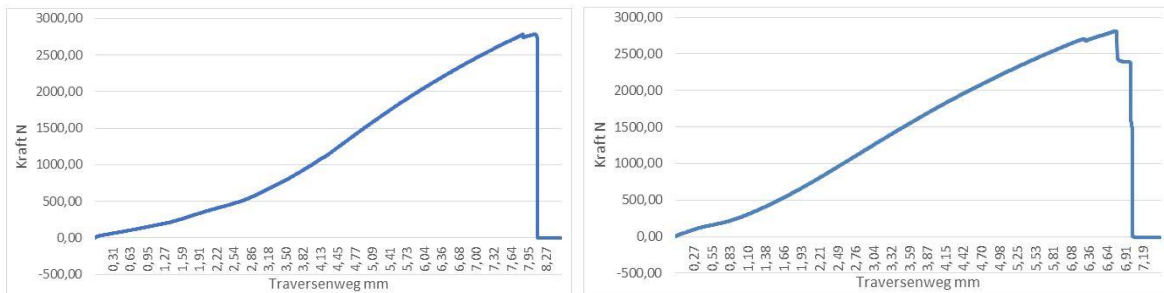


Bild 37: Kraftverlauf der Proben a) Lom2 und b) Lom3

Danach dehnen sich die Proben weiter, bis die nächsten Schichten reißen. Da die Spannung für die verbliebenen Schichten zu groß ist, versagt sofort die gesamte Probe (Abriss). Das schichtweise Versagen ist an der Delaminierung gut zu sehen.

Die Zugfestigkeit von 73,75 N/mm<sup>2</sup> übertrifft die in früheren Versuchen zur richtungsabhängigen Zugfestigkeit ermittelten Werte deutlich (siehe Diss. Ch. Birke). Diese sind mit Zugspannungen von max. 65,38 N/mm<sup>2</sup> für die 0°-Ausrichtung (also genau entlang der Papierlagen) gemessen wurden.

Die Proben Lom4, Lom5 und Lom6 wurden mit Glasfasern belegt und diese Fasern in Polyesterharz eingebettet. Das Polyesterharz ist ein Zwei-Komponenten-Werkstoff, der aus einem Harz (schnellhärtendes, aminbeschleunigtes Polyesterharz) und einem Härter (BPO-Paste, Dibenzoylperoxid) besteht. Der Härter ist rot eingefärbt, so dass beim Mischen der sonst klaren Flüssigkeiten die Durchmischung beurteilt werden kann. Nach dem Mischen der vorher genau abgewogenen Komponenten (3% Härter) verbleiben bei Raumtemperatur ca. 7 min zur Verarbeitung der Harzmasse. Dabei erkennt man das Aushärten an einer exothermen chemischen Reaktion. Die Masse wird also schnell warm, was die Aushärtung beschleunigt und sich durch eine zunehmende Zähigkeit bemerkbar macht.

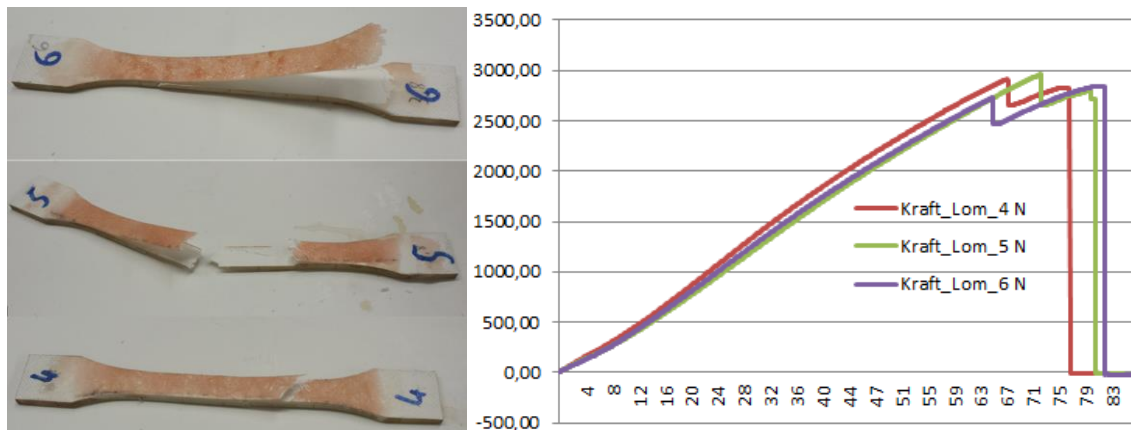


Bild 38: a) Proben Lom4, Lom5 und Lom6 mit b) Diagramm (Kraft über Zeit)

Tabelle 10: Ergebnisse der Zugversuche\_1/2

	max. Kraft (N)	max. Zugspannung (N/mm <sup>2</sup> )	Traversenweg (mm)	Zeit (s)
Lom4	2911,34	76,61	5,61	67,38
Lom5	2954,7	77,76	6,02	72,3
Lom6	2846,2	74,90	6,81	81,76

Das Einbetten der Fasern erfordert Geschick, um nicht mit den gesundheitsschädlichen Chemikalien in Berührung zu kommen. Es ist dabei auch nicht gelungen, alle Fasern in die Hauptbelastungsrichtung zu orientieren. Die gewebten Matten mit ihrer Ausrichtung in verschiedene Richtungen wurden einfach ausgeschnitten und auflaminiert.

Genau wie die Proben Lom4, Lom5 und Lom6 auf einer Seite verstärkt wurden, sind bei den Proben Lom8, Lom9 und Lom10 beidseitig Glasfasern in einer Polyestermatrix aufgelagert. Dabei wurde die Verarbeitung der Polyester Masse immer schwieriger, da die Aushärtung schon weiter fortgeschritten war.

Tabelle 10: Ergebnisse der Zugversuche\_1/3

	max. Kraft (N)	max. Zugspannung (N/mm <sup>2</sup> )	Traversenweg (mm)	Zeit (s)
Lom8	2477,6	65,2	6,18	74,12
Lom9	2491	65,5	5,33	63,94
Lom10	2818,78	78,76	6,56	78,76

Die Proben Lom4, Lom5 und Lom6 hatten im arithmetischen Mittel eine Zugfestigkeit von 76,4 N/mm<sup>2</sup>. Bei den beidseitig verstärkten Proben (Lom8, Lom9, Lom10) wurde der Mittelwert der Zugfestigkeit mit 69.2 N/mm<sup>2</sup> berechnet. Das ist nicht zu erwarten gewesen. In der Regel geht man davon aus, dass zusätzliche Schichten, besonders, wenn sie mit Glasfasern verstärkt wurden, die Zugfestigkeit erhöhen.

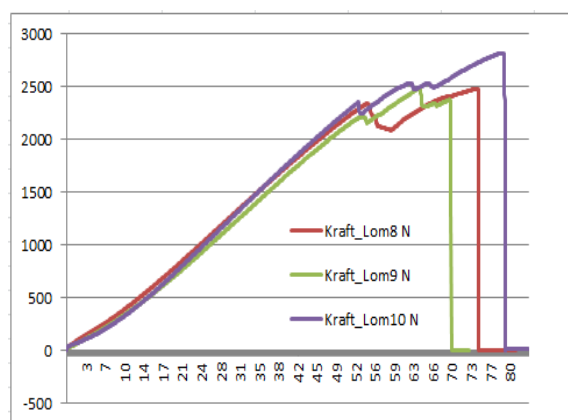


Bild 39: a) Proben Lom8, Lom9, Lom10 mit b) Kraft-Zeit-Diagramm

## 6. Zugversuche

### Interpretation

Die Verstärkung mit in Polyester eingebetteten Glasfasern, aber auch das Lackieren der Proben führte zu einer Erhöhung des E-Moduls der äußeren Papierschicht. Beim Zugversuch kam es durch diese Versteifung innerhalb der Probe zu Schubspannungen, die eine Delaminierung bewirkten. Da die dabei abgetrennten Schichten die Zugkräfte anschließend nicht mitgetragen haben, war die Belastung in den darunterliegenden Schichten größer und es kam früher zum Versagen der gesamten Probe.

### Schlussfolgerung

*Die lokale Verstärkung der Proben kann eine Delaminierung mit sich bringen und damit die Probe schwächen. Die zielführende, konstruktive Maßnahme ist hierbei, die Verstärkung bis zum Kräfteinleitungsort weiter zu führen. Dadurch werden die Schubspannungen im Bauteil vermieden. Dabei muss beachtet werden, dass die Verstärkung eine geometrische Veränderung des Bauteils hervorruft. Die zusätzliche Lage hat ein Aufmaß von ca. 1mm zur Folge.*

### Probe 7

Die Probe 7 war etwas anders aufgebaut als die anderen Proben. Während bei den anderen Proben die Glasfasern außen auf die Proben laminiert wurden, wurde die Probe 7 in der Mitte, entlang der Papierschichten gespalten. Dann wurde auf beide Seiten das durch Härter aktivierte Polyesterharz aufgetragen. Anschließend wurde eine vorher zurecht geschnittene Glasfasermatte auf eine Seite gelegt und die Probe zusammengefügt.

Tabelle 11: Lom7 (Versuch1/4)

	max. Kraft (N)	max. Zugspannung (N/mm <sup>2</sup> )	Traversenweg (mm)	Zeit (s)
Lom7	3092,9	81,39	6,26	75,18

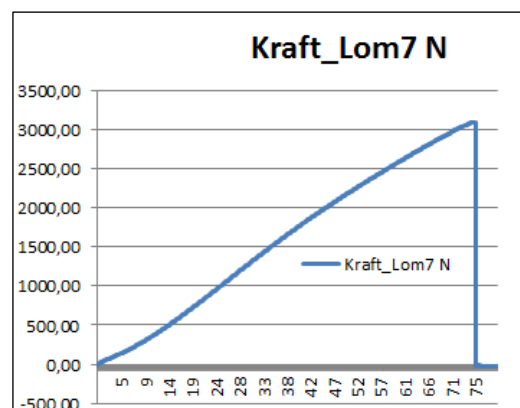


Bild 40: a) Probe Lom7 mit b) Kraftverlauf

Die Glasfasermatte war hierbei auf die komplette Fläche (mit Einspannstellen) zurechtgeschnitten und der Effekt der Delaminierung trat beim Zugversuch nicht auf. Dadurch stieg der Wert der Zugfestigkeit auf  $81,39 \text{ N/mm}^2$ . Diese Messung ist jedoch nur ein Einzelergebnis und es konnte kein statistisches Mittel gebildet werden. Dennoch ist zu erkennen, dass die Verstärkung an der Kraffteinleitungsstelle die Schubspannungen verringert und die erwartete Erhöhung der Festigkeit eintritt.

Nach den Zugversuchen wurden die Proben mit bloßem Auge begutachtet und die Beobachtungen im Protokoll festgehalten. Danach wurden mit einer Fotokamera Bilder gemacht, die zum Protokoll hinzugefügt wurden. Ein Auszug aus einem Protokoll ist in Bild 36 zu sehen.

#### Untersuchung mit dem Keyence VHX500



Bild 41: Digital Mikroskop Keyence VHX 500 [26]

Im Rahmen einer Produktpräsentation der Firma Keyence war es möglich, einige Proben mit dem optischen Mikroskop VHX 500 zu analysieren.

Im Bild 42 d) ist gut der Schichtaufbau der Zugprobe Lom7 zu sehen. Man kann auch erkennen, dass 26 Schichten das Bauteil bilden. Beim Teilen wurde aber nicht nach der 13. Lage getrennt, sondern zwischen der 12. Lage und der 14. Lage. Dadurch ist eine Seite etwas dicker als die andere.

Die im Bild 42 a) als etwas dunklere Schicht erkennbare Verklebung, hat eine Schichtdicke von  $100\text{-}120 \mu\text{m}$ . Darin sind die eingebetteten Glasfasen zu sehen.

Die oberste Schicht ist etwas delaminiert. Dies ist wahrscheinlich auf die bei der Versuchsdurchführung eingetragenen Druckspannungen zurückzuführen. Diese wurden durch das Spannfutter in die Probe gebracht. Im Bild 42 d) sind die als gleichmäßiges Muster auftre-

## 6. Zugversuche

tenden Kerben erkennbar, die durch die Oberflächenstruktur des Spannftters entstehen und das Rutschen verhindern sollen.

Das Mikroskopsystem verfügt aber nicht nur über optische Bildaufnehmer. Durch eine schnelle Abfolge von Einzelbildern konnten diese zu einem topologischen Scan (Bild 42 b) zusammengefügt werden. In diesem ist der Versatz der beiden Seiten der Probe zu sehen.

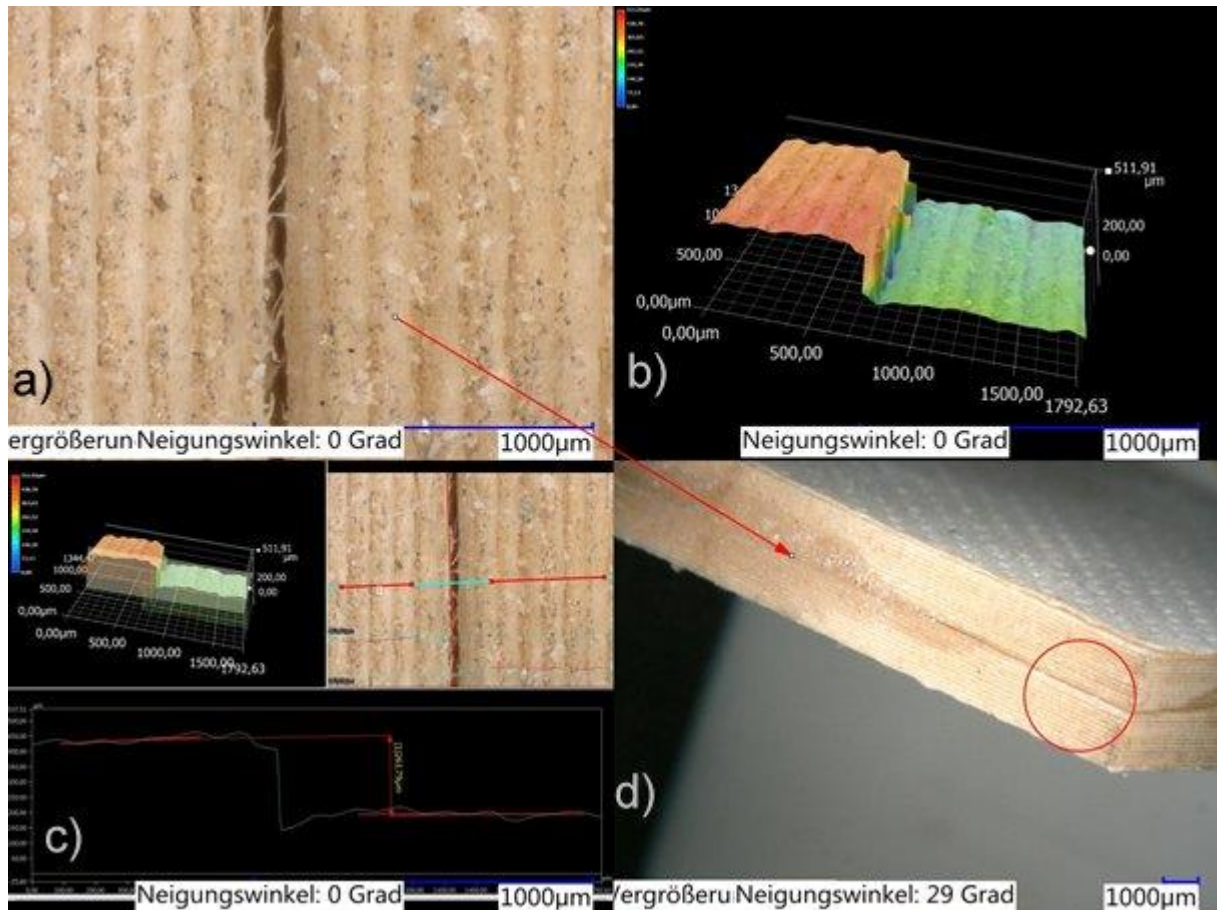


Bild 42: Darstellung der Aufnahmen der Zugprobe Lom7

Beim Verkleben gelingt es nur in der Theorie, die beiden Seiten einer Probe exakt aufeinander zu legen. In der Praxis war der Kleber aus Polyesterharz schon etwas verfestigt und wurde warm. Die Schichtdicke der Klebers war nicht gleichmäßig. Ein weiterer Aspekt ist, dass die Durchführenden Handschuhe trugen, um nicht mit der aggressiven Chemikalien in Hautkontakt zu kommen und dadurch das Hantieren erschwert wurde. Diese Einflüsse bringen Ungenauigkeiten in den Versuchsablauf und führen zu Abweichungen, die aber nur schwer messbar sind. Durch den Topologiescan war es aber möglich zu messen.

Entlang einer Linie wurde der Scan virtuell geschnitten und aufgeklappt. Der Schnitt (Bild 42 c) zeigt das Höhenprofil entlang der Linie. Die Erhebungen sind die Papierschichten und die Vertiefungen die Klebeschicht, die sich beim Erkalten und Erstarren zusammen zieht (hier

um geschätzte 5µm). Der Sprung in der Höhenlinie ist der Versatz beim Verkleben der Ober- und Unterseite der Probe. In dem Schnitt konnte gemessen wurden. Dazu wurde je eine gemittelte Linie durch das Profil vor und nach dem Sprung gelegt und der Abstand der Linien gemessen.

Die Messung ergab 263,79 µm, wurde nur an einer Stelle durchgeführt und konnte nicht wiederholt werden. Der Versatz beim Verkleben unter schwierigen Umständen beträgt ca. 0,25 mm. Die Klebeschicht weist eine Dicke von 0,10 mm - 0,12 mm auf.

Diese Messung sollte auch ohne das Mikroskop VHX500 nachgeprüft werden. Anschließend sind konstruktive Maßnahmen zu entwickeln, den Versatz beim Verkleben zu verringern und die Wirksamkeit ist nachzuweisen.

### 6.3 Zweite Versuchsreihe

Nachdem in der ersten Versuchsreihe Proben aus der Papierlaminieranlage LOM getestet wurden, um Materialkenndaten und Aussagen über Schichten und die Anisotropie zu erhalten, sollten in der zweiten Testreihe weitere Daten über Materialien und Ausrichtung gesammelt werden.

Dazu wurden Proben aus anderen Materialien angefertigt. Auf der Objekt Eden 330 wurden 10 Proben gedruckt. Diese waren flach und nebeneinander in Bauraum positioniert.

Fünf Proben vom Typ1B nach DIN 527, die auf der Objekt gefertigt wurden, sollten benutzt werden, um eine Silikonform herzustellen. Diese sollte dazu dienen, Proben aus Materialien herzustellen, die nicht mit einer generativen Fertigungsanlage gedruckt werden können. Ein solches Verfahren wird zu den indirekten generativen Fertigungsverfahren gezählt.

## 6. Zugversuche

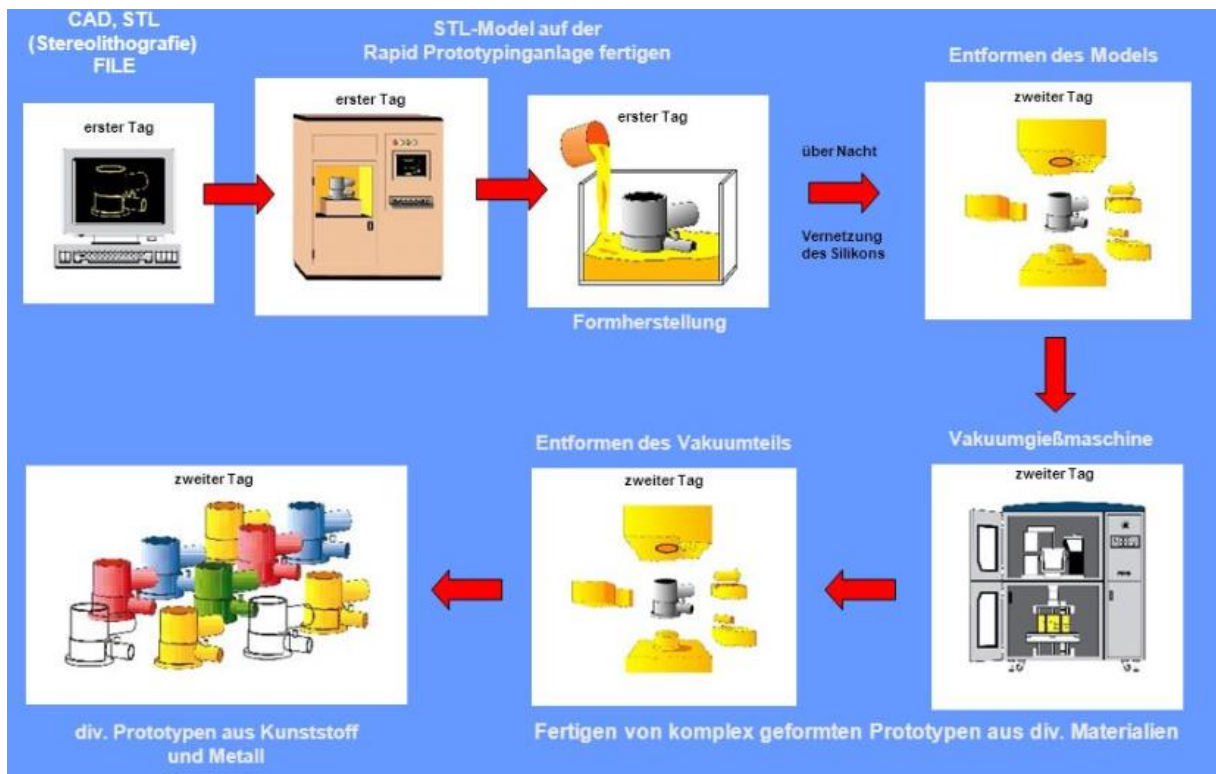


Bild 43: Prozesskette Vakuumgießen [27]

Die gesamte Prozesskette ist in Bild 43 zu sehen. Erst wird ein CAD-Modell am Computer erarbeitet. Dieses wird ins neutrale Datenformat \*.STL gespeichert, das die generative Fertigungsanlage einlesen kann. Dann wird ein Positivmodell generiert. Dieses wird in einer Form positioniert und mit Silikon ummantelt. Dabei kommt eine Vakuumgießanlage zum Einsatz, mit der das für den Abguss verwendete Silikon entgast wird. Dabei entweicht die in allen Flüssigkeiten gelöste Luft aus dem Silikon. Zusätzlich wird auch die Abgusskammer evakuiert, so dass auch in der Form keine Luftbläschen verbleiben.

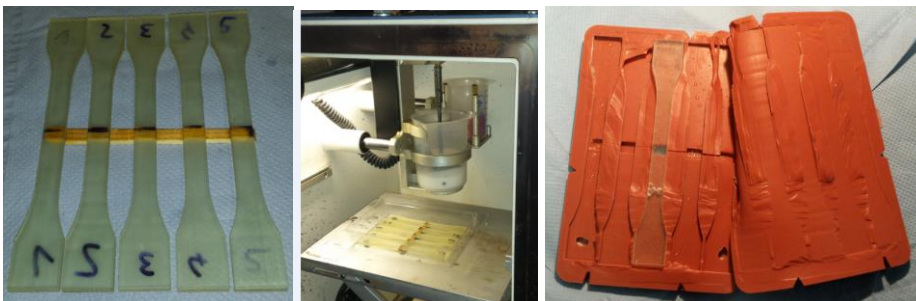


Bild 44: a) Proben als Positiv mit Einguss b) Vakuumgießkammer c) Silikonform

Nach dem Vernetzen und Aushärten des Silikons wird die Form aufgetrennt und das Positiv entnommen. Der verbleibende Hohlraum kann nun als Form für einen anderen formlosen Stoff dienen und bildet das Originalmodell aus dem CAD mit den Fehlern aus STL-Konvertierung (Facettierung) und Slicing (Treppenstufeneffekt) ab. Vor dem Gießen muss nur noch das Einguss- und Steigersystem angefertigt werden. Beim Zusammenfügen der Form muss, wie bei jedem Gießprozess, auf die genaue Lage von Ober- und Unterseite geachtet werden. Der eigentliche Guss findet wieder in der Vakuumkammer statt, damit sowohl das Abgussmaterial entgast, als auch die Luft aus der Form abgepumpt wird. Dadurch wird eine gute Formfüllung, auch bei komplexen Hohlräumen möglich.

### Epoxidharzabguss

Da Proben nach DIN 527 Typ 1B in höherer Anzahl für die verschiedenen Zugversuche benötigt wurden, sollte die Möglichkeit untersucht werden, die Proben kostengünstiger herzustellen. Die nach dem im Bild 43 zu sehenden Verfahren hergestellte Silikonform sollte dabei als Negativ zum Gießen verschiedener Kunststoffe dienen. Dazu wurde als erstes ein Epoxidharz gewählt, das als Zwei-Komponenten-Werkstoff zur Verfügung stand. Dieses wurde nach Herstelleranweisung gemischt und mit der Vakuumanlage in die gefertigte Silikonform gegossen. Die dadurch gefertigten Proben sind sehr gut maßhaltig (Abweichung > 0,1 mm) und deutlich kostengünstiger als die generativ gefertigten Proben.

*Es kann also gefolgert werden, dass sich generative Fertigungsmethoden auch für die Modellherstellung bei indirekten Herstellungsverfahren eignen, um damit die Formen für das Urformen zu erzeugen.*

### Zugversuche 2. Versuchsreihe

Für die 2. Reihe der Zugversuche wurden 16 Proben ausgewählt.

- 6 Proben gefertigt auf der Objet Eden 330 (Material Full Cure 720)
- 6 Proben aus Epoxidharz in der Silikonform abgegossen
- 2 Proben Lom gespalten und mit Epoxidharz und Kohlefasern verstärkt
- 2 Proben aus Epoxidharz verstärkt durch umgossene Kohlefasern



## 6. Zugversuche



Bild 45: vorbereitete Proben für die 2. Versuchsreihe

Die Zugversuche wurden wieder auf der Universal-Zug- und Druckprüfmaschine TIRAtest 2825 im Institut für Werkstoff- und Fügetechnik durchgeführt.

Tabelle 12: Ergebnisse der Zugversuche\_2/1

	max. Kraft (N)	max. Zugspannung (N/mm <sup>2</sup> )	Traversenweg (mm)	Zeit (s)
O1	348,04	8,7	0,61	7,36
O2	1826,3	45,65	3,76	45,14
O3	1768,3	44,2	3,81	45,78
O8	2300,42	57,5	5,99	71,94
O9	2302,04	57,55	5,77	69,22
O10	2218,2	55,45	5,65	67,82

Zuerst wurden die 6 Objekt-Proben geprüft. Dabei ergab sich ein sehr unterschiedliches Bild bei der höchsten Zugspannung und der Dehnung.

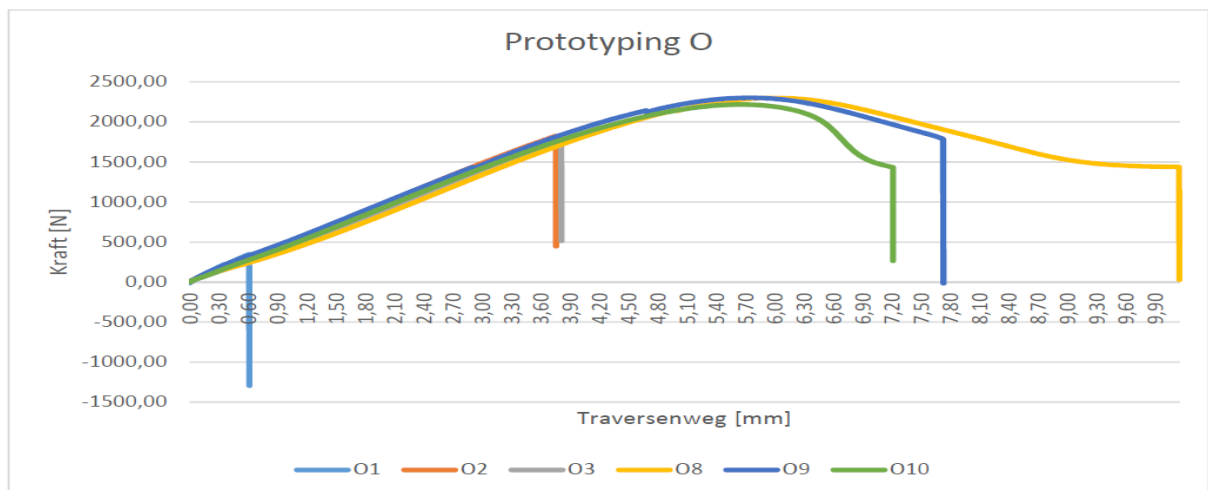


Bild 46: Diagramm Zugversuche\_2/1 (Objet)

Die Probe O1 versagte bereits bei 348N, was einer Zugspannung von 8,7 N/mm<sup>2</sup> entspricht.

Etwas höher waren die Werte der Proben O2 und O3 mit einer max. Zugspannung von 45,6 N/mm<sup>2</sup> bzw. 44,2 N/mm<sup>2</sup>. Bis zum Versagen stieg die Spannung linear zur Dehnung an und fiel abrupt bis zum Abriss ab.

Die Proben O8, O9 und O10 erreichten deutlich höhere Werte (2218 N bis 2302 N), was einem max. Zugspannung von 55,45 N/mm<sup>2</sup> bis 57,55 N/mm<sup>2</sup> entspricht. Es kommt auch nicht direkt zum Abriss, sondern nach der höchsten Zugspannung schnürt sich die Probe ein und reißt nach einer Dehnung zwischen 1,5 und 3 mm bei ca. 1400 N -1500 N ab.

### Interpretation

Die Proben O1, O2 und O3 wurden zur Herstellung der Silikonform genutzt. Dabei wurden sie nebeneinander platziert und mit einem Stück Holz verklebt (siehe Bild 44). Dieses Holz sollte das spätere Eingussystem bilden und die Proben beim Silikonabguss in ihrer Lage fixieren. Der eingesetzte Kleber war ein Sekundenkleber (Cyanacrylat).

An der Stelle, die verklebt war, konnte nach dem mechanischen Ablösen des Holzstücks eine erhöhte Rauheit und Vertiefung festgestellt werden. Genau an dieser Stelle, die bei allen fünf Proben zu finden war, ist die Probe gerissen. Es kann damit angenommen werden, dass diese Stelle beim Zugversuch eine Kerbe darstellt, die zu einer Schwächung des Querschnitts führt.

Nicht bewiesen ist die Vermutung, dass die chemischen Verbindungen im Sekundenkleber auch die tieferen Schichten veränderten. Dadurch kam es zu einer drastischen Abnahme der Zugfestigkeit, wie es bei Probe O1 zu beobachten war.

### Epoxidharzproben

Die erste Silikonform für 5 Proben erwies sich als nicht geeignet.



Bild 47: fehlerhafte Proben aus Epoxidharz

## 6. Zugversuche

Das verwendete rote Hochtemperatur-Silikon war nicht transparent, so dass die Füllung der Form und die Einschlüsse von Luft nicht beurteilt werden konnten. Außerdem ist die Wandstärke zu gering gewählt worden, so dass es zu elastischen Verformungen bei geringen Kräfteinwirkungen kam. Schon das Durchhängen der Form führte zu inakzeptablen Formabweichungen. Die Folge waren Proben schlechter Qualität, die nicht für Zugversuche benutzt werden konnten.

Deswegen wurde eine neue Silikonform hergestellt, die aus transparentem Material besteht und größere Wandstärken aufweist. Damit können nur zwei Proben gegossen werden, bei denen aber sichergestellt ist, dass die Restluft oder die Ausgasungen aus der Form entweichen können.

Damit wurden Proben nach DIN 527 Typ 1B gegossen. Als Abformmaterial wurde ein Zwei-Komponenten-Epoxidharz verwendet. Sechs Proben wurden davon ausgewählt, mit denen Zugversuche durchgeführt wurden.

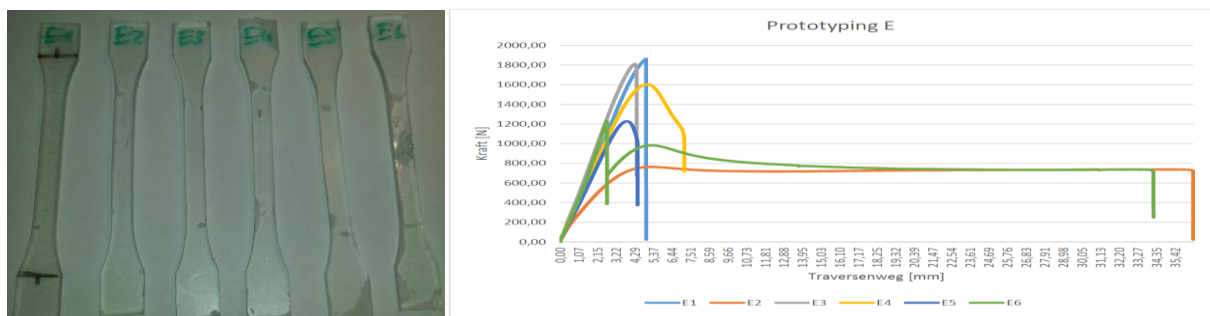


Bild 48: a) Proben aus Epoxidharz b) Diagramme der Zugversuche

Tabelle 11: Ergebnisse der Zugversuche\_2/2

	max. Kraft (N)	max. Zugspannung (N/mm <sup>2</sup> )	Traversenweg (mm)	Zeit (s)
E1	1864,32	46,6	4,96	59,54
E2	764,16	19,1	36,47	437,7
E3	1810,54	45,2	4,3	51,76
E4	1603,22	40,08	7,17	86,02
E5	1228,2	30,7	4,47	53,6
E6	1230,48	30,76	34,18	410,2

Die Zugprobe E1 zeigte leichte Blaseneinschlüsse, die bei näherer Betrachtung alle an der Oberseite des Bauteils zu finden waren. Der Abriss erfolgte durch die größte der, in der Gesamtheit kleinen Blasen.

Die Proben E2 und E6 waren deutlich elastischer als die anderen Objekte. Die max. Zugspannung betrug hier auch nur 19,1 N/mm<sup>2</sup> bzw. 30,76 N/mm<sup>2</sup>.

In kurzer Zeit mit geringer Dehnung, aber einer hohen Spannung riss die Probe E3 mit einer max. Zugspannung von 45,2 N/mm<sup>2</sup>.

Eine mittlere Dehnung und eine mittlere max. Zugfestigkeit konnte bei den Proben E4 und E5 gemessen werden.

### Interpretation

Die Proben wurden an mehreren aufeinander folgenden Tagen hergestellt. Dabei wurden die Komponenten für das Epoxidharz genau abgewogen und gemischt. Das Gemisch wurde unter Vakuum verrührt und dadurch entgast. Nach einer Rührzeit von 10 min bei ca. 40-50 hPa wurde das Epoxidharz in der Vakuumgießanlage vergossen.

Danach wurde die Form aus der Anlage entnommen und zum Aushärten über Nacht möglichst gerade gelagert. Am nächsten Tag wurden die Bauteile entformt und gereinigt. Das Epoxidharz für die nächsten Proben wurde angemischt, die Form vorbereitet und der nächste Abguss vorgenommen.

Die Vermutung liegt nahe, dass die Proben unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, weil sie unterschiedliche Zeit zum Aushärten hatten. Die zuerst gefertigten Proben hatten mehrere Tage, um komplett auszuhärten und die neuesten Proben nur einige Stunden.

Bei vollständiger Aushärtung ist die Zugfestigkeit am höchsten und die elastische Dehnung am geringsten. Hierbei kann man von einem spröden Materialverhalten ausgehen.

Dieses Verhalten sollte weiter beobachtet werden, um bei anderen Versuchen die Ergebnisse richtig beurteilen zu können.

### Verstärkte Proben

Die Proben der L-Reihe wurden alle mit Kohlefasern verstärkt. Bei zwei Proben wurde der Versuch unternommen, die Kohlefasern vorher in die Silikonform einzulegen und dann mit Epoxidharz zu umgießen.

Allerdings kam es bei der Herstellung zu einem rein handwerklichen Problem. Da die Kohlefasern nur lose in die Silikonform eingelegt waren ohne sie zu fixieren, wurden sie beim Eingießen der flüssigen Epoxidmasse weggespült. Das Ergebnis ist in Bild 49 zu sehen.

## 6. Zugversuche



Bild 49: Silikonform für Proben L1 und L2

Die Kohlefasern waren nur im hinteren Teil der Probe zu finden und nicht gleichmäßig über die beim Zugversuch belastete Prüfstelle verteilt.

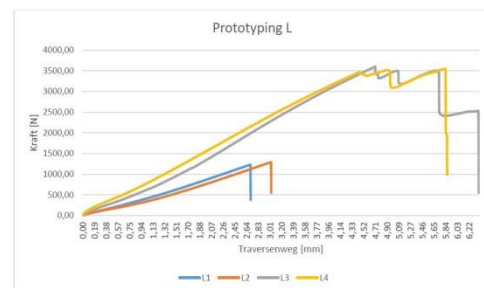
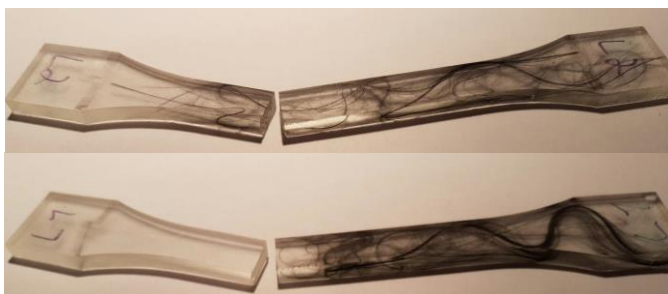


Bild 50: Zugversuche der L-Reihe a) L1 b) L2 c) Diagramm Kraft über Weg

Die Ergebnisse der Zugversuche L1 und L2 überraschten etwas, da die Zugfestigkeit mit 30,76 bzw. 32,32 N/mm<sup>2</sup> unter der von unverstärkten Proben lag.

Tabelle 14: Ergebnisse der L-Reihe

	max. Kraft (N)	max. Zugspannung (N/mm <sup>2</sup> )	Traversenweg (mm)	Zeit (s)
L1	1230,48	30,76	2,7	32,42
L2	1292,88	32,32	3,03	36,4
L3	3598,34	89,95	4,71	56,5
L4	3541,46	88,53	5,83	70,0

Die Proben ertrugen nur geringe Zugspannungen. Bis dahin stieg die Belastungskurve aber linear an. Es kam also nicht zu der elastischen Verformung vor dem Abriss, der bei den Proben E2 und E6 zu beobachten war. Die Probe L1 versagte an der Stelle, bis zu der die Fasern beim Gießen weggespült wurden. Der Einguss erfolgte in der Lage, die im Bild 49 zu sehen ist, von links und die Prüfstelle brach im unverstärkten Abschnitt.

Etwas anders war das Verhalten der Probe L2. Diese zeigte einen glatten Durchriss an einer Stelle, die zwar wenige Fasern aufweist, aber es wurden auch Fasern durchtrennt.

Bei den Proben L3 und L4 wurde wieder versucht, die Testkörper aus VarioPaper plus, die auf der LOM gefertigt wurden, in der Mitte zu spalten. Dieses Mal wurden aber nicht Glasfa-

sen in Polyester eingebettet, sondern Kohlefasen in Epoxidharz. Anschließend wurden die Proben wieder zusammen gefügt und mit dem Epoxidharz verklebt.

Die Proben L3 und L4 zeigten die erwarteten, sehr hohen Zugspannungen und einen gezackten Verlauf der Belastungskurve. Dieses deutet auf ein schichtweises Versagen infolge der Delaminierung hin.

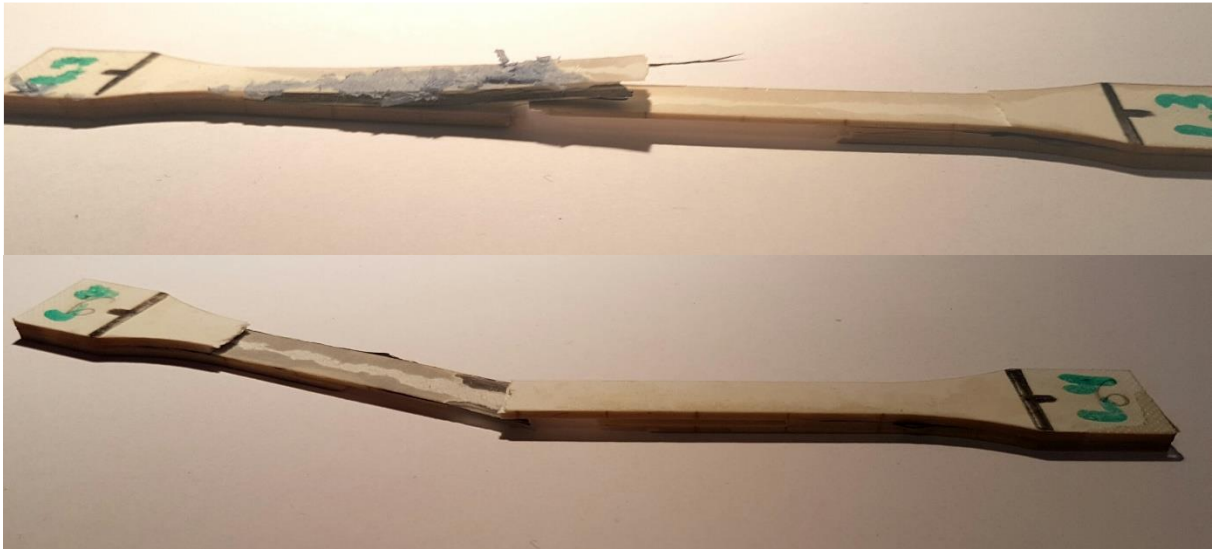


Bild 51: Proben L3 und L4 nach dem Zugversuch

Beim Vermessen der Proben nach den Versuchen wurde ein seitlicher Versatz zwischen 0,2mm und 0,5 mm festgestellt. Außerdem hafteten noch Reste des Papiers an, das verwendet wurde, um eine Trennschicht zu erzeugen. Diese sollte verhindern, dass die Probe durch hervorquellenden Klebstoff an den Gewichten zum Beschweren haftet.

## 6.4 Dritte Versuchsreihe

Die dritte Versuchsreihe hatte das Ziel zu ermitteln, wie Teile zu fügen sind.

Dabei sollte folgen Dinge ermittelt werden:

- Welche Anforderungen muss eine Fügestelle grundsätzlich erfüllen?
- Wie ist die Geometrie zu wählen
- Wie ist der Fügespalt zu dimensionieren?

Die Grundregel des Konstruierens „*Einfach, Eindeutig und Sicher*“ [3] führen dazu, dass die Konstrukteure oft sehr simple Fügstellen entwerfen.

## 6. Zugversuche

Zu diesen simplen Fügestellen, die sich in der Praxis vielfach bewährt haben zählen:

- stumpfer Stoß
- schräger Stoß
- einfache Lasche
- doppelte Lasche

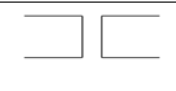
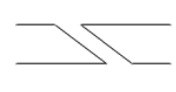
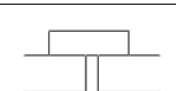

Stumpfer Stoß	
Schräger Stoß	
Einfache Lasche	
Doppelte Lasche	

Bild 52: einfache Formen

Diese Stoßarten werden beispielsweise bei Schweißverbindungen häufig eingesetzt. Der Vorteil hierbei ist, dass die Vorbereitung der zu fügenden Teile sehr einfach ist. Deshalb ist der gerade oder stumpfe Stoß die am meisten eingesetzte Variante. Der Nachteil ist aber die relativ kleine Klebefläche für den Fall, dass die Teile später verklebt werden sollen.

Bei Zugversuchen wird die Klebefläche des stumpfen Stoßes ausschließlich durch Normalspannungen belastet. Beim schrägen Stoß teilt sich die Belastung in so einem Fall je nach Winkel in Quer- und Normalspannungen auf.

In einem realen Bauteil sind die Belastungen nicht immer so idealisiert anzunehmen.

Die nächste Weiterentwicklung des Stoßes ist ein einfacher Absatz. Dieser wird bei Schweißteilen nur selten eingesetzt, da ein weiterer Bearbeitungsschritt notwendig ist.

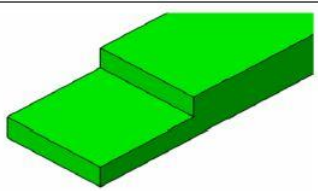
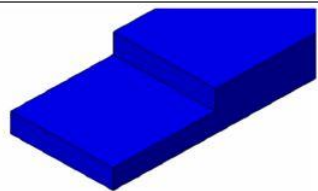
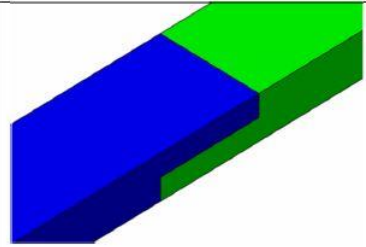
Nr.	Ansicht Part 1	Ansicht Part 2	Produkt
1			

Bild 53: einfacher Absatz

Um den Kraftverlauf direkt durch die Klebestelle zu legen, wurden extra Proben mit einem Absatz auf der Objekt Eden 330 angefertigt. Dabei wurde die Standardprobe nach DIN 527 geteilt und zwei Probeflächen mit Absatz zu einer Zugprobe zusammen geklebt. Insgesamt

wurden 24 halbe Probekörper mit Absatz gefertigt für die Versuchsreihe „Objet Sp x“. Dabei war der Absatz bei 12 halben Proben genau 2 mm hoch und bei 12 halben Proben 1,95 mm hoch. Bei Kleben sollte dadurch ein Klebspalt von 0 mm bzw. 0,1 mm entstehen, um mögliche Auswirkungen auf die Zugfestigkeit zu untersuchen.

Des Weiteren sollte an den Probekörpern der Reihe „Objet Sp x“ genau vermessen werden, damit die Genauigkeit der Lage der Fügeiteile zueinander eingeschätzt werden kann.

#### 6.4.1 Vermessung der Zugproben

Die 24 halben Proben wurden auf der Objet Eden 330 gedruckt. Dabei wurden sie so angeordnet, dass die Lasche immer unten liegt, um unnötige Stützen zu vermeiden.

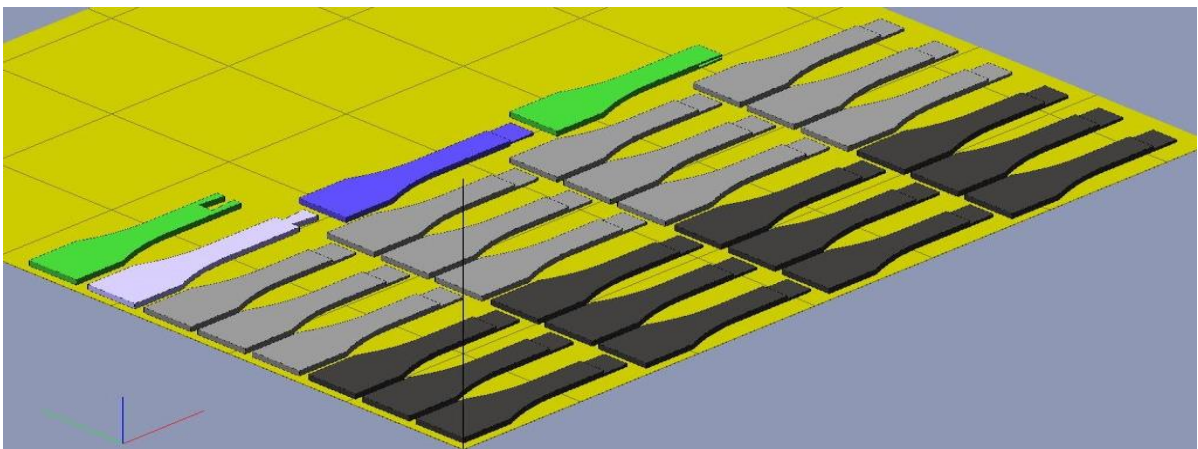


Bild 54: Probenfertigung auf der Objekt Eden 330

Zusätzlich sollten 2 Proben gefertigt werden, bei denen eine Verbindung über einen Schwalbenschwanz und eine Schwalbenschwanznut hergestellt wird. Da hierbei zwei Ausrichtungen der Nut (horizontal und vertikal) möglich sind, wurden beide Varianten erstellt. Insgesamt wurden also 28 halbe Probekörper generiert. Die Anordnung im Bauraum ist in Bild 54 zu sehen.

#### Probenvorbereitung

Nach der Fertigung und der Reinigung der Proben, für die im Abschnitt 3.3 die Kostenberechnung nachzulesen ist, wurden die Proben getrocknet. Das war notwendig, da die Proben mit einem Wasser-Hochdruck-Strahl gereinigt wurden.

Danach wurden die Proben mit einem 2-Komponenten-Epoxidharz verklebt. Dazu wurden die Proben auf eine glatte, ebene Unterlage aus Papier gelegt. Die Klebestellen wurden mit dem Epoxidharz bestrichen und die halben Proben möglichst gerade zusammengefügt. Durch die Unterlage sollte sichergestellt werden, dass der Klebspalt von 0 mm bzw. 0,1 mm genau eingehalten wird. Die Proben wurden nicht eingespannt oder zusammen gepresst, da



## 6. Zugversuche

Epoxidharz ein chemisch abbindender Klebstoff ist. Nach dem Ausrichten und Kleben wurden die Proben 24 Stunden zum Aushärten des Klebstoffes ruhen gelassen.

### 3D-Scannen

Die Proben wurden mit einem 3D-Scanner vermessen, um die Genauigkeit der Positionierung und Lage der Probehälften zueinander beurteilen zu können. Dazu wurde ein Scanner der Gesellschaft für Optische Messtechnik (GOM) genutzt. Der ATOS Compact Scan 2M ist ein hochauflösender 3D-Digitalisierer, der schnell und genau ein Messobjekt erfassen kann [28].

Er besteht aus einem Projektor und zwei Sensoren. Der Projektor erzeugt ein Streifenmuster, das von zwei optischen Sensoren (Kameras) aufgezeichnet wird. Über eine zweifach ausgeführte Triangulation kann die Lage jedes Punktes im Raum berechnet werden. Abhängig vom Abstand der Sensoren und den eingesetzten Objektiven für Projektor und Kameras ergibt sich ein räumlicher Bereich, in dem die 3D-Punkte berechnet werden können. Dieser Bereich heißt Messvolumen. Bei der gewählten Kameraposition 300 ist das Messvolumen 125 x 90 x 90 mm (in Bild 55 als blaues Licht zu sehen). Darin werden in einem Abstand von 0.075 mm voneinander bis zu 2 x 2 Millionen 3D-Punkte erzeugt [28].

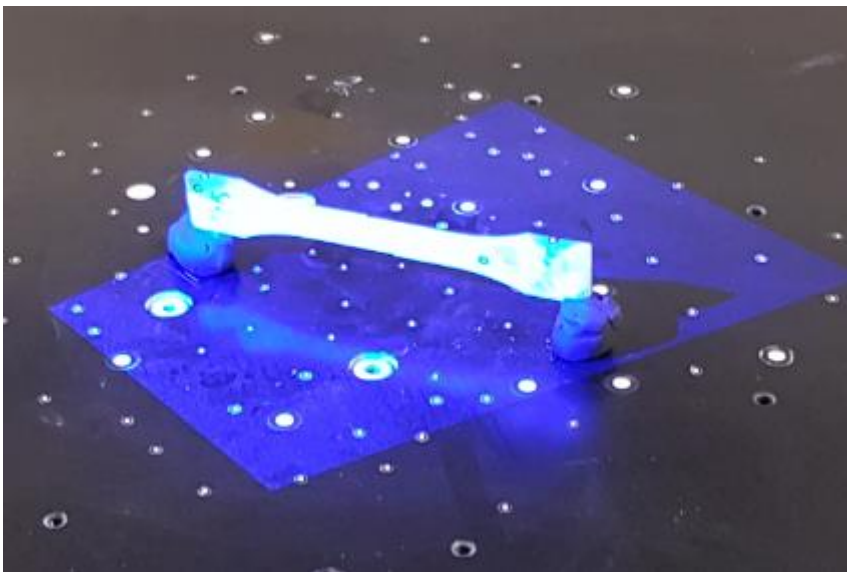


Bild 55: Messvolumen und mit Knetmasse fixierte Zugprobe

Diese Punkte werden zu einer Punktwolke zusammengefasst. Eine Objekt-Erfassung besteht dabei oft aus mehreren Messungen. Damit diese Einzelmessungen zusammengefügt werden können, werden auf dem Messobjekt und der Unterlage Referenzpunktmarken aufgebracht. Die einzelnen Punktwolken können über die Referenzpunkte in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert werden und ergänzen sich.



Bild 56: 3D-Scanner mit Drehtisch und Referenzpunkten

Wichtig ist dabei, dass beide Kameras immer mindestens 3 Referenzpunkte erfassen. Diese dürfen nicht überbeleuchtet oder unterbeleuchtet sein. Das Messobjekt darf in seiner Lage nicht zu den Referenzpunkten verändert werden. Darum wird der Sensor um das Objekt herum bewegt oder ein Drehtisch wird eingesetzt. Da zum Zubehör des am IMK verwendeten 3D-Scanner ein Drehtisch gehört, werden die Messungen deutlich vereinfacht und sind schneller.

Das Messobjekt wird bei der Vorbereitung also mit Referenzpunkte in unregelmäßigen Abständen beklebt. Dann wird es auf dem mit Referenzpunkten versehenen Drehtisch platziert. Das sollte so erfolgen, dass möglichst viel von der Geometrie erfasst werden kann. Wenn das Objekt auf einer Seite liegt, kann die unten liegende Seite nicht erfasst werden. Deshalb wurde bei den Zugproben mit einer Knetmasse gearbeitet, um die Proben zu fixieren, aber wenig Oberfläche zu verdecken.

Um mögliche Messfehler durch nicht kooperierende Oberflächen (transparent oder stark spiegelnd) zu vermeiden, wurden die Proben mit einem Kreidespray mattiert. Dann wurde

## 6. Zugversuche

die Funktion „Automatische Drehtischmessung“ genutzt und in 6 Schritten das Objekt um jeweils 60° versetzt gemessen.

Um die Rückseite zu vermessen, wurde das Messobjekt mit seinen Referenzpunkten umgedreht und eine neue Drehtischmessung durchgeführt. Über die gemeinsamen, in ihrer Lage zueinander unveränderten Referenzpunkte konnten beide Messungen zueinander transformiert werden. Dadurch ergab sich eine vollständige Abbildung der Oberfläche der Zugprobe.

Ein Flächenvergleich zu einer idealen Probe aus dem CAD-Modell ergab ein Fehlfarbenbild, in dem zusätzlich einzelne Messfähnchen an besonders interessanten Stellen angebracht wurden.

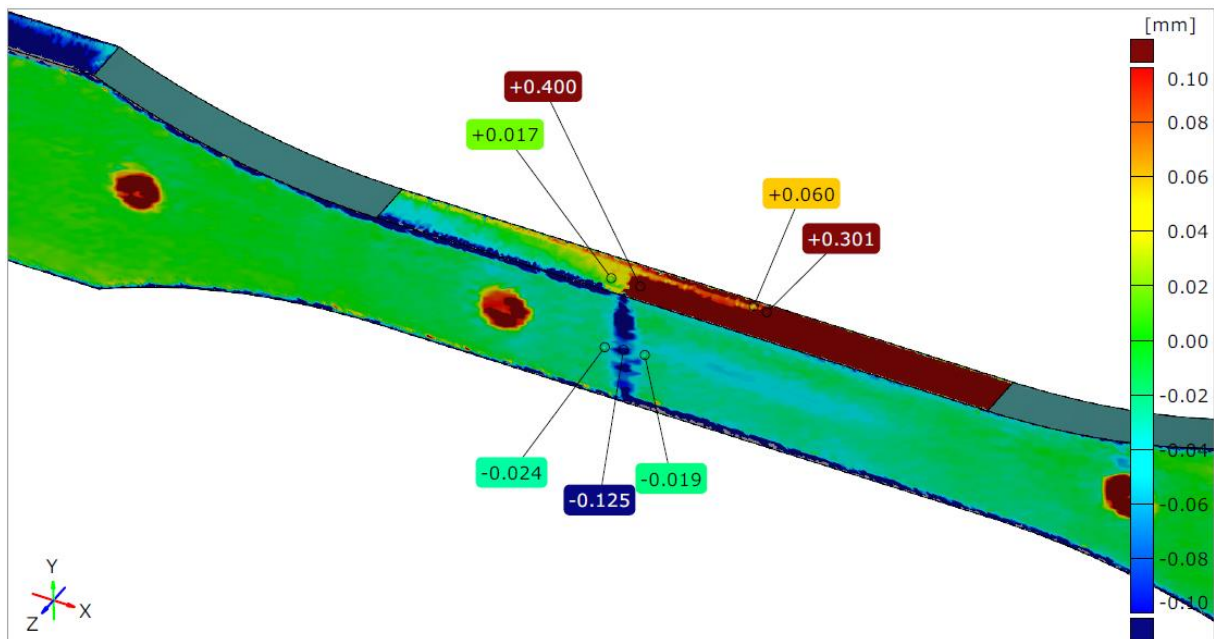


Bild 57: Fehlfarbenbild des Flächenvergleichs der Probe Sp4

### Auswertung der Geometrieüberprüfung

Im Bild 57 ist zu erkennen, dass die Teile der Probe Sp4 nicht perfekt zueinander liegen. Das wird in der Praxis nie der Fall sein, denn wenn man genau genug messen kann, ist immer eine Abweichung feststellbar. In der Höhe ist die Abweichung mit -0,024mm zu -0,019 mm sehr gering. Beide Probenhälften sind etwas zu klein aber mit ca. 20µm ist dies im Toleranzbereich. Die Differenz beträgt nur 5 µm und ist damit sehr genau.

Es ist auch erkennbar, dass der Klebstoff, der vorher den Spalt komplett gefüllt hatte um 0,125 mm geschrumpft ist. Das ist auf die Trocknung und den damit einher gehenden Volumenverlust zurückzuführen. In diesem Ausmaß ist das noch akzeptabel und führt nicht zur Schwächung der Probe beim Zugversuch.

Die seitliche Abweichung beträgt 400µm (0,4 mm). Das ist im deutlich tastbaren Bereich und als zu groß anzusehen. Am Ende des Absatzes ist die Abweichung nur noch 0,3 mm. Daraus kann gefolgert werden, dass die Probe nicht nur versetzt, sondern auch in einem Winkel zur Längsachse verklebt wurde.

Auf ähnliche Weise wurden die Ergebnisse der Flächenvergleichsmessungen für alle Proben ausgewertet. Im Folgenden sind mehrere Messungen zusammengefasst, um den Rahmen nicht zu sprengen.

Im Bild 58 sind die Bilder zu den Flächenvergleichsmessungen der Proben Sp1 bis Sp4 zu sehen.

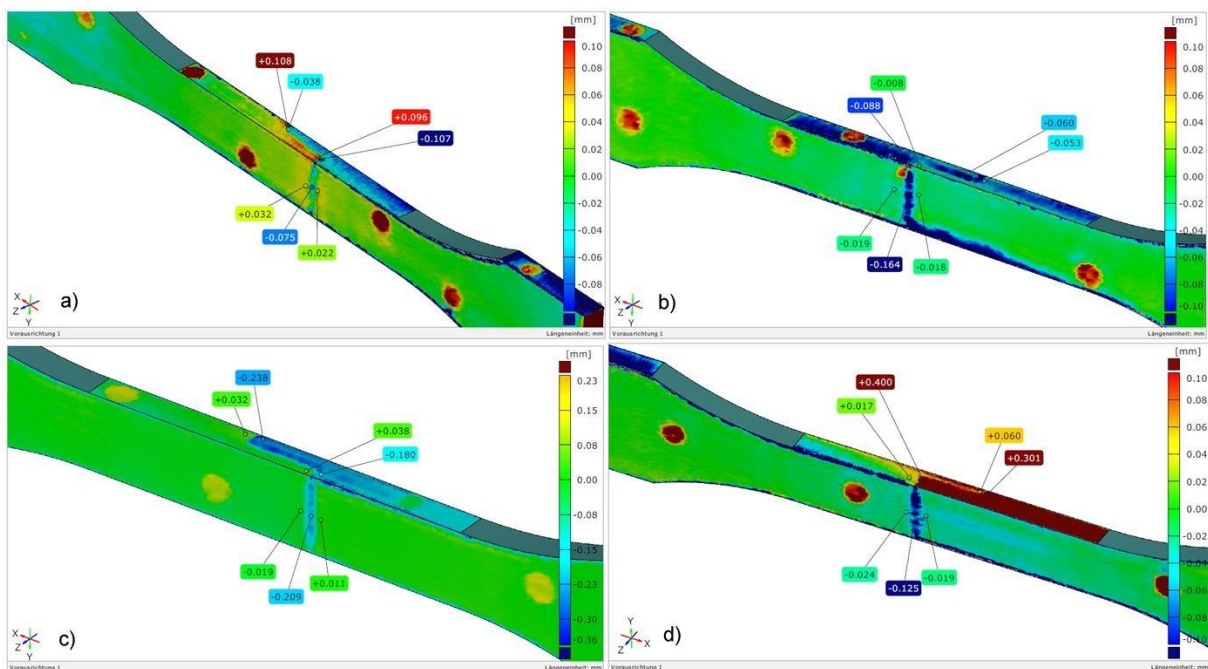


Bild 58: Flächenvergleich der Proben a) Sp1 b) Sp2 c) Sp3 d) Sp4

Wenn die automatische Ausrichtung der Punktwolke zum CAD-Modell, die als Grundlage für den Flächenvergleich dient, nicht perfekt übereinander gelegt werden konnte, sind beispielsweise die Höhenwerte insgesamt im positiven Bereich (alles Aufmaß). Darum sind bei der Auswertung nicht die absoluten Werte, sondern die Unterschiede relevant.

Die Probe Sp1 zeigt in der Höhe eine geringe Abweichung (< 0,01 mm). Die seitliche Abweichung beträgt ca. 0,2 mm. Die zunehmend ins blaue gehende Verfärbung weist auf einen Winkelversatz zwischen den Probenteilen hin.

Die Differenz der Absätze der Proben Sp2, Sp3 und Sp4 in vertikale Richtung ist jeweils unter 10 µm und damit sehr genau. Der seitliche Versatz liegt bei 0,06mm(Sp3), 0,26 mm(Sp4) und wie oben erwähnt 0,4mm (Sp4).

## 6. Zugversuche

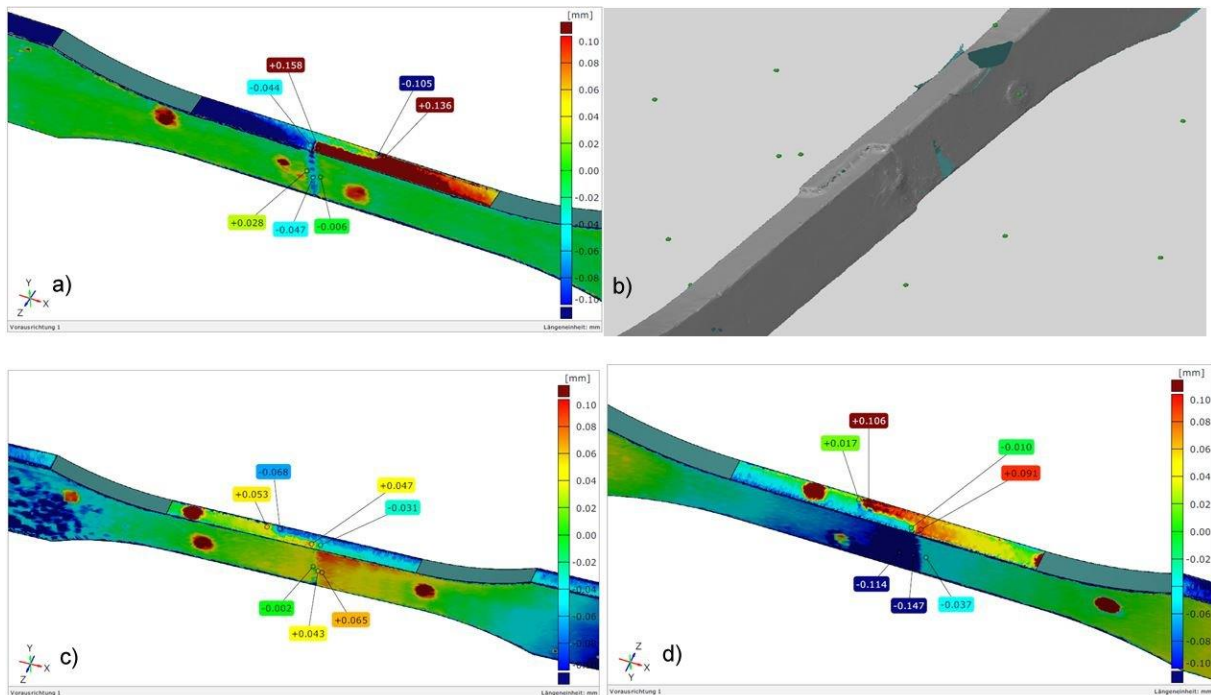


Bild 59: Flächenvergleich der Proben a) Sp5 b) Sp6 c) Sp7 d) Sp8

Bei den Proben Sp5 und Sp6 ist die seitliche Abweichung mit 0,23 und 0,6 mm sehr groß.

Da die Abweichung der Probe Sp6 so groß war, konnte kein Flächenvergleich gemacht werden, da das Programm zur Auswertung die Daten nicht aufeinander ausrichten konnte. Die Abweichung wurde taktil (mit einem Messschieber) am realen Bauteil nachgemessen.

Die Proben Sp7 bis Sp12 wurden mit einem größeren Absatz gefertigt, wodurch ein Spalt von 0,1mm entstehen sollte. Außen sollten die Flächen trotzdem in einer Ebene liegen und gerade verklebt werden. Das ist nicht immer gelungen. Besonders gut zu sehen ist das bei Sp8. Die Farbe wird immer dunkler zum Spalt hin. Dies zeigt an, dass die Probe nicht eben verklebt wurde, sondern zum Spalt gekippt ist. Dieser Effekt wurde auch schon bei Sp7 in etwas geringerer Ausprägung beobachtet (gelb ins orange gehend). Seitlich ist Sp7 um 0,11 mm und Sp8 um 0,12mm verschoben.

Die in allen Bildern zu sehenden roten Punkte sind die Referenzpunktmarken, die durch die Dicke des Papiers eine deutliche geometrische Erhebung darstellen.

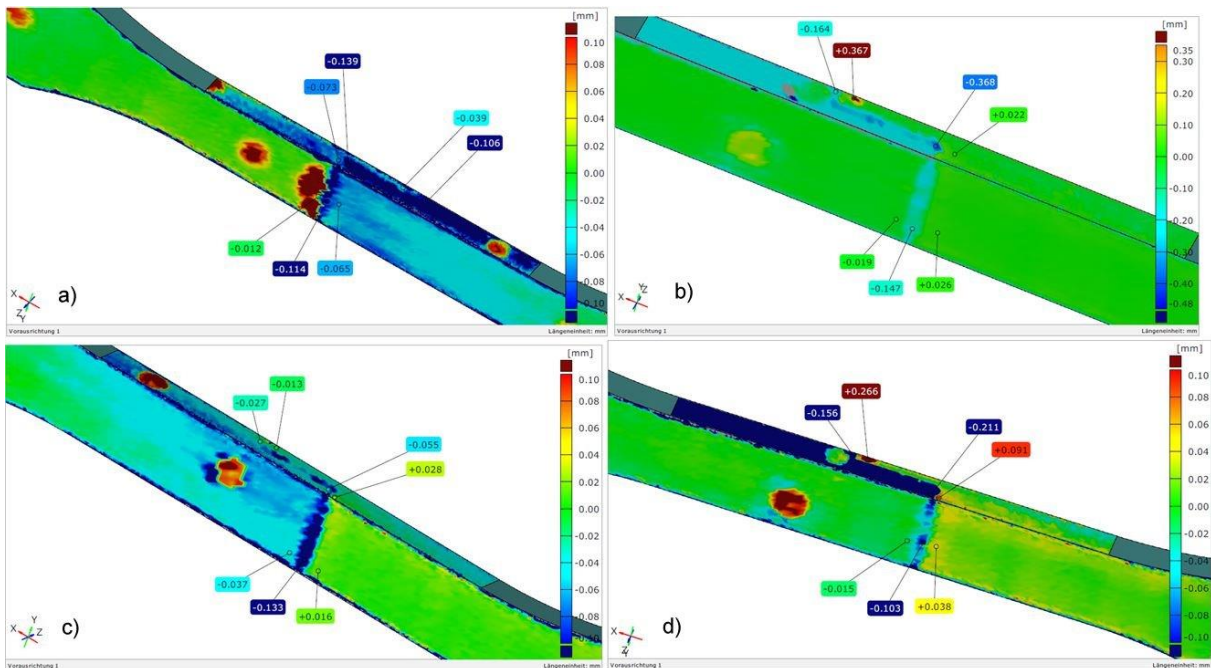


Bild 60: Flächenvergleich der Proben a) Sp9 b) Sp10 c) Sp11 d) Sp12

Bei der Probe Sp9 wurde der Spalt von 0,1 mm nicht eingehalten, wodurch außen ein Absatz entstanden ist. Dieser misst ca. 0,05 mm. Die seitliche Abweichung ist relativ gering (0,04 mm) und nur im Spalt größer.

Die Proben Sp10, Sp11 und Sp12 sind horizontal verschoben (0,3 mm, 0,1mm bzw. 0,4mm), aber in der vertikalen Differenz viel genauer (ca. 50µm oder nur 7µm bei Sp10).

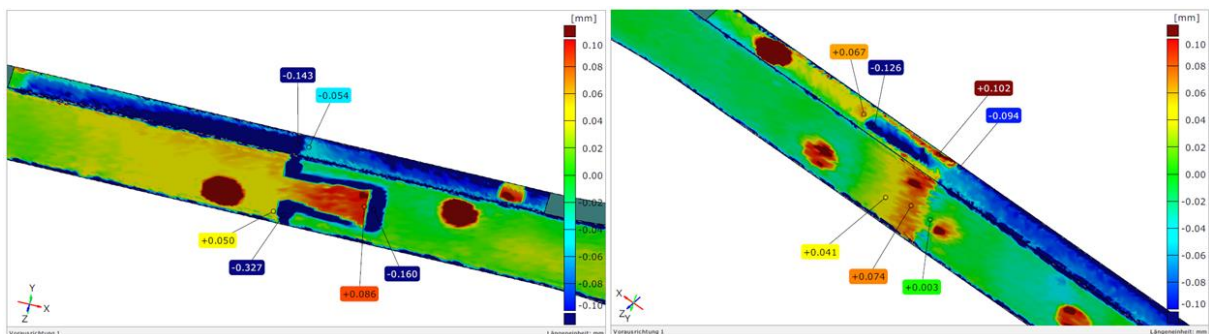


Bild 61: a) Schwalbenschwanz quer und b) Schwalbenschwanz seitlich

Auch die Proben mit den Schwalbenschwanzverbindungen in unterschiedlichen Ausrichtungen wurden mit dem 3D-Scanner digitalisiert.

Die Probe mit dem Schwalbenschwanz quer, ist nach dem Verkleben in der Position der Teile sehr gut maßhaltig (sowohl seitlich als auch in der Höhe unter 20 µm). Nur ein leichter Kippeffekt zum Spalt hin lässt die Abweichung über 0,03 mm steigen.

## 6. Zugversuche

Beim Schwalbenschwanz quer war die Klebefläche relativ groß und die Toleranzen eng gewählt, so dass schon beim Fügen ohne Klebstoff große Kräfte aufgewendet werden mussten. Nach dem Verkleben zeigte sich ein leichtes Aufspreizen der Verbindung. Durch die erhöhten Kräfte und einen fehlenden Anschlag, war die seitliche Abweichung mit 0,2 mm Versatz zu messen.

### Zusammenfassung

Die seitliche Abweichung der Probenhälften, die miteinander verklebt wurden, ist bei allen Prüfkörpern hoch (0,04 mm bis 0,6mm). Hier fehlt eine Positionierhilfe, die es ermöglicht die Bauteile besser zu fügen.

Die Abweichungen in der Höhe sind deutlich geringer. Die Absätze lassen sich relativ genau aufeinander platzieren. Der Abstand zwischen den Teilen, der einen Spalt ergeben sollte, führt wiederum zu größeren Ungenauigkeiten. Dabei werden die Probenteile gekippt oder zu sehr aneinander gefügt und es fehlt ein Anschlag.

Die Ergebnisse sind stark unterschiedlich und zeigen, dass die Position von Zufall abhängig ist. Da die Person, die die Proben verklebt, den Klebstoff nicht berühren sollte, kann auch nicht getastet werden, ob eine Abweichung vorliegt. Hier sind konstruktiven Maßnahmen zu ergreifen, die eine bessere Positionierung erlauben.

### 6.4.2 Fertigung der Proben für die Zugversuche

Für die Zugversuche der dritten Versuchsreihe wurde Proben gefertigt, bei denen die Erfahrungen aus den bereits absolvierten Versuchen und der Fertigung einfließen.

### Verbesserung durch Abstandshalter

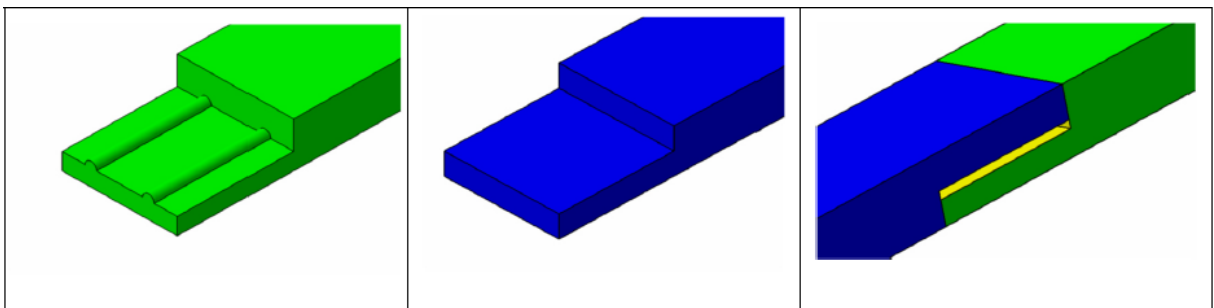


Bild 62: Abstandshalter

Als Resultat aus den Vermessungen der Proben mit Spalt (Sp7 bis Sp12) wurde ein Abstandshalter entwickelt, der es ermöglichen sollte, einen vorher definierten Abstand (0,1 mm,

0,25 mm bzw. 0,5 mm) einzuhalten. Dabei sollte der vertikale Versatz und das Kippen, das bei den Proben mit 0,1 mm Spalt nachgewiesen wurde, verhindert werden. In Bild 62 ist das Prinzip des Abstandshalters zu sehen. Es wurden zwei parallel zur Längsrichtung verlaufende halbrunde Rippen mit Radien konstruiert und im CAD-System Catia V5 umgesetzt.

Es wurden jeweils drei Proben mit dem Radius der Rippen von 0,1 mm, 0,25 mm und 0,5 mm auf der Objet Eden 330 angefertigt. Die zu verklebenden Gegenstücke waren gleich, so dass 9 halbe Proben mit einem einfachen Absatz von 2mm generiert werden konnten.

### Proben mit quer verlaufenden Schichten

Um die in Abschnitt 2.6 erwähnte Anisotropie überprüfen zu können, wurden drei Proben gefertigt, bei denen die Schichten quer zur Zugbelastung verlaufen. Dadurch sollten Materialkennwerte gesammelt werden, um die bezweifelte Gleichmäßigkeit der Eigenschaften in jede Richtung untersuchen zu können.

Dazu wurden die Zugproben nach DIN527 Typ 1B im Bauraum aufrecht angeordnet. Auf der Plattform wurden auch noch die 18 halben Proben für die Untersuchungen der oben erwähnten Abstandshalter platziert. Dies war ein sehr unwirtschaftliches Experiment, da sich die Bauzeit enorm verlängerte (11 h 15 min). Außerdem ist im Bild 63 bei den Proben links gut zu erkennen, dass der Druckkopf für das Stützmaterial an einigen Stellen verstopfte. Die Proben waren deshalb teilweise von schlechter Qualität und der Druckkopf musste ausgetauscht werden.

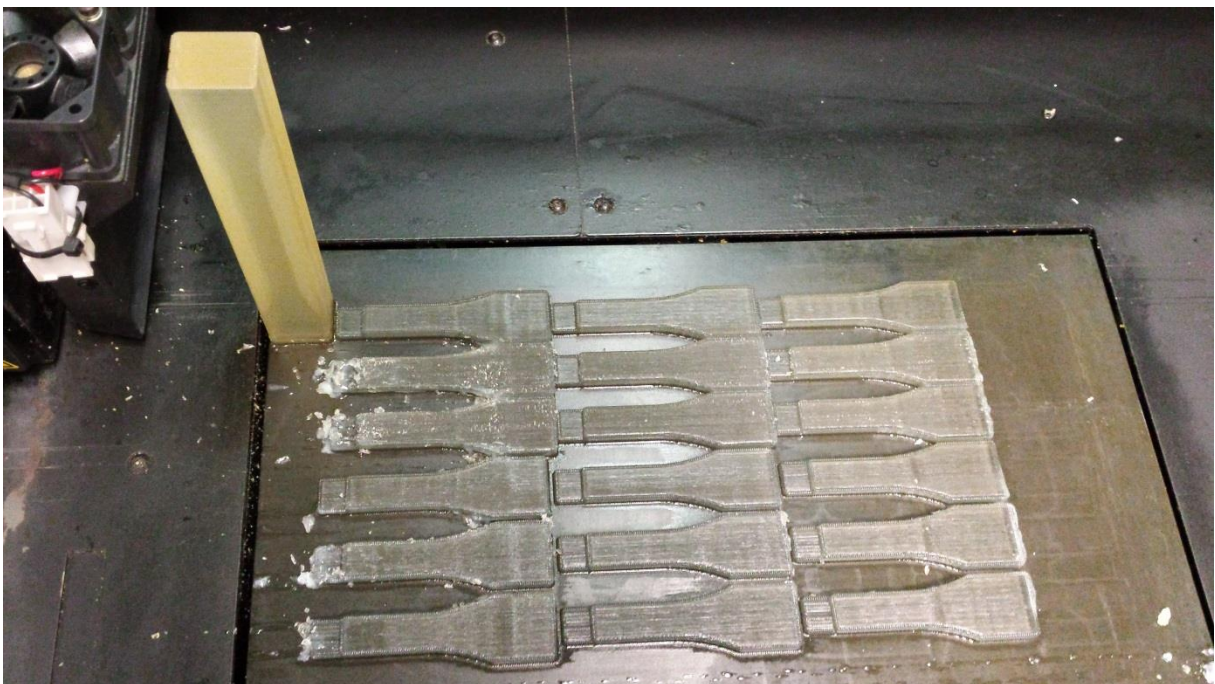


Bild 63: 18 halbe Proben mit Abstandshaltern und 3 Proben aufrecht stehend



## 6. Zugversuche

### Metallproben

Es wurden 20 halbe Proben aus Metall angefertigt. Der Werkstoff ist E235 (Stahl mit einer Streckgrenze von 235 N/mm<sup>2</sup>). Damit sollten unterschiedliche Klebstoffe und veränderbare Fügebedingungen untersucht werden. Das Ziel dabei ist, die schwer einschätzbaren Faktoren, wie das elastische Verhalten der Proben beim Versuch und die Klebkraft am Probenmaterial, zu vereinheitlichen. Des Weiteren sollte verhindert werden, dass die Probe außerhalb des eigentlichen Fügespalts versagt. Ein anderer Entscheidungsfaktor war auch, dass die Proben wiederverwendbar sind.

Die Proben wurden ähnlich angefertigt, zu der in der DIN 527 genormten Geometrie. Hierdurch sollte der Herstellungsprozess vereinfacht werden. Da Werkstoff E235 eine deutlich höhere Zugfestigkeit als die zu untersuchenden Klebstoffe aufweist, kann die Probe als starr idealisiert werden. Deshalb kann auch angenommen werden, dass nicht die Probe als Bauteil versagen wird und die große Rundung kann durch einen einfachen Absatz ersetzt werden.

Beim Erstellen der Bauteilzeichnung für die Mitarbeiter in der Werkstatt, kam es aber trotzdem zu einem Fehler. Es wurde eine Länge von 75 mm angegeben. Da sich die Proben aber um 10 mm überlappen, ergibt die Gesamtlänge nach dem Verkleben nur 140mm, statt den genormten 150mm.

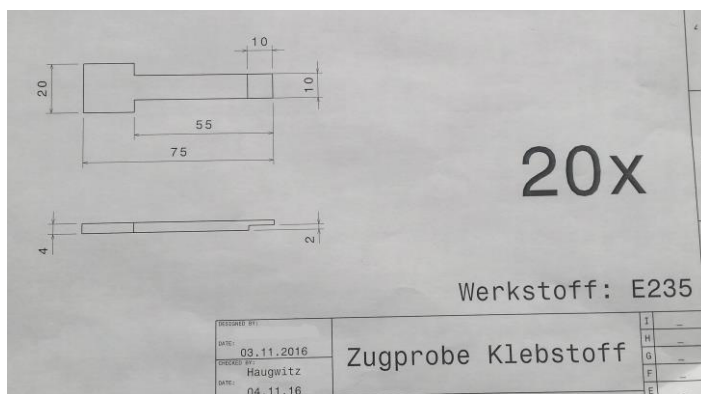


Bild 64: Ausschnitt aus der Werkstattzeichnung für die Zugproben

Da dieser Wert aber in der Software für die Zugversuche variabel eingegeben werden kann und die Proben weiterhin als starr gelten, wurden die 20 gefertigten Teile trotzdem für Zugversuche verwendet.

Die 20 Hälften wurden zu 10 Zugproben mit verschiedenen Klebstoffen verklebt:

- 3 Proben mit Polyesterharz
- 4 Proben mit Epoxidharz
- 3 Proben mit Sekundenkleber (Cyanacrylat)

Die Proben wurden dabei ohne zusätzliche Krafteinwirkung auf einer ebenen Fläche ohne Klebspalt gefügt.



Bild 65: Probenvorbereitung für die 3. Versuchsreihe

Um mit einfachen Stößen zu experimentieren, wurden Proben der vorhergehenden Versuchsreihen an der Versagensstelle mit Epoxidharz wieder zusammen geklebt. Dazu wurden die Proben ausgewählt, die nur elastisch verformt gewesen sind oder nur geringe plastische Verformung aufwiesen.

#### 6.4.3 Zugversuch der dritten Versuchsreihe

Insgesamt wurden in der dritten Versuchsreihe 44 Zugproben vorbereitet

- 6 Objekt-Proben mit 0 mm Spalt (mit 3D-Scanner vermessen) → Sp01 bis Sp06
- 6 Objekt-Proben mit 0,1 mm Spalt (mit 3D-Scanner vermessen) → Sp07 bis Sp12
- 2 Objekt-Proben mit Schwalbenschwanz (quer und seitlich)
- 10 Metallproben mit verschiedenen Klebstoffen verklebt
- 9 Objekt-Proben mit Abstandshalter (3 x 0,1 mm; 3 x 0,25 mm; 3 x 0,5 mm)

## 6. Zugversuche

- 3 Objekt-Proben mit Schichtverlauf quer zur Zugbelastung
- 8 Proben aus vorherigen Versuchen → am Stoß wieder geklebt (4 x Objekt; 4 x Epoxid)

Die Zugversuche wurden auf der Universal-Zug-Druck-Prüfmaschine TIRAtest 2825 durchgeführt.

### Proben mit Spalt von 0 mm

Tabelle 15: Ergebnisse der Zugversuche 3/1 (Absatz Spalt 0 mm)

	max. Kraft (N)	max. Zugspannung (N/mm <sup>2</sup> )	Traversenweg (mm)	Zeit (s)
Sp1	330,12	8,253	0,88	5,52
Sp2	464,32	11,608	1,03	6,72
Sp3	515,96	12,899	1,05	6,54
Sp4	596,72	14,918	1,31	8,14
Sp5	553,68	13,842	1,19	7,34
Sp6	520,86	13,02	1,12	6,98

Die durchschnittliche Zugspannung beim Versagen beträgt 12,4 N/mm<sup>2</sup>. Die einwirkende Kraft ist im Durchschnitt 496,94 N.

### Proben mit Spalt von 0,1 mm

Tabelle 16: Ergebnisse der Zugversuche 3/2 (Absatz Spalt 0,1 mm)

	max. Kraft (N)	max. Zugspannung (N/mm <sup>2</sup> )	Traversenweg (mm)	Zeit (s)
Sp7	328,18	8,20	0,72	4,56
Sp8	342,64	8,56	0,94	5,88
Sp9	294,7	7,36	0,59	3,8
Sp10	462,68	11,56	1,03	6,38
Sp11	611,98	15,3	2,02	12,54
Sp12	478,94	11,97	1,09	6,88

Die durchschnittliche Zugspannung beim Versagen beträgt 10,49 N/mm<sup>2</sup>. Die einwirkende Kraft ist im Durchschnitt 419,85 N.

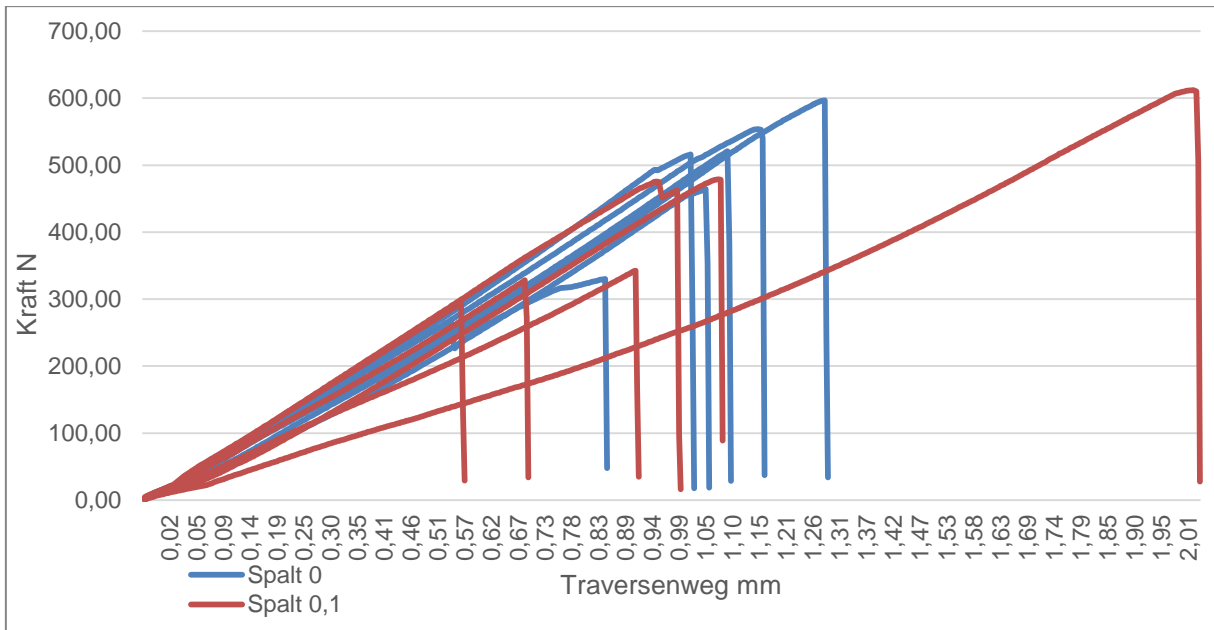


Bild 66: Kraft-Weg-Diagramm der Proben Sp1 bis Sp12

### Interpretation

Die Proben zeigten eine deutlich geringere Zugfestigkeit als erwartet. Die unbeeinflussten Proben hatten eine durchschnittliche Festigkeit von  $56,83 \text{ N/mm}^2$ . Bei einem Querschnitt von  $40 \text{ mm}^2$  versagten die vergleichbaren Proben aus der 2. Versuchsreihe O8, O9 und O10 bei einer durchschnittlichen Kraft von  $2273 \text{ N}$ .

Nur die Probe Sp1 versagte an der Klebestelle. Sonst kam es zum Abriss der Lasche (das Stück der Probe, das durch den Absatz einen geringeren Querschnitt aufweist). Dabei war der Bruch 6-mal genau an der Kante (glatter Durchriss, ungezackt) und 5-mal ca.  $2 \text{ mm}$  weiter nach innen (glatter Riss oder leicht gezackt).



Bild 67: Versagensstellen der Proben Sp1, Sp3 und Sp4

## 6. Zugversuche

Wenn durch den Absatz die eigentliche beanspruchte Fläche auf 20 mm<sup>2</sup> herabgesetzt wird, sind Zugkräfte von 1100 N vorher berechnet wurden. Mit Kraft-Werten von 496,94 N und 419,85 N versagten die Proben im Zugversuch aber deutlich früher.

Die aus Dauerfestigkeitsberechnung von Wellen bekannten Effekte der Kerbwirkung können die Festigkeit herabgesetzt haben. Dabei wird ein Absatz als Kerbe berechnet und die Höhe des Absatzes und der Radius gehen in die Rechnung ein. In diesem Fall ist die Höhe des Absatzes mit der Hälfte des Querschnitts sehr groß und durch die generative Fertigung ist kein Radius zu finden. Vermutlich ist deshalb die Festigkeit des Bauteils um mehr als die Hälfte herab gesetzt.

Zusammenfassend kann analysiert werden, dass die Proben, die ohne Spalte gefertigt wurden etwas größere Zugkräfte aufnehmen konnten, aber Sp1 bis Sp12 ungewöhnlich schnell brachen.

Zur Überprüfung dieser Vermutung werden für die 4. Versuchsreihe Proben gefertigt, die einen Absatz mit Radius haben.

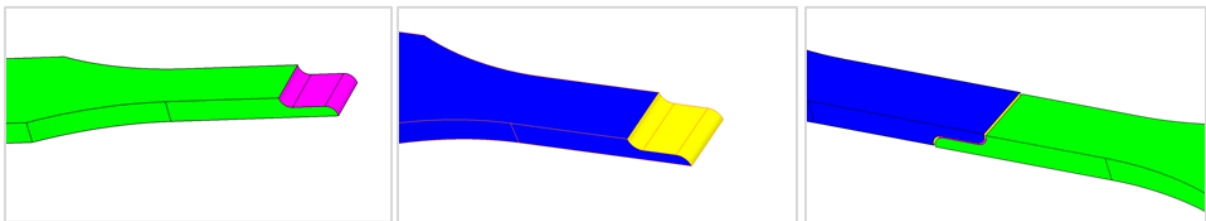


Bild 68: geteilte Probe mit Absatz und Radius

### Schwalbenschwanzverbindungen

Die Zugproben mit den Schwalbenschwanzverbindungen zeigten einen linearen Anstieg bis zum Bruch. Die Probe mit dem Schwalbenschwanz quer zur Belastung, versagte bei einer Kraft von 646,76N und die mit dem seitlichen bei 785,66N. Da die Spannung nach der Formel  $\text{Spannung} = \text{Kraft} / \text{Fläche}$  berechnet und die Ausgangsfläche mit 40 mm<sup>2</sup> konstant angenommen wird, ergibt sich die max. Spannung von 16,16 N/mm<sup>2</sup> bzw. 19,64 N/mm<sup>2</sup>

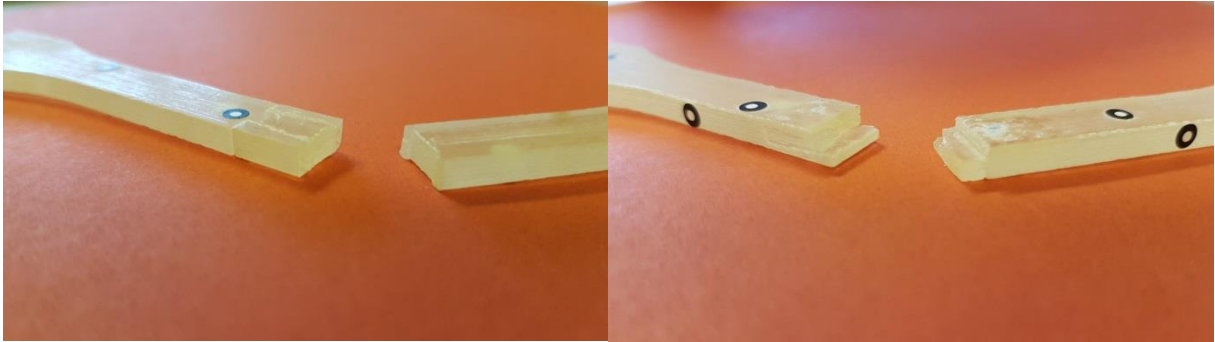


Bild 69: Schwalbenschwanz a) quer und b) seitlich

Der Abriss in Bild 69 a) ist an der Stelle lokalisiert, wo die Nut am breitesten ist. Die andere Probe versagte 2mm entfernt vom dünnsten Querschnitt des Stegs.

### Metallproben

Die Metallproben wurden unterteilt in:

- 3 Proben die mit Polyesterharz (Mp)
- 4 Proben die mit Epoxidharz (Me) und
- 3 Proben die mit Sekundenkleber (Ms) verklebt wurden.

Tabelle 17: Metallproben

	max. Kraft (N)	max. Zugspannung (N/mm <sup>2</sup> )	Traversenweg (mm)	Zeit (s)
Mp1	49,54	1,23	0,10	0,7
Mp2	406,64	10,16	0,52	3,18
Mp3	486,58	12,16	0,56	3,46
Me1	297,14	7,42	0,47	2,94
Me2	765,18	19,13	0,61	3,74
Me3	1161,60	29,04	0,95	5,76
Me4	1243,64	31,09	1,22	7,48
Ms1	307,86	7,69	0,39	2,46
Ms2	1352,00	33,8	0,94	5,74
Ms3	1150	28,75	k.A.	k.A.

Die Probe Mp1 wird als fehlerhaft verklebt angenommen und nicht weiter berücksichtigt. Der Mittelwert der anderen Proben mit Polyesterkleber ist 11,16 N/mm<sup>2</sup>.

Auch bei den anderen Klebstoffen ist jeweils die erste Probe viel früher gerissen als die anderen. Diese Werte werden bei der Beurteilung aber nicht ausgeschlossen.

Die mit Epoxidharz verklebten Metallproben brachen bei einer durchschnittlichen Kraft von 866,9 N. Das entspricht einer Zugfestigkeit von 21,67 N/mm<sup>2</sup>.

## 6. Zugversuche

Die mit Sekundenkleber geklebten Proben versagten bei 936,62 N und 23,41 N/mm<sup>2</sup>.

### Zugproben mit Abstandshaltern

Die Proben OSp1 bis OSp9 wurden mit einem Absatz gefertigt. Um Aussagen über die Größe des Spalts bei Klebeverbindungen generativ gefertigter Bauteile treffen zu können, wurde der Spalt mithilfe von zwei axial verlaufenden Rippen auf einen definierten Wert eingestellt. Dabei sollte ein Kippen verhindert werden und so eine gleichmäßige Fuge entstehen.

Tabelle 12: Proben mit Abstandshalter

	max. Kraft (N)	max. Zugspannung (N/mm <sup>2</sup> )	Traversenweg (mm)	Zeit (s)
OSp1 (0,1 mm)	428,58	10,71	1,08	6,72
OSp2 (0,1 mm)	408,1	10,2	1,00	6,24
OSp3 (0,1 mm)	489,52	12,24	1,32	8,18
OSp4 (0,25 mm)	409,24	10,23	1,12	7,01
OSp5 (0,25 mm)	583,88	14,6	1,46	9,04
OSp6 (0,25 mm)	636,68	15,91	1,78	11,00
OSp7 (0,5 mm)	325,56	8,14	1,33	8,38
OSp8 (0,5 mm)	586,32	14,65	1,48	9,14
OSp9 (0,5 mm)	502,8	12,57	1,32	8,20

Bei den Proben mit den Abstandshaltern und den unterschiedlichen Spalten versagten in 8 Fällen die Zugproben und nur einmal die Klebung (Probe OSp3).

Die Probe mit dem Spalt von 0,1 mm widerstand recht gleichmäßig einer gemittelten Kraft von 442 N.

Mit dem durch die Abstandshalter vorgegebenen Spalt von 0,25 mm wurde der Mittelwert der Kraft bei 543,3 N und bei einem Spalt von 0,5 mm mit einem Wert von 471,6 N gemessen.

### Schlussfolgerung

*Ein Spalt von 0,1 mm - 0,2 mm ist für die Verklebung von generativ gefertigten Bauteilen sinnvoll, da die Oberflächenrauheiten und Montagefehler ausgeglichen werden.*

### Normal zur Bauplattform ausgerichtete Zugproben

Tabelle 19: vertikal gedruckte Proben

	max. Kraft (N)	max. Zugspannung (N/mm <sup>2</sup> )	Traversenweg (mm)	Zeit (s)
Q1	770,06	19,25	2,31	14,22
Q2	807,10	20,17	2,65	16,32
Q3	886,24	22,15	2,46	15,08

Die Zugproben der Reihe Q mit der Schichtung quer zur Zugbelastung wiesen eine durchschnittliche max. Zugspannung von 20,52 N/mm<sup>2</sup> auf. Damit ist der Mittelwert der Kraft beim Versagen 821,13 N.

### Schlussfolgerung

Die vergleichbaren Proben (O8, O9 und O10) mit der Schichtung längs zur Belastung aus der zweiten Versuchsreihe erreichten Werte von ca. 56 N/mm<sup>2</sup>. Bei den Proben mit der Ausrichtung der Schichten quer zur Belastung ist der Wert der Zugspannung auf 36% gefallen. Damit ist die Isotropie widerlegt und der Werkstoff wird als anisotrop behandelt.

Die Ausrichtung der Bauteile im Bauraum der Fertigungsanlage muss bei krafttragenden Bauteilen so gewählt werden, dass die Hauptbelastung längs zur Schichtrichtung verläuft.

### An der Rissstelle wieder verklebte Proben

Tabelle 13: verklebte Stöße

	max. Kraft (N)	max. Zugspannung (N/mm <sup>2</sup> )	Traversenweg (mm)	Zeit (s)
St1	1070,3	26,75	2,44	14,88
St2	818,16	20,45	2,07	12,74
St3	399,32	9,98	1,26	7,84
St4	x	x	x	x
St5	190,56	4,76	0,75	4,86
St6	719,8	17,99	2,3	14,22
St7	1065,9	26,64	2,69	16,42
St8	502,98	12,57	1,44	9,00



Bild 70: wieder verklebte Proben der St-Reihe



## 6. Zugversuche

Gut vergleichbar sind innerhalb der St-Reihe die Proben St1, St2, St4 und St7. Diese sind aus Objet-Material und wurden in einem vorherigen Zugversuch getestet. Die Proben wurden dann am Stoß (der Reißstelle) mit Epoxidharz verklebt und erneut einem Zugversuch unterzogen. Leider ist die Probe St4 schon vor dem Versuch durch unsachgemäße Handhabung gebrochen.

Die Proben St1, St2 und St7 zeigten hohe Werte beim Zugversuch (1070,3 N, 818,16 N und 1065,9 N). Dabei ist die Probe St2 nicht an der Klebestelle gerissen, sondern versagt am Anfang der Rundung. Die Zugspannung ist durchschnittlich 24,62 N/mm<sup>2</sup>.

### Schlussfolgerung

*Da die wieder verklebten Stöße der Proben aus Objet-Material (Full Cure 720) ausschließlich mit Zugspannungen belastet wurden, kann angenommen werden, dass die Zugfestigkeit normal zur Lastrichtung bei Epoxidharzklebstoffen deutlich mehr als 20 N/mm<sup>2</sup> beträgt.*

Die Proben St3, St5 und St6 sind aus Epoxidharz gegossen. Die Proben St3 und St5 sind stark versetzt geklebt worden. Dabei entstand ein Absatz ähnlich der Proben mit Lasche und Spalt. Auch hier erwies sich der Absatz als Kerbe und die Proben versagten deutlich früher (399,32 N und 190,56 N) als die Vergleichsprobe (719,8 N).

## 6.5 Vierte Versuchsreihe

In der vierten Versuchsreihe sollten die Erkenntnisse aus den vorherigen Versuchen berücksichtigt werden und konstruktiv anspruchsvollere Verbindungsstellen untersucht werden.

Deshalb wurde die im Bild 68 gezeigte konstruktive Änderung umgesetzt und die Proben am besonders belasteten Querschnittsprung mit einem Radius versehen. Zur Überprüfung der Richtigkeit der Vermutung wurden sechs halbe Proben mit einem Radius von 2 mm (R1) gefertigt.

Damit die Proben beim Zugversuch möglichst in der zu untersuchenden Verbindungsfuge und nicht im gedruckten Material brechen, wurden die Proben der gesamten Versuchsreihe mit einer Höhe von 6 mm statt der in der DIN 527 vorgesehenen 4mm ausgeführt.

Die Proben mit Absatz und mit Absatz und Rundung haben nur einen Anschlag in einer transversalen und einer axialen Richtung. Das führt zu großen Abweichungen beim Fügen wie im Abschnitt 6.4.1 gezeigt wurde.

Für eine bessere Positionierung wurden Proben erstellt, die über eine tangential Führung verfügen.

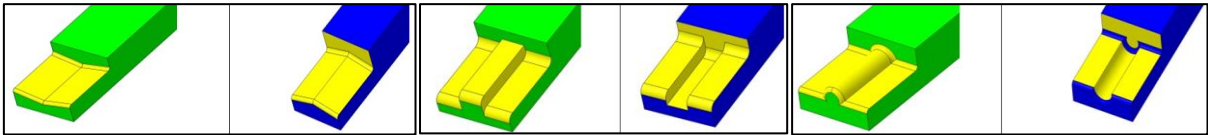


Bild 71: V-Form (V1), Absatz mit Rippe (R2) und Absatz mit Längsnut (N1)

Die einfachste Form ist die V-Form (V1). Durch die zusammenlaufenden Schrägen ist eine Positionierung möglich. Diese hat allerdings keinen festen Anschlag. D.h. bei einer seitlichen Kraft können die Ober- und die Unterseite gegeneinander verschoben werden.

Der Absatz mit Rippe (R2) bietet eine bessere Fixierung. Dabei könnte der Querschnittsprung in axialer Richtung aber wieder die Kerbwirkung erhöhen und als Rissursprungsstelle das Versagen begünstigen. Beim Absatz mit Längsnut (N1) sollen die Übergänge fließender sein und damit die Kerbwirkung minimiert werden.

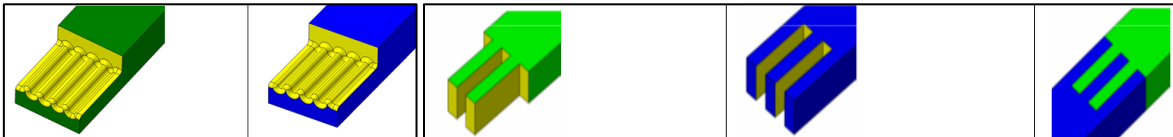


Bild 72: gewellter Absatz (W1) und verzahnter Stoß (Z1)

Durch Anordnen von 4 Nuten nebeneinander wurde die Oberfläche weiter vergrößert und die tangentielle Positionierung verstärkt. Zusätzlich wurden die Rundungen am Absatz mit hinein kombiniert, um die Kerbwirkung im Querschnittsprung klein zu halten. Das resultierende Formelement ist dann ein gewellter Absatz (W1).

Werden die Rippen über den gesamten Querschnitt geführt, entstehen in transversale Richtung ineinander gefügte Flächen, die bei axialer Zugbelastung mit Querkräften belastet werden. Diese Form wurde als verzahnter Stoß (Z1) bezeichnet. (Hier ist die Nomenklatur genau zu beachten. Ist der Absatz in axialer Richtung so strukturiert, wird er gezackter Absatz genannt.)

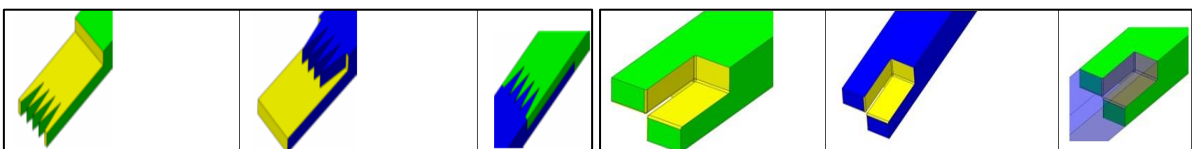


Bild 73: gezackter Absatz (Z2) und gekreuzter Stoß (K1)

## 6. Zugversuche

Eine Kombination aus Absatz als transversalen Abschlag und Vergrößerung der Fläche in axialer Richtung, stellt der gezackte Absatz (Z2) dar. Hier ist ein tangentialer Formschluss für die Position gedacht.

Eine etwas unkonventionelle Verbindung stellt der gekreuzte Stoß (K1) dar. Dieser bietet einen Formschluss in tangentialer und transversaler Richtung und ist nur in axialer Richtung ffügbar. Die Fügeflächen sind beim Zugversuch mit der Querkraft auf einer mittelgroßen Fläche belastet.

Zusätzlich zu den Varianten mit einem Formschluss in eine oder zwei Richtungen wurden Proben mit einer strukturierten Oberfläche konstruiert (S1 bis S4). Dabei soll ein Absatz mit Rundung von 2 mm am Querschnittsprung, durch eine Veränderung der Oberfläche im Absatz untersucht werden. Die in transversaler Richtung aufeinander liegenden Flächen werden durch kleine Hohlräume strukturiert. Dadurch soll der Kleber in die Hohlräume fließen und neben der Flächenvergrößerung bei Aushärten auch noch einen formschlüssige Verbindung des Klebers bewirken. Die Hohlräume sind viereckige Sacklöcher (Subtraktion von vier Quadern unter der Fläche) und Pyramidenstümpfe mit gerundeten Kanten.

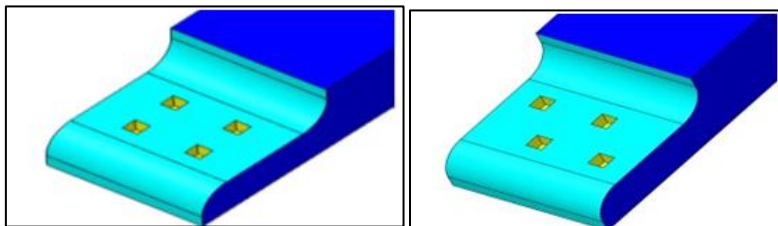


Bild 74: Quader gleichmäßig (S1)

Die Form des Pyramidenstumpfes soll verhindern, dass der ausgehärtete Kleber einfach aus dem Hohlraum heraus gezogen wird und die gerundeten Kanten die Kerbwirkung im Grund verringern. (Die graphische Darstellung der Hohlräume wurde so gewählt, damit die Transparenz die innenliegenden Konturen besser darstellbar macht.)

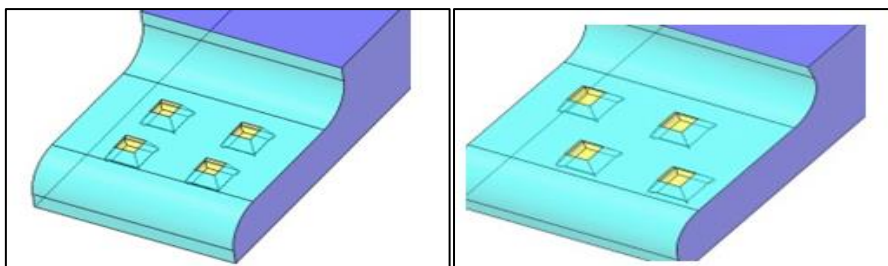


Bild 75: Pyramidenstumpf gleichmäßig (S3) und Pyramidenstumpf Lochbild (S4)

Auf jeder Absatzfläche wurden vier negative Formelemente platziert und liegen sich auf der Unter- und der Oberseite genau gegenüber. Je einmal wurden die Quader und die Pyramidenstümpfe im Viereck angeordnet und je einmal versetzt zueinander. Die als Lochbild verteilten Elemente sollen den verbesserten Kraftfluß, der aus den Kenntnissen über Nietverbindungen gewonnen wurde, abbilden.

#### Untersuchung der unterschiedlichen Fügeiteilflächen der Metallproben

Um die Auswirkungen der Oberflächenrauheit auf die Festigkeit der geklebten Flächen analysieren zu können, wurden die wiederverwendbaren Metallproben besonders bearbeitet.

Dazu wurden sechs halben Proben mit feinem Schleifpapier von Hand angeschliffen (F1, F2, F3). Sechs weitere Proben wurden mit einer Feile so vorbereitet, dass eine deutlich erhöhte Oberflächenrauheit erzeugt wurde (F4, F5, F6).



Bild 76: Metallproben mit unterschiedlichen Oberflächenrauheiten

Die Proben F7, F8 und F9 wurden jeweils mit 12 Schlägen eines werkstattüblichen Körners verändert. Die dabei entstehende Oberfläche ist so stark verändert, dass man diese schon als eine strukturierte Fügefläche ansehen kann.

## 6. Zugversuche

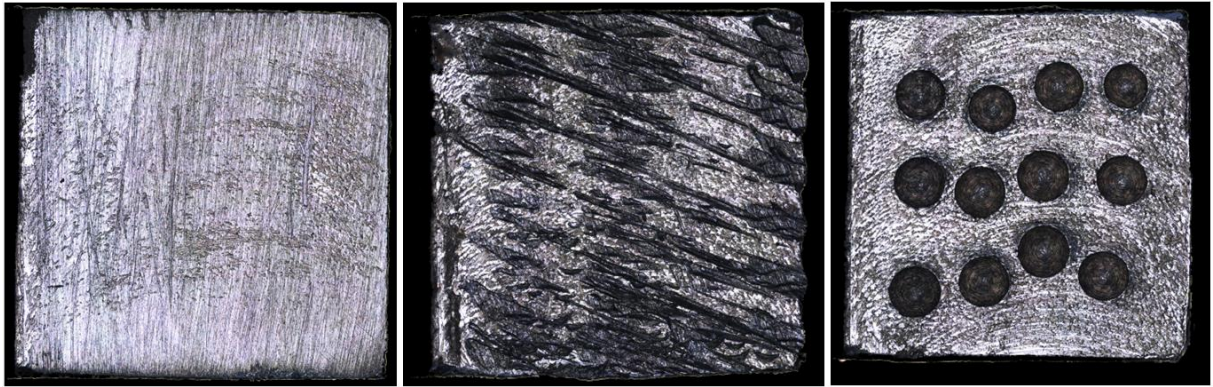


Bild 77: mikroskopische Aufnahmen der Proben a) F3 mit Schleifpapier b) F5 mit Feile c) F8 mit Körner bearbeitet

Die bearbeiteten Flächen sind im Bild 77 als 5-fache vergrößerte Aufnahme mit dem Oberflächenmikroskop zu sehen.

Die Untersuchung mit dem Oberflächenmikroskop „Infinite Focus“ der Firma Alicona diente der Bestimmung der Rauheitskennwerte. Dabei wurde nicht nur ein Rauheitskennwert bestimmt, sondern die gesamte Topologie aufgenommen und analysiert. Das Bild 78 zeigt einen Auszug aus dem Protokoll der fein geschliffenen Probe F3-1. Zum Vergleich wurde der Rauheitswert Rz gewählt. Dieser beträgt ca. Rz 27 bei Probe F3-1 (rote Markierung)

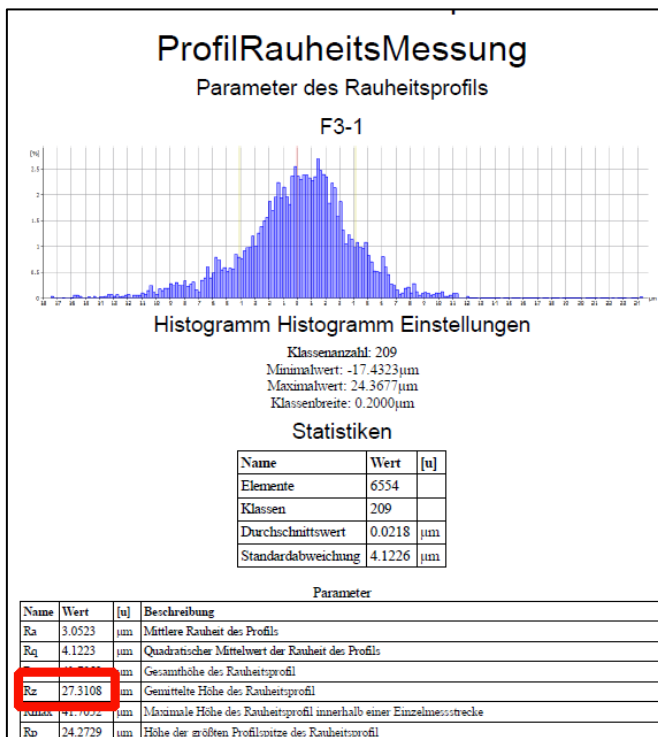


Bild 78: Protokoll der Rauheitsbestimmung

Für die Probe F5-1 wurde ein gemittelte Rautiefe Rz mit ca. 49  $\mu\text{m}$  bestimmt und für F8-2 Rz 125 $\mu\text{m}$ .

Für die weiteren Betrachtungen wurden die Werte gerundet und verallgemeinert:

- Geschliffene Proben (F1-1, F1-2, F2-1, F2-2, F3-1, F3-2) Rz25
- mit Feile aufgeraute Proben (F4-1, F4-2, F5-1, F5-2, F6-1, F6-2) Rz50
- strukturierte Proben (F7-1, F7-2, F8-1, F8-2, F9-1, F9-2, F10-1, F10-2) Rz125

Bei den strukturierten Proben sind nur die tiefen Einkerbungen des Körners ausschlaggebend und die Profilspitzen sind von untergeordneter Bedeutung.

Der Profilschnitt im Bild 79, der durch die vier Körnungen in der Mitte gelegt wurde, verdeutlicht dies gut. Die Tiefe der Körnung ist mit 0,669 mm gemessen wurden.



Bild 79: Profilschnitt Probe F8-2

### 6.5.1 Vorbereitung der Proben

Die oben erwähnten Proben wurden mithilfe des CAD-Systems Catia V5 konstruiert und davon STL-Files abgeleitet, die an die Objet Eden 330 übergeben wurden.



Bild 80: Bauplattform mit den Proben der 4. Reihe und vier halben Kleiderhaken

## 6. Zugversuche

Es wurden 28 halbe Zugproben mit unterschiedlichen Fügestellen und vier halbe Kleiderhaken (längs geteilt mit Positionierhilfen) im Bauraum angeordnet. Der Druck-Job dauerte 5 h 32 min und insgesamt wurde ca. 0,5 kg Material verbaut.

Tabelle 21: Material- und Zeiteinsatz für die 4. Testreihe

Proben 4. Versuchsreihe		Verbrauch	Zeit
28 Proben (Höhe 6mm)	Modellmaterial	397 g	5h 32 min
4 halbe Haken	Support material	201 g	

Anschließend wurden die Objet-Proben entformt und mit einer Wasserstahlanlage gereinigt. Die Proben wurden zum Trocknen 48 h auf saugfähigem Papier gelagert und beschriftet.



Bild 81: Verklebte Proben und Haken

Das Kleben erfolgte unter Zimmertemperatur mit Epoxidharzkleber, der vorher unter Vakuum 10 min verrührt wurde. Da die Topfzeit mit 40 min angegeben ist, verblieben 30 min zu Verarbeitung des Klebstoffs. Beim Verkleben der Proben wurde besonders darauf geachtet, dass die Fuge vollständig mit Klebstoff gefüllt ist. Bei den strukturierten Flächen wurden die Hohlräume sorgfältig gefüllt, bevor die Oberflächen mit Klebstoff bestrichen wurden.

Die Metallproben wurden im gleichen Arbeitsgang verklebt. Die Proben mit den fein geschliffenen Oberflächen wurden zu den Proben F1, F2 und F3 verklebt. Von den 6 mit der Feile aufgerauten Proben wurden nur 4 untereinander zu den Proben F4 und F5 geklebt. Zwei halbe Proben wurden mit Objet-Halbproben zu zwei Mischproben (M1 und M2) verbunden, um auch die Kohäsion zwischen verschiedenen Materialien untersuchen zu können.

Ähnlich wurde bei den gekörnten Halbproben vorgegangen. Von den 8 Teilstücken wurden 6 zu den Proben F6, F7 und F8 gefügt und die anderen beiden Halbproben mit je einer Objekt-Hälfte verklebt.

Insgesamt wurden also 26 Zugproben vorbereitet:

- 14 Objekt-Proben mit unterschiedlichen Fügestellen
- 8 Metall-Proben mit unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften
- 4 Mixed-Proben

### 6.5.2 Vermessung der tangential positionierten Proben

An 7 Zugproben sollte die Wirksamkeit der konstruktiv angestrebten tangentialen Positionierung überprüft werden. Deshalb wurden ausgewählt:

- 3 Proben die einen definierten seitlichen Anschlag haben
  - N1 - Absatz mit Längsnut
  - R2 - Absatz mit Rippe
  - W1 - gewellter Absatz
- 3 Proben ohne seitlichen Anschlag
  - R1 – Rundung 2mm
  - S3 – Pyramide gleichmäßig
  - S4 – Pyramiden Lochbild
- Eine Probe bei der die Wirkung der tangentialen Führung zweifelhaft war
  - V1 – V-Form

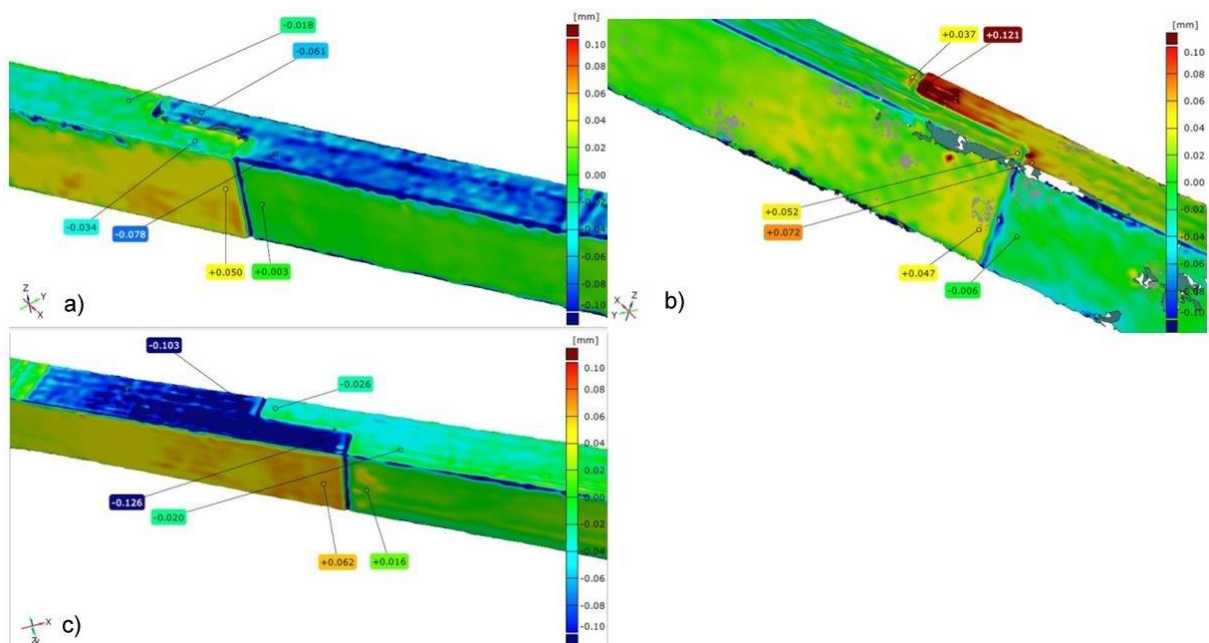


Bild 82: Flächenvergleich der Proben a) N1 b) R2 c) W1



## 6. Zugversuche

Diese Proben wurden wieder mit dem 3D-Scanner „Atos Compact Scan 2M“ vermessen und die Punktwolke mittels Flächenvergleich zur optimalen CAD-Probe analysiert.

Wie im Bild 82 gut zu erkennen ist sind die Proben mit seitlichem Anschlag sehr genau gefertigt.

Tabelle 14: Abweichung der verklebten Halbproben (mit seitlicher Führung)

	Abweichung tangential	Abweichung transversal
N1 - Absatz mit Längsnut	43 µm	47µm
R2 - Absatz mit Rippe	84µm	41µm
W1 - gewellter Absatz	77µm	46µm

Die Abweichungen sind unter 0,1 mm (Mittelwert 68µm) und die Handhabung beim Fügen war deutlich besser als ohne die Positionierhilfe.

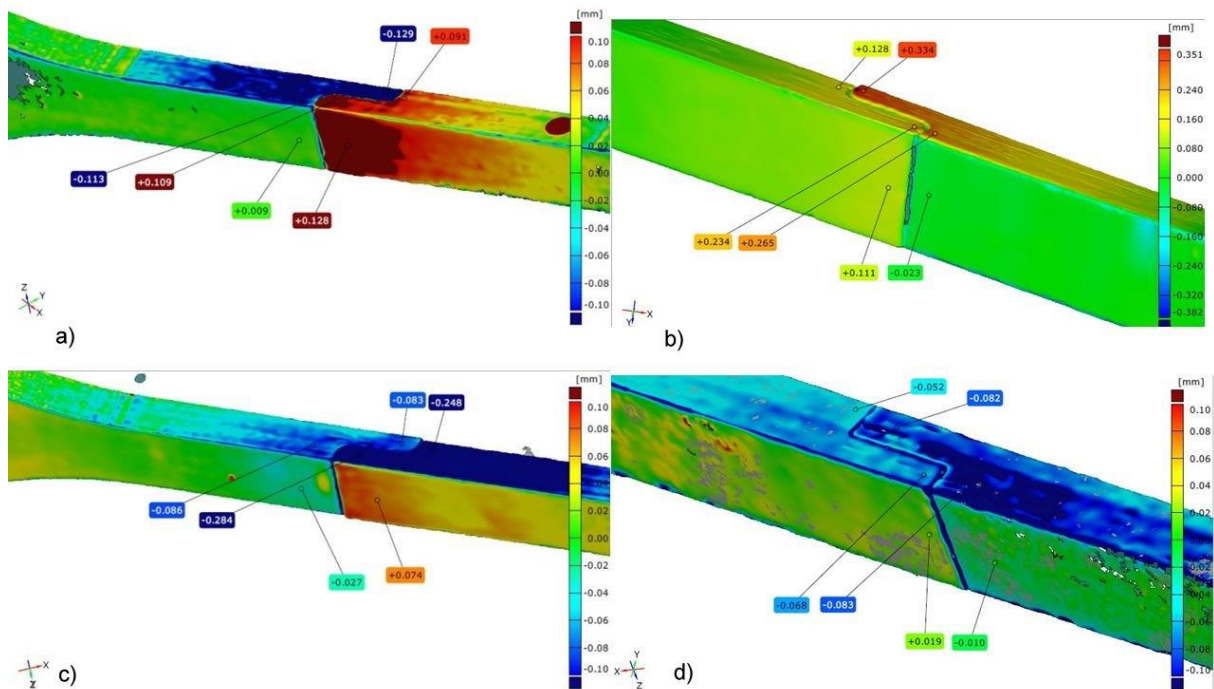


Bild 83: Flächenvergleich der Proben a) R1 b) S3 c) S4 d) V1

Tabelle 15: Abweichung der verklebten Halbproben (ohne seitliche Führung)

	Abweichung tangential	Abweichung transversal
R1 – Rundung 2mm	203µm	98µm
S3 – Pyramide gleichmäßig	206µm	134µm
S4 – Pyramiden Lochbild	165µm	101µm
V1 -V-Form	30µm	29µm

Die Proben ohne tangentielle Führung wurden mit einer Abweichung von 191 µm gefertigt. Die Probe V1 (V-Form) hatte eine Genauigkeit von 30 µm.

### Schlussfolgerung

Die Probenhälften mit seitlicher Führung, wurden deutlich genauer verklebt (Mittelwert von ca. 0,06mm). Die zum Vergleich herangezogenen Proben wurden mit Abweichungen von ca. 0,19 mm verklebt. Die Abweichung ist auf ca. ein Drittel gesunken.

Die Wirksamkeit der konstruierten seitlichen Führungen wird also als gesichert angenommen und deshalb in die Gestaltungsrichtlinien aufgenommen.

Die Probe mit der V-Form der Fuge wurde sehr genau gefügt und auch dieses konstruktive Element kann empfohlen werden.

### 6.5.3 Auswertung der Zugversuche

Die Zugversuche der vierten Versuchsreihe wurden wieder auf der Zwei-Säulen-Zugprüfmaschine TIRAtest 2835 am IWF durchgeführt.

Insgesamt wurden nur 25 Proben statt der geklebten 26 getestet, da eine Metallprobe mit geschliffenen Oberflächen (F2) beim Transport beschädigt wurde.

Zuerst wurden die 14 Objekt-Proben im Zugversuch untersucht. Um ein Rutschen im Spann- futter zu verhindern, wurden die Proben vor Ort präpariert. Dazu wurde mit grobem Schleif- papier die Oberfläche an der Einspannstelle quer zur Zugrichtung aufgeraut.

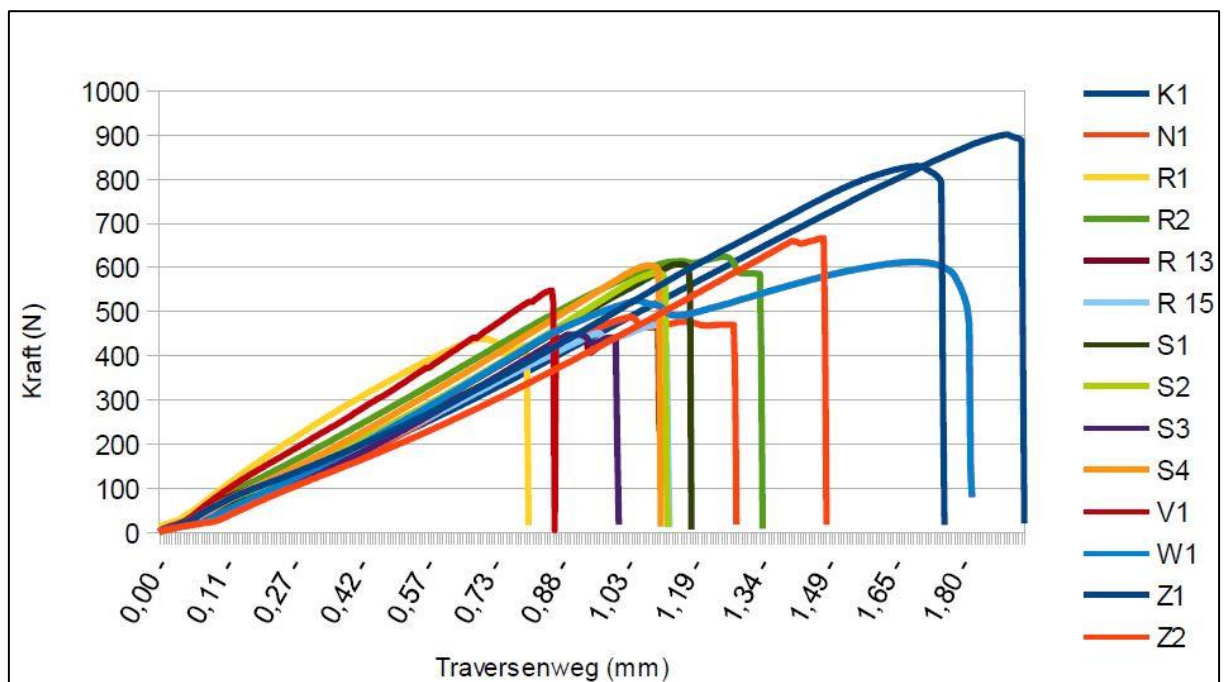


Bild 84: Auswertung der Objekt-Proben der vierten Testreihe

## 6. Zugversuche

Die Zugversuche zeigten wieder recht geringe Werte für die Zugfestigkeit. Die meisten Proben versagten nicht wie erhofft an der Fügestelle, sondern im umgebenden Material. Die in den anderen Versuche ermittelten Werte für die Zugfestigkeit des Werkstoffs lagen bei 55 - 57 N/mm<sup>2</sup>. Da die Proben eine Dicke von 6mm, davon 3 mm an der Klebestelle und eine Breite von 10 mm haben, ist ein Versagen des umgebenden Materials bei ca. 1650 N berechnet wurden. Die Proben versagten aber oft schon bei Belastungen zwischen 450 N und 620 N.

*Ob die strukturierte Oberfläche der Proben S1- S4 bessere Werte erzielen, konnte nicht ermittelt werden, da die Proben nicht an dieser Stelle, sondern im umgebenden Material versagten. Typisch war in der Versuchsreihe ein Bruch der Probe am Auslauf der Rundung, die zur Kerbminimierung konstruiert wurde.*

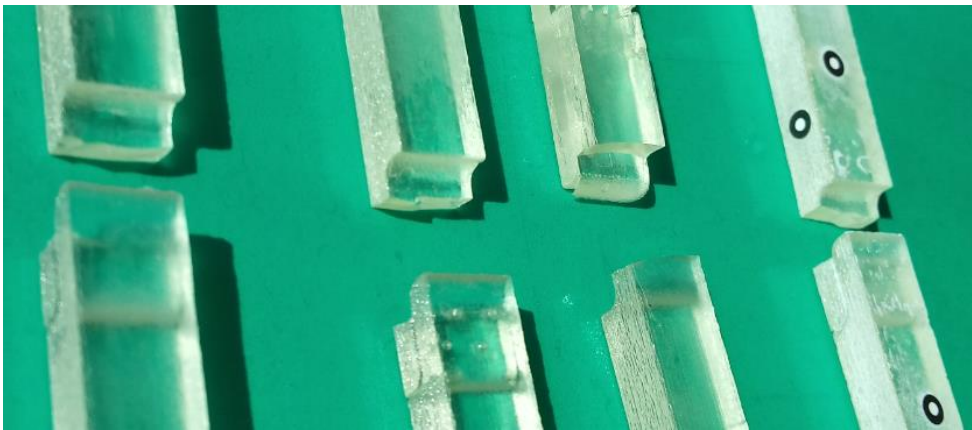


Bild 85: Versagensstelle der Objekt-Proben im Zugversuch

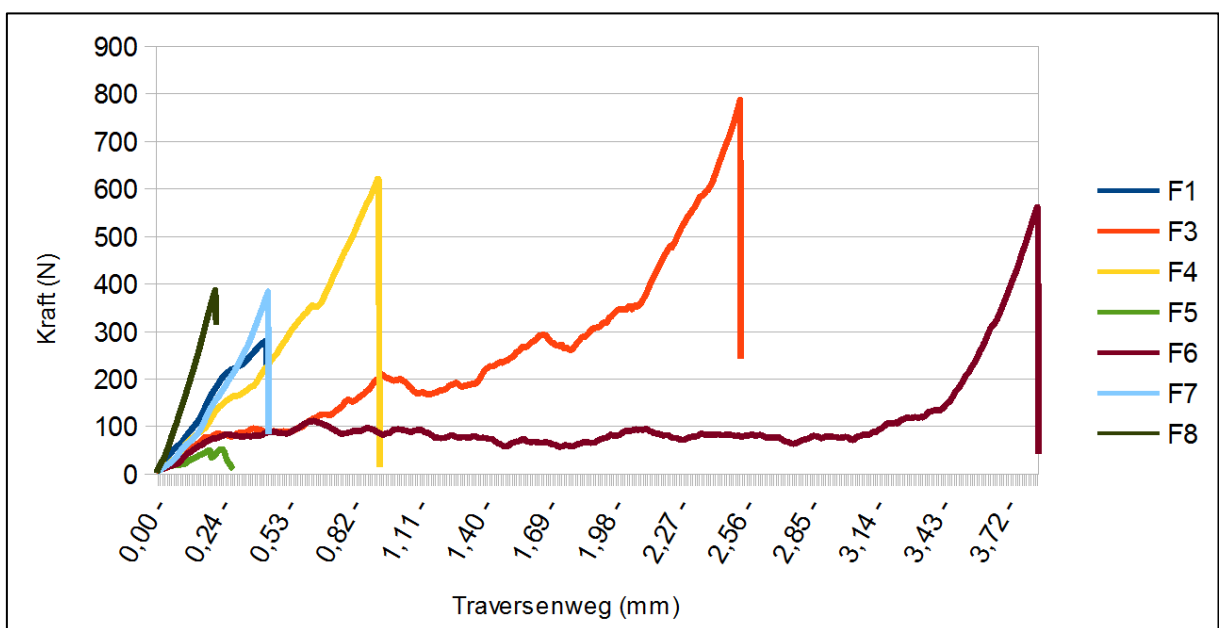


Bild 86: Metallproben mit unterschiedlicher Rauheit

Die Metallproben, die zur F-Reihe zusammengefasst wurden, sind im Zugversuch auch hinter den Erwartungen zurück geblieben. Die geschliffenen Proben (F1 und F3) versagten recht unterschiedlich. F1 brach bei 280,68 N, während F3 mit einer Kraft 787,32 N den höchsten Wert der gesamten Reihe erzielte. Die mit der Feile aufgeraute Probe F4 widerstand einer Zugkraft von 621,80 N, aber bei F5 löste sich die Verklebung schon bei 52,3 N. Die gekörnten Proben sind mit 562,5 N(F6), 384,32 N (F7) und 387,08 N (F8) etwas gleichmäßiger, doch zu früh gebrochen.

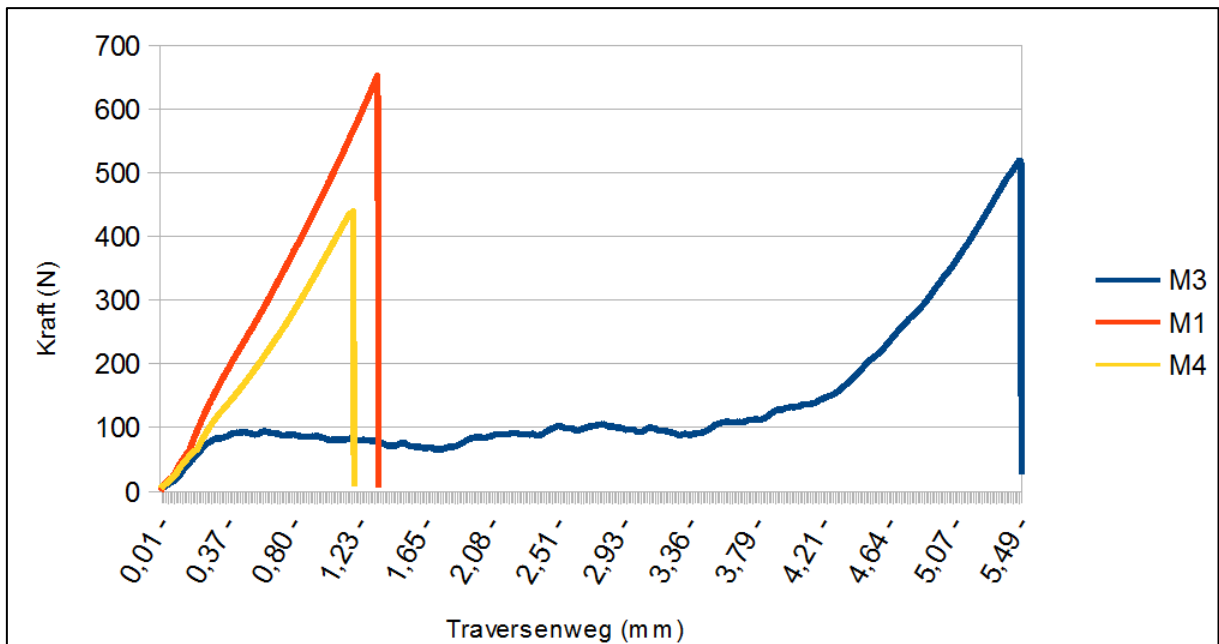


Bild 87: Mixedproben (Metall +Objet)

Auch keine der Mischproben erreichte die angestrebten Werte. Die Proben M1 und M2 (Objet-Material kombiniert mit der Metallprobe durch Feile aufgeraut) brachen bei 635 N bzw. 429 N. (Im Diagramm fehlt der Graph für M2 und der Wert wurde dem Messprotokoll entnommen). Die gekörnten Proben, die mit den Objekt-Proben verklebt wurden, versagten bei 518,82 N (M3) bzw. 439,7 N (M4). Allerdings konnte nach dem Versagen nachgewiesen werden, dass der Klebstoff die Oberfläche sehr gut benetzte und auch die großen Oberflächenrauheiten der gekörnten Proben sehr gut ausfüllte (Bild 88).

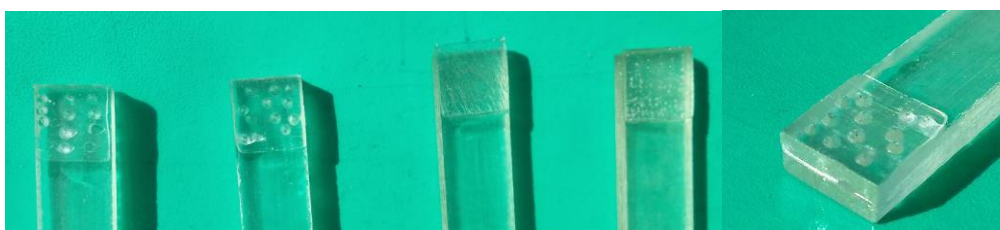


Bild 88: Oberflächen der Mixed-Proben und vergrößert M2

## 7. Umsetzung der Konstruktionsmethodik

Es brach zwar immer die Verklebung, eine gesicherte Aussage über eine Verbesserung der Festigkeit bedarf aber zusätzlicher Versuchsreihen.

### Interpretation

*Die untersuchten Proben hatten fast alle einen Absatz und damit eine sich einschnittig überlappende Fuge. Bei einer axialen Belastung führt dies zu einem Biegemoment in der Verbindungsstelle. Dieses Biegemoment verursacht eine Schälbelastung in der Klebung und mit dem Hebelarm der Überlappung zu einem Bruch am Auslauf des Radius, der so oft beobachtet wurde.*

*Die dabei gemessenen Werte liegen meist bei einer Zugkraft zwischen 380 N und 650 N. Auch die Struktur der Fläche oder die Vergrößerung der Oberfläche durch bspw. Rippen, Nuten, Wellen konnte diesen Effekt nicht verhindern.*

*Nur die Proben Z1 (gezahnter Stoß) und K1 (gekreuzter Stoß) hatten keinen Absatz und darum keine Biegemomenteinleitung und zeigten Werte von über 800 N der Zugkraft beim Versagen.*

### Schlussfolgerung

*Bei einer axialen Belastung führen einschnittig überlappende Verbindungen zu verringerter Festigkeit der Verklebung durch die eingeleiteten Biegemomente und sollten konstruktiv vermieden werden. Sinnvoll sind in solchem Fall, Fügstellen ohne Biegemomenteinleitung oder beidseitig auftretende Momente, die sich ausgleichen (z.B. beim abgesetzten Quader oder Treppenstoß).*

*Bei gegenüber liegenden Verbindungsstellen, wie dem beispielhaft dargestellten Zylinder, gleichen sich durch die umlaufende Fuge die Momente aus und alle im Konstruktionskatalog aufgenommenen Fügstellen können verwendet werden.*

## 7. Umsetzung der Konstruktionsmethodik

### 7.1 Konstruktionskatalog für geteilte Zugproben

Im Laufe der Untersuchungen ergab sich eine Vielzahl von Möglichkeiten, wie die Fügstelle bei geteilten Zugproben zu konstruieren ist. Dabei wurden die geometrischen Merkmale aus dem morphologischen Kasten kombiniert und zu Varianten auskonstruiert. Diese sind in einem Konstruktionskatalog zusammengefasst.

Die ersten einfachen Varianten waren:

- Stumpfer Stoß
- Schäftung
- Absatz

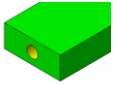
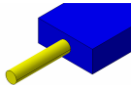
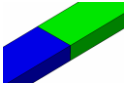
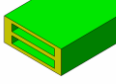
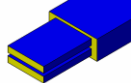
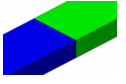
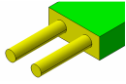
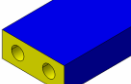
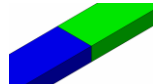


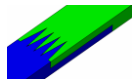
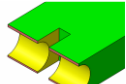
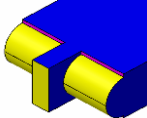

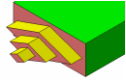
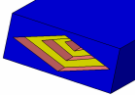
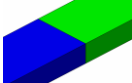
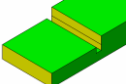
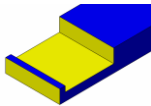
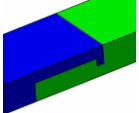
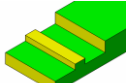
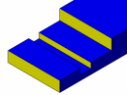
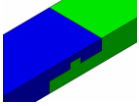
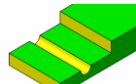

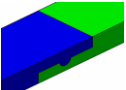
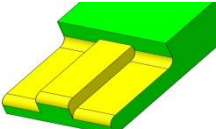
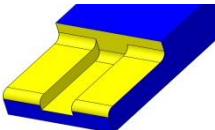
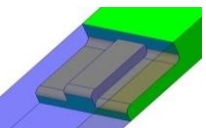
Es wurden nur Varianten weiter verfolgt, die aus zwei Teile bestehen. Darum kommen die einfache Lasche und die doppelte Lasche nicht im Konstruktionskatalog vor. Das bedeutet nicht, dass sie im Entwicklungsprozess nicht berücksichtigt werden sollten. Da aber die Einhaltung der geometrischen Form eine wichtige Anforderung ist, kann beispielsweise eine einfache Laschung als Variation des Absatzes gesehen werden. Zwar kann dabei der Stoß mittig gelegt werden, aber die so entstehende Lösung wird als trivial betrachtet.

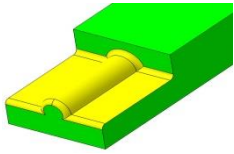
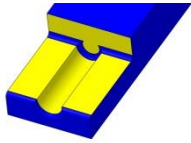
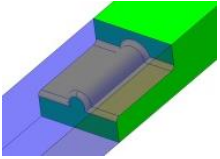
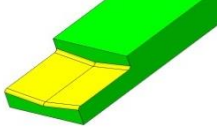
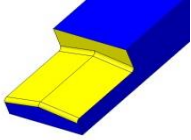
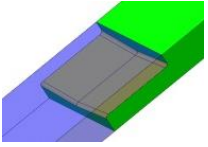
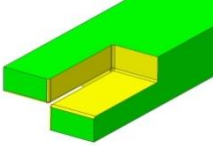
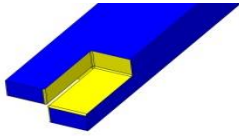
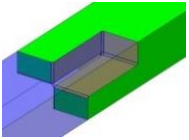
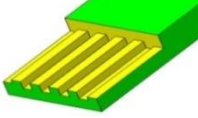
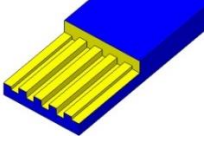
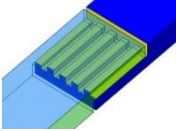
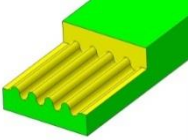
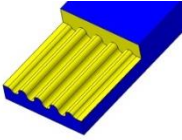
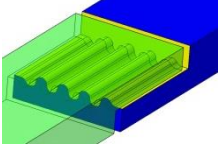
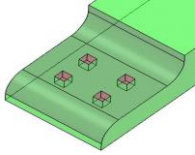
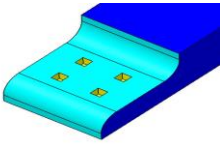
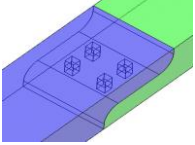
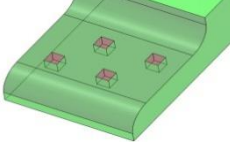
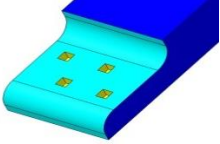
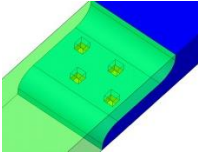
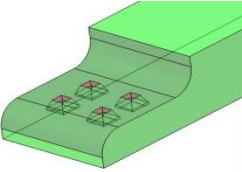
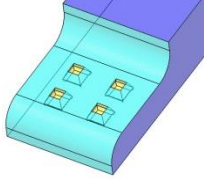
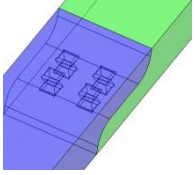
Die im Konstruktionskatalog aufgeführten Varianten ergeben sich als logische Kombination der im Abschnitt 4.3 im morphologischen Kasten entwickelten Strukturen. Diese können für eine komplexere Lösung auch kombiniert und mehrfach verwendet und weiterentwickelt werden.

Tabelle 24: Konstruktionskatalog für Fügstellen

Benennung	Unterteil	Oberteil	Baugruppe
stumpfer Stoß			
Schäftung			
Absatz			
gerundeter Absatz			
Abstandshalter			
Schwalbenschwanz			
Schwalbenschwanz quer			
gezahnter Stoß			
abgesetzter Quader			

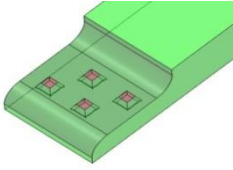
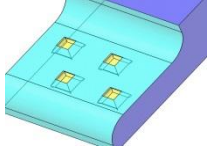
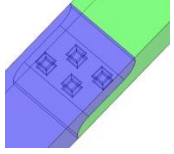
## 7. Umsetzung der Konstruktionsmethodik

Benennung	Unterteil	Oberteil	Baugruppe
gestifteter Stoß			
gezahnter Absatz			
zweifach gestifteter Stoß			
gezackter Absatz			
gerundeter Stoß mit Führungsnase			
Treppenstoß			
Absatz mit Haken			
Absatz mit mittigem Haken			
Absatz mit Querrille			
Absatz mit Rippe			

Benennung	Unterteil	Oberteil	Baugruppe
Absatz mit Längsnut			
V-Form			
Gekreuzter Stoß			
gezahnter Absatz			
gewellter Absatz			
Quader gleichmäßig			
Quader Lochbild			
Pyramide gleichmäßig			



## 7. Umsetzung der Konstruktionsmethodik

Benennung	Unterteil	Oberteil	Baugruppe
Pyramide Lochbild			

Um die Belastungen klein zu halten, sollten Fügestellen so konstruiert werden, dass die Kraft die Klebestelle zusammen hält und nicht trennt. Ist dies nicht möglich, sollte die Belastung auf eine große Klebefläche verteilt werden. Dabei sind in der Regel Zug- und Scherspannungen vorzufinden. Da die meisten Klebstoffe nur geringe Zugspannungen ertragen, sind Scherspannungen in der Fuge zu bevorzugen. Auf jeden Fall sind Schälbelastungen zu vermeiden, da sie zu Aufklaffen der Verbindung führen und nur den Rand der Verklebung beanspruchen. Dadurch kommt es zu hohen Spannungen und einem fortschreitenden Riss, der ein Versagen der Fügestellen zur Folge hat.

### stumpfer Stoß

Der stumpfe Stoß stellt die einfachste Form für eine Fügestelle dar. Dazu werden die Teile an der geraden Trennfuge zusammengefügt und verklebt. Der Hauptgrund für die Verwendung ist die einfache Herstellbarkeit. Es müssen keine weiteren Bearbeitungsschritte durchgeführt werden. Darum kommt er häufig bei Blechen und Schweißteilen vor.

Die Belastung erzeugt im vorliegenden idealisierten Lastfall ausschließlich Zugspannungen.

Alle anderen Fügestellen sind oft nur für Fügeteile geeignet, die mit generativen Fertigungsverfahren hergestellt werden. Werden die Bauteile jedoch generativ gefertigt, ist eine erhöhte Komplexität der Fügefläche nicht zeit- oder kostenrelevant.

*Fügefläche:* *sehr klein (40 mm<sup>2</sup>)*

*auftretende Spannung:* *nur Zugspannung*

*Positionierung:* *keine*

*erwartete Rißstelle:* *Trennfuge*

## Absatz

Der Absatz vergrößert die Klebefläche und bietet eine Positionierhilfe in axiale Richtung. Die Fuge teilt die axial belasteten Bereiche und fügt durch Querkraft beanspruchte Bereiche zur Klebefläche hinzu.

Der Bearbeitungsaufwand ist gering. Deshalb ist der Absatz auch bei spanend gefertigten Teilen zu finden.

<i>Fügefläche:</i>	<i>klein (140 mm<sup>2</sup>)</i>
<i>auftretende Spannung:</i>	<i>Zugspannung und Scherung, Biegung</i>
<i>Positionierung:</i>	<i>axial, eine Richtung</i>
<i>erwartete Rißstelle:</i>	<i>am Querschnittssprung</i>

## gerundeter Absatz

Im Gegensatz zum normalen Absatz ist der gerundete Absatz mit großen Radien in den stark belasteten Bereichen versehen. Aus den Versuchen ging die Erkenntnis über eine Kerbwirkung des Absatzes am Querschnittssprung hervor. Die resultierenden Spannungsspitzen sollten hier minimiert werden.

Der Bearbeitungsaufwand ist erhöht, kann aber durch übliche spanende Verfahren hergestellt werden

<i>Fügefläche:</i>	<i>klein (140 mm<sup>2</sup>)</i>
<i>auftretende Spannung:</i>	<i>Zugspannung und Scherung, Biegung</i>
<i>Positionierung:</i>	<i>axial, eine Richtung</i>
<i>erwartete Rißstelle:</i>	<i>am Auslauf der Rundung</i>

## Schräger Stoß (Schäftung)

Der schräge Stoß ist in einem gleichmäßigen Winkel an beiden Fügeteilen zu finden. Bei einer Länge von 10mm auf die Höhe von 4mm der Probe ergibt sich für die Klebefläche ein Winkel von ca. 21°. Der große Nachteil ist die fehlende Positionierung. Je flacher der Winkel ist, desto schwieriger ist eine genaue Ausrichtung, da ein Anschlag fehlt.

Zwei gegenüberliegende Schrägen bieten eine kleine Verbesserung der Positionierung und gleichen die Biegemomente aus.

## 7. Umsetzung der Konstruktionsmethodik

<i>Fügefläche:</i>	<i>klein (107,7 mm<sup>2</sup> bei 21°)</i>
<i>auftretende Spannung:</i>	<i>Zugspannung und Scherung, Biegung</i>
<i>Positionierung:</i>	<i>keine</i>
<i>erwartete Rißstelle:</i>	<i>Trennfuge</i>

### Abstandshalter

Der Abstandshalter ist ein einfacher Absatz mit zwei gerundeten Rippen längs in der Fuge, die einen definierten Abstand einstellen. Dadurch kann bei Klebstoffen, die nicht auf sich berührende Kontaktflächen ausgelegt sind, eine gleichmäßige Distanz sichergestellt werden. Die Radien der Rippen betragen 0,1 mm, 0,25 mm oder 0,5 mm.

<i>Fügefläche:</i>	<i>klein (145,7 mm<sup>2</sup> mit Abstand 0,25 mm)</i>
<i>auftretende Spannung:</i>	<i>Zugspannung und Scherung, Biegung</i>
<i>Positionierung:</i>	<i>nur Abstand und axial eine Richtung</i>
<i>erwartete Rißstelle:</i>	<i>Querschnittssprung</i>

### Schwalbenschwanz (längs und quer)

Der Schwalbenschwanz oder Verzinkung ist eine in axiale Richtung formschlüssige Verbindung. Sie ist verdrehsicher und bietet eine sehr gute Positionierung. Zum Fügen sollte ein Spalt (ca. 0,1 mm) vorgesehen werden, da sonst die Montagekräfte zu groß werden. Hier wurde zusätzlich noch mit dem Absatz kombiniert, der als Anschlag beim Fügen dient.

<i>Fügefläche:</i>	<i>klein (107,7 mm<sup>2</sup> bei 21°)</i>
<i>auftretende Spannung:</i>	<i>Zugspannung und Scherung</i>
<i>Positionierung:</i>	<i>komplett (nur in umgekehrte Fügerichtung trennbar)</i>
<i>erwartete Rißstelle:</i>	<i>schmale Stelle an der Basis des Schwalbenschwanzpositivs</i>

### Verzahnung

Die gezahnte Verbindung vergrößert die Klebefläche und bietet eine Positionierhilfe in tangentialer Richtung. Den axial belasteten Flächen werden durch Querkraft beanspruchte Bereiche hinzugefügt.

Es fehlt eine Positionierung in transversaler Richtung

<i>Fügefläche:</i>	<i>klein (140 mm<sup>2</sup>)</i>
<i>auftretende Spannung:</i>	<i>Zugspannung und Scherung, keine Biegung</i>
<i>Positionierung:</i>	<i>tangential komplett, axial- eine Richtung</i>
<i>erwartete Rißstelle:</i>	<i>am Querschnittssprung</i>

#### abgesetzter Quader

Der abgesetzte Quader ist ein Absatz an vier Seitenflächen. Dadurch entsteht ein quaderförmiger Zapfen der in einen Negativ-Quader im Gegenstück genau hinein passt.

<i>Fügefläche:</i>	<i>groß (240 mm<sup>2</sup>)</i>
<i>auftretende Spannung:</i>	<i>Zugspannung und Scherung, keine Biegung</i>
<i>Positionierung:</i>	<i>tangential komplett, transversal komplett, axial- eine Richtung</i>
<i>erwartete Rißstelle:</i>	<i>am Querschnittssprung des Positiv-Quaders</i>

#### gestifteter Stoß

Der gestiftete Stoß besteht aus einem runden Zapfen und einer passenden Bohrung im Gegenstück. Durch spanende Verfahren schwer herstellbar. Aber durch Einbringen einer dritten Komponente (Stift) die in je eine Bohrung gefügt wird, einfach und kostengünstig herzustellen.

<i>Fügefläche:</i>	<i>klein (102,8 mm<sup>2</sup>)</i>
<i>auftretende Spannung:</i>	<i>Zugspannung und Scherung, keine Biegung</i>
<i>Positionierung:</i>	<i>tangential und transversal komplett, axial - eine Richtung, aber Rotation möglich</i>
<i>erwartete Rißstelle:</i>	<i>am Beginn des Zapfens</i>

#### gezahnter Absatz

Der gezahnte Absatz entsteht durch Verdopplung des abgesetzten Quaders. Die Klebefläche wird dadurch stark vergrößert.

<i>Fügefläche:</i>	<i>groß (340 mm<sup>2</sup>)</i>
<i>auftretende Spannung:</i>	<i>Zugspannung und Scherung, keine Biegung</i>

## 7. Umsetzung der Konstruktionsmethodik

*Positionierung:* tangential komplett, transversal komplett, axial- eine Richtung  
*erwartete Rißstelle:* am Querschnittssprung

### zweifach gestifteter Stoß

Der zweifach gestiftete Stoß besteht aus zwei runden Zapfen und zwei passenden Bohrungen im Gegenstück. Dadurch wird die Rotation um die Achse, die beim gestifteten Stoß möglich war, verhindert. Außerdem wird die Klebefläche vergrößert. Mit je zwei Bohrungen und zwei Stiften leicht herstellbar

*Fügefläche:* mittel (165,6 mm<sup>2</sup>)  
*auftretende Spannung:* Zugspannung und Scherung, keine Biegung  
*Positionierung:* tangential und transversal komplett, axial - eine Richtung  
*erwartete Rißstelle:* am Beginn des Zapfens

### gezackter Absatz

Der gezackte Absatz ist eine tangential formschlüssige Verbindung in Kombination mit dem Absatz, um einen transversalen Anschlag zu bieten. Dadurch ist diese Verbindung leicht fgbar und gut zu positionieren.

*Fügefläche:* mittel (192,2 mm<sup>2</sup>)  
*auftretende Spannung:* Zugspannung und Scherung, Biegung  
*Positionierung:* tangential komplett, axial und transversal - eine Richtung  
*erwartete Rißstelle:* Querschnittssprung

### gerundeter Stoß mit Fhrungsnase

Der einfache gerundete Stoß wurde mit einer Fhrungsnase versehen, um eine tangential Positionierung zu ermöglichen. Auch der Winkelversatz wird durch die Fhrungsnase gering gehalten.

*Fügefläche:* klein (73,2 mm<sup>2</sup>)  
*auftretende Spannung:* Zugspannung und kaum Scherung, keine Biegung  
*Positionierung:* tangential und transversal komplett, axial - eine Richtung  
*erwartete Rißstelle:* Basis der Fhrungsnase

### Treppenstoß

Der Treppenstoß ist eine fast nur generativ herstellbare Verbindung. Dabei wird ein Parallelogramm in drei Stufen abgesetzt, wodurch die Klebefläche vergrößert wird. Der gestufte Hohlraum ist mit spanenden Verfahren nicht herstellbar.

<i>Fügefläche:</i>	<i>klein (91,4 mm<sup>2</sup>)</i>
<i>auftretende Spannung:</i>	<i>Zugspannung und wenig Scherung, keine Biegung</i>
<i>Positionierung:</i>	<i>tangential und transversal komplett, axial - eine Richtung</i>
<i>erwartete Rißstelle:</i>	<i>Basis der kleinsten Stufe</i>

### Absatz mit Haken, Absatz mit mittigen Haken, Absatz mit Querrille

Diese drei Fügestellen sind Variationen eines einfachen Absatzes mit einem axialen Formschluss. Sie bieten keinen tangentialen Anschlag und haben nur eine geringfügig vergrößerte Oberfläche.

<i>Fügefläche:</i>	<i>klein (160 mm<sup>2</sup>)</i>
<i>auftretende Spannung:</i>	<i>Zugspannung und kaum Scherung, Biegung</i>
<i>Positionierung:</i>	<i>transversal und axial komplett</i>
<i>erwartete Rißstelle:</i>	<i>Basis des Hakens</i>

### Absatz mit Rippe, Absatz mit Längsnut, V-Form

Diese drei Fügestellen sind Variationen eines einfachen Absatzes mit einem tangentialen Formschluss. Sie bieten einen tangentialen, einen transversalen und einen axialen Anschlag. Deshalb sind sie sehr gut zu positionieren.

Die Verbindungen haben nur eine geringfügig vergrößerte Oberfläche.

<i>Fügefläche:</i>	<i>klein (150 bis 165 mm<sup>2</sup>)</i>
<i>auftretende Spannung:</i>	<i>Zugspannung und kaum Scherung, Biegung</i>
<i>Positionierung:</i>	<i>tangential und axial - eine Richtung</i>
<i>erwartete Rißstelle:</i>	<i>Basis des Hakens</i>

## 7. Umsetzung der Konstruktionsmethodik

### gekreuzter Stoß

Beim gekreuzten Stoß werden jeweils zwei versetzt gegenüber liegenden Quader bis zur Mitte gehend entfernt. Die Trennfuge ergibt im Schnitt betrachtet ein Kreuz. Es ergibt sich eine Fügestelle mit nur einer möglichen Fügerichtung und einer sehr guten Positionierung

<i>Fügefläche:</i>	<i>klein (150 mm<sup>2</sup>)</i>
<i>auftretende Spannung:</i>	<i>kaum Zugspannung und Scherung, keine Biegung</i>
<i>Positionierung:</i>	<i>transversal und tangential komplett, axial - eine Richtung</i>
<i>erwartete Rißstelle:</i>	<i>Basis der Positivquader</i>

### gezahnter und gewellter Absatz

Sowohl beim gezahnten als auch beim gewellten Absatz werden mehrere Rippen längs auf einem Absatz angeordnet. Dadurch entsteht eine Oberflächenvergrößerung und es wird eine tangentielle Positionierung erzeugt.

<i>Fügefläche:</i>	<i>groß (220 mm<sup>2</sup>)</i>
<i>auftretende Spannung:</i>	<i>kaum Zugspannung und Scherung, Biegung</i>
<i>Positionierung:</i>	<i>tangential komplett, transversal und axial - eine Richtung</i>
<i>erwartete Rißstelle:</i>	<i>Querschnittssprung</i>

### Quader (gleichmäßig + Lochbild) und Pyramide (gleichmäßig + Lochbild)

Diese vier Fügstellen sind gerundete Absätze mit einer strukturierten transversalen Oberfläche. Die Hohlräume sollen einen Formschluss beim Aushärten des Klebers bewirken. Außerdem wird die Fügeteiloberfläche vergrößert

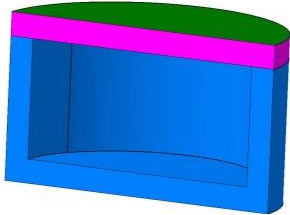
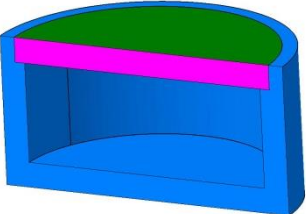
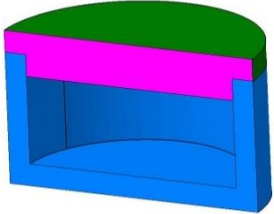
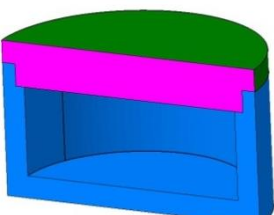
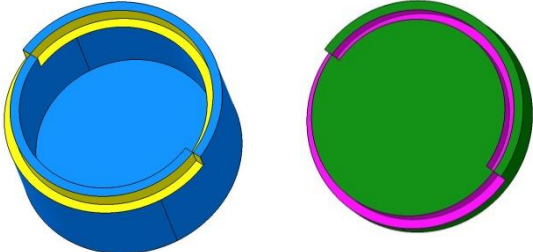
Ein tangentialer Anschlag fehlt bei diesen Varianten komplett.

<i>Fügefläche:</i>	<i>groß (160 mm<sup>2</sup>)</i>
<i>auftretende Spannung:</i>	<i>kaum Zugspannung und Scherung, Biegung</i>
<i>Positionierung:</i>	<i>transversal und axial - eine Richtung</i>
<i>erwartete Rißstelle:</i>	<i>im Grund der Hohlräume</i>

## 7.2 Konstruktionskatalog für Hohlzylinder

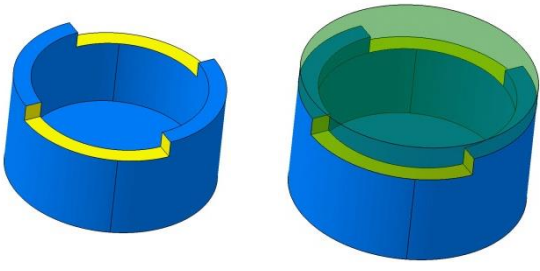
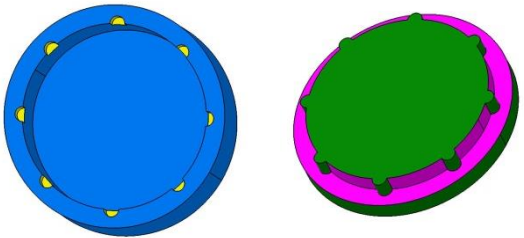
Der Konstruktionskatalog aus Kapitel 6.2 kann auch für Zylinder und Hohlzylinder angewendet werden. Dabei ergibt sich durch die runde Form und die gegenüberliegenden Teile der Fuge oft eine Positionierung, die beim Stoß für Quader (Zugproben) nicht gegeben ist.

Tabelle 16: Konstruktionskatalog für Hohlzylinder

Nr.	Ansicht	Form der Fuge	Bemerkung
1		--	Einfacher Deckel Einfacher Zylinder
2		┌_	Einfacher Deckel Abgesetzter Zylinder
3		┐_	Abgesetzter Deckel Einfacher Zylinder
4		┐┌_	Abgesetzter Deckel Abgesetzter Zylinder
5			Gekreuzter Absatz



## 7. Umsetzung der Konstruktionsmethodik

Nr.	Ansicht	Form der Fuge	Bemerkung
5			Radiale Stufe
6			Radiale Positionsnase

Die Varianten sind auch für volle Zylinder anwendbar. Dabei ist nur der innere Hohlraum ausgefüllt zu konstruieren. Die Fugestelle wird dadurch vergrößert und die Fuge dient meist nur der besseren Positionierung.

Die geteilte Ausführung erlaubt auch eine Kombination von Materialien. So kann eines der beiden zu fügenden Teilstücke aus Metall oder einem anderen Kunststoff sein und muss nicht generativ gefertigt werden. Hier ist die Anwendung von standardisierten oder aus Halbzeugen kostengünstig hergestellten Bauteilen sinnvoll.

### Einfache Deckel, einfacher Zylinder

Der Deckel ist ein einfacher Zylinder der durch konstruktives Trennen vom Hohlzylinder abgeteilt gefertigt wird. Der große Vorteil gegenüber einer ungeteilten Ausführung ist, dass der untere Teil des Zylinders hohl gefertigt werden kann. Dabei wird sehr viel Material eingespart und die äußere Form bleibt theoretisch erhalten. In der Praxis kann es aber vorkommen, dass der Deckel durch die fehlende Positionierung nicht bündig gefügt wird.

### Einfache Deckel, abgesetzter Zylinder

Durch die abgesetzte Fuge im Hohlzylinder ist eine sehr gute Positionierung erreichbar. Spanend gefertigt ist dafür ein zusätzlicher Bearbeitungsschritt notwendig. Darum ist es sinnvoll, den Absatz am generativ gefertigten Bauteil zu konstruieren, falls eine Materialkombination angewendet wird. Sonst ergeben sich keine Mehrkosten, da erhöhte Komplexität bei generativ gefertigten Teilen keinen erhöhten Bearbeitungsaufwand mit sich bringt.

### Abgesetzter Deckel, einfacher Zylinder

Auch hier ist eine gute Positionierung gegeben. Der Hohlzylinder ist geometrisch primitiv und die Führung erfolgt durch den passenden Bund am Deckel. Der Zylinder könnte kostengünstig aus einem Halbzeug hergestellt werden.

### Abgesetzter Deckel, abgesetzter Zylinder

Spanend mit zusätzlichen Bearbeitungsschritten, generativ weiterhin simpel herstellbare Verbindung, die eine vergrößerte Fuge mit verbesserter Dichtwirkung darstellt.

*Die bis hierhin beschriebenen Verbindungen bieten keine rotatorische Positionierung. Ist diese erforderlich, sind komplexe Fügstellen zu konstruieren.*

### Gekreuzter Absatz

Diese Fügstelle ist die beispielhafte Umsetzung des gekreuzten Absatzes für Zugproben auf eine Verbindung von Hohlzylinder und Deckel. Eine solche Fügstelle ist spanend nicht oder nur mit extremem Aufwand zu fertigen und bietet auch eine rotatorische Positionierung.

### Radiale Stufe

Diese Verbindung ist eine etwas einfachere Fügstelle, die auch spanend gefertigt werden könnte. Auch sie ist verdrehsicher und stellt eine komplette Positionierung sicher. Allerdings sind die Verbindungsflächen klein und könnten bei ungenauer Fertigung Abweichungen begünstigen. Durch Kombination mit einem zusätzlichen Absatz lässt sich dieses Verhalten aber leicht abstellen.

### Radiale Positionsnase (8 Stellungen)

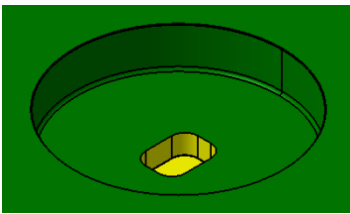
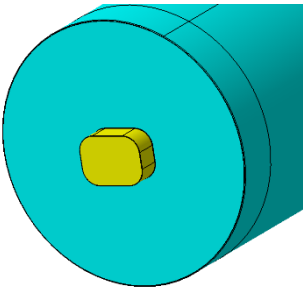
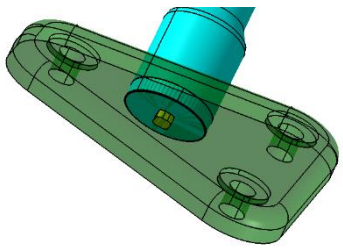
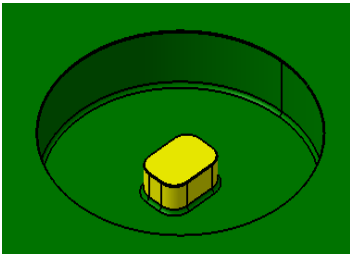
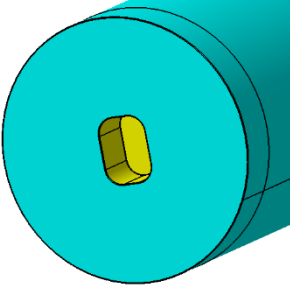
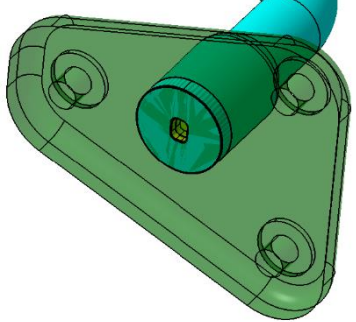
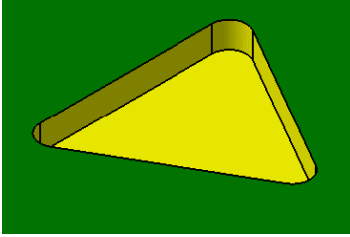
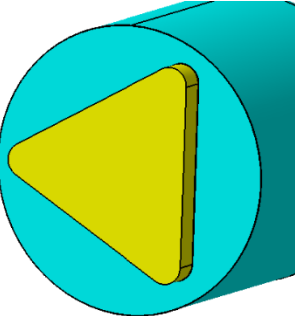

Bei dieser Verbindungsstelle ist der Deckel mit 8 Positionsnasen versehen, die gleichmäßig auf den Umfang verteilt ( $45^\circ$ ) sind. Als Gegenstück hat der Hohlzylinder 8 Aussparungen in die die Nasen genau hinein passen. Die rotatorische Position ist dadurch in 8 definierten Lagen möglich. Falls genau eine Position gefügt werden soll, kann auch nur eine Nase mit der passenden Aussparung im Gegenstück gefertigt werden.

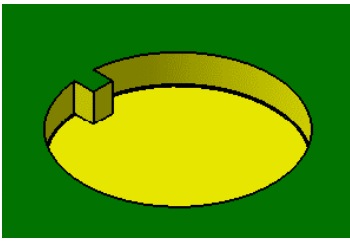
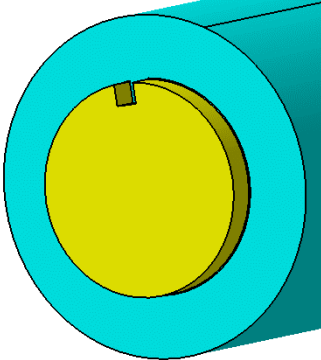
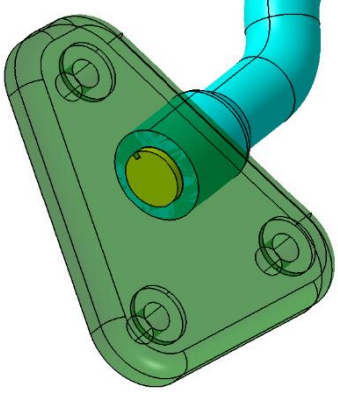
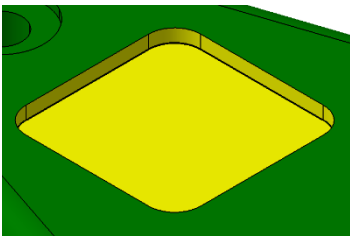
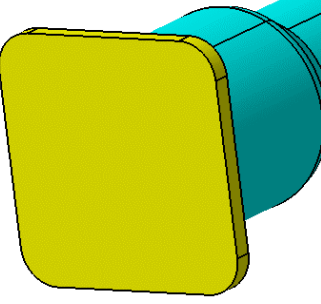
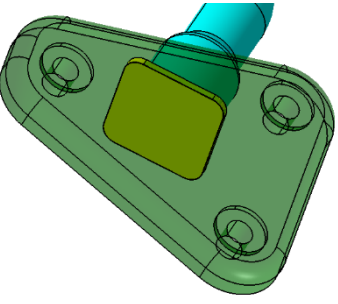
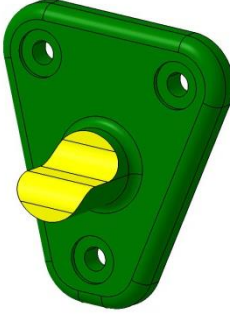
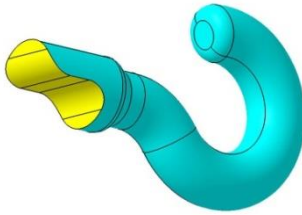
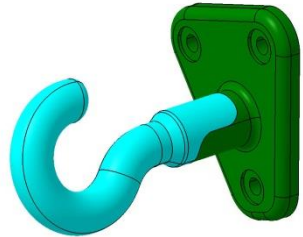
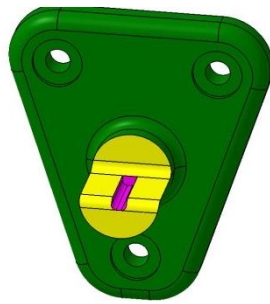
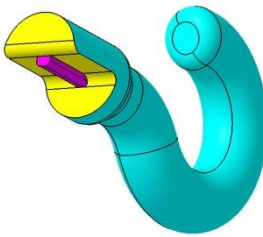
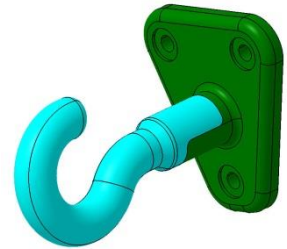
Da fast alle Fügstellen durch eine derartige Kombination weiter entwickelt und komplexer gestaltet werden könnten, sind diese beispielhaften Verbindungen als Denkanlass zu verstehen und sollen nicht vollständig sein.

### 7.3 Konstruktionskatalog für geteilte Haken


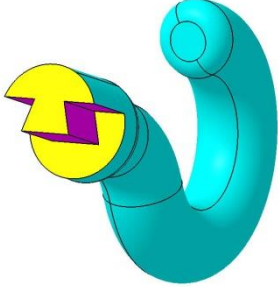
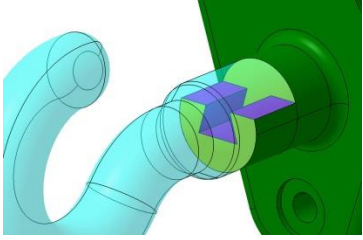

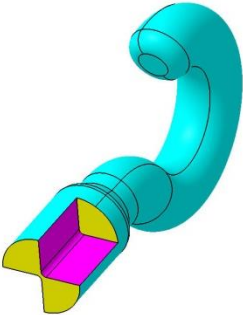
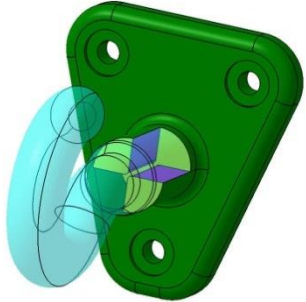
Um die Anwendung des Konstruktionskatalogs zu demonstrieren, wurden Lösungen für das Beispiel des Kleiderhakens erarbeitet. Von den einfachen Lösungen ausgehend, die im Kapitel 3.2 erarbeitet und gegenüber gestellt wurden, sind weite Varianten durch Kombination der geometrischen Merkmale entstanden. Das Ziel war neben der Kraftübertragung und Vergrößerung der Klebefläche, auch die rotatorische Positionierung zur y-Achse sicher zu stellen. Später wurden auch die Erkenntnisse aus den Versuchen angewendet und hier beispielhaft umgesetzt.

Tabelle 17: Konstruktionskatalog für geteilte Haken

Nr.	Ansicht Part 1	Ansicht Part 2	Produkt
1			
2			
3			

Nr.	Ansicht Part 1	Ansicht Part 2	Produkt
4			
5			
6			
7			

## 7. Umsetzung der Konstruktionsmethodik

Nr.	Ansicht Part 1	Ansicht Part 2	Produkt
8			
9			

Das erste und zweite Beispiel verdeutlichen, dass ein formschlüssiges Element immer aus einem Positiv-Volumen und einem passgleichen Negativ-Volumen am Gegenstück besteht. Ob am Haken das Positiv-Volumen oder einer Aussparung (Hohlraum) vorgesehen ist oder eine Platte zur Vergrößerung der Klebefläche konstruktiv hinzugefügt wird, kann der Konstrukteur entscheiden. In beiden Fällen ist die Funktion sichergestellt, wenn das Negativ-Volumen lagerichtig am Gegenstück platziert ist.

Die Beispiele 3, 4 und 5 zeigen formschlüssige Elemente an der Basis des Schafts, die neben der geteilten Ausführung auch die Klebefläche der Fuge vergrößern. Zusätzlich ist eine genaue Positionierung in x- und y-Richtung möglich. Dies wird durch den Absatz und den genau hinein fügbaren Schaft erreicht. Dazu sollte eine Fuge von ca. 0,1mm vorgesehen werden, um sicher zu stellen das die Teile ohne Kraft zusammengesetzt werden können. Ein Klemmen führt zu dauerhaft erhöhten Spannungen in der Leibung und in der Folge zu plastischen Verformungen, die eine geometrische Abweichung der gesamten äußeren Form mit sich bringen könnten (Aufweiten).

Die Elemente sind immer so ausgeführt, dass eine rotatorische Positionierung erfolgt und der Haken damit immer gerade steht.

Während in Bsp.3 und Bsp.4 die Negativ-Form in der Platte des Kleiderhaken kleiner als der Schaft ist, wurde in Bsp.5 demonstriert, dass die Basis auch stark vergrößert werden kann, um die Oberfläche der Klebefuge zu erhöhen. Dabei sollte aber beachtet werden, dass im Fall des Hakens wieder mehr Stützen gefertigt werden müssten. Hier ist jeder konkrete Entwurf auf Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit zu beurteilen.

Die Beispiele 6 bis 9 zeigen die Umsetzung der im Konstruktionskatalog aufgeführten Fügestellen gerundeter Absatz, Absatz mit Längsnut, Schwabenschwanz und gekreuzter Stoß auf diesen Anwendungsfall. Das Prinzip lässt sich auf fast alle im Konstruktionskatalog vorgeschlagenen Fügestellen umsetzen und ist an dieser Stelle nur als Beispiel zu sehen.

## 8. Kombination von Materialien

Oft ist ein Bauteil in der Form durch generative Fertigungsverfahren recht frei in der Gestaltung, jedoch sind die Werkstoffeigenschaften meist nicht für größere Belastungen geeignet. Hier kann durch geschicktes Kombinieren von Materialien eine höhere Festigkeit der Bauteile erzielt werden. Zusätzlich können Standardelemente des Maschinenbaus zu geringen Kosten bezogen werden und erweitern dadurch die möglichen Anwendungsgebiete von generativ gefertigten Teilen.

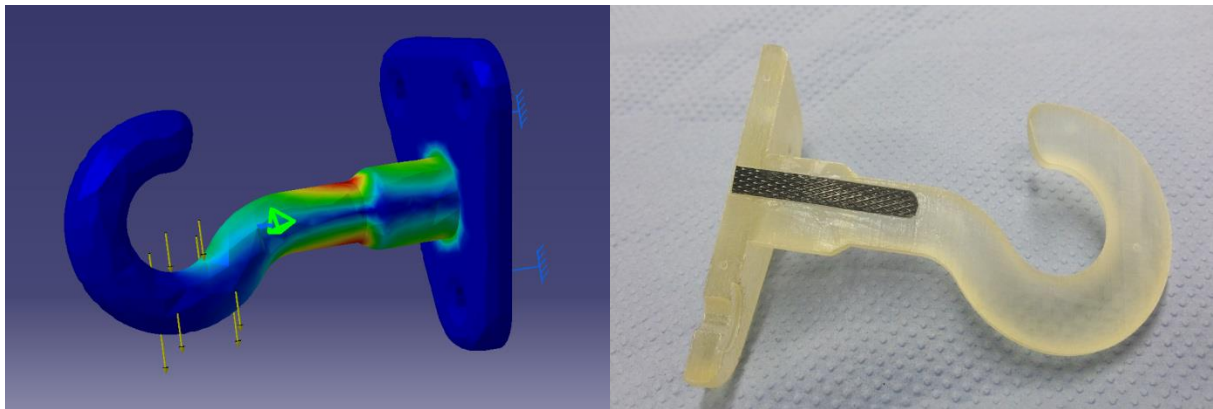


Bild 89: a) Simulation der Belastungen des Hakens und b) konstruktive Anpassung durch Materialkombination

Im Bild 89 ist ein längs geteilter Kleiderhaken zu sehen, bei dem ein hoch belastbares Kunststoffband an der gefährdeten Stelle im Schaft eingeklebt wurde. Dieses soll die Zugspannungen, die durch die Simulation ermittelt wurden, aufnehmen und in geringer belastete Bereiche des Bauteils ableiten. Ein weiterer Anwendungsfall liegt vor, wenn die Teile mit komplizierten Freiformflächen generativ gefertigt und auf einem Korpus aus kostengünstigem Material (Holz, Stahl) befestigt werden. Zur Positionierung und Verbindung der Teilelemente sollten die im Konstruktionskatalog vorgeschlagenen Formelemente verwendet werden.

## 8. Kombination von Materialien

Eine Materialkombination ist auch denkbar, wenn höher belastete Gewinde benötigt werden. Zwar können die Gewinde im Bauteil gleich mit gefertigt werden oder hinterher mit üblichen Gewindeschneidwerkzeugen spanend erzeugt werden, bieten aber nicht die gleiche Festigkeit wie metallische Gewinde. In solchen Fällen können Standardelemente wie Muttern oder Gewindebuchsen eingeklebt werden. Auch eine Vernietung von Gewindenieten ist möglich. Dabei ist die Lochleibung so zu konstruieren, dass die Grenzflächenpressung des generativ gefertigten Materials nicht überschritten wird und Biege- oder Scherbelastungen vermieden werden. (Im Bild 90 ist der Fall zu sehen, dass beim Nieten die Spannungen überschritten wurden. Die Bruchstelle wurde genutzt, um das Einkleben einer Stahlmutter bildlich darzustellen.)



Bild 90: Kleiderhaken mit eingeklebter Stahlmutter und Stahldraht

An diesen Beispiel wurde auch noch eine andere Möglichkeit realisiert. Dabei wurde ein Stahldraht mit dem Durchmesser 2 mm in einen generativ gefertigten Hohlraum längs zur Fuge eingeklebt. Dies diente der Positionierung der Bauteilhälften des Hakens und soll die gezogene Faser des als Biegeträger angenommenen Hakenschafts verstärken. Der Hohlraum hatte einen Durchmesser von 2,1 mm und einen umlaufenden Klebespalt von 0,05 mm.

Eine weitere Anwendung von unterschiedlichen Materialien, ist die Verstiftung. Dabei werden in beide Füge-teile normal zur Oberfläche jeweils mindestens zwei Löcher gefertigt. Diese werden später mit Stiften aus einem anderen Material gefügt. Dieses Vorgehen entspricht dem Verstiften mit Dübeln, das beim Zusammenbau von Holzteilen bekannt ist. Bei der generativen Fertigung muss aber das Loch nicht gebohrt werden, sondern wird gleich so gefertigt. Die Stifte dienen der Positionierung der Substrukturen zueinander. Wenn die Stifte länger ausgeführt werden und an besonders belastete Stellen konstruiert werden, können sie auch verstärkende Funktionen übernehmen. Für diesen Einsatzfall sind einfache Stifte aus Metall mit einer aufgerauten Oberfläche zu wählen.

Für den Anwendungsfall, dass Bauteile dicht gegen Medien (Gase mit unterschiedlichem Druck oder Flüssigkeiten) sein sollen, können auch Dichtungen aus Gummi verwendet werden. Im Gegensatz zu Verkleben müssen Dichtungen aber durch eine Kraft leicht verformt werden, um ihre dichtenden Eigenschaften zu entwickeln. Der Vorteil ist besonders bei lösbaren Verbindungen die Austauschbarkeit und Wiederverwendung.

Die besonderen Eigenschaften bestimmter generativer Fertigungsverfahren wie beispielsweise Laminated Object Manufacturing (LOM) führen zu schlechten Festigkeitseigenschaften bei Belastung normal zu Schichtung. Der Effekt vergrößert sich erfahrungsgemäß unter dauerhaften UV-Einfluss (Tageslicht). Über größere Zeiträume wird es zur Delaminierung von Modellen führen. Man kann dem entgegen wirken, wenn an maßlich unkritischen Bereichen eine Verstärkung von außen auf das Modell aufgebracht wird. Dazu wurden ältere LOM-Modelle von außen durch Glasfasern verstärkt, die in ein Polyesterharz eingebettet waren. Gerade bei runden Bauteilen konnte so ein „Pflaster“ die Struktur stärken und Schubspannungen zwischen den Schichten aufnehmen. Hier sind auch Kohlefasern denkbar und die Struktur kann auch Epoxidharz sein. Dies sollte nach den Haftbedingungen und der Beschaffenheit des Untergrunds ausgewählt werden.

*Wichtig ist, dass im Falle einer Verbesserung der Festigkeit durch Auflaminieren von Fasern (Glas-, Kohle- oder Aramidfasern) die Fasern bis zur Kräfteinleitungsstelle geführt werden. Ist dies nicht der Fall, wird das Bauteil durch die Versteifung verspröden, was eine Delaminierung und ein schnelleres Versagen zur Folge hat.*

Ein weiterer Anwendungsfall ist die Kombination großflächiger faserverstärkter Bauteile mit generativ gefertigten Strukturen. Typisch ist dies bei Spezialanwendungen, bei denen der Leichtbau im Vordergrund steht. Beispielhaft sind große Karosserieteile im Motorsport. Diese werden aus kohlefaserverstärkten Kunststoffen gefertigt. Die Verbindungsstellen zur Befestigung werden dabei oft geklebt. Da die Fläche klein ist, kann durch den Einsatz von strukturierten Flächen, die mechanische Adhäsion verbessert werden. Das wurde in den Beispielen mit den Negativ-Formen (Quader, Pyramide) exemplarisch umgesetzt und eignet sich besonders, wenn die Flächen schlecht mit Klebstoffen benetzbar sind und trotzdem hohe Lasten aufnehmen sollen.

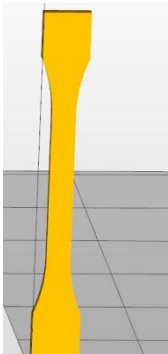
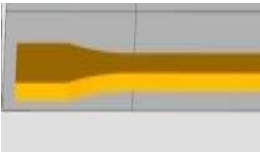

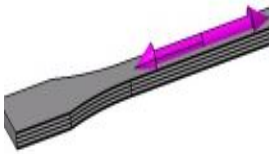
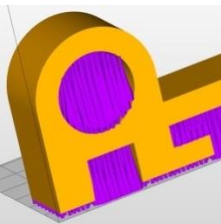
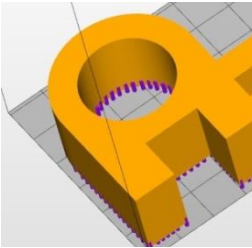


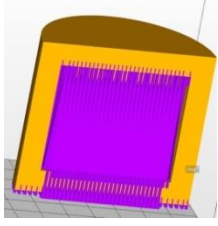
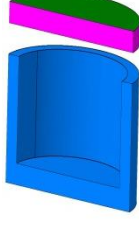
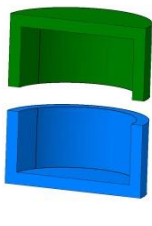
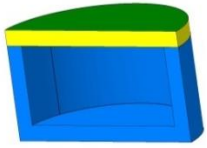
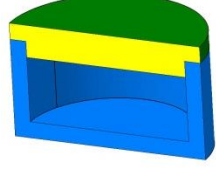
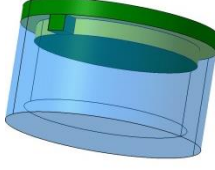
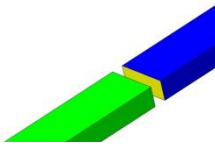
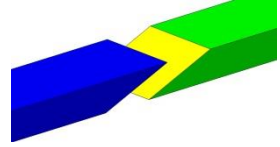
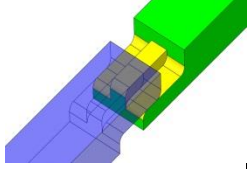
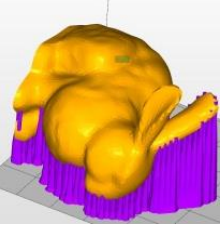
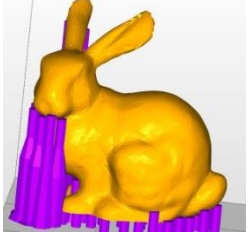
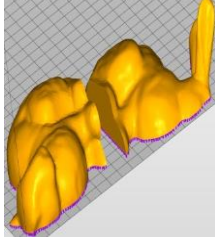
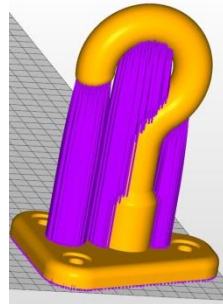
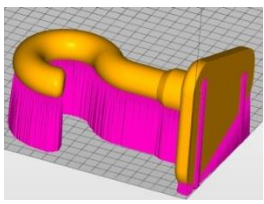
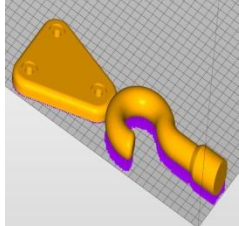
## 9. Gestaltungsrichtlinien für die generative Fertigung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene konstruktive Aspekte betrachtet, die bei der Fertigung von Bauteilen mit generativen Fertigungsverfahren wichtig sind. Dabei wurden meist nur Verfahren berücksichtigt, die Kunststoffe durch chemische oder physikalische Effekte aushärten. Die gesammelten Ergebnisse sind in den Konstruktionskatalogen zusammengefasst. Diese Erhebungen keinen Anspruch auf Vollständigkeit und sollen nur konstruktive Möglichkeiten aufzeigen. Jeder Konstrukteur kann diese Kataloge erweitern und auf die speziellen Anforderungen seines Anwendungsgebiets anpassen.

Aus den speziellen Lösungen wurden allgemeine Gestaltungsrichtlinien abgeleitet und in einer Tabelle aufgelistet.

Tabelle 27: Gestaltungsrichtlinien für die generative Fertigung

vermeiden	bevorzugen	besser	Erklärung
			<b>Ausrichtung beachten</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Anzahl der Schichten verringern</li> <li>• Bauteile flach im Bauraum positionieren</li> </ul>
			<b>Schichtrichtung beachten</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Schichten möglichst längs zur Hauptkraftrichtung ausrichten</li> <li>• Druckspannungen bevorzugen</li> </ul>
			<b>Stützen minimieren (Ausrichtung)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Durch geschicktes Ausrichten werden die Stützen minimiert</li> </ul>

vermeiden	bevorzugen	besser	Erklärung
			<b>Stützen minimieren (Teilen)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Durch Teilen Hohlräume nach oben Öffnen</li> <li>• Möglichst Schichthöhe minimieren</li> </ul>
			<b>Position sicher stellen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tangential sicher</li> <li>• Tangential und verdrehsicher</li> </ul>
			<b>Klebefläche vergrößern</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Axialer Anschlag</li> <li>• Tangentiale Führung</li> </ul>
			<b>Stützen auf wichtigen Flächen vermeiden</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Das Entfernen der Stützen führt zu großer Rauheit</li> <li>• Auf sichtbaren Flächen vermeiden</li> <li>• Durch Teilen nach innen legen</li> </ul>
			<b>Bauzeit verkürzen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Schichthöhe verringern</li> <li>• Teilen</li> </ul>

### Ausrichtung beachtet

Die Ausrichtung der Bauteile sollte stets so gewählt werden, dass eine geringe Anzahl von Schichten gefertigt werden muss, um die Bauzeit zu minimieren. Das ist durch eine flache Platzierung der Bauteile im Bauraum der Anlage zu erreichen. Oft bietet die Software der generativen Fertigungsanlage dazu Optimierungsalgorithmen an. Diese sind beim Einstellen des Bau-Jobs zu überprüfen, da sie oft nur für einfache, gleiche Teile gute Ergebnisse liefern.

## 9. Gestaltungsrichtlinien für die generative Fertigung

### Schichtrichtung beachten

Die Hauptbeanspruchung des Bauteils ist abzuschätzen, bzw. bei komplexen Bauteilen zu simulieren. Bei der generativen Fertigung ist darauf zu achten, dass bei einigen Verfahren die Festigkeit des Werkstoffs nicht isotrop ist und sich die gefertigten Schichten bei Zugbeanspruchung voneinander trennen können (Delaminierung) oder es zum Bruch kommt.

Deshalb sollten die Bauteile so ausgerichtet werden, dass die Schichtrichtung so liegt, dass die Hauptkrafttrichtung längs zur Schicht verläuft.

### Stützen minimieren (Ausrichtung)

Stützstrukturen verursachen einen erhöhten Materialverbrauch und damit höhere Kosten. Die Kosten werden durch die notwendigen Nachbearbeitungen zur meist händischen Entfernung der Stützen noch angehoben.

Deshalb sollten die Bauteile im Bauraum so angeordnet werden, dass so wenig Stützen wie möglich nötig sind. Dazu ist es oft zielführend Hohlräume und Überhänge in z-Richtung auszurichten, so dass weniger oder keine Stützen generiert werden müssen.

### Stützen minimieren (Teilen)

Bei komplexeren Bauteilen ist es oft nicht einfach möglich, die Hohlräume oder Überhänge in z-Richtung auszurichten, weil sie beispielsweise in unterschiedliche Richtungen zeigen. Dann kann durch Teilen und damit Öffnen der Hohlräume nach oben, eine erhebliche Reduzierung der Stützen erreicht werden.

Wenn dann nicht nur ein einfacher flacher Deckel abgetrennt und daneben liegend gefertigt wird, sondern z.B. eine zylindrische Struktur, ist es auch noch möglich die Gesamthöhe und dadurch die Bauzeit zu verringern.

### Position sicher stellen

Wenn Bauteile geteilt hergestellt werden, muss die Position der Teile beim Fügen sicher gestellt werden. Dazu sind Anschläge und Führungen vorzusehen. Im besten Fall werden die Bauteile so konstruiert, dass die Lage zueinander eineindeutig ist.

Bei rein rotationssymmetrischen Teilen kann dies aber auch überflüssig sein und um die Grundregeln „*Einfach, Eindeutig, Sicher*“ [3] zu befolgen, genügt ein axialer Anschlag

→ *Einfach*

### Klebefläche vergrößern

Um die Festigkeit der Verklebten Teile zu gewährleisten, sollte die Klebefläche möglichst groß und an robusten Strukturen ausgeführt werden.

Da die Klebstoffe meist höhere Scherspannungen als Zugspannungen ertragen, ist von stumpfen Stößen bei höherer Belastung abzusehen. Besser ist es, die Fuge längs zur Last- richtung zu vergrößern und damit einen Bereich zu erzeugen der auf Scherung belastet ist.

Zusätzlich können durch Anwendung des Konstruktionskatalogs diese Bereiche zur Führung der Bauteile beim Fügen und damit zur besseren Positionierung genutzt werden.

### Stützen auf wichtigen Flächen vermeiden

Da Stützen beim mechanischen Entfernen (Abbrechen) oft eine erhöhte Oberflächenrauheit verursachen, sollten Stützen auf wichtigen Funktionsflächen und besonders auf Sichtflächen vermieden werden. Ansonsten müssen diese oft komplizierten Flächen aufwendig nachbearbeitet werden.

Deshalb sollten Stützen auf einfachen geraden Flächen vorgesehen werden. Sind diese nicht zu finden, können sie erzeugt werden, indem das Bauteil geteilt wird und die Stützen an den Teilflächen ansetzen. Nach dem Verkleben sind die Teilflächen innenliegend und damit nicht mehr sichtbar.

### Bauzeit verkürzen

Da die Schichthöhe die Bauzeit und die damit verbundenen die Kosten, proportional beeinflusst, sollte sie durch eine geschickte Lage im Bauraum gering gehalten werden.

Oft kann das Aufteilen der Bauteile mehrere Effekte kombinieren. Im dargestellten Fall wird die Bauzeit verringert, die Stützen werden minimiert und die Ausrichtung der Schichten im Haken ist besser zur Lastrichtung.

## 10. Fazit

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Konstruktionsmethode erarbeitet, die den sich verändernden Möglichkeiten der Bauteilfertigung gerecht wird.

Waren in der Vergangenheit Verfahren dominierend, die spanend aus einem Rohling oder Halbzeug Material entfernten, so sind heute generative Fertigungsverfahren in der Entwicklung, die materialzufügend Bauteile erschaffen. Deshalb wurde ein weiter gefasster Begriff des Urformens für diese Verfahren verwendet, der die generativen Verfahren berücksichtigt.

Die Darstellung in der Populärliteratur und in anderen Medien als eine uneingeschränkte Möglichkeiten bietende Technologie, wurde unter wissenschaftlichen Aspekten betrachtet und auf die Eignung im professionellen Sinne untersucht. Dabei eröffneten sich Einblicke in eine ganzheitliche Technologie, die von der Erstellung am Computer mittels CAD-Software, über die Schnittstelle STL und die prozesstypische Schichtgenerierung, bis zur eigentlichen Fertigung nur wenige Stunden oder Tage benötigt.

Aber wie bei allen Verfahren werden bei genauer Kenntnis der in Hintergrund laufenden Prozesse Vorteile und Nachteile, aber auch Grenzen und Restriktionen sichtbar.

Eine wichtige Erkenntnis ist, dass erhöhte geometrische Komplexität keinen höheren Aufwand und damit keine steigenden Kosten zur Folge hat.

Weiterhin macht die Neuheit und Andersartigkeit im Vergleich zu herkömmlichen Produktionsabläufen neue Systeme und Anlagen nötig, die Schulungen und eine spezielle Denkweise der Mitarbeiter erfordern. Besonders der schichtweise Aufbau der Bauteile muss Berücksichtigung finden und sollte schon bei der Konstruktion bedacht werden.

Da alle technischen Prozesse auch einer wirtschaftlichen Betrachtung Stand halten müssen, wurden die kostentreibenden Faktoren Schichthöhe und Materialverbrauch beleuchtet und Möglichkeiten zur Reduzierung aufgezeigt.

Als Lösung wird eine Methode vorgestellt, bei der durch geschicktes Teilen von Bauteilen die Stärken generativer Fertigungsverfahren besonders hervortreten. Das anschließende Fügen der Substrukturen und die konstruktive Sicherung der Position zueinander, wurden ebenfalls untersucht.

Eine Einbindung in komplexe Fertigungsprozesse, bei denen die generativ gefertigten Modelle als Negativ-Form einen Hohlraum bilden, aus dem sie später ausgeschmolzen oder ausgebrannt werden, wurde aufgezeigt und beispielhaft demonstriert. Hierbei sollten durch die Anfertigung von Formen die benötigten Zugproben aus kostengünstigerem Werkstoff

hergestellt werden. Als Folge konnten die Material- und vor allen die Herstellkosten, in die die Stundensätze der Maschinen eingehen, reduziert werden.

Die hohen Kosten sind zurzeit noch ein beschränkender Faktor bei der Verwendung der neuen Technologien. Dadurch ist absehbar, dass die generativen Verfahren die herkömmlichen wie Gießen und Zerspanen nicht ersetzen, sondern nur ergänzen können. Die Möglichkeiten der Freiheit in der Formgestaltung lassen besonders individualisierte, hochkomplexe Strukturen zu, die bisher nicht fertigbar waren. Dem gegenüber sind speziell bei den Kunststoff-verfestigenden Verfahren, die hier beschrieben wurden, die Festigkeitswerte der Bauteile mit denen aus Werkstoffen wie Stahl oder Aluminium nicht vergleichbar.

Eine Kombination aus generativ gefertigten filigranen Strukturen auf einem festen, großen Korpus aus Metall ist eine denkbare Anwendung, bei der die Stärken der spanenden Verfahren mit denen der generativen gekoppelt werden. Die hierbei benötigten Fügestellen sind untersucht worden. Um dann eine Maßhaltigkeit sicherstellen zu können, sind zulässige Abweichungen definiert und mithilfe eines 3D-Scanners an extra umgesetzten Entwürfen überprüft worden. Dabei wurde gezeigt, dass bei geschickter Auswahl der Konstruktionselemente wie Anschläge, Führungen, Rippen und Nuten die Abweichungen der Teile nach dem Fügen ca. 0,06 mm und damit deutlich unter dem definierten Wert von 0,1 mm lagen. Ohne die Formelemente betrug die Abweichung, die mit dem 3D-Scanner festgestellt wurde, zwischen 0,2 mm und 0,6 mm. Demnach wurde die Wirksamkeit der Positionierhilfen bewiesen.

Im Fall von Materialkombinationen, die viele Vorteile der Herstellungsverfahren und Werkstoffe vereinen, sollten die Kraftflüsse konstruktiv berücksichtigt werden, um zu garantieren, dass die Belastungen in tragfähige Strukturen abgeleitet werden. Hierbei sollten die an Absätzen und Querschnittssprüngen auftretenden Kerbwirkungen mithilfe von Radien und fließenden Übergängen reduziert werden.

Bei einer axialen Krafteinleitung führt ein Absatz zu einem Biegemoment in der Fügestelle, so dass oft die umgebenden Strukturen überlastet werden. In einem solchen Fall sollte ein Absatz vermieden werden oder durch gegenüberliegende Elemente ein Momentenausgleich den Effekt verhindern.

Als Ergebnis wurden Konstruktionskataloge für das Entwerfen von Fügestellen aufgestellt und beispielhaft deren Anwendung demonstriert.

Eine weitere Besonderheit der generativen Fertigung ist der schichtweise Aufbau der Bauteile. Dazu wurden Untersuchungen durchgeführt, die als Ergebnis unterschiedliche Eigenschaften in verschiedenen Richtungen aufzeigten. Diese Anisotropie gilt als gesichert und muss bei der Konstruktion und der Fertigung berücksichtigt werden. Deshalb wird die Lage

## 10. Fazit

der Bauteile im Bauraum der Fertigungsanlage nach der Hauptkraftrichtung orientiert, so dass eine möglichst große Belastung ertragen werden kann, ohne dass sich die Schichten mechanisch trennen.

Die allgemein gültigen Regeln wurden visuell dargestellt und zu einfach umzusetzenden Gestaltungsrichtlinien in eine Tabelle eingefügt. Diese Gestaltungsrichtlinien fassen die besonderen Eigenschaften generativer Fertigungstechnologien zusammen und sollen als Vorschlag verstanden werden.

## 11. Quellenverzeichnis

- [1] C. Hull.USA Patent 4,575,330, 1984.
- [2] A. Gebhardt, 3D-Drucken Grundlagen und Anwendung des Additive Manufacturing (AM), München: Carl Hanser Verlag München; ISBN 978-3-3446-4237-5, 2014.
- [3] Pahl G. / Beitz W., Konstruktionslehre Methoden und Anwendung 4.Aufl, Berlin: Springer-Verlag ISBN 3-540-61974-7, 4.Aufl., 1997.
- [4] VDI 3405, „Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen,“ Beuth-Verlag, Berlin, 2017.
- [5] DIN 8580, „Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung,“ Beuth-Verlag, Berlin, 2003.
- [6] Uhlmann, E, „Urformen Fertigungstechnik-Vorlesung,“ TU Berlin, 2007.
- [7] Gebhardt, A., Rapid Prototyping, Werkzeuge für die schnelle Produktentwicklung, München: Carl Hanser Verlag; ISBN 3-446-18240-3, 1996.
- [8] Kochan HD, Solid Freeform Manufacturing, Amsterdam: Elsevier Ltd., 1993.
- [9] A. Gebhardt, Generative Fertigungsverfahren Rapid Prototyping-Rapid Tooling-Rapid Manufacturing 3. Aufl., München: Carl Hanser Verlag, ISBN 978-3-3446-22666-1, 2007.
- [10] Pahl G./ Beitz W., Konstruktionslehre Methoden und Anwendung 8.Aufl, Berlin: Springer-Verlag ISBN 978-3-642-29568-3, 8.Aufl., 2013.
- [11] Objet, „Produktdatenblatt <http://www.stratasys.com/customer-support/customer-resource-center/material-patches>,“ 2004. [Online].
- [12] Danjou S., Köhler H., „Vorbereitung von CAD-Konstruktionsdaten für den RP-Einsatz – eine Schnittstellenproblematik,“ <https://www.rtejournal.de/ausgabe5/1509>, 2008.
- [13] Martha, Alexander, Optimierung des Produktentwicklungsprozesses durch CAD-CAM-Integration im Kontext der additiven Fertigung, Duisburg-Essen: Dissertation, 2015.



## 11. Quellenverzeichnis

- [14] DIN 527, „Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze (ISO 527-1:2012),“ Beuth-Verlag, Berlin, 2012.
- [15] Birke Ch., Der Einsatz von Rapid-Prototyping-Verfahren im Konstruktionsprozess, Magdeburg: Shaker Diss., 2002.
- [16] Martha A., Manoharan T., Köhler P., Additiv Manufacturing - Intergration von Fertigung und Produktentwicklung, Dresden: Tagungsband eee2014 KT, 2014.
- [17] Kuhlmann, Kevin, Kostenreduktion beim Vakuum-Differzedruck-Gießen durch additiv gefertigte, hohle Ausbrennmodelle, Magdeburg: Shaker, Diss., 2015.
- [18] RTC Rapid Technologies GmbH, „Bestellformular Material-Optionen Objet Eden,“ Mettmann, 2013.
- [19] Müller S., Grunwald M., „Haptische Wahrnehmungsleistungen,“ [http://haptiklabor.medizin.uni-leipzig.de/fileadmin/res/pdf/publikationen/paper/2013\\_haptische\\_wahrnehmungsleistung\\_physiotherapeuten\\_manuelle\\_medizin.pdf](http://haptiklabor.medizin.uni-leipzig.de/fileadmin/res/pdf/publikationen/paper/2013_haptische_wahrnehmungsleistung_physiotherapeuten_manuelle_medizin.pdf), 2013.
- [20] VDI 2221, „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte,“ VDI, Beuth-Verlag, 1993.
- [21] Beitz W., Grote K.-H., Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 20 Aufl, Berlin: Springer-Verlag; ISBN 3-540-67777-1, 20. Aufl., 2001.
- [22] Zwicky F., Entdecken, Erfinden, Forschen im Morphologischen Weldbild, München: Droemer-Knauer, 1966.
- [23] VDI 2225, „Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Technisch-wirtschaftliche Bewertung,“ VDI, Beuth-Verlag, 1998.
- [24] Lohse, Hartwig, „[https://www.planet-schule.de/warum\\_chemie/kleben/themenseiten/t4/s2.html](https://www.planet-schule.de/warum_chemie/kleben/themenseiten/t4/s2.html),“ 1997. [Online].
- [25] Koebitz U., „Klebstoffe,“ [https://www.konstruktionsatlas.de/verbindungstechnik/kleben/kleben\\_kleber.shtml](https://www.konstruktionsatlas.de/verbindungstechnik/kleben/kleben_kleber.shtml), 2012.

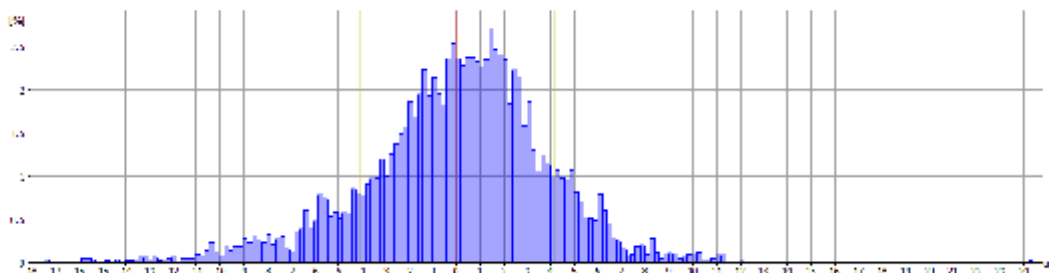
- [26] Keyence, „Digital-Mikroskop VHX 500,“  
<http://www.keyence.de/products/microscope/digital-microscope/vhx-500f/index.jsp>,  
 2017.
- [27] Baumgärtner S, „3D-Druck eignet sich für Prototypen und die Serie,“ 2015. [Online].  
 Available: <http://www.plastverarbeiter.de/51223/3d-druck-eignet-sich-fuer-%C2%ADprototypen-und-die-serie/>.
- [28] GOM mbh, „ATOS Compact Scan,“ in *Benutzerhandbuch*, Braunschweig, 2012.
- [29] Hezog D., Kranz J., Canisius M., Emmelmann C., „Additiv Denken und konstruieren,“  
*Konstruktionspraxis*, pp. 20-21, 2016.
- [30] Koerbitz U., „Klebgerechte Konstruktion,“  
[https://www.konstruktionsatlas.de/verbindungstechnik/kleben/kleben\\_kleber.shtml](https://www.konstruktionsatlas.de/verbindungstechnik/kleben/kleben_kleber.shtml),  
 2012.
- [31] J. Sehrt und G. Witt, „Auswirkung des anisotropen Gefüges strahlgeschmolzener  
 Bauteile auf mechanische Eigenschaftswerte,“ RTeJournal,  
<http://www.dipp.nrw.de/service/dppl/>, 2009.
- [32] Roth K., *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen*, Berlin: Springer-Verlag, ISBN 3-  
 540-09815-1, 1982.

# Measurement Report

## ProfilRauheitsMessung

### Parameter des Rauheitsprofils

F3-1



Histogramm Histogramm Einstellungen

Klassenanzahl: 209  
 Minimalwert: -17.4323µm  
 Maximalwert: 24.3677µm  
 Klassenbreite: 0.2000µm

### Statistiken

Name	Wert	[u]
Elemente	6554	
Klassen	209	
Durchschnittswert	0.0218	µm
Standardabweichung	4.1226	µm

### Parameter

Name	Wert	[u]	Beschreibung
Ra	3.0523	µm	Mittlere Rauheit des Profils
Rq	4.1223	µm	Quadratischer Mittelwert der Rauheit des Profils
Rt	41.7052	µm	Gesamthöhe des Rauheitsprofil
Rz	27.3108	µm	Gemittelte Höhe des Rauheitsprofil
Rmax	41.7052	µm	Maximale Höhe des Rauheitsprofil innerhalb einer Einzelmessstrecke
Rp	24.2729	µm	Höhe der größten Profilspitze des Rauheitsprofil
Rv	17.4323	µm	Tiefe des größten Profiltales des Rauheitsprofil
Rc	15.8765	µm	Mittlere Höhe der Profilmulden des Rauheitsprofil
Rsm	228.8547	µm	Mittlerer Abstand der Profilmulden des Rauheitsprofil
Rsk	-0.2289		Schiefe des Rauheitsprofil

# Measurement Report

## 3D Ansicht

F3-1



Alicona Imaging GmbH  
Dr.-Auner Strasse 21a  
A-8074 Raaba/Graz

aliconona

# Measurement Report

## ProfilFormMessung

Vorschau

F3-1



Measurement performed by Alicona InfiniteFocus, 22.03.2017 13:38:13

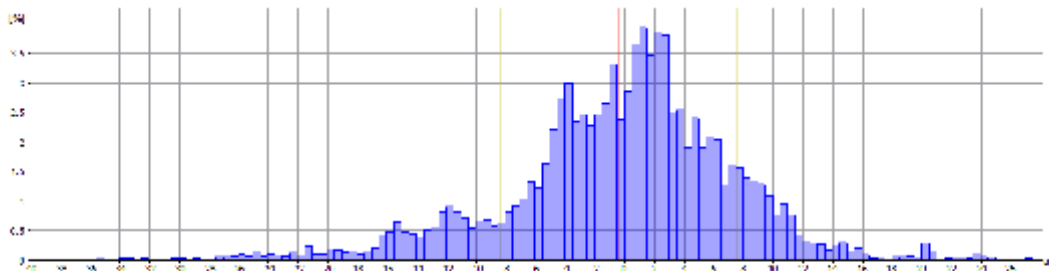
1

# Measurement Report

## ProfilRauheitsMessung

### Parameter des Rauheitsprofils

F5-1



Histogramm Histogramm Einstellungen

Klassenanzahl: 131  
 Minimalwert: -38.0463µm  
 Maximalwert: 27.4537µm  
 Klassenbreite: 0.5000µm

### Statistiken

Name	Wert	[u]
Elemente	6554	
Klassen	131	
Durchschnittswert	-0.3826	µm
Standardabweichung	8.0205	µm

### Parameter

Name	Wert	[u]	Beschreibung
Ra	5.8804	µm	Mittlere Rauheit des Profils
Rq	8.0290	µm	Quadratischer Mittelwert der Rauheit des Profils
Rt	65.3722	µm	Gesamthöhe des Rauheitsprofil
Rz	49.1031	µm	Gemittelte Höhe des Rauheitsprofil
Rmax	59.0305	µm	Maximale Höhe des Rauheitsprofil innerhalb einer Einzelmessstrecke
Rp	27.3258	µm	Höhe der größten Profilspitze des Rauheitsprofil
Rv	38.0463	µm	Tiefe des größten Profitales des Rauheitsprofil
Rc	29.7248	µm	Mittlere Höhe der Profilunregelmäßigkeiten des Rauheitsprofil
Rsm	339.7328	µm	Mittlerer Abstand der Profilunregelmäßigkeiten des Rauheitsprofil
Rsk	-0.7522		Schiefte des Rauheitsprofil

Alicona Imaging GmbH  
Dr.-Auner Strasse 21a  
A-8074 Raaba/Graz

aliconona

# Measurement Report

## 3D Ansicht

F5-1



# Measurement Report

## ProfilFormMessung

Vorschau

F5-1

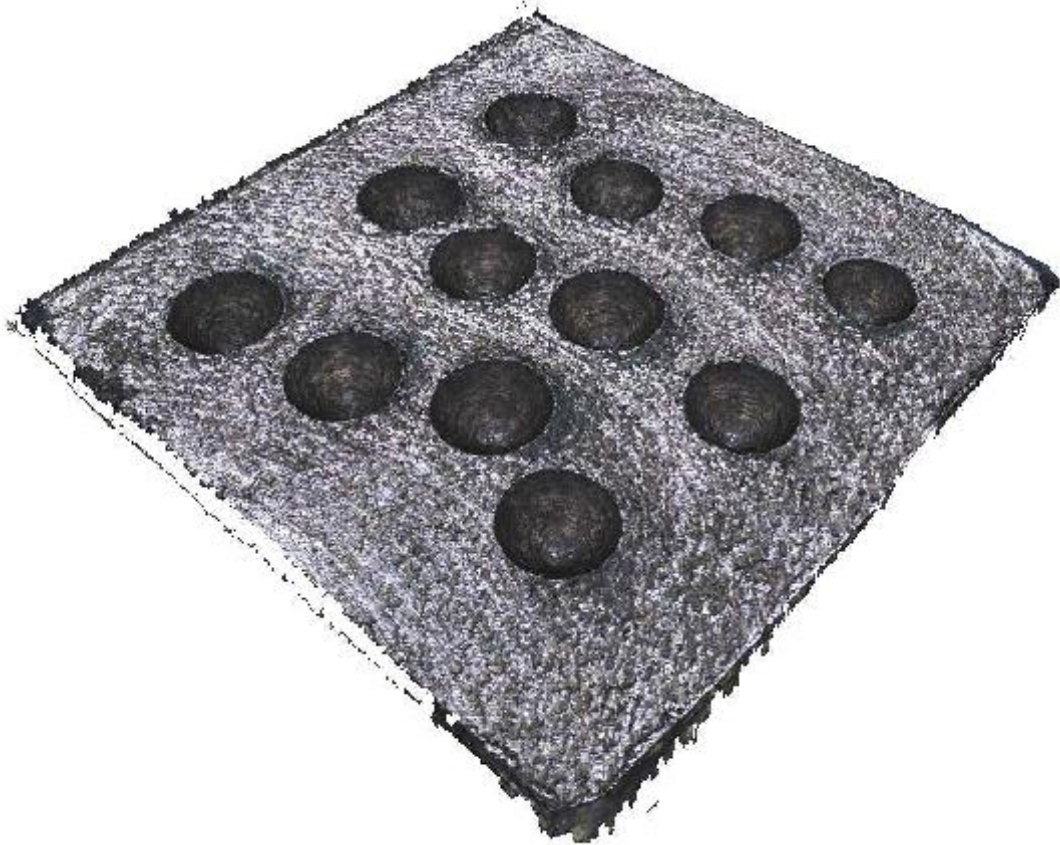




# Measurement Report

## 3D Ansicht

F8-2

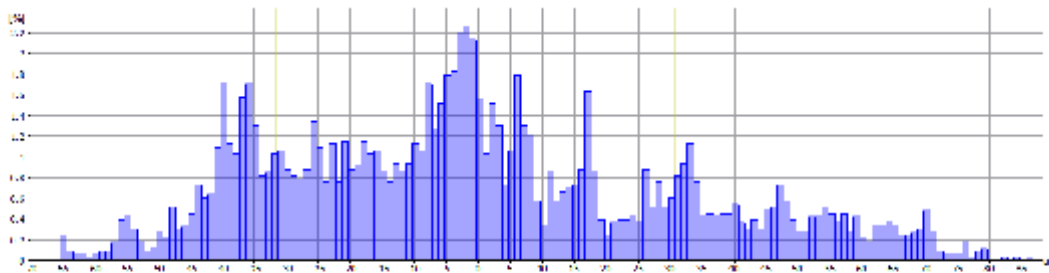


# Measurement Report

## ProfilRauheitsMessung

### Parameter des Rauheitsprofils

F8-2



Histogramm Histogramm Einstellungen

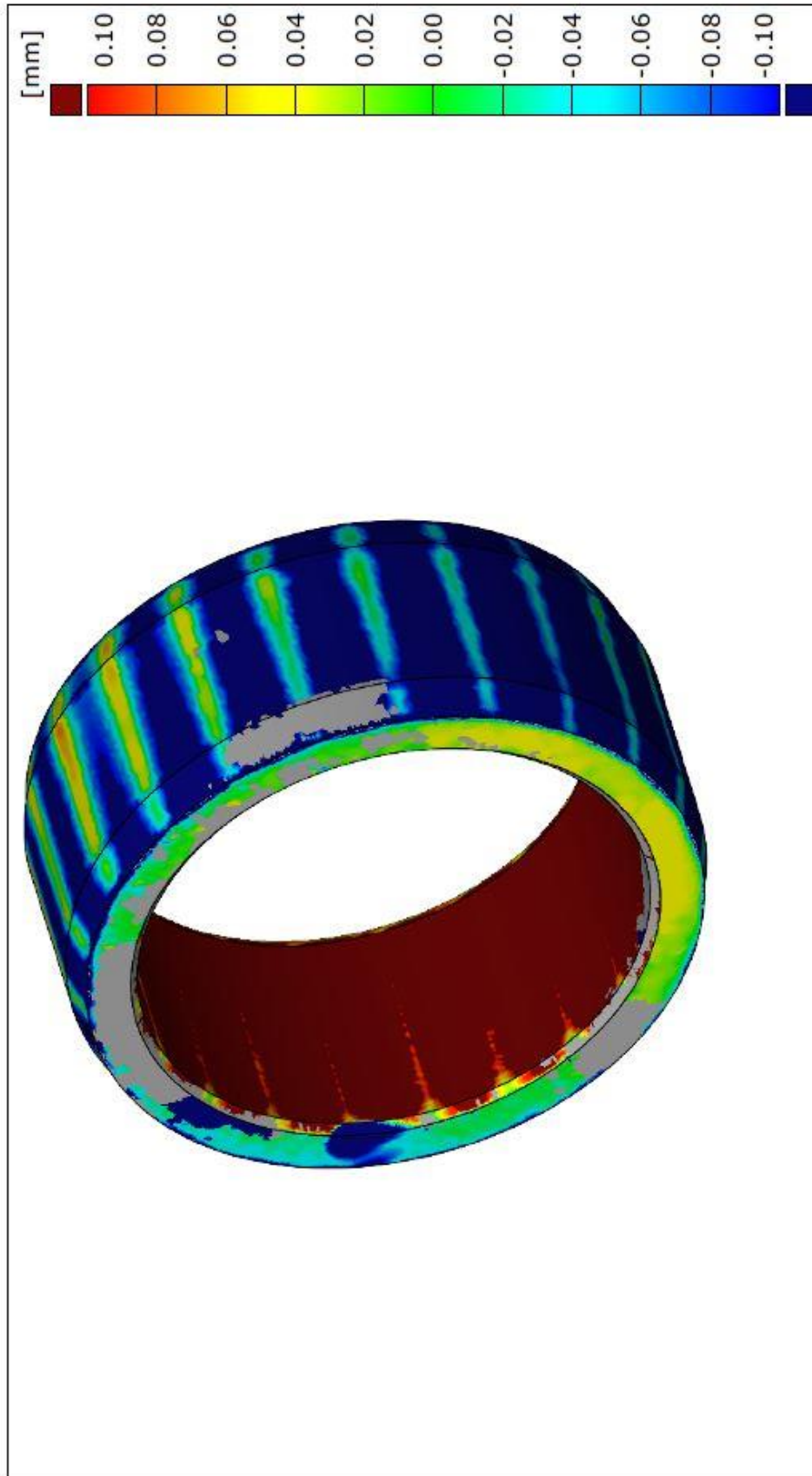
Klassenanzahl: 152  
 Minimalwert: -65.3040µm  
 Maximalwert: 86.6960µm  
 Klassenbreite: 1.0000µm

### Statistiken

Name	Wert	[u]
Elemente	3278	
Klassen	152	
Durchschnittswert	-0.3548	µm
Standardabweichung	31.1964	µm

### Parameter

Name	Wert	[u]	Beschreibung
Ra	25.0798	µm	Mittlere Rauheit des Profils
Rq	31.1937	µm	Quadratischer Mittelwert der Rauheit des Profils
Rt	151.1372	µm	Gesamthöhe des Rauheitsprofil
Rz	125.4497	µm	Gemittelte Höhe des Rauheitsprofil
Rmax	141.8138	µm	Maximale Höhe des Rauheitsprofil innerhalb einer Einzelmessstrecke
Rp	85.8332	µm	Höhe der größten Profilspitze des Rauheitsprofil
Rv	65.3040	µm	Tiefe des größten Profiltales des Rauheitsprofil
Rc	117.3777	µm	Mittlere Höhe der Profilvergleichshöhen des Rauheitsprofil
Rsm	1.3753	mm	Mittlerer Abstand der Profilvergleichshöhen des Rauheitsprofil
Rsk	0.3918		Schiefte des Rauheitsprofil



Prüfer: Carsten Haugwitz Firma: OvGU Abteilung: IMK Ort: Magdeburg Datum: 16.02.16	Projekt: Zylinder Bauteil: Teile-Nr.: Datenstand: Chargen-Nr.:	System: GOM ATOS compact 2 Ausrichtung: Vorausrichtung 1	
--	--	---	--

Bild 91: Flächenvergleich Ring

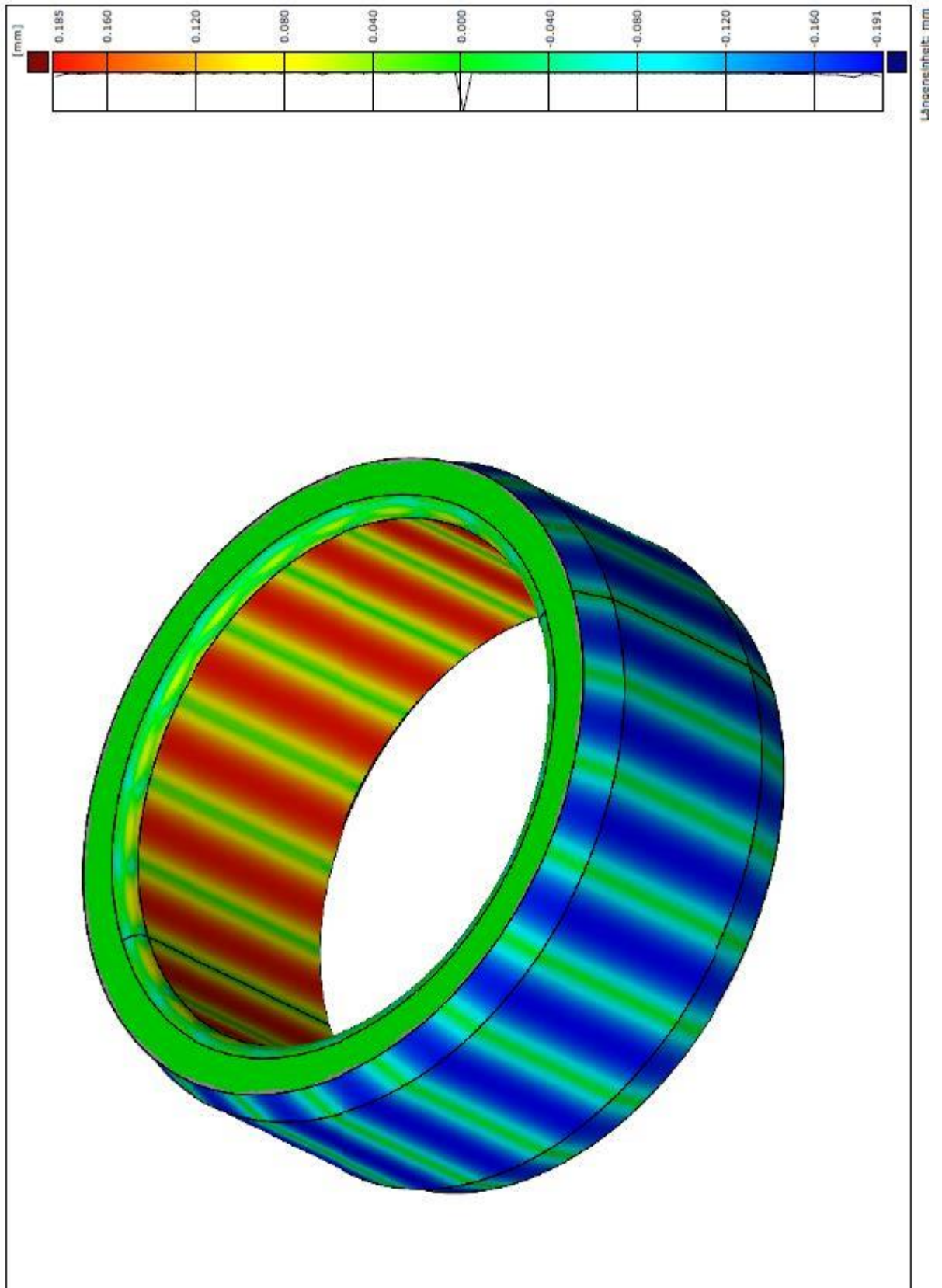


Bild 92: Flächenvergleich STEP -STL