

Modul AKS 16810

Modulbezeichnung: Bachelorarbeit

Der Fertigungsverlauf eines Kohle-Faser-Stabs für die Cellohalsversteifung



Candeniz Kudu

42825

INDEX

Abstract.....	7
1. Einleitung	8
2. Design.....	11
Geometrisches Design des Versteifungstabs.....	11
Parametrische Zeichnung des Stabs:.....	12
Schritte.....	14
Nachoptimierung des Stabs.....	22
Materialauswahl.....	25
Carbonfaser	25
TOW, K-Zahlen, Stoffgewichte	30
Weitere Verbrauchsmaterialien und notwendige Werkzeuge.....	30
3. Formenkonstruktion.....	32
Formmaterial	32
Erstellung der CAM-Strategien und Werkzeugwegplanung.....	44
Strategie und Werkzeugwegplanung	45
Umsetzung der CAM-Programmierung	47
Erstellung des NC-Programms.....	58
Fräsen	58
Schleif- und Polierprozess der Formoberfläche.....	60
Wirksamkeitsprüfung von Versiegler ve Trennmittel im Vorversuch	60
Ein Zweiter form zur Handlaminierung	62
Fertigung zweiter Form	65
4. Laminationsstrategie und Materialeinsatz	72
Strategie	72
Wickelmethode.....	74
Handlaminieren.....	76
Vorbereitung des Bauteils für den Aushärtungsprozess	76
5. Aushärtung des CFK	77
6. Ergebnisse	79
Diskussion.....	81

7. Fazit und Ausblick.....	82
8. Literaturverzeichnis.....	83
9. Abbildungs-, Schritten- und Tabellenverzeichnis	84
10. Danksagung.....	87
11. Selbständigkeitserklärung	89
Anhang A:	91

Abstract

Im traditionellen Cellobau verhindern Halsbewegungen während und nach der Montage des Halses am Korpus, dass der kritische Projektionswinkel, der die Saitenhöhe über dem Griffbrett und die Stegposition bestimmt, innerhalb der angestrebten Toleranzen stabilisiert wird. In Kombination mit Faktoren wie Saitenspannung, Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen sowie dem zeitabhängigen Materialkriechen des Holzes führen diese strukturellen Stabilitätsprobleme zu dauerhaften Deformationen des Instruments, was den Spielkomfort beeinträchtigt und kostenintensive Wartungsprozesse nach sich zieht. In den vom Autor im Rahmen seiner Projektarbeit „Theoretische Material- und Geometrieoptimierung der Cello-Halsstabilität in CAD-Simulationen“ im Jahr 2024 durchgeführten FEM-Simulationen unter Zuweisung unterschiedlicher Materialeigenschaften erweisen sich die technischen Keramiken oder Legierungen, die die höchste mechanische Leistung zeigten, in einer kleinen Geigenbauwerkstatt als praktisch unmöglich zu verarbeiten. Daher wurde kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff als die idealste und leistungsstärkste Alternative identifiziert, die direkt in der Werkstatt durch Boutique-Formverfahren hergestellt werden kann, ohne eine industrielle Fertigungsinfrastruktur zu erfordern. Diese Arbeit ist eine Fortsetzung des genannten simulationsbasierten Projekts und konzentriert sich auf den experimentellen Herstellungsprozess und die Validierung einer CFK-Stabilisierungsstange mit L-Form und einem Querschnittsübergang vom D-Profil zum O-Profil. Das Hauptziel der Arbeit besteht darin, einen sicheren und reproduzierbaren Arbeitsablauf für die Herstellung dieser Verbundkomponente zur Verstärkung des Cellohalses zu entwickeln und detailliert zu dokumentieren. Methodisch ist die Forschung als ein iterativer Produktentwicklungsprozess aufgebaut, der die parametrische CAD-Optimierung, die CNC-Formenherstellung, die Bestimmung der Faserlagenkonfiguration und die thermischen Aushärtungsphasen umfasst. Diese Arbeit zeigt, dass die Kombination aus gerolltem UD-Kohlefasergewebe und einem darüber gezogenen Carbon-Flechtschlauch die funktionellste und am einfachsten zu realisierende Fertigungsmethode darstellt. Das entwickelte Produkt ist in diesem Zustand bereits direkt für den Cellobau einsatzfähig. Da bei der Verwendung von Prepregs Crimp-Effekte an den Innenecken beobachtet wurden, wird davon ausgegangen, dass das Materialpotenzial mit jener Methode nicht vollständig ausgeschöpft werden konnte. Alternative Verfahren wie die Harzinfusion könnten eine straffere, crimpfreie Ausrichtung der Fasern ermöglichen und so die Materialeffizienz maximieren. Um dies zu verifizieren, sind zukünftig detaillierte Messungen und Untersuchungen erforderlich.

1. Einleitung

Im traditionellen Cellobau stellt die langfristige Stabilität des Halses eine zentrale konstruktive Herausforderung dar. Während des Gebrauchs und bereits während der Montage können durch die hohe Saitenspannung sowie durch Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen messbare Verformungen entstehen. Diese Effekte werden zusätzlich durch das zeitabhängige Kriechverhalten des Holzes verstärkt und führen zu Veränderungen des Halswinkels, welche die Spielbarkeit und die geometrische Stabilität des Instruments beeinträchtigen.

Trotz einer umfangreichen Fachliteratur in den Bereichen Festigkeitslehre und Werkstoffkunde lässt sich keine wissenschaftliche Studie über die Herstellung einer Stabilisierungsstange im Cellohals und deren Auswirkungen auf das Instrument finden. Es existieren jedoch wertvolle Erkenntnisse und Entwicklungsansätze aus der Praxis. So beschreibt Ham die Integration von Verstärkungselementen auf Kohlenstofffaserbasis im Halsbereich und deren praktische Umsetzung in der Werkstatt.¹ Ähnliche Ansätze zeigen sich bei Burgess, der die Halsfussverstärkung mit kleinen Holzstiften beschreibt², und bei Schryer, der eine L-förmige CFRP-Verstärkungsstruktur am Halsfuss vorschlägt.³ Curtin diskutiert historische sowie moderne Methoden des Halsbaus und deren Auswirkungen auf die strukturelle Stabilität von Streichinstrumenten.⁴

Im Rahmen einer im Jahr 2024 durchgeführten Projektarbeit wurden diese Konzepte zusätzlich mittels Finite-Elemente-Simulationen untersucht.⁵ Dabei zeigte sich, dass insbesondere eine L-förmige Geometrie mit einem Übergang vom D-Profil zum O-Profil eine hohe strukturelle Steifigkeit aufweist. Obwohl alternative Werkstoffe wie technische Keramiken und metallische Legierungen die besten mechanischen Eigenschaften zeigen, sind sie für die werkstattbasierte Herstellung nicht praktikabel. Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff stellt daher die geeignetste Lösung für eine realisierbare Umsetzung dar.

Trotz dieser Informationen gibt es bislang keine detaillierte Beschreibung des Herstellungsprozesses, die sowohl die Formgebung als auch die Materialbearbeitung und die damit verbundenen Verfahren im Instrumentenbau umfasst. Ausgehend von dieser Feststellung ist es das Ziel dieser Arbeit, einen Herstellungsprozess für einen CFK-Stabilisierungsstab zur Verstärkung des Cellohalses zu entwickeln und diesen in der Praxis anzuwenden.

Vor diesem Hintergrund befasst sich diese Arbeit mit der Frage, wie ein CFK-Verstärkungsstab für Instrumentenhälse hergestellt werden kann. Dabei wird untersucht, wie sich rückwirkende Korrekturen im Prozess vornehmen und eine zukünftige Skalierbarkeit der Geometrie

¹ Jim Ham, *Innovation in Violin Making Cello Neck Reinforcement*, in VSA, Vol XXIII, No 3.

² David Burgess, *Stabilising Cello Necks*, in: *The Strad. Trade Secrets*, Vol. 119 (August 2008, Nr. 1420), S.64-67.

³ Raymond Schryer, *Installing a carbon-fibre reinforcement to a cello neck*, in: *The Strad. Trade Secrets*, Vol. 126 (April 2015, Nr. 1500), S. 67-71.

⁴ Joseph Curtin, *Adjustement to change*, in: *The Strad*, Vol. 132 (August 2021, Nr. 1576), S. 28-33.

⁵ Candenz Kudu, *Theoretische Material- und Geometrieoptimierung der Cello-Halsstabilität in CAD-Simulationen*, Markneukirchen 2024.

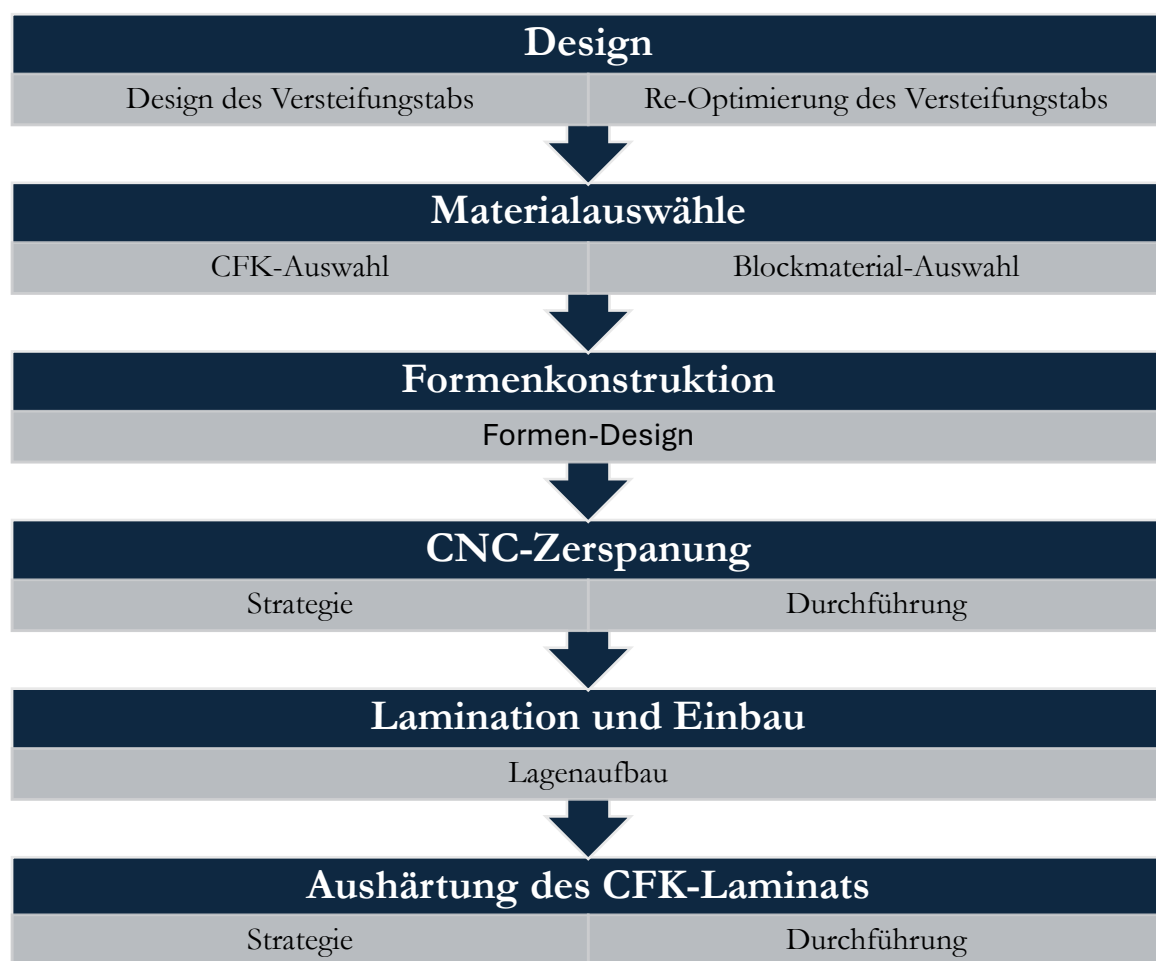
gewährleisten lassen. Zudem steht im Fokus, wie die Produktion mit einfach zugänglichen Werkzeugen auf kostengünstige und praktische Weise realisiert werden kann.

Methodisch basiert die Arbeit auf einem experimentellen, iterativen Herstellungsprozess, der die CAD-gestützte Konstruktion, den CNC-basierten Formenbau sowie die Verarbeitung und Aushärtung von kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) umfasst. Die Verwendung von Prepreg-basierten CFK-Materialien wird dabei gewählt, da sie formstabil sind und ein definiertes Verhältnis von Fasern und Harz aufweisen. Außerdem lassen sie sich gut und gleichmäßig verarbeiten. Da keine aufwendigen Verfahren wie Vakuuminfusion oder Autoklavtechnik zur Verfügung stehen, stellt das Prepreg-Verfahren eine werkstattdaugliche und prozesssichere Lösung dar. Die geometrische Genauigkeit des Stabs ist ein wichtiger Faktor für die Produktqualität. Ist die Geometrie exakt, kann der Stab ohne zusätzliche Anpassungen in die gefräste Nut im Cellohals eingesetzt werden. Dadurch wird eine präzise und effiziente Montage der Verstärkungskomponente im Cellohals ermöglicht.

Der Produktionsprozess wurde als experimenteller Produktentwicklungsprozess durchgeführt. Designentscheidungen und Optimierungen wurden auf der Grundlage praktischer Erfahrungen und Rückmeldungen aus den verschiedenen Phasen des Produktionsprozesses sowie im Rahmen eines Versuch-und-Irrtum-Ansatzes getroffen. Der in der vorherigen Arbeit entwickelte D-Profil-L-Verstärkungsstab wurde in Autodesk Fusion parametrisch weiterentwickelt und auf Grundlage des Feedbacks erfahrener Cellobauer optimiert. Die in dieser Arbeit formulierten Fertigungsschritte sind natürlicherweise nur auf dieses Programm ausgelegt. Anschließend wurde eine geeignete Aushärteform für den Herstellungsprozess entworfen. Diese Form wurde in einer CAD-Umgebung modelliert, mittels CNC bearbeitet und für die Produktion vorbereitet. Parallel dazu wurde eine Layup-Form ebenfalls in einem vergleichbaren CAD- und CNC-Prozess hergestellt. Diese Form wurde verwendet, um eine kontrollierte und reproduzierbare Platzierung der CFK-Schichten zu gewährleisten. Die Bauteile wurden möglichst unter denselben Fertigungsprinzipien gefertigt. Der Lagenaufbau bestand aus etwa 8–9 Lagen unidirektionalem Kohlefasermaterial in 0°-Ausrichtung. Zusätzlich wurde eine Lage geflochtenes Carbonegewebe auf der Innenseite sowie eine weitere Lage auf der Außenseite aufgebracht. Als äußerste Schicht wurde *Peel Ply* verwendet. Diese Schicht erzeugte eine raue, klebfähige Oberfläche und stellte die notwendige Oberflächenvorbereitung für das spätere Verkleben im Cellohals dar. Im inneren Aufbau wurde zusätzlich ein Silikonschlauch verwendet. Dieser wurde während des Herstellungsprozesses auf etwa 3 bar aufgeblasen, um die CFK-Schichten gegen die Formwand zu pressen. Dadurch wurde eine gleichmäßigere Verdichtung und ein geringerer Porenanteil erreicht. Nach Abschluss des Aushärtungsprozesses wurde der Silikonschlauch entfernt, wodurch eine hohle Innenstruktur entstand. Der Aushärtungsprozess wurde in einem Backofen durchgeführt. Dabei wurde kontinuierlich ein Vakuum angewendet. Zusätzlich wurde der Innendruck temperaturabhängig stufenweise erhöht: etwa 1 bar bei 80 °C, 2 bar bei 100 °C und 3 bar bei 120 °C. Diese Vorgehensweise diente dazu, die Schichtkonsolidierung zu verbessern und die Bildung von Poren zu reduzieren. Im Herstellungsprozess wurden in einigen Prototypen 2–3 Lagen

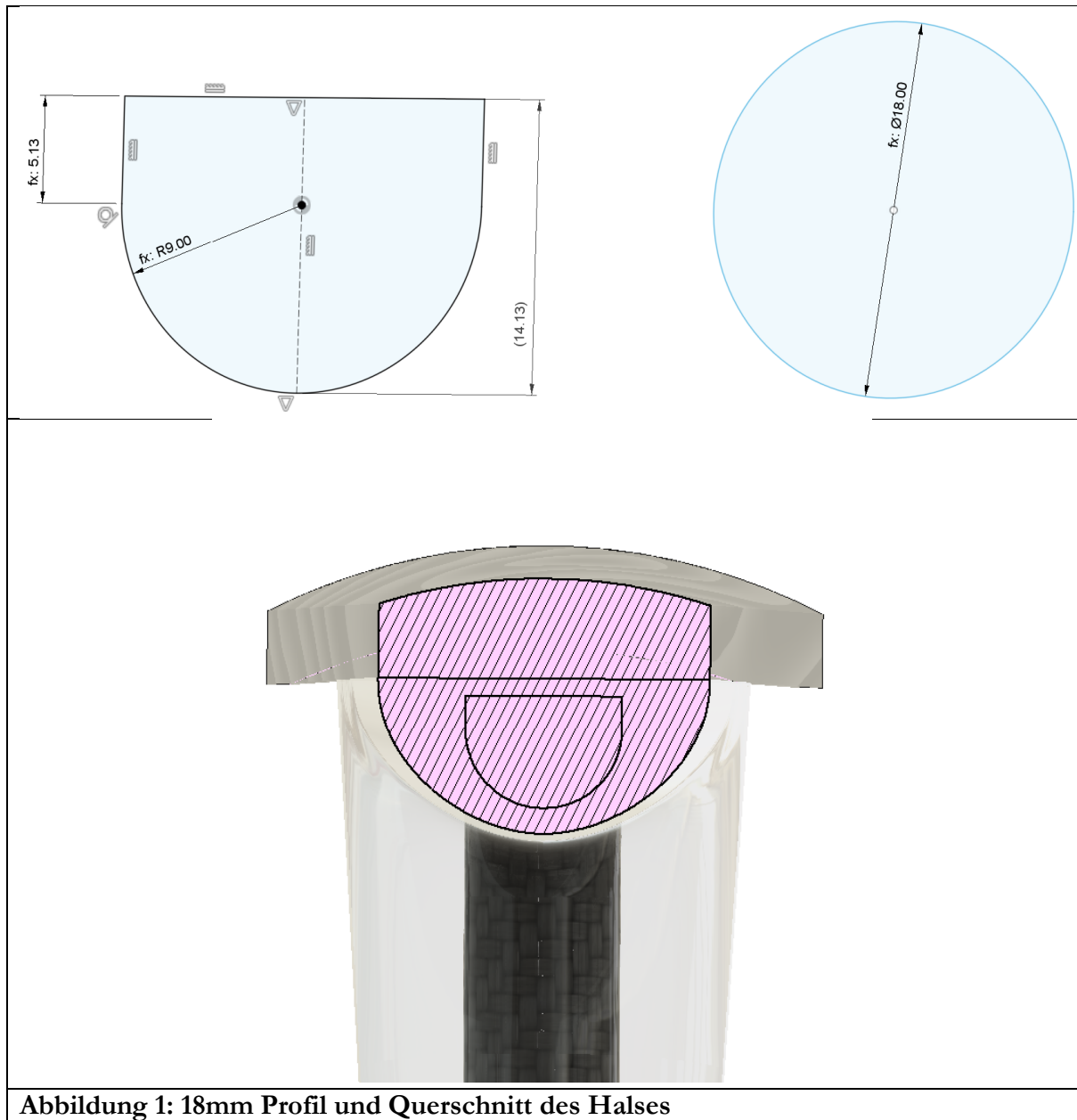
Epoxidfilm verwendet. Da die geflochtenen und schlauchförmigen Strukturen keine Prepreg-Materialien waren, musste die Harzverteilung manuell kontrolliert werden. Dadurch traten in einigen Bereichen unzureichende Benetzung und trockene Zonen auf. Um dieses Problem zu beheben, wurde die Epoxidmenge in bestimmten Prototypen erhöht, und insbesondere im fünften Prototyp wurden vier Lagen Epoxidfilm verwendet, wodurch eine homogenere Harzverteilung und eine verbesserte interlaminaire Verbindung erreicht wurde.

In der ersten Phase wurden drei Prototypen hergestellt. Auf Grundlage der aus diesem Prozess gewonnenen Erfahrungen wurde die Layup-Form neu gestaltet. Mit der neuen Form wurden zwei weitere Prototypen gefertigt, sodass insgesamt fünf CFK-Verstärkungstäbe in einem iterativen Entwicklungsprozess hergestellt wurden. Nach folgendem Schema wurde die Herstellung durchgeführt:



2. Design

Geometrisches Design des Versteifungstabs



In der vorherigen Arbeit wurde berechnet, dass die massivste Geometrie, die in den anhand von Weishaars Schablonen modellierten Cellohals passt, ein Stab mit einem Durchmesser von 18 mm ist. Wenn das Bauteil an diesem Punkt 2 mm in den Hals eingelassen wird, verbleibt an der Unterseite eine Ausgleichszugabe von 2–3 mm. Dieses Profil wurde so entworfen, dass der Geigenbauer als Endnutzer die Nut problemlos mit einem 18-mm-Kugelkopf-Fräser ausheben und den Halsfuß mit einem 18-mm-Holzbohrer durchbohren kann. Zudem bestand das Risiko, dass eine eckig gefräste Nut aufgrund des Verlaufs der Jahrringe im Halsholz zu einer

Rissausbreitung führen könnte. Um dieses Risiko zu minimieren, wurde das Design als D-Profil gestaltet. Ein weiterer Vorteil des D-Profils besteht darin, dass es die Integration der maximal möglichen Materialmasse im Inneren des Halses erlaubt, ohne die äußere Holzstruktur des Cellohalses zu schwächen.

Parametrische Zeichnung des Stabs:

In der folgenden Tabelle ist die Parameterliste für die Konstruktion aufgeführt. Vor Beginn der Konstruktion müssen diese Daten in den Parameterbereich eingegeben werden. Die Eingabe kann entweder manuell erfolgen oder als Excel-Datei importiert werden, indem das "Parameter-I/O-Paket" installiert und verwendet wird. Im gesamten Verlauf dieser Arbeit weisen kursiv gedruckte Angaben auf parametrisierte Maße hin.

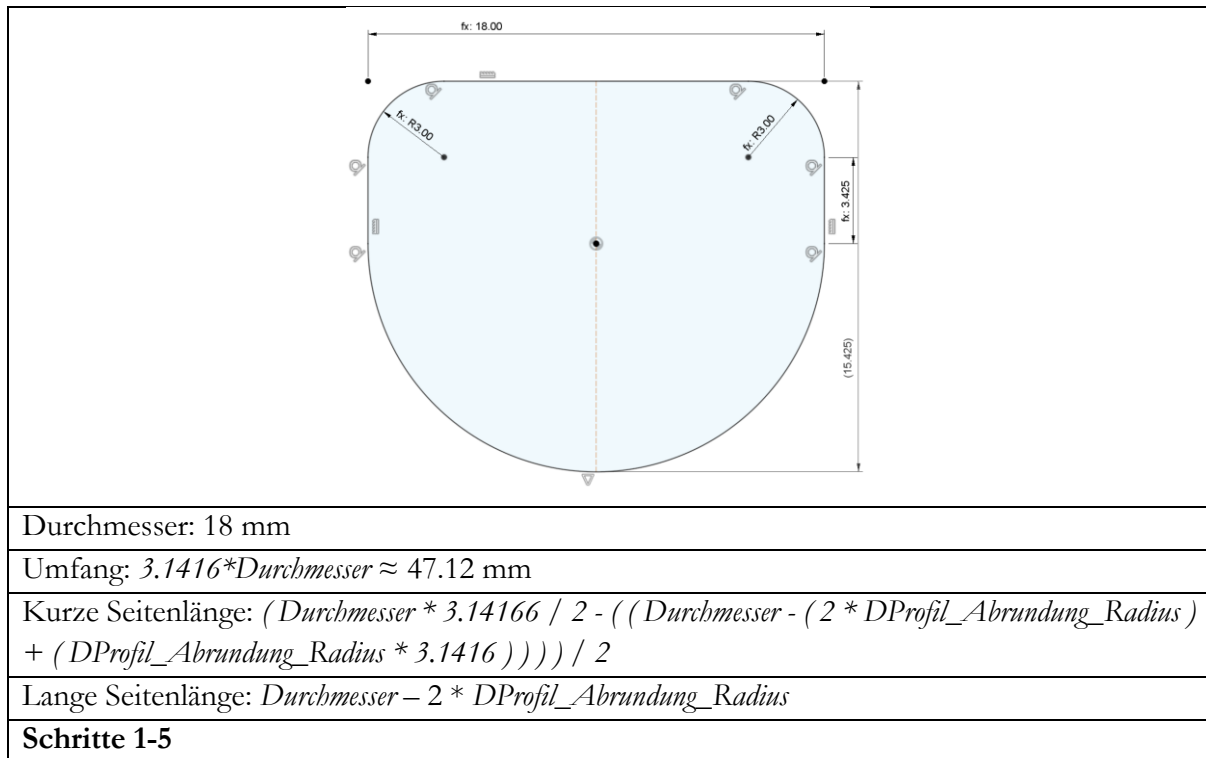
Durchmesser	mm	18 mm
Halsmensur	mm	280 mm
Halsfußlänge	mm	120 mm + 22 mm + 5 mm
Halseinlaß	mm	15 mm
Versenkungtiefe	mm	1 mm
Halsrückenversatz	mm	2.3 mm
Halsfußschräge	deg	83 deg
Halsüberstand	mm	22 mm
Deckenrandstärke	mm	5.2 mm
Zargenhöhe	mm	120 mm
Randüberstand	mm	3 mm
Zäpfchenhöhe	mm	21 mm
Halsstärke_oben_ausschließlich_Griffbret	mm	17.4 mm
Halsstärke_unten_ausschl_Griffbret	mm	18.5 mm
Stab_biegungsradius	mm	7.5 mm
Halsfußradius	mm	20 mm
DProfil_Verkürzung	mm	Durchmesser / 2 + 10 mm
Tiefe_des_Stabs	mm	100 mm
Befestigungsschrauben_Durchmesser	mm	6 mm
Entlastungsbohrungen_Durchmesser	mm	15 mm

d155	mm	Entlastungsbohrungen_Durchmesser * 1.5
Form_Stärke	mm	20 mm
d172	mm	10.9956 mm
Taschen_Versatz	mm	7 mm
Taschen_Tiefe	mm	2 mm
Gewindehülse_Tiefe	mm	8 mm
DProfil_Abrundung_Radius	mm	3 mm
Tabelle 1: Parameterliste		

Zu Beginn der Konstruktion bestand das wichtigste Kriterium darin, die Umfangslängen des D-Profils und des Zylinders parametrisch aufeinander abzustimmen, um einen gleichmäßigen Oberflächenübergang und eine homogene Materialverteilung zu erzielen. In der Fertigung ermöglicht diese Geometrie die Verwendung von einheitlich rechteckig zugeschnittenen Kohlefasergeweben, die ohne weitere Bearbeitung direkt gewickelt werden können. Da zudem bei der Verwendung von Prepregs Faltenbildungen an den Ecken beobachtet wurden, kam zusätzlich die Technik des manuellen Einlegens zum Einsatz. Für die endgültige Geometrie des D-Profils müssen die Oberkante und die Seitenkanten im Winkel von 90° zueinander stehen. Da bei der CNC-Bearbeitung des Werkstücks ein Fräser mit kugelförmigem Kopf ($\varnothing$ 6 mm) verwendet wird, wurden die Ecken zur Erleichterung der Fertigung abgerundet; der Radius wurde dabei auf 3 mm festgelegt, was genau dem Werkzeugradius entspricht. Aus technischer Sicht ist dieser Radius variabel; je kleiner der gewählte Eckenradius ist, desto geringer ist die resultierende Gesamttiefe des Profils.

Darüber hinaus birgt das Beibehalten von scharfen Ecken beim D-Profil Risiken für die Bauteilgeometrie. Da sich Kohlefasertextilien nicht um scharfe Kanten biegen lassen, würde in diesen Bereichen ein Hohlraum entstehen, der sich beim Laminieren rein mit Harz füllt. Um diese strukturellen Schwachstellen und potenziellen Materialfehler zu vermeiden, wurden die Ecken gezielt abgerundet. Zudem stellt ein D-Profil mit scharfen Kanten beim Übergang zu einem O-Profil eine schwer zu bearbeitende Geometrie dar. Durch das Abrunden der Kanten wurde der Fertigungsprozess effizienter gestaltet.

Schritte



Schritt 1

Auf der Front-Ebene wird ein Halbkreis mit einem Durchmesser von 18 mm gezeichnet, wobei der Ursprungspunkt als Mittelpunkt dient.

- Volumenkörper > Skizze erstellen > ZX Ebene (Vorne Ebene)
- Skizze > Erstellen > Bogen durch Mittelpunkt
- Skizze > Erstellen > Skizzenbemaßung > Parameter: *Durchmesser*.

Schritt 2

An den Enden des Halbkreises werden zwei kurze Kanten tangential gezeichnet. Anschließend werden diese Kanten vertikal ausgerichtet.

- Skizze > Erstellen > Linie
- Skizze > Abhängigkeiten > Horizontal/Vertikal
- Skizze > Abhängigkeiten > Tangente

Schritt 3

An den oberen Punkten dieser beiden kurzen Kanten wird eine lange Kante gezeichnet und horizontal ausgerichtet. Kurze und lange Kanten werden mit der Funktion „Abrunden“ um den

Betrag *DProfil_Abrundung_Radius* verrundet. Die Gesamtlänge der Radien der beiden kurzen Kanten und der verkürzten langen Kante muss dem halben Umfang entsprechen.

- Skizze > Erstellen > Linie
- Abhängigkeiten > Horizontal/Vertikal
- Skizze > Erstellen > Skizzenbemaßung > Parameter: $(\text{Durchmesser} * 3.14166 / 2 - ((\text{Durchmesser} - (2 * \text{DProfil_Abrundung_Radius})) + (\text{DProfil_Abrundung_Radius} * 3.1416))) / 2$
- Skizze > Ändern > Abrunden (Kurze und lange Seite werden verbunden) > Parameter: *DProfil_Abrundung_Radius*

Schritt 4

Anschließend wird mit einer Konstruktionslinie eine Mittellinie gezeichnet. Diese Mittellinie wird so fixiert, dass sie vertikal, zum Mittelpunkt der langen Kante, koinzident (coincident) zum Ursprung und koinzident zum Halbkreis verläuft.

- Skizze > Erstellen > Linie > Konstruktionslinie (Tastaturkurzbefehl "X")
- Skizze > Abhängigkeiten > Horizontal/Vertikal
- Skizze > Abhängigkeiten > Mittelpunkt (zu Uzun Kenar)

Schritt 5

Die Konstruktions-Mittellinie wird zur Messung mittels Skizzenbemaßung als getriebene Bemaßung erstellt. Diese Länge zeigt uns die minimale Tiefe dieser geometrischen Form innerhalb des Schafts mit ca. 15,4 mm an. Auf diesen Punkt wird im Abschnitt Designoptimierung erneut eingegangen.

- Skizze > Erstellen > Bemaßung > getriebene Bemaßung

Schritt 6

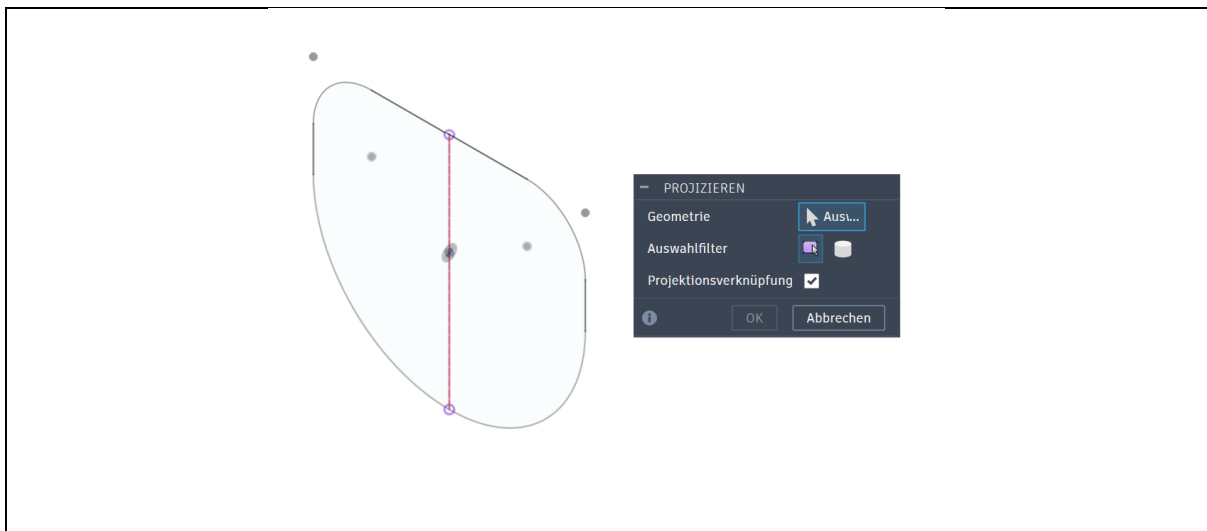
Um die Seitenansicht dieses Profils zu erstellen, wird eine zweite Skizze auf der YZ-Ebene erstellt. In derselben Skizze wird in den folgenden Schritten auch die Seitenzeichnung des Halses erstellt. Auf diese Weise stellen wir sicher, ob der Stab die passenden Maße für den Hals aufweist.

- Volumenkörper > Skizze erstellen > YZ Ebene (Rechts Ebene)

Schritt 7

Um die erstellte Skizze mit der ersten Skizze zu verknüpfen, werden die unteren, oberen und Ursprungspunkte der Geometrie aus der 1. Skizze in die 2. Skizze projiziert. Falls die erste Skizze im linken Browser-Menü ausgeblendet ist, muss sie eingeblendet werden. Die Funktion „Projektionsverknüpfung“ muss ausgewählt sein.

- Skizze > Erstellen > Projizieren/Einschließen



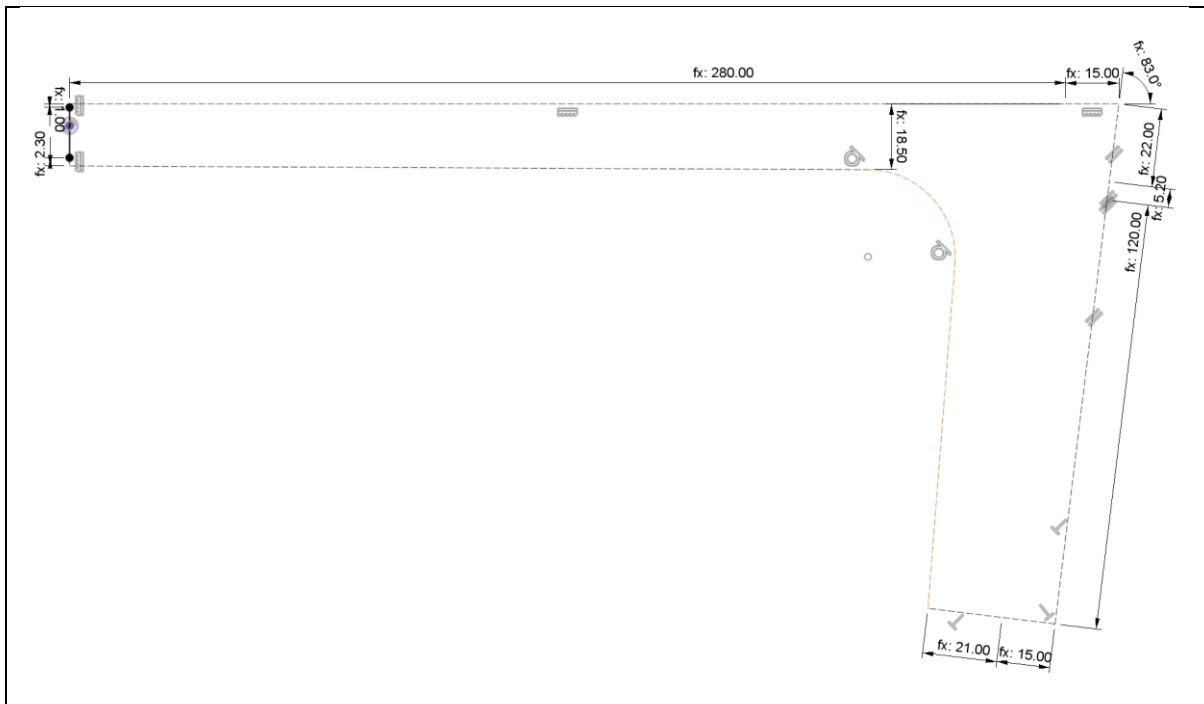
Schritt 7

Schritt 8

Die projizierten Punkte werden durch Konstruktionslinien miteinander verbunden. Anschließend werden zwei vertikale Linien gezeichnet: eine vom oberen Punkt nach oben und eine vom unteren Punkt nach unten. Die Länge der oberen Linie ergibt die Versenkungstiefe, während die Länge der unteren Linie den Halsrückenversatz ergibt.

- Skizze > Erstellen > Linie > Konstruktionslinie
- Skizze > Abhängigkeiten > Horizontal/Vertikal

- Skizze > Erstellen > Skizzenbemaßung > Für obere Linie, Parameter: *Versenkungtiefe* > Für untere Linie, Parameter: *Halsrückenversatz*



Schritte 8-12

Schritt 9

Der Endpunkt der oberen Linie ist gleichzeitig der Halsmensur-Punkt, und von hier aus werden zwei aufeinanderfolgende Linien nach rechts gezeichnet. Diese entsprechen der Halsmensur und dem Halseinlaß.

- Skizze > Erstellen > Linie > Konstruktionslinie (2 Mal für die anschließende Linien)
- Skizze > Erstellen > Skizzenbemasung > Erste Linie, Parameter: *Halsmensur* > Zweite Linie, Parameter: *Halseinlaß*

Schritt 10

Vom Endpunkt des Schafts aus werden drei aufeinanderfolgende und kollineare Linien in einem Winkel von 83° nach unten gezeichnet. Diese sind von oben nach unten jeweils Halsüberstand, Deckenrandstärke und Zargenhöhe. Sie werden mit diesen Parametern bemaßt.

- Skizze > Erstellen > Linie > Konstruktionslinie (3 Mal für die anschließende Linien)
- Skizze > Erstellen > Skizzenbemaßung > Zwischen Halseinlaß und Halsüberstand, Parameter: *Halsfußschräge* > Von oberen Linie nach mittleren- und unteren Linien, Parameter: *Halsüberstand* > *Deckenrandstärke* > *Zargenhöhe*

Schritt 11

An dem Punkt am Halsfuß werden zwei aufeinanderfolgende Linien im 90°-Winkel gezeichnet. Die erste dieser Linien wird auf das Maß des Halseinlasses und die zweite auf Zäpfchenhöhe abgetragen. Die Abmessungen der am Zäpfchen zu verleimenden Halsfußfläche variieren in Abhängigkeit von Parametern wie der Deckenwölbungshöhe, der Halsprojektion oder der Halsfußschräge. Aus diesem Grund wird eine Mindestbemaßung vorgenommen. Normalerweise beträgt die Länge dieser Fläche etwa 40-45 mm. Diese Fläche wird an die Leimfläche des Halsfußes zum Oberklotz in einem Winkel von weniger als 90° angepasst, neigt sich also leicht, was nach der Montage des Halsschafts einen Verriegelungsmechanismus bildet. Um jedoch die Variationen zu reduzieren, wird in dieser Arbeit von 90° ausgegangen.

- Skizze > Erstellen > Linie > Konstruktionslinie (2 Mal für die anschließende Linien)
- Skizze > Erstellen > Skizzenbemaßung > Zwischen Halsfuß-Oberklotz
- Leimoberfläche und Halsfuß-Zapfchen-Leimoberfläche, Bemasung: 90°
- Skizze > Erstellen > Skizzenbemaßung > Erste Linie, Parameter: *Halseinlaß* -(minus)
- *Randüberstand* > Zweite Linie, Parameter: *Zäpfchenhöhe*

Schritt 12

Vom Endpunkt des Zäpfchens aus wird eine beliebige Linie nach oben gezeichnet. Vom Halsrücken-Versatz-Punkt aus wird eine zweite Linie nach rechts gezogen. Der Abstand zwischen dieser zweiten Linie und der Linie „Hals-griffbrett-leimoberfläche“ wird auf den Parameter: *Halsstärke_oben_ausschließlich_Griffbrett* bemaßt. Anschließend werden diese beiden Linien durch einen tangentialen Bogen miteinander verbunden.

- Skizze > Erstellen > Linie > Konstruktionslinie (von Zapfchen nach oben)
- Skizze > Erstellen > Linie > Konstruktionslinie (von Halsrücken-Versatzpunkt nach rechts)
- Skizze > Erstellen > Bogen > Tangentialbogen (zwischen beiden Enden von diesen Linien)
- Abhängigkeiten > Tangente (zwischen dem Bogen und der Linie von Zapfchen)

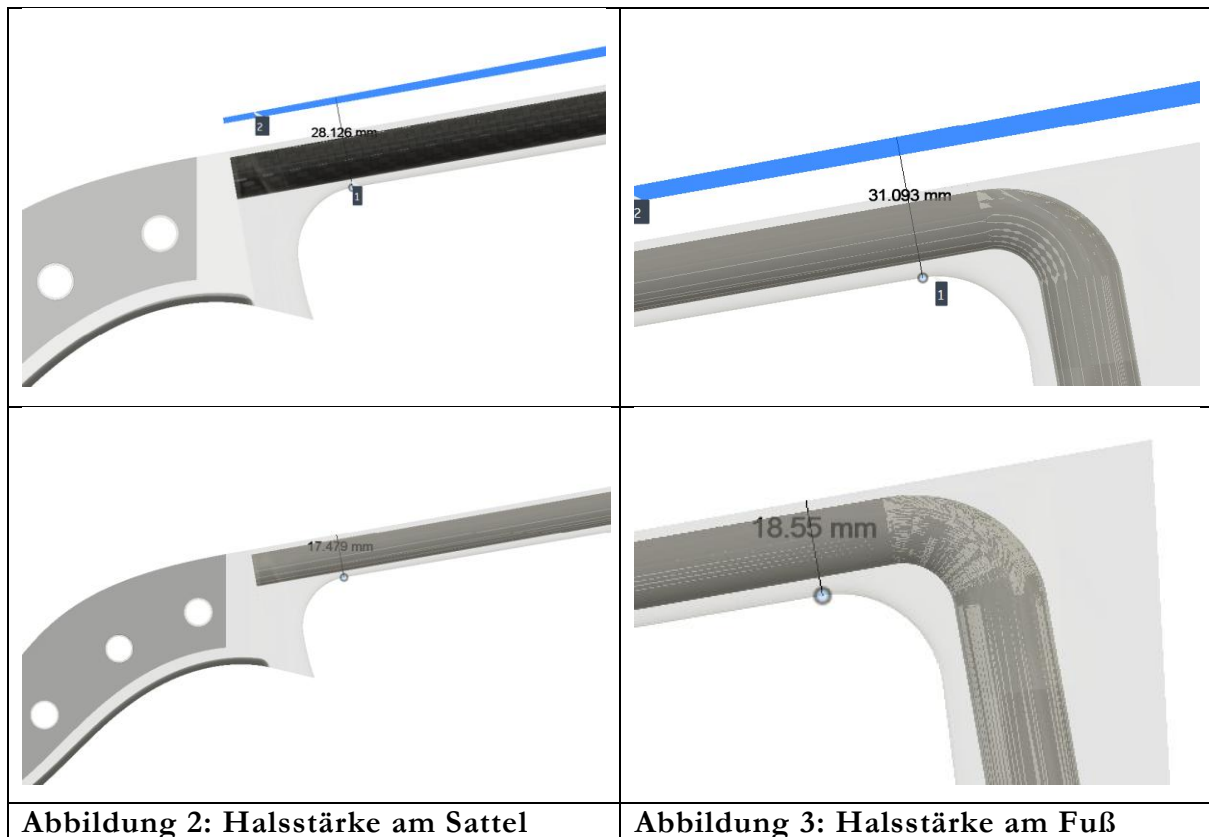
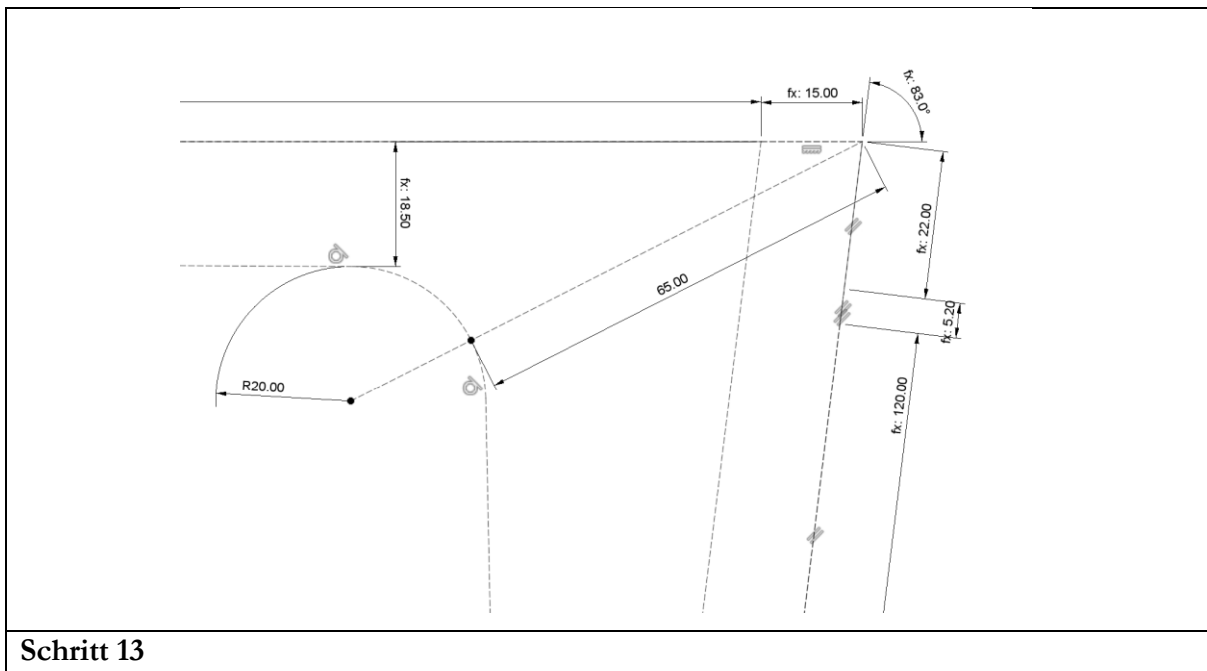


Abbildung 2 und 3 zeigen das in der vorherigen Arbeit gezeichnete ve nach den Schablonen von Weißhaar gestaltete Halsprofil sowie den Hals, der nach den Vorgaben der Maßtabelle des Verbandes Deutscher Geigenbauer konstruiert wurde.[1] In diesem Modell ist ein Griffbrett mit einem Radius von R70 integriert. Die Griffbrettkanten sind mit 8,5 mm ausgeführt. Demnach beträgt der dünnste Querschnitt des Halsrückens im Obersattelbereich ~17,5 mm und die dünnste Stelle im Halsfußbereich ~18,5 mm. Diese beiden Bereiche definieren die maximale Tiefe des Stabes, der im Hals platziert werden kann. Je kleiner der Radius wird, desto größer wird die Griffbretthöhe; je größer der Radius wird, desto geringer wird die Griffbretthöhe.

Schritt 13

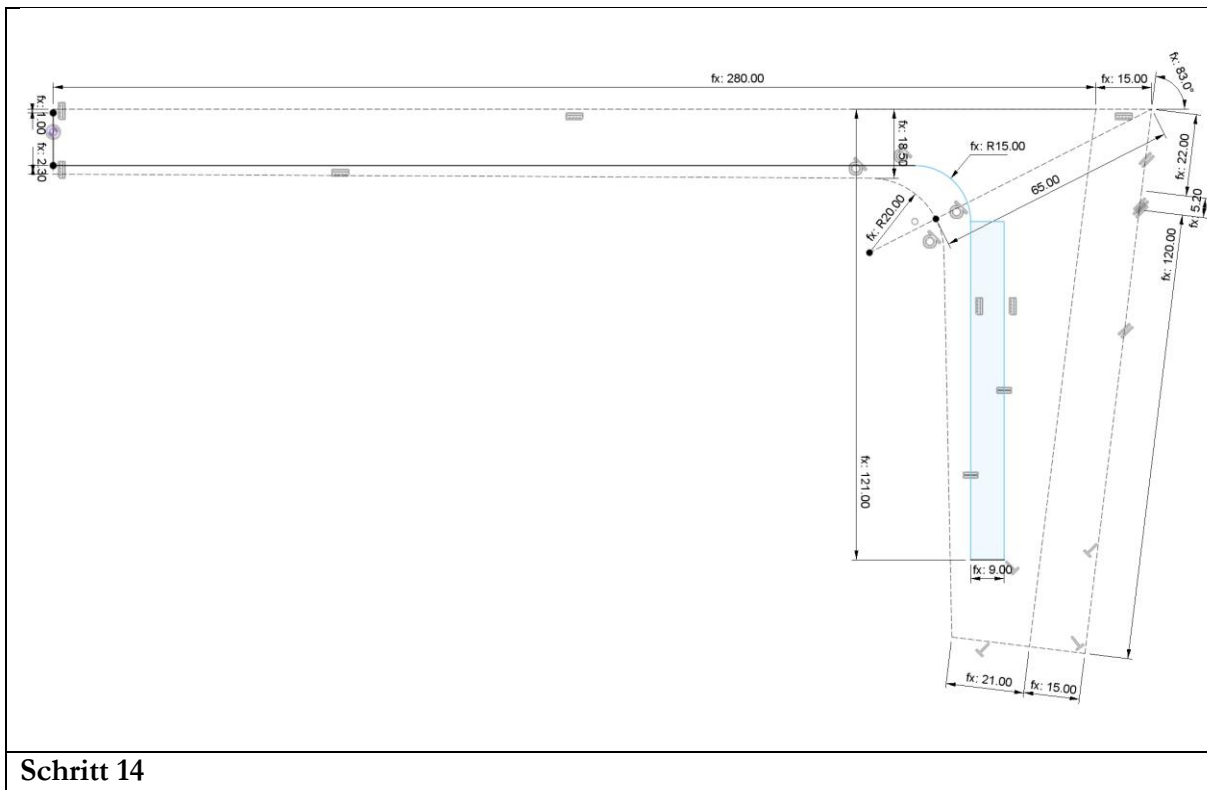
Dem Tangentialbogen wird ein Radius von 20 mm, Parameter: *Halsfußradius* , zugewiesen, und vom Endpunkt der Griffbrettleimoberfläche aus wird eine Konstruktionslinie zum Mittelpunkt des Bogens gezeichnet. An dem Punkt, an dem diese Linie den Bogen schneidet, wird ein koinzidenter Punkt definiert. Der Abstand zwischen diesen beiden Punkten wird auf 65 mm bemaßt. In diesem Stadium ist die Seitenansicht des Halses grob fertiggestellt



- Skizze > Erstellen > Skizzenbemaßung > Parameter: *Halsfußradius*
- Skizze > Erstellen > Linie > Konstruktionslinie
- Skizze > Erstellen > Punkt
- Skizze > Erstellen > Skizzenbemaßung > 65 cm

Schritt 14

Vom unteren Punkt des in Sketch 1 gezeichneten Stabprofils wird eine horizontale Linie mit zufälliger Länge nach rechts gezeichnet. Anschließend werden innerhalb des Halsfußes 2 vertikale Linien mit zufälliger Länge gezeichnet. Diese beiden zueinander parallelen vertikalen Linien werden mit dem Radius bemaßt und gleichgesetzt (gleich). Die horizontale Linie und die vertikale Linie werden durch einen tangentialen Bogen miteinander verbunden. Der Bogenradius wird mit Parameter: *Stab_biegungsradius* bemaßt. Der Radius am D-O-Übergang kann aufgrund der Halsform zwischen R0 und R20 ausgeführt werden. Theoretisch gilt: Je kleiner dieser Radius ist, desto stärker steigt unter Last die Spannungskonzentration im Oberflächenquerschnitt auf der Halsrückseite. Im umgekehrten Fall wird die Spannung gleichmäßiger verteilt, was die Konstruktion widerstandsfähiger gegen Bruch, Delamination und Faserversagen macht. Als natürliche Folge dieser Situation ist die Annahme richtig, dass das Material flexibler sein kann, da die Fasern und der dazugehörige Kunststoff weiter von der Streckgrenze entfernt sind. In diesem Stadium habe ich diesen Übergang, den ich zuvor mit R10 ausgeführt hatte, auf R15 revidiert. Die oberen und unteren Enden dieser beiden vertikalen Linien werden durch eine weitere Linie miteinander verbunden. Die untere Linie markiert das Ende des O-Profils, danach wird deren Abstand zur Hals-Griffbrettleimoberfläche bemaßt.

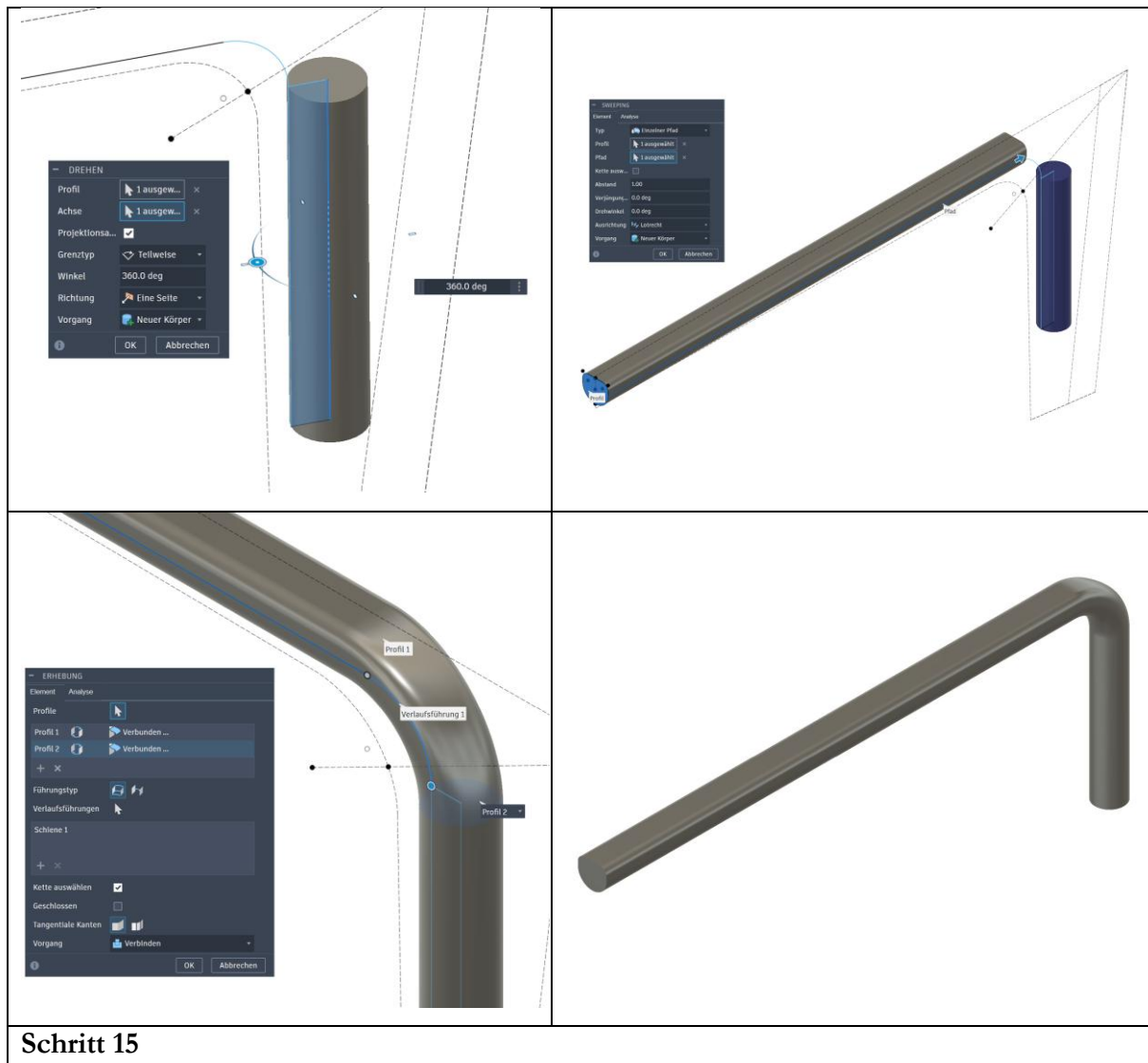


Schritt 14

- Skizze > Erstellen > Linie (von Stabprofilprojizieren nach Rechts)
- Skizze > Erstellen > Linie (2 Mal Vertikal im Halsfuß)
- Skizze > Erstellen > Skizzenbemaßung > Parameter: *Durchmesser / 2*
- Skizze > Erstellen > Bogen > Tangentialbogen > Bemaßung, Parameter: *Stab_Biegungsradius*
- Skizze > Erstellen > Skizzenbemaßung (Von Griffbrett-Leimoberfläche Halses nach Endpunkt O-Profil) > Parameter: *Tiefe_des_Stabs + Versenkungtiefe*

Schritt 15

Die Volumenmodellierung beginnt ab diesem Stadium. Das als blaues Rechteck dargestellte Profil wird durch die Operation Drehen als neuer Körper in ein Volumenmodell umgewandelt. Der 1. Sketch wird auf Einblenden geschaltet und der D-Profil-Sketch wird bis zum Anfang des Radius gezogen. Stellen Sie dabei sicher, dass die Option Kette auswählen deaktiviert ist. Als Pfad wird die in der obigen Abbildung gezeigte Linie verwendet und als neuer Körper in ein Volumenmodell umgewandelt. Der Endpunkt des D-Profils und der Endpunkt des O-Profils werden durch eine Erhebung miteinander verbunden, wobei der *Stab_Biegungsradius* Bogen als Pfad verwendet wird. Das Bauteil wird auf diese Weise modelliert.



Schritt 15

- Volumenkörper > Drehen > Neuer Körper erstellen
- Volumenkörper > Sweeping > Neuer Körper Erstellen
- Volumenkörper > Erhebung > Verbinden (ID-Profil zu O-Profil mit dem Pfad)

Nachoptimierung des Stabs

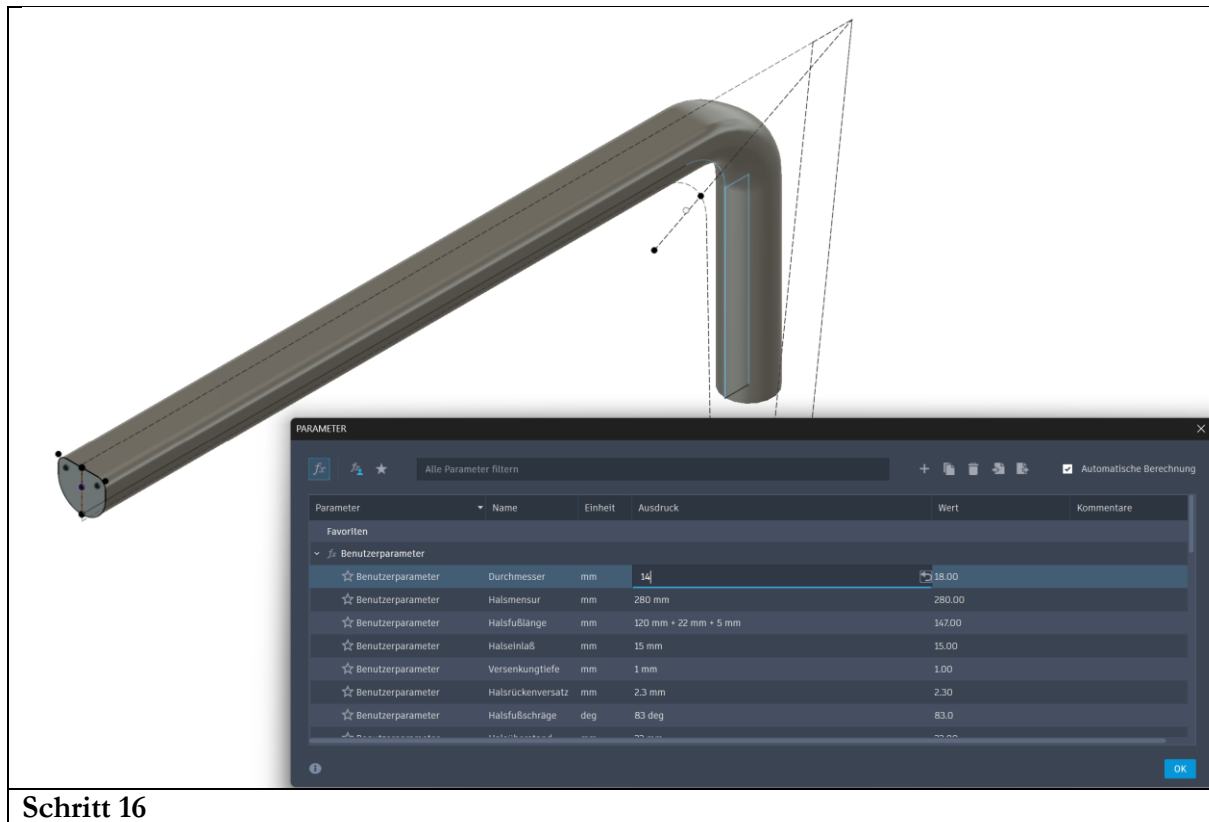
Bei der Modellierung des Cellohalses wurden die Halsstärken verwendet, die in der vom Verband Deutscher Geigenbauer und Bogenmacher herausgegebenen Maßtabelle empfohlen werden.⁶ Es ist von großem Wert, dass diese Tabelle einen Standard etabliert und die berufliche Praxis der Geigenbauer erleichtert. Es ist jedoch zu beachten, dass diese Stärken oder Profile je nach den Wünschen des Geigenbauers oder des Cellisten variieren können. Es ist zu erwarten, dass ein Cellohals, der von einem Cellisten mit kleinerer Statur und kleineren Händen verwendet wird,

⁶ Verband Deutscher Geigenbauer und Bogenmacher e.V., 2009.

zierlicher und dünner ist, während im umgekehrten Fall bei einem Cellisten mit großen Händen ein dickeres und massiveres Profil zu erwarten ist. Die Entscheidungen, die der Geigenbauer an dieser Stelle zu treffen hat, variieren je nach Spielkomfort und den individuellen Vorlieben des Musikers. Zudem darf nicht außer Acht gelassen werden, dass ein Griffbrett, das mit einem Radius von R60 mm oder R70 mm gestaltet ist, und ein Griffbrett mit einem Romberg-C-Kante-Profil unterschiedliche Höhen aufweisen werden. Die Tiefe, in der der Versteifungsstab eingebettet wird, ist ein weiterer Parameter, der die Arbeit beeinflussen wird. Je tiefer er eingebettet ist, desto weiter entfernt er sich von der Biegeachse unter der Saitenlast, was den Steifigkeitsfaktor erhöht. Im umgekehrten Fall ist mit einer Verringerung zu rechnen. Während der Vorbereitung dieser Arbeit wurde der Rat mehrerer Geigenbauer eingeholt. In einem Gespräch mit dem in Würzburg ansässigen Geigenbaumeister Christian Pabst empfahl dieser, den Versteifungsstab in verschiedenen Abmessungen herzustellen. Als jedoch darauf hingewiesen wurde, dass dies die Form- und Produktionskosten erhöhen würde und die Finanzierung dieser Mehrkosten im letzten Studienjahr schwierig zu realisieren sei, riet er dazu, statt 18 mm eine Breite von 14 mm zu wählen. Nach wertvollen Ratschlägen aus einer Konsultation mit dem Geigenbaumeister Heiko Seifert, einem Dozenten unserer Hochschule mit eigener Werkstatt in Plauen, wurde der Entschluss gefasst, dass die Herstellung eines Versteifungsstabs mit einer Breite von 14 mm die sinnvollere Lösung darstellt. Eine geringfügige Verkürzung des D-Profil-Halses ab dem Mensurpunkt wurde gewählt, um sowohl die Spannung am Übergang zwischen Holz und CFK auf eine größere Fläche zu verteilen als auch die Handhabung während der Montagephase zu erleichtern. Der Fräser, der die Nut im Cellohals öffnet, wird an den Ein- und Austrittspunkten kreisförmige Schnitte erzeugen. Es wurde als angemessen erachtet, diese Bereiche entweder frei zu lassen oder mit Klebstoff zu füllen. Zudem wurde das D-Profil, das im Basisentwurf eckig war, abgerundet, da es in der Fertigungspraxis die Qualität des Produkts mindern würde. Der Teil des O-Profils, der in den Halsfuß eintritt, sollte nicht durchgehend verlaufen. Wenn man ihn mindestens 1 cm kürzer hält, wird die Bearbeitbarkeit der Fläche gewährleistet, die nach dem Einpassen des Halses mit dem Zäpfchen verleimt wird. Zudem führt die durch die Saitenspannung bedingte Last und Spannung im Halsinneren im Bereich des Zäpfchens zu einer nur sehr geringen Belastung, sodass eine Erhöhung der Festigkeit in diesem Abschnitt nicht zwingend erforderlich ist. Zudem wird durch einen etwas kürzeren O-Profilverlauf ermöglicht, bei der Montage eine um einige Zentimeter kürzere Bohrung vorzunehmen. Dies wird sich prozesserleichternd auf die Montage auswirken.

Schritt 16

Da die Zeichnung parametrisch modelliert ist, reicht es aus, nur den Parameter: *Durchmesser* zu ändern. Ich habe den *Durchmesser* auf 14 mm reduziert.

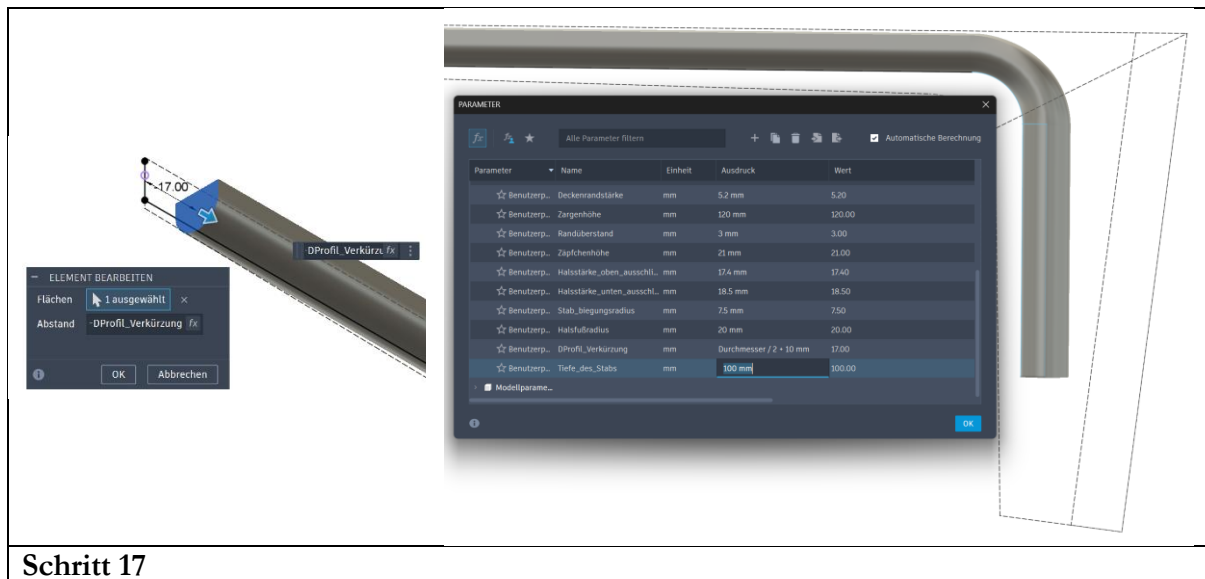


Schritt 16

- Volumenkörper > Ändern > Parameter ändern > Parameter: Durchmesser

Schritt 17

Um das D-Profil zu verkürzen, wird das Profil mit dem Befehl *Drücken/Ziehen* um den Wert von Parameter: *DProfil_Verkürzung* gezogen. Wenn Sie denselben Vorgang für das O-Profil durchführen möchten, wird der Parameter: *Tiefe_des_Stabs* aus der Parameterliste geändert. Ich habe die Gesamttiefe (Tiefe) des Stabes auf 100 mm reduziert.



- Volumenkörper > Ändern > Drücken/Ziehen, Parameter: - (minus) *DProfil_Verkürzung*
- Volumenkörper > Ändern > Parameter ändern > Parameter: *Tiefe_des_Stabs*

Am Ende dieses Schrittes ist das geometrische Design des Stabes abgeschlossen.

Materialauswahl

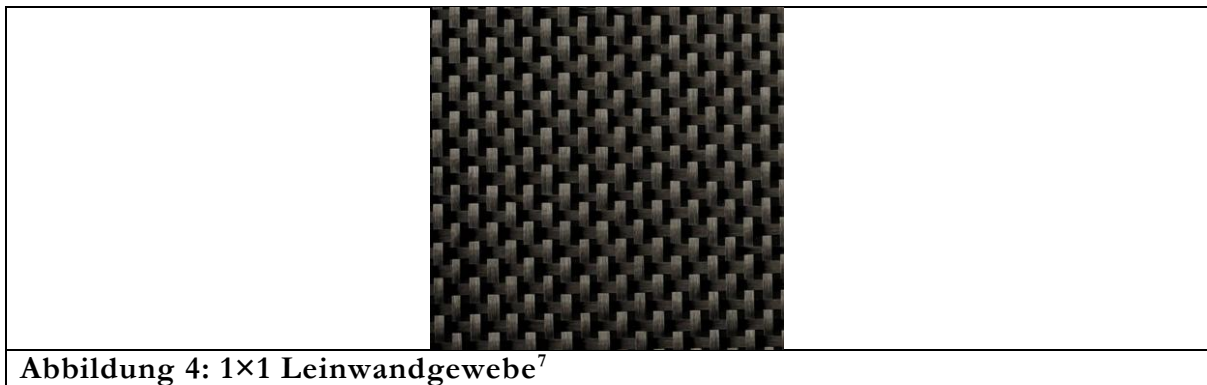
Eine vollständige Übersicht aller verwendeten Hilfs- und Verbrauchsmaterialien sowie der Fertigungswerkzeuge ist im Anhang A detailliert aufgeführt.

Carbonfaser

Kohlefaser sind dünne Fasern, die als Verstärkungselement in Verbundwerkstoffen mit Polymermatrix verwendet werden, deren Grundstruktur aus Graphenschichten besteht und die sich durch hohe Festigkeit sowie einen hohen Elastizitätsmodul auszeichnen. Die Hauptgründe für die Verwendung von kohlenstofffaserverstärkten Polymeren als Verstärkungsstab im Inneren des Cellohalses sind der spezifische Modul (Verhältnis von Festigkeit zu Dichte) dieses Materials und seine hohe Formstabilität. Kohlenstofffasern weisen entlang ihrer Faserachse eine wesentlich höhere Festigkeit auf als Stahl. Bei einer Konstruktion wie einem Cellohals, die ständig einer Saitenspannung und Umwelteinflüssen ausgesetzt ist, wirkt sich der negative oder nahezu null liegende Wärmeausdehnungskoeffizient der Kohlefaser so aus, dass er die natürlichen Bewegungen des Holzes unter dem Einfluss von Wärme und Feuchtigkeit einschränkt und somit ein Verziehen des Halses im Laufe der Zeit verhindert.[1] Technische Keramiken erfordern das Brennen bei hohen Temperaturen sowie komplexe Pulverpressverfahren; dies sind Prozesse, die für eine kleine Werkstatt nur schwer umsetzbar sind. Metalle hingegen werden in der Regel durch Verfahren wie Gießen oder zerspanende Bearbeitung geformt, die den Einsatz schwerer Maschinen erfordern. Durch den Einsatz von Kohlefaserkomponenten lassen sich mit Verfahren wie dem Vakuumbeutelverfahren oder dem Handlaminieren komplexe Geometrien herstellen,

ohne dass riesige Industrieöfen erforderlich sind. Das Material ist korrosionsbeständig und muss nicht zwingend in das Holz eingeleimt oder in einem Bindemittel eingebettet sein, da es sich auch mechanisch am Hals befestigen lässt. Trotz ihrer vielen leistungsstarken Eigenschaften ist Kohlefaser nicht biologisch abbaubar. Bei ihrer Herstellung und Verarbeitung fallen giftige Abfälle an. Werden bei der Verarbeitung in einer kleinen Werkstatt die erforderlichen Schutzmaßnahmen nicht beachtet, birgt dies ernsthafte Gesundheitsrisiken. Das Schleifen, Fräsen und das Einatmen von Staub können zu sehr schweren Lungenerkrankungen führen. Kohlefasern können nicht nur in Kunststoffen, sondern auch in vielen anderen Matrixmaterialien wie Metallen und Keramiken eingesetzt werden. Die grundlegenden Webarten und Faserkonfigurationen, die bei Kohlefaser und anderen Verbundwerkstoff-Verstärkungsmaterialien zum Einsatz kommen, umfassen Gewebestrukturen, die aus Fasern bestehen, die in zwei zueinander senkrechten Richtungen – Kette und Schuss – verlaufen. Zu den häufig verwendeten Webarten gehören:

Leinwand (Plainweave):



Die Leinwandbindung ist das einfachste Webmuster, bei dem jeder Schussfaden über einen Kettfaden und dann unter den nächsten verläuft. Die Vor- und Nachteile dieser Webart sind wie folgt:

- Vorteile
 - In einem ausgewogenen Leinwandgewebe ist die Fadenanzahl in Kett- und Schussrichtung identisch, sodass das Material in beiden Hauptrichtungen identische Eigenschaften aufweist.
 - Da es sich um das Muster handelt, bei dem sich die Fasern am dichtesten und an den meisten Punkten kreuzen, bleibt die Form des Gewebes sehr gut erhalten und ein Verrutschen der Fasern wird minimiert.
- Nachteile
 - Im Vergleich zu anderen Gewebearten lässt es sich schwieriger formen.

⁷ Easy Composites Ltd, 90g ProFinish Plain Weave 1k Carbon Fibre Cloth, online im Internet unter: <https://www.easycomposites.eu/90g-profinish-plain-weave-1k-carbon-fibre-cloth> (abgerufen am 17.06.2026).

- Das kontinuierliche Auf-und-Ab-Verflechten der Fasern führt zu einer Krümmung, die als "Crimp" bezeichnet wird. Diese gewellte Struktur führt zu einer höheren Dehnung des Materials und damit zu einer geringeren Steifigkeit (Modul) im Vergleich zu geraden Unidirektional-Lagen, die die gleiche Fasermenge enthalten.

Atlas (Satin):

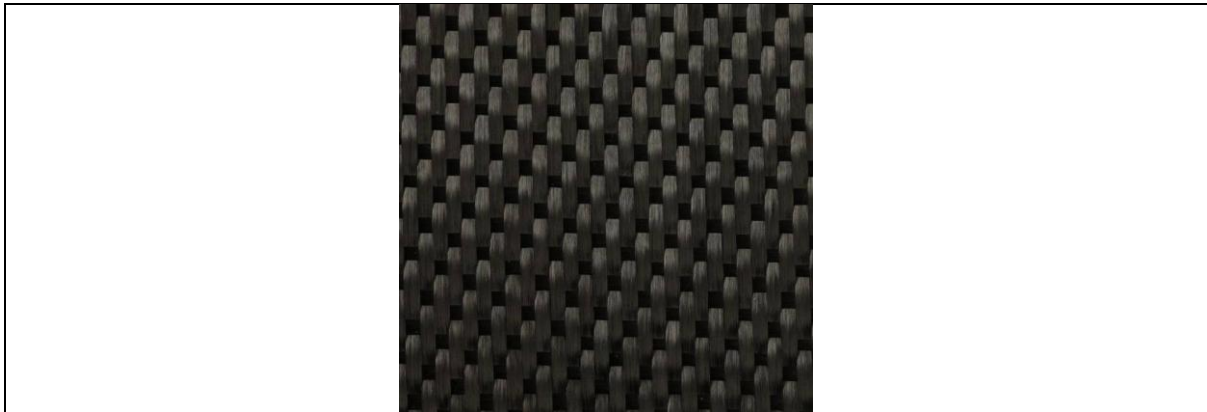


Abbildung 5: 5-bindiger Atlasgewebe⁸

Es handelt sich um eine Webart, bei der der Schussfaden über mehrere Kettfäden verläuft, bevor er unter einem Kettfaden hindurchgeführt wird. Zum Beispiel verläuft beim "5-Harness-Atlas" der Schussfaden über 4 Fäden und unter dem 5. Faden. Atlasbindungen können komplexere Oberflächen besser abdecken als Leinwandbindungen.

⁸ Easy Composites Ltd, 375g 5HS 6k Carbon Fibre Cloth, online im Internet unter: <https://www.easycomposites.eu/375g-5hs-6k--carbon-fibre-cloth> (abgerufen am 17.06.2026).

- Vorteile
 - Der größte Vorteil der Atlasbindung ist ihre hohe Flexibilität, wodurch sie doppelt gekrümmte oder komplexe Geometrien wesentlich glatter abdecken kann als eine Leinwandbindung.
 - Da die Fasern beim Weben über lange Strecken hinweg flottieren, bleiben sie im Vergleich zur Leinwandbindung gerader. Diese geringere Faserkräuslung führt dazu, dass sich das Material unter Last weniger dehnt und einen höheren Elastizitätsmodul aufweist.
 - Aufgrund der langen Faserflottierungen ist die Gewebeoberfläche wesentlich glatter.
- Nachteile
 - Die Form des Gewebes ist weniger beständig, da die Fasern nicht so fest ineinandergreifen wie bei einer Leinwandbindung; beim Zuschneiden und Auslegen können die Fasern leichter verrutschen oder das Gewebe kann sich leichter verziehen.
 - Atlasgewebe sind von Natur aus asymmetrisch; auf einer Seite des Gewebes dominieren Kettfasern, auf der anderen Schussfasern. Wenn die Schichten bei der Herstellung nicht gemäß der Mittelschichtsymmetrie angeordnet werden, kann diese asymmetrische Struktur dazu führen, dass sich das Bauteil aufgrund thermischer Spannungen während der Abkühlphase verzieht oder verformt.
 - Die lockere Struktur des Gewebes ist anfälliger für die Bildung harzreicher Bereiche zwischen den Faserbündeln oder für den Einschluss von Hohlräumen bei Vakuum- oder Infusionsverfahren, sofern nicht sorgfältig gearbeitet wird.

Körperbindung

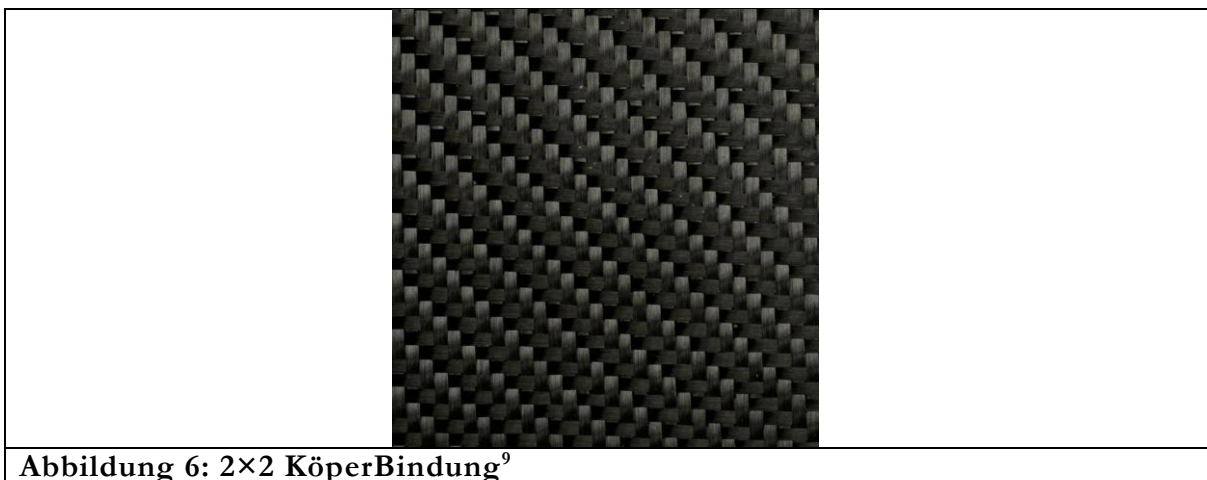


Abbildung 6: 2×2 KörperBindung⁹

⁹ Easy Composites Ltd, 200g 2/2 Twill 3k Carbon Fibre Cloth, online im Internet unter: <https://www.easycomposites.eu/200g-22-twill-3k-carbon-fibre-cloth> (abgerufen am 17.06.2026).

Dies ist eine Webart, bei der die Fasern so übereinander verlaufen, dass sie ein diagonales Muster bilden. Die Körperbindung stellt den Mittelweg zwischen Leinwand- und Atlasbindung dar. Sie bietet eine höhere Steifigkeit als die Leinwandbindung, ist jedoch weniger locker und instabil als die Atlasbindung.

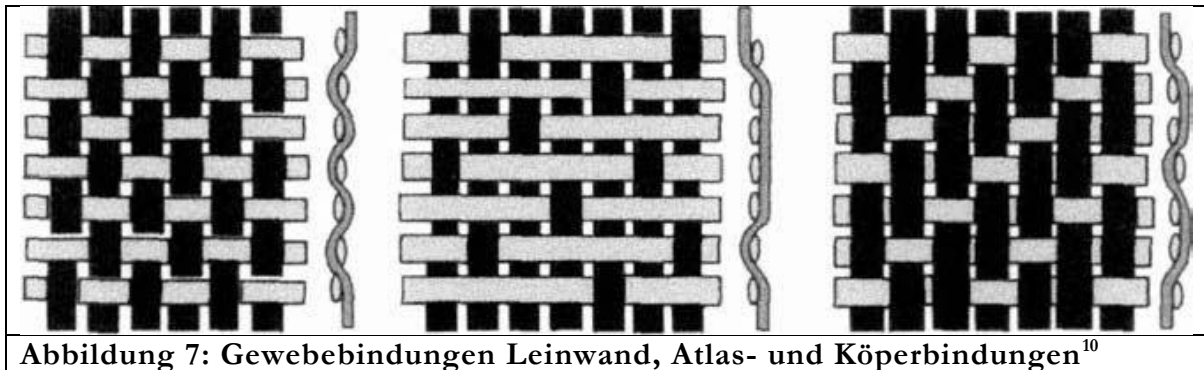


Abbildung 7: Gewebebindungen Leinwand, Atlas- und Körperbindungen¹⁰

Neben den Geweben werden weitere grundlegende Verstärkungsprodukte und Faserkonfigurationen, die in der Verbundwerkstoffherstellung verwendet werden, nachfolgend beschrieben.

Unidirektionale Produkte: Hierbei handelt es sich um Roving-, Band- oder Streifenformen, bei denen alle Fasern parallel in einer einzigen Richtung (0°) ausgerichtet sind. Sie bieten maximale Steifigkeit, sind jedoch nur in Faserrichtung belastbar.

Vliesstrukturen: Diese Gruppe umfasst Matten, in denen Fasern zufällig verteilt statt gewebt sind, sowie Filze aus Kurzfasern. Matten weisen in ihrer Ebene in alle Richtungen ähnliche Eigenschaften auf.

Kurzfasern: Hierbei handelt es sich um Formen, bei denen die Fasern einige Zentimeter oder Millimeter lang sind

3D-Strukturen: Dies sind komplexe Architekturen, bei denen die Fasern in mehr als zwei Richtungen (wie z. B. X-, Y- und Z-Achsen) dreidimensional angeordnet sind, wodurch das Risiko einer Delamination eliminiert wird.

Sphärische Füllstoffe und Pulver: Hierbei handelt es sich um massive oder hohle Mikrokügelchen sowie verschiedene Metall- oder Keramikpulver, die verwendet werden, um die Matrix zu verstärken, das Gewicht zu reduzieren oder spezifische Eigenschaften zu verleihen.

¹⁰ Gay/Hoa, Composite Materials, S. 42.

Prepregs: Dies sind Produkte in Form von Bändern oder Geweben, bei denen die Fasern zur Produktionserleichterung bereits mit Harz imprägniert und in einem teilgehärteten Zustand geliefert werden.

TOW, K-Zahlen, Stoffgewichte

In der Verbundwerkstoffindustrie bezeichnet ein Tow ein ungedrehtes und lose gebündeltes Strangbündel aus Endlosfilamenten. Jedes Tow besteht aus Tausenden von Einzelfilamenten, deren Durchmesser üblicherweise zwischen 5 und 15 Mikrometern liegt. Die K-Zahl gibt die Anzahl der Filamente innerhalb eines Tows an, wobei der Buchstabe "K" für tausend (1000) steht. Bei einem 3K-Kohlefasergewebe befinden sich beispielsweise in jedem einzelnen Webfaden (Tow) 3000 Einzelfilamente. Mit steigender K-Zahl nimmt die Dicke des Tows und somit auch die Textur des Gewebes zu. Während Gewebe mit niedrigen Werten wie 1K sehr dünn und dicht gewebt sind, bilden Tows mit hohen Werten wie 12K oder 24K schwerere und dickere Lagen. Mit abnehmender Filamentanzahl innerhalb eines Tows (z. B. 1K oder 3K) verringern sich die physikalische Breite und Dicke des betreffenden Strangs linear. Gewebestrukturen aus dünnen Tows ermöglichen eine höhere Dichte an Kett-Schuss-Verkreuzungen pro Flächeneinheit. Diese strukturelle Optimierung sorgt dafür, dass die charakteristische "karosierte" Ästhetik von Kohlefaserverbundwerkstoffen auf einer viel feineren Mikroebene und mit höherer Auflösung entsteht. Zudem lässt sich ein Gewebe mit einer niedrigen K-Zahl im Vergleich zu einem Gewebe mit einer hohen K-Zahl wesentlich leichter umformen. Darüber hinaus ist das Flächengewicht einer der wichtigsten Parameter. Es gibt viele Faktoren, die bestimmen, ob ein Gewebe schwerer ist. Die K-Zahl (1K, 3K, 12K usw.), welche die Anzahl der Filamente in jedem einzelnen das Gewebe bildenden Tow darstellt, ist der primäre Faktor, der die Basismasse des Gewebes bestimmt. Das Flächengewicht hängt jedoch nicht nur von der K-Zahl ab; Durchmesserunterschiede der Einzelfilamente zwischen 5 und 15 Mikrometern und die verfahrensbedingte Variabilität der Faserdichte zwischen 1.78 und 2.15 g/cm³ aufgrund von Wärmebehandlungen im Herstellungsprozess beeinflussen die Masse pro Längeneinheit des Garns direkt. Darüber hinaus sorgt die Webdichte, Anzahl der Schuss- und Kettfäden pro Längeneinheit, dafür, dass selbst Produkte mit derselben K-Zahl unterschiedliche Grammaturen aufweisen können; eine dichtere Gewebearchitektur erhöht die Fasermenge pro Quadratmeter (g/m²) und steigert so direkt sowohl die strukturelle Dichte des Gewebes als auch die Dicke der resultierenden Verbundschicht.

Weitere Verbrauchsmaterialien und notwendige Werkzeuge

In den verschiedenen Fertigungsverfahren der Verbundwerkstofftechnologie kommt eine Vielzahl spezialisierter Werkzeuge und Hilfsstoffe zum Einsatz. Die im Rahmen dieser Arbeit relevanten Materialien und Betriebsmittel werden nachfolgend aufgeführt:

Versiegler wird vor dem Auftragen von Trennmitteln appliziert, um mikroskopische Hohlräume auf der Oberfläche poröser Verbundwerkstoffformen zu füllen. Seine Hauptfunktion besteht

darin zu verhindern, dass Harz in die Poren der Form eindringt, sich mechanisch mit der Form verzahnt und das Bauteil durch Festkleben an der Form beschädigt wird. Nicht-poröse, präzise bearbeitete und glatte Metallformen wie Aluminium oder Stahl erfordern in der Regel keinen Sealer.

Formtrennmittel ist eine chemische Substanz, die im Verbundwerkstoff-Herstellungsprozess das Anhaften des Bauteils an der Form verhindert und nach Abschluss des Härtingsprozesses eine fehlerfreie Entformung des Produkts gewährleistet.

Abreißgewebe wird direkt auf die Kohlefaser gelegt. Es ist harzdurchlässig, haftet selbst jedoch nicht. Nach Abschluss der Härtung wird es abgerissen und entfernt, wodurch eine raue, für Verklebungen bereite Oberflächenstruktur zurückbleibt.

Saugvlies ist eine poröse Zwischenschicht, die eine Kontinuität zwischen der Laminatoberfläche und der Vakuumleitung gewährleistet. Es sorgt für einen Druckausgleich im Sack, indem es einen ununterbrochenen Luftweg von der Vakuumabzugsstelle bis zu den entferntesten Bereichen schafft. Auf diese Weise garantiert es die Evakuierung der gesamten Luft im Inneren des Bauteils während des Vakuumprozesses. Zudem absorbiert und bindet es das überschüssige Harz, das während der Härtung zwischen die Fasern eindringt. Dieser Prozess trägt direkt zur Erhöhung der spezifischen Festigkeit bei, indem er die lineare Dichte des Bauteils verringert.

Dichtband oder Tacky Tape ist ein stark haftendes und flexibles Material, das beim Vakuumsackverfahren verwendet wird, um Luftlecks zu verhindern und das System komplett luftdicht zu machen.

Vakuumsackfolie ist eine flexible und belastbare Kunststofffolie, die beim Vakuumsackverfahren oder bei der Autoklavhärtung das gesamte System nach außen hin abschließt und für Luftdichtigkeit sorgt.

Vakuumpumpe ist das Hauptwerkzeug, das die gesamte Luft aus dem System absaugt. Wenn die Luft im Inneren des Sacks evakuiert ist, drückt der atmosphärische Druck gleichmäßig auf alle Bereiche des Sacks. Durch den Vakuumprozess werden unerwünschte Lufteinschlüsse zwischen den Schichten herausgedrückt, und überschüssiges Harz wird von den Saugvliesen aufgenommen. Als Ergebnis wird ein Bauteil erhalten, das sowohl wesentlich leichter als auch deutlich stabiler und glatter ist.

Ein Through-Bag Connector oder Sack-Durchführung ist ein Verbindungsstück aus Metall oder Kunststoff, das beim Vakuumsack- und Autoklavverfahren verwendet wird, um den Vakuumschlauch sicher von außen nach innen durch den Vakuumsack zu verbinden. Dieses Bauteil wird durch eine Öffnung in der Vakuumsackfolie eingesetzt und sorgt dank spezieller Dichtungen dafür, dass das System absolut luftdicht bleibt, während die Vakuumpumpe die Luft aus dem Inneren absaugt.

Ofen und Autoklav sind die beiden Hauptgeräte, die im Härungsprozess eingesetzt werden – der letzten Stufe bei der Herstellung von Verbundwerkstoffen, bei der das flüssige Harz erstarrt und die Fasern miteinander verbindet. Während der Ofen nur zum Erwärmen des Bauteils dient, ist der Autoklav ein Druckbehälter, der sowohl hohe Hitze als auch hohen Druck aufbringen kann. Auf diese Weise ermöglicht er die Herstellung von leichten und stabilen Bauteilen ohne Lufteinschlüsse unter sehr hohem Druck.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde entschieden, für die äußeren Lagen ein Leinwand-Schlauchgewebe einzusetzen, welches die innere und äußere Form umschließt, zusammenhält und gleichzeitig eine ästhetisch ansprechende Oberfläche der finalen Schicht gewährleistet. Für den lasttragenden Innenkern wurde der Einsatz von unidirektionalen Fasern gewählt, da diese neben einer einfachen Handhabung ohne Faserondulation die höchste Steifigkeit und Zugfestigkeit aufweisen.

Nach der Materialdiskussion wird nun das Formdesign behandelt.

3. Formenkonstruktion

Die Formgebung des Stabes erfolgt durch das Einlegen zwischen zwei Formhälften und das Anpressen an die Formwände mittels eines hindurchgeführten Rohres. In diesem Abschnitt werden die Herstellungsschritte der Form beschrieben, mit welcher dieses Verfahren durchgeführt wird.

Die vollständige Materialliste dieses Projekts ist im Anhang A dokumentiert.

Formmaterial

Um die Kohlefaser in die gewünschte Geometrie zu bringen, ist ein Formwerkzeug erforderlich. Die Auswahlkriterien für dieses Material sind in Tabelle 2 dargestellt..

Funktion	Was macht diese Komponente?
	• Diese Form hält das Kohlefasergewebe/Prepreg und das Epoxidharz während des gesamten Aushärtungsprozesses stabil zusammen und gewährleistet so die präzise Abbildung der angestrebten geometrischen Endform
Bedingung / Beschränk ungen	Welche nicht verhandelbaren Bedingungen müssen erfüllt werden?
	• Thermische Beständigkeit: Die Form muss den für die Aushärtung des Epoxidharzes erforderlichen Prozesstemperaturen 120-140°C standhalten, ohne sich zu verformen, zu schmelzen oder an mechanischer Festigkeit zu verlieren. • Dimensionale Stabilität: Der thermische Ausdehnungskoeffizient (CTE) des Formmaterials muss präzise auf das Dehnungsverhalten des Kohlefaserverbundwerkstoffs abgestimmt sein.

	• Druckfestigkeit: Die Form muss stabil und druckfest sein. Sie muss dem Druck beim Vakuumaufbau und beim Aufblasen zuverlässig standhalten.
	Welche verhandelbaren, aber wünschenswerte Bedingungen gibt es?
	• Geringes Gewicht: Die Form darf nicht zu schwer sein, damit man sie leicht in den Ofen schieben kann. Ein geringes Gewicht ist wichtig, um die Handhabung im Alltag einfacher zu machen. • Leicht formbar oder einfache Fertigung. Metallguss, Pulvermetallurgie und ähnliche Techniken können teuer und kompliziert sein. • Günstiger Preis: Das Formmaterial muss für Geigenbauer bezahlbar sein. Seltene Metalle oder teure Fertigungsmethoden sollten bei der Herstellung der Form nicht verwendet werden, um die Kosten niedrig zu halten. • Wiederverwendbarkeit: Die Form sollte mehrmals verwendet werden können
Objektive	Was soll maximiert oder minimiert werden?
	• Maximale Maßgenauigkeit: Die Form muss geometrisch exakt sein. • Minimale Produktionskosten und kurze Fertigungszeit: Die Kosten und die Zeit für die CNC-Bearbeitung der Form sollten so gering wie möglich sein.
Freie Variablen	Welcher Parameter des Problems können frei verändert werden?
	• Typ des Formmaterials und Formdesign
Tabelle 2: Bestimmungskriterien fürs Formmaterial	

Metalllegierungen stellen die leistungsfähigsten Werkstoffe für den Formenbau dar. Da es sich hierbei jedoch um eine Prototypenfertigung handelt, bei der die institutionellen Werkzeuge genutzt werden sollten, und da die Metallbearbeitung mit hohen Kosten verbunden ist, wurde das Epoxid-Blockmaterial ED700 bevorzugt. Die Beschaffung von Epoxid-Polyurethan-Platten (Tooling Boards) gestaltete sich für Kleinanwender als organisatorisch schwierig. Die einzigen zwei kommerziell verfügbaren Optionen waren SikaBlock® und Easy Composites ED700. Da ED700 auch in geringen Mengen abgenommen werden konnte, fiel die Wahl auf dieses Blockmaterial. Es zeichnet sich im Vergleich zu metallischen Alternativen durch ein sehr geringes Gewicht aus. Allerdings sind die mechanische Festigkeit sowie die Temperaturbeständigkeit im Vergleich zu Metallen deutlich geringer ausgeprägt. Die linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten des Blockmaterials und weiterer Referenzwerkstoffe sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.^{11,12}

¹¹ Callister/Rethwisch.2002, Appendix B, A25.

¹² Easy Composites Ltd: ED700 High Temperature Epoxy Tooling Board - Technical Datasheet, online unter: <https://media.easycomposites.eu/datasheets/EC-TDS-EP700-High-Temperature-Epoxy-Tooling-Board.pdf> (aufgerufen am 07. Juni 2026).

Material	Temperaturbereich	Einheit	Norm	Wert
EB700	10 – 100°C	$(10)^{-6} \times (\text{K})^{-1}$	ISO 11359	35 - 40
Stahl 1.4401	RT	$(10)^{-6} \times (\text{C})^{-1}$	keine Angabe	16.0
Aluminium 6061	RT	$(10)^{-6} \times (\text{C})^{-1}$	keine Angabe	23.6
Titanium grade 1	RT	$(10)^{-6} \times (\text{C})^{-1}$	keine Angabe	8.6
Corrundum Rein	RT	$(10)^{-6} \times (\text{C})^{-1}$	keine Angabe	7.4
Hoch Modulus CFK	RT	$(10)^{-6} \times (\text{C})^{-1}$	keine Angabe	-0.5

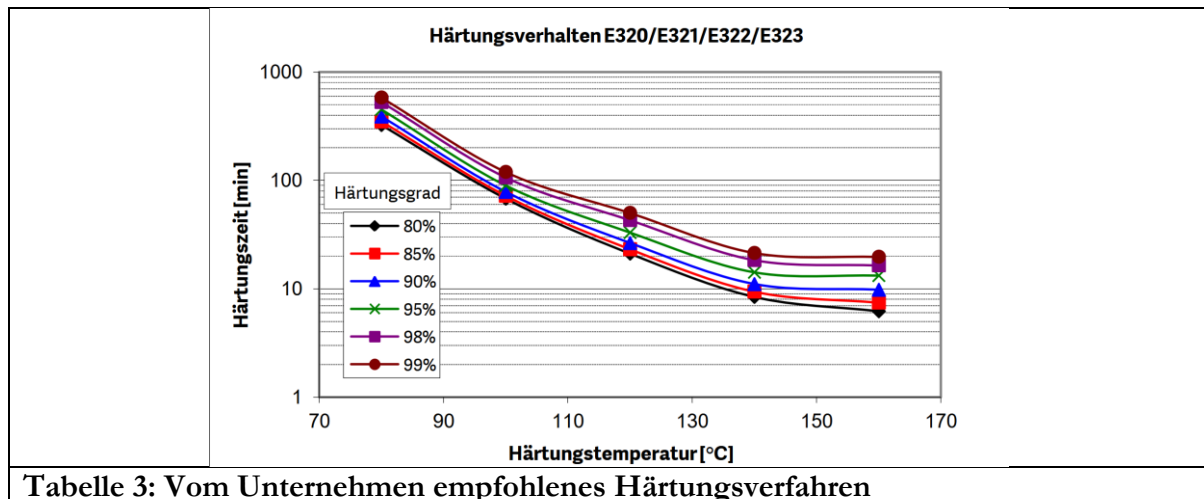
Der ermittelte Kennwert von 35 bis 40 $(10^{-6}/\text{K})$ deutet darauf hin, dass die thermische Ausdehnung des Bauteils im Vergleich zu den oben genannten alternativen Formwerkstoffen hoch ist. Nachfolgend wird die lineare Ausdehnung für CFK ve ED700 bei einer Referenzlänge von 260 mm berechnet. Demnach ist zu erwarten, dass sich das Formwerkzeug linear um bis zu 1 mm ausdehnt. Obwohl die flächigen und volumetrischen Ausdehnungen geometrisch weniger kritisch ausfallen, darf die thermische Expansion des Blockmaterials parat im Ofenprozess nicht vernachlässigt werden. Um diese thermisch bedingten Längenänderungen zu kompensieren, ist eine strukturelle Auskofferung im Zentrum des Werkzeugs zu empfehlen. Für die Berechnungen doğrusal termal genleşme wurde die entsprechende Formel herangezogen.¹³

$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T$	L_0 : Ausgangslänge ΔT : Temperaturdifferenz ΔL : Längenänderung α : Wärmeausdehnungskoeffizient (CTE)
Für Kohlenstofffasern in Faserrichtung (L=260mm):	Für ED700 Form (L=260mm):
$\Delta L_A = -0.5 \cdot 10^{-6} \cdot 260 \cdot 110 \approx -0.014 \text{ mm}$	$\Delta L_B = 35 \cdot 10^{-6} \cdot 260 \cdot 110 \approx 1.001 \text{ mm}$

In dieser Phase ist die thermische Ausdehnung des Epoxidharzblocks nicht mit der des Kohlenstofffasermaterials kompatibel. Da jedoch die Bearbeitung alternativer Werkstoffe, wie beispielsweise metallischer Formen, sehr aufwendig und kostenintensiv wäre, wurde das Risiko einer Verformung der Epoxidharzform bewusst in Kauf genommen. Ein primäres Konstruktionsziel besteht darin, dass sich das Werkzeug nach der thermischen Expansion leicht demontieren lässt. Im ersten Szenario war geplant, Hülsenschrauben mit einem Außendurchmesser von 6 mm zu nutzen, um simultan zu zentrieren und zu spannen. Dabei sollten nur wenige Schrauben spielfrei als Passung sitzen. Wenn alle Elemente eine zu geringe Toleranz aufweisen, klemmt die Form aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnung, was das Öffnen erheblich erschwert. Aufgrund einer Diskrepanz bei der Bestellung wurden die Schrauben jedoch mit einem Außendurchmesser von 5 mm (AD5) geliefert. Da diese Schrauben keine präzise Zentrierung mehr gewährleisten konnten, wurde die Konstruktion angepasst: Die exakte Zentrierung wurde durch zwei separate Passstifte realisiert, während die vorhandenen Schrauben

¹³ Vgl. Callister/Rethwisch 2020, S. 746.

nun mit ausreichendem Spiel rein zum Festziehen dienen. Die Härtungstemperatur des SIGRAPREG® C U230-0/NF-E320/39 % Kohlenstofffaser-Prepregs liegt zwischen 90 °C und 140 °C. Die Glasübergangstemperatur (T_g) von ED700 beträgt 130 °C.[1] Dieser Temperaturunterschied wurde ausgeglichen, indem die Wärmebehandlung bei niedrigeren Temperaturen zeitlich verlängert wurde. In der folgenden Abbildung sind die vom Hersteller empfohlenen Parameter für die Wärmebehandlung dargestellt.¹⁴



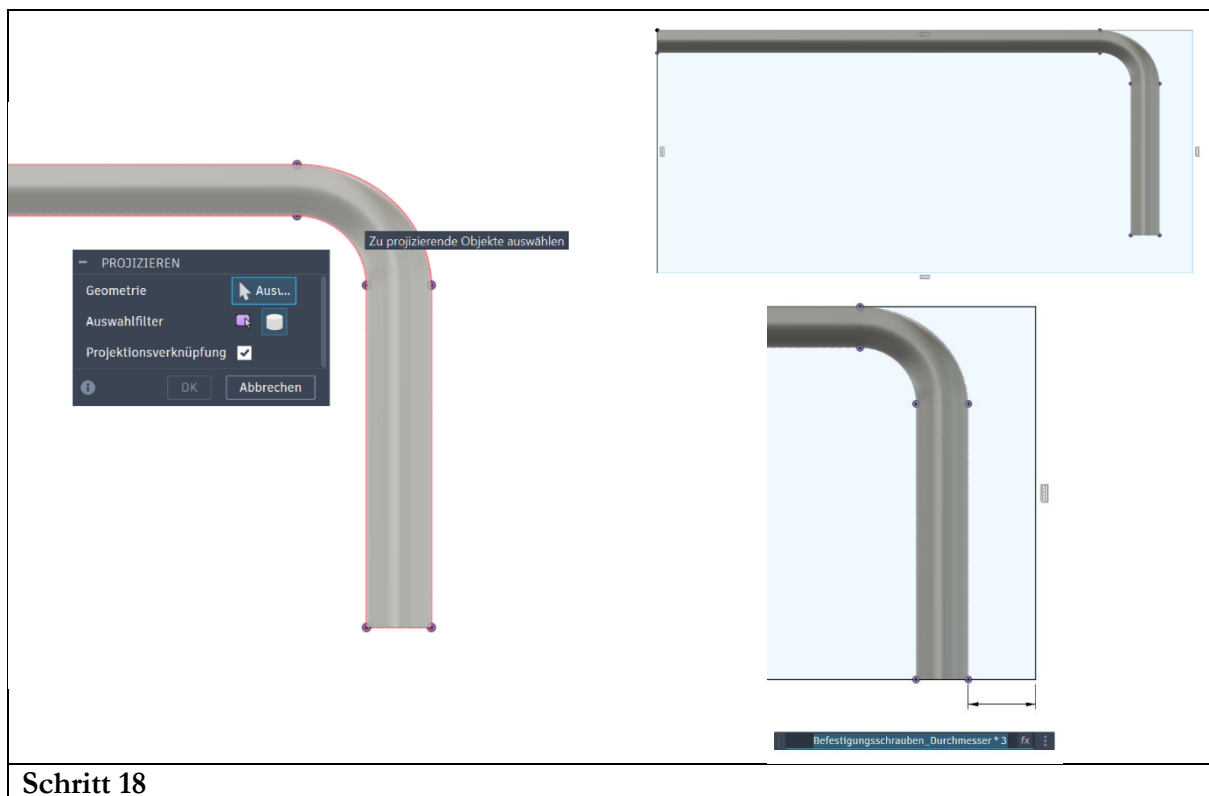
Für eine mühelose Entformung des Bauteils wurde ein zweiteiliges Negativformwerkzeug bevorzugt. Die beiden symmetrischen Formhälften, yansıtlarak CNC-gefräst werden, erfahren mithilfe von Passstiften eine präzise Positionierung zueinander und werden anschließend durch Hülsenschrauben festgespannt.

¹⁴ SGL CARBON SE: Technical Data Sheet: Harzsysteme E320/E321/E322/E323 - Epoxid-Harzsysteme für SIGRAPREG® Prepregs, online im Internet unter: https://www.ezentrumbilder.de/rg/pdf/td_de_SIGRAPREG.pdf (aufgerufen am 07.06.2026).

Schritt 18

Eine dritte Skizze wird auf der ZY-Ebene erstellt. Das vorliegende Volumenmodell des Bauteils wird in diese Skizze projiziert, wobei im Auswahlfilter die Option „Körper“ aktiviert ist. Anschließend wird ein das Bauteil umschließendes Rechteck so konstruiert, dass koinzident eine seiner Ecken auf der oberen linken Ecke der projizierten Bauteillinien liegt. Die untere Kante des Rechtecks wird deckungsgleich mit dem unteren Eckpunkt des Bauteils gesetzt. Die Positionierung der rechten Rechteckkante erfolgt so, dass ihr Abstand zur rechten Bauteilkante mindestens das Dreifache des Durchmessers jener Schraube beträgt, yansılarak die für die spätere Fixierung des Bauteils vorgesehen ist.

- Skizze > Erstellen > Rechteck Rechteck mit Zwei Punkten
- Skizze > Abhängigkeiten > Koinzident
- Skizze > Skizzenbemaßung, Parameter: $Befestigungsschrauben_Durchmesser \times 3$

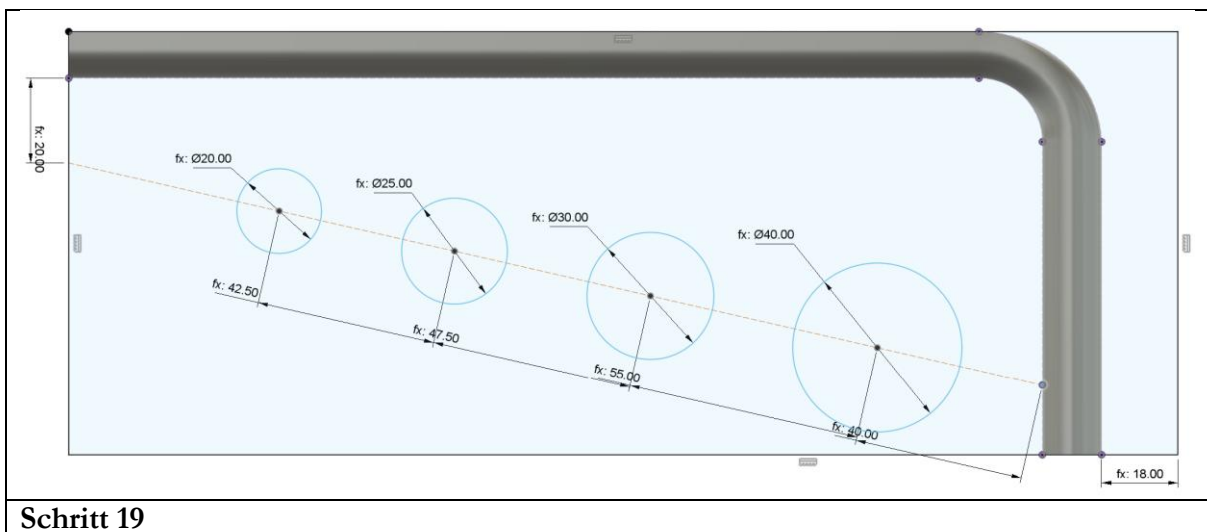


Schritt 18

Schritt 19

Auf der linken Seite des Werkzeugs wird eine Konstruktionslinie erstellt, die im Abstand der Blockmaterialstärke am D-Profil-Kanal beginnt und bis zum O-Profil-Kanal führt. Koaxial zu dieser Linie werden vier Bohrungen mit den Durchmessern 20, 25, 30 und 40 mm modelliert. Der Abstand zwischen den jeweiligen Kreisumfängen entspricht dabei exakt der Dicke des Formmaterials. Für die letzte Bohrung mit dem Durchmesser von 40 mm wird ein Abstand zum O-Profil-Kanal definiert, welcher dem Parameter: *Form_Stärke* entspricht.

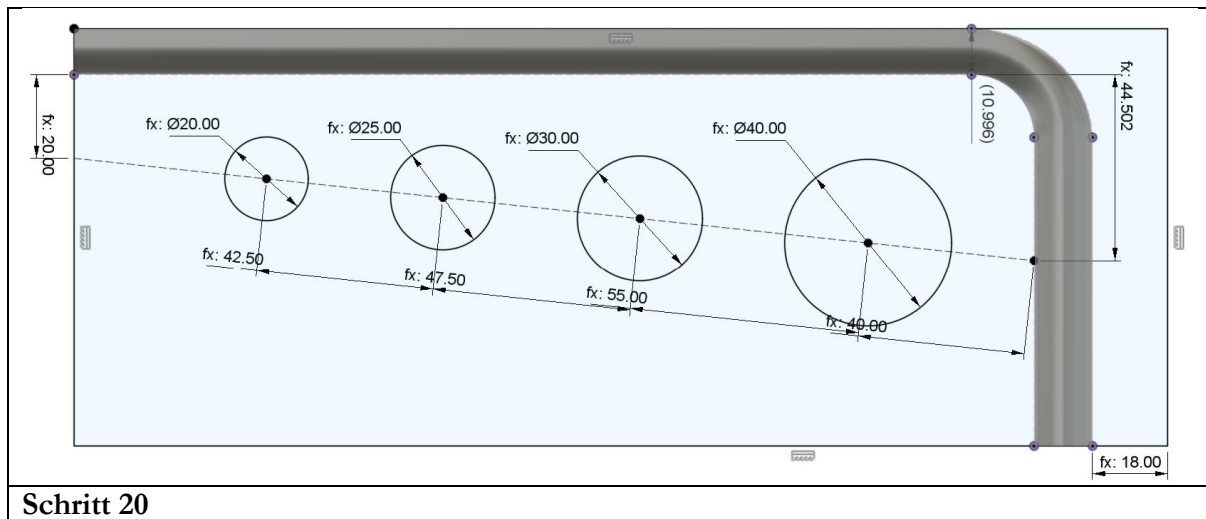
- Skizze > Erstellen > Linie > Konstruktionslinie (sol kenardan O profile kadar)
- Skizze > Erstellen > Skizzenbemaßung, Parameter: *Form_Stärke* (D-Profil sol alt noktasindan)
- Skizze > Erstellen > Kreis > Mittelpunkt, Durchmesser, Kreis (4 Mal Links nach Rechts), Parameter:
 1. *Entlastungsbobrunge_Durchmesser*
 2. *Entlastungsbobrunge_Durchmesser* * 1.25
 3. *Entlastungsbobrunge_Durchmesser* * 1.50
 4. *Entlastungsbobrunge_Durchmesser* * 2
- Skizze > Erstellen > Skizzenbemaßung (Von links nach rechts wird ein Abstand hinzugefügt, der der Summe der Radien der Kreise plus der Formstärke entspricht; während des erneuten Zeichenprozesses können die Modellparameter variieren.), Parameter:
 1. $(\text{Kreis 1}) d146 / 2 + (\text{Kreis 2}) d147 / 2 + 20 \text{ mm}$
 2. $(\text{Kreis 2}) d147 / 2 + (\text{Kreis 3}) d148 / 2 + 20 \text{ mm}$
 3. $(\text{Kreis 3}) d148 / 2 + (\text{Kreis 4}) d149 / 2 + 20 \text{ mm}$
 4. $(\text{Kreis 4}) d149 / 2 + 20 \text{ mm}$ (nach der Wand des O-Profils)



Schritt 20

Die Dicke des D-Profiles wird über eine Referenzbemaßung ermittelt. Die Mittellinie, auf der die Bohrungen zentriert sind, ist exakt in der geometrischen Mitte positioniert

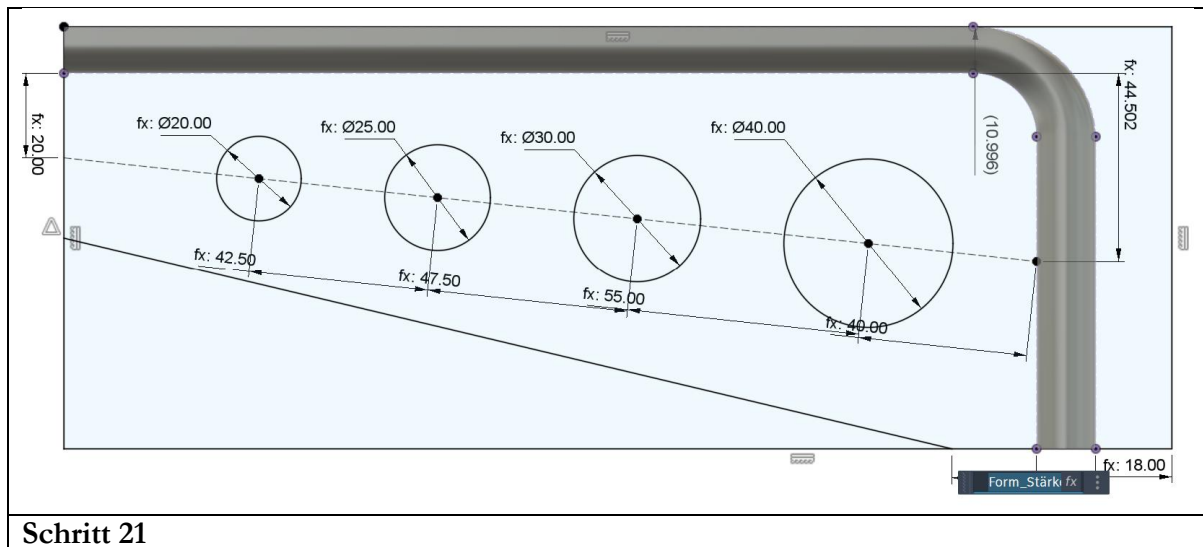
- Skizze > Erstellen > Skizzenbemaßung > getriebene Bemaßung
- Skizze > Erstellen > Skizzenbemaßung, Parameter: $(Tiefe_des_Stabs - (getriebene\ Bemasung_{d174}) / 2)$



Schritt 21

Eine geneigte Linie wird konstruiert, um die untere und linke Kante miteinander zu verbinden. Der linke Endpunkt dieser Linie ist koinzident zum Mittelpunkt der linken Rechteckkante ausgerichtet, während der untere Endpunkt in einem Abstand zum O-Profil-Kanal positioniert wird, welcher dem Parameter *Form_Stärke* entspricht.

- Skizze > Erstellen > Linie
- Skizze > Abhängigkeiten Mittelpunkt
- Skizze > Erstellen > Skizzenbemaßung, Parameter: *Form_Stärke*

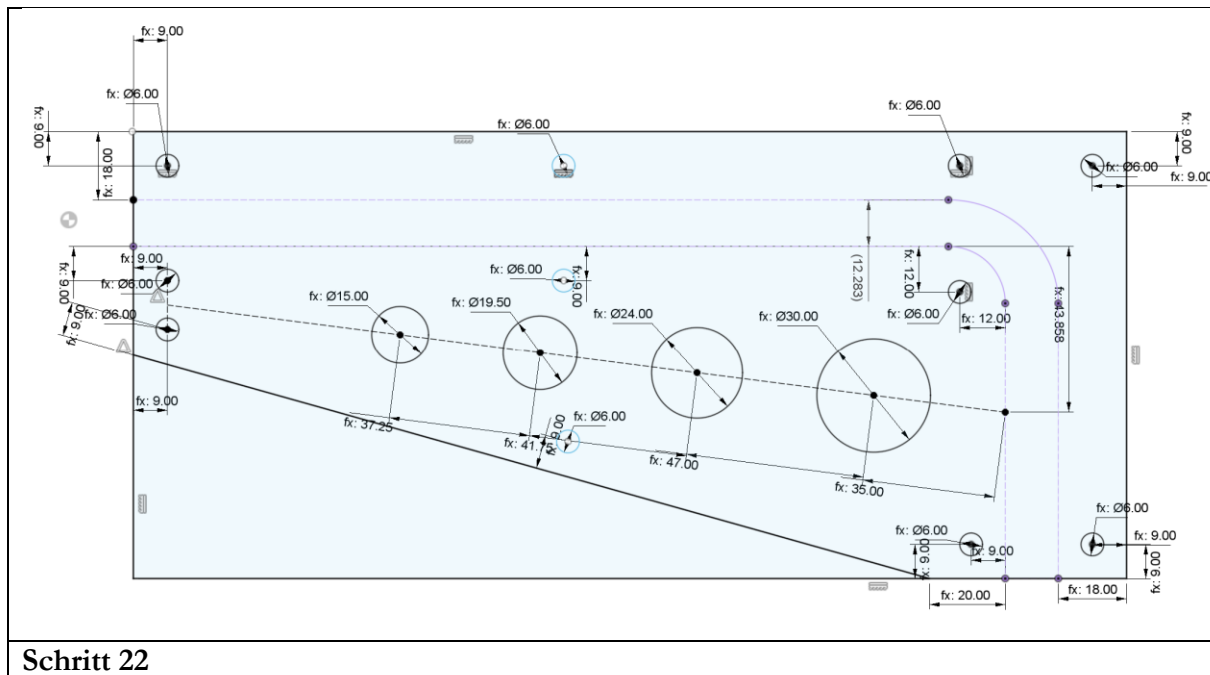


Schritt 22

Für die Befestigungsschrauben werden insgesamt 11 Schraubenlöcher modelliert. Ein kritischer Parameter im Designprozess ist, dass der Abstand der Lochmitten zu den Kanten mindestens das 1,5-Fache des Schraubendurchmessers betragen sollte. Dieses Verhältnis stellt die untere Grenze der sicheren Festigkeitsgrenze dar, und bei weichen Materialien muss dieser Sicherheitsfaktor weiter erhöht werden. Da die Form jedoch nicht zu groß sein darf und keine erhebliche Last darauf wirkt, wurden die Löcher genau wie in der Skizze des jeweiligen Konstruktionsschritts positioniert.¹⁵

- Skizze > Erstellen > Kreis > Mittelpunkt, Durchmesser, Kreis (8 Mal), Parameter: *Befestigungsschrauben_Durchmesser*
- Skizze > Erstellen > Skizzenbemaßung
 1. Für alle 6-mm-Kreise, außer dem einen an der L-Ecke, Parameter: *Befestigungsschrauben_Durchmesser* * 1.5
 2. Für Den an der L-Ecke, Parameter: *Befestigungsschrauben_Durchmesser* * 2

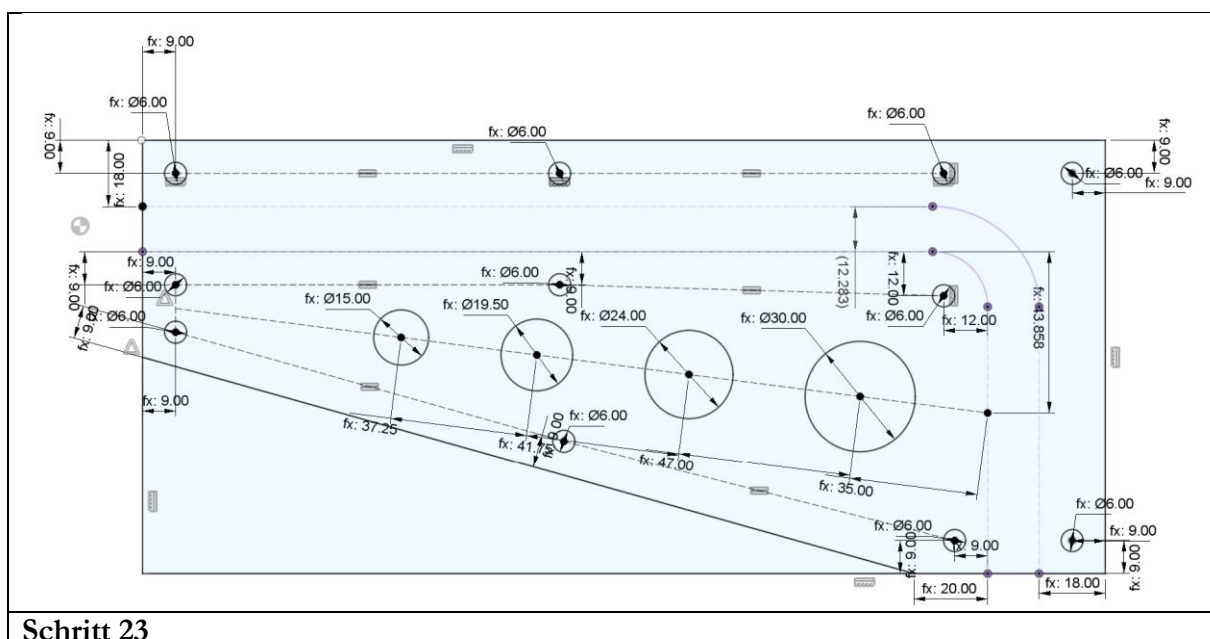
¹⁵ Vgl. Europäische Standard EN 1993-1-8, 2005.



Schritt 23

Die beiden noch unterbestimmten Kreise in der Mitte müssen exakt positioniert werden. Hierzu werden von den Mittelpunkten dieser noch unvollständig definierten Kreise aus Konstruktionslinien zu den Mittelpunkten der jeweils rechts und links angrenzenden Kreise gezogen. Über eine geometrische Zwangsbedingung werden beide Linien auf Gleichheit gesetzt. Auf diese Weise werden die zuvor unterbestimmten Kreise symmetrisch zentriert.

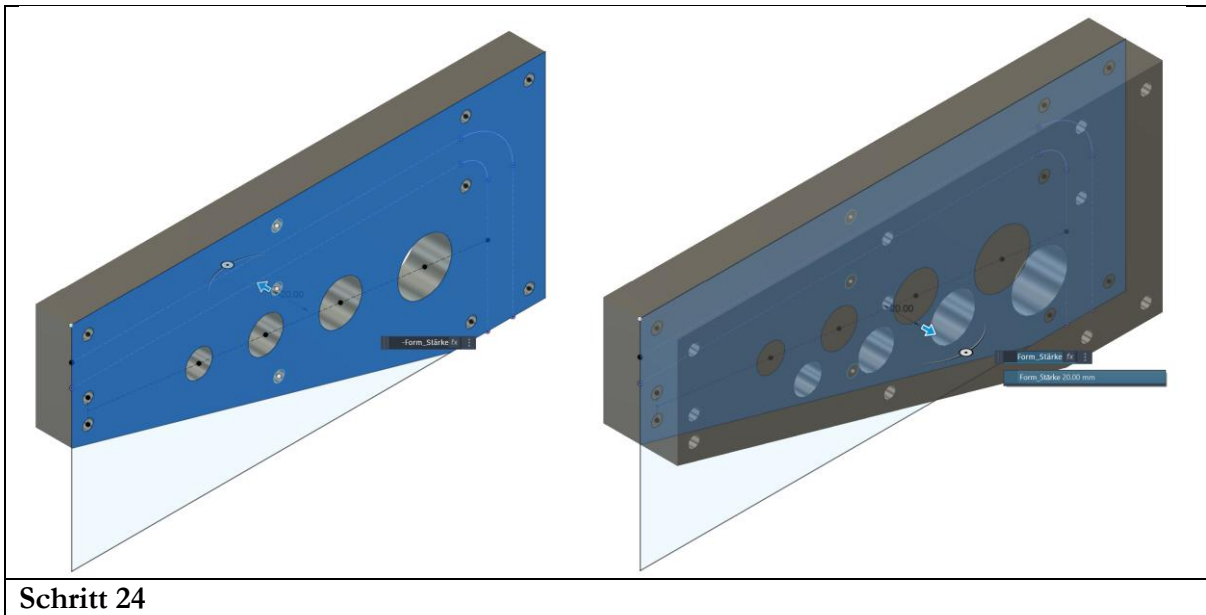
- Skizze > Erstellen > Linien (4-mal)
- Skizze > Abhängigkeiten > Gleich



Schritt 24

Nach dem Ausblenden des Stab-Körpers wird das Volumenmodell des Formwerkzeugs erstellt. Die Form ist zweiteilig ausgeführt. Die erste Extrusion wird in negative Achsenrichtung durchgeführt, während die zweite Extrusion symmetrisch dazu in positive Richtung entsprechend der definierten Formwandstärke erfolgt.

- Volumenkörper > Extrusion, Parameter: *-Form_Stärke*
- Volumenkörper > Extrusion, Parameter: *Form_Stärke*

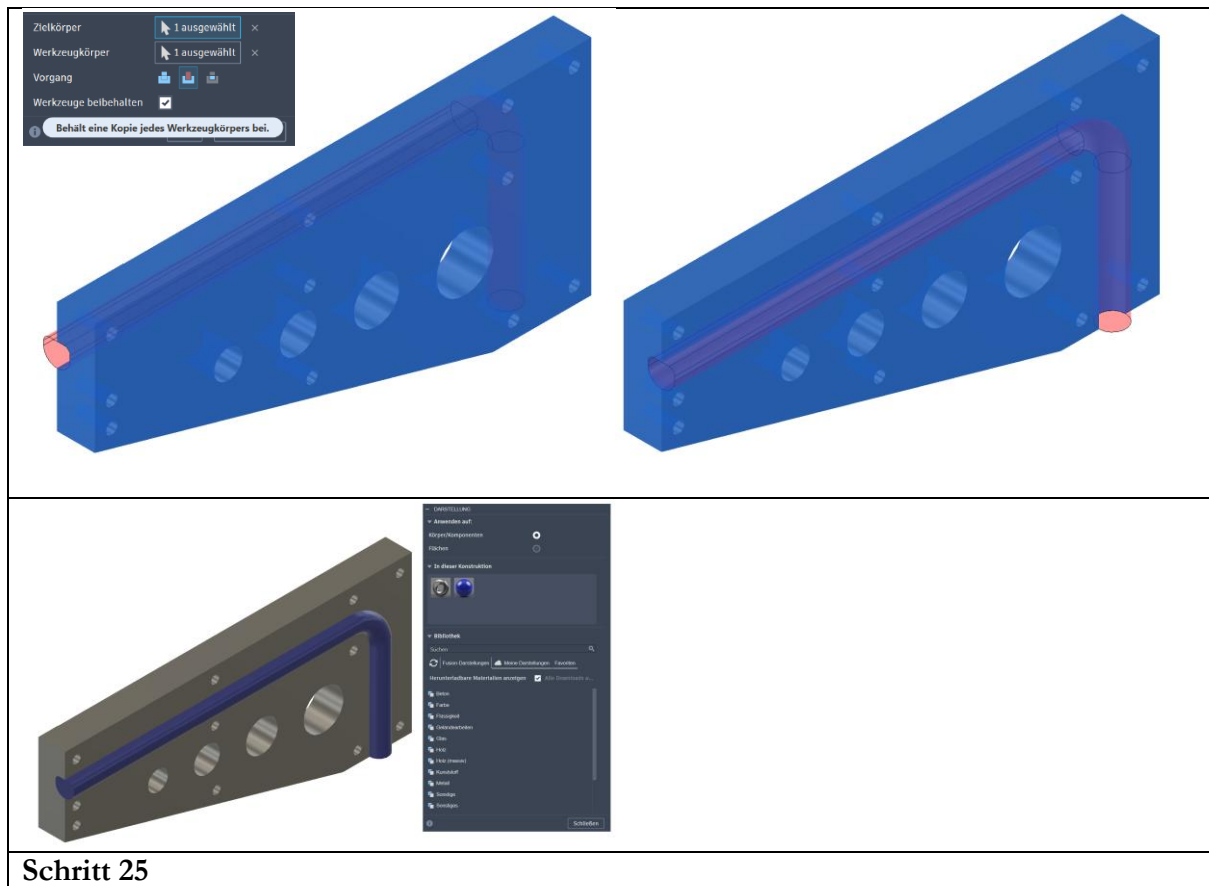


Schritt 24

Schritt 25

Unter Verwendung des Stabs als Werkzeug wird ein Schnitt durch das linke und rechte Bauteil durchgeführt. Für beide Schnittvorgänge muss das Kästchen Werkzeuge beibehalten aktiviert werden. Nach diesem Schritt wird der Stab blau gefärbt, um die Ansicht leichter verständlich zu machen. Dies hat keine funktionelle Auswirkung.

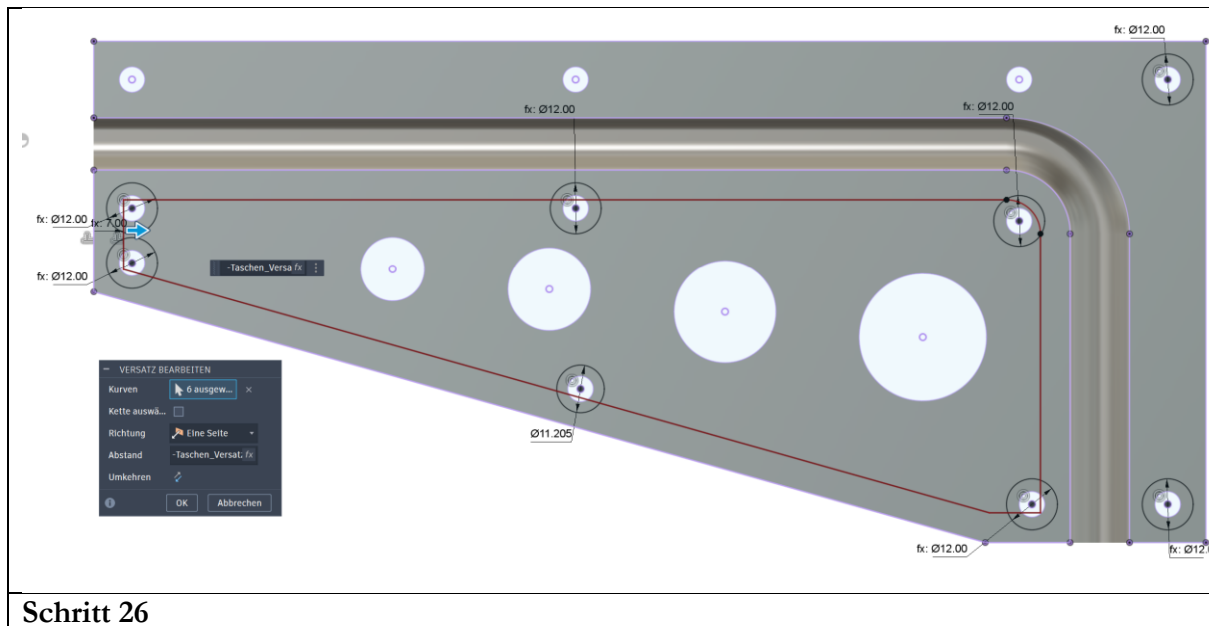
- Volumenkörper > Ändern > Kombinieren, Linke Teil - Zielkörper, Stab - Werkzeugkörper, Werkzeugbeibehalten
- Volumenkörper > Ändern > Kombinieren, Rechte Teil - Zielkörper, Stab - Werkzeugkörper, Werkzeugbeibehalten
- Tastatur Kurzbefehl: *A*, zum Farben



Schritt 25

Schritt 26

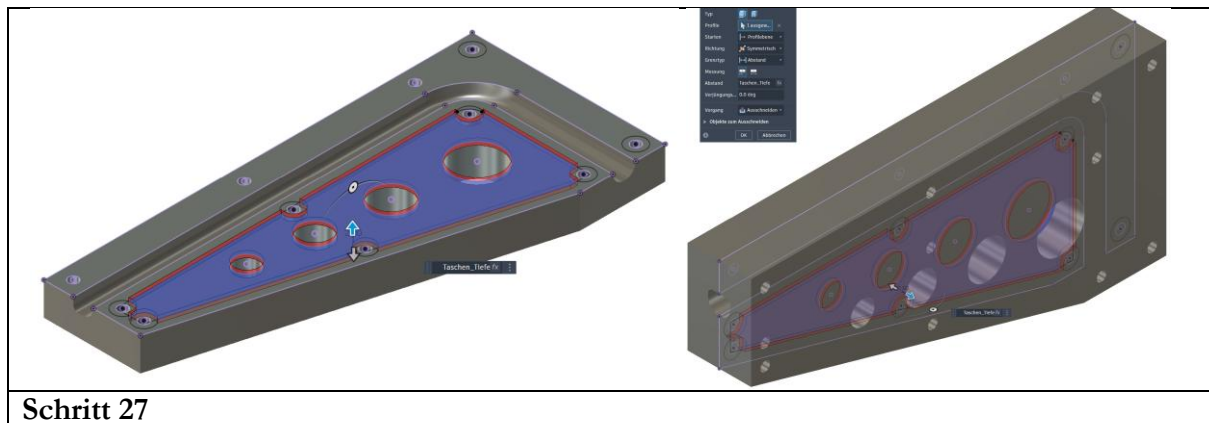
Vor diesem Arbeitsschritt wurde die Grobmodellierung des symmetrischen Formwerkzeugs abgeschlossen. Der nachfolgende Prozess umfasst die Feinabstimmung der Formgeometrie. Um das Risiko von Adhäsionen (Anhaftungen) im mittleren Bereich des Bauteils zu minimieren, ist die Konstruktion einer Aussparung (Tasche) vorteilhaft. Hierzu werden alle Körper mit Ausnahme der linken Formhälfte ausgeblendet. Auf der zentralen XZ-Ebene, welche die Symmetrieachse der Bauteile bildet, wird eine neue Skizze erstellt. Die Trennfläche (Kontaktlinie) zwischen den Formhälften wird in die Skizze projiziert, wobei der Auswahlfilter auf „Spezifizierte Objekte“ gesetzt ist. Um die Mittelpunkte der Befestigungsschrauben werden Sicherheitskreise mit dem doppelten Schraubendurchmesser konstruiert. Anschließend wird der Umfang dieser inneren Kontaktfläche unterhalb des Stabkanals ausgewählt und ein Offset nach innen angewendet. Diese geschlossene Offset-Kontur definiert die Begrenzung der Aussparung, um das Adhäsionsrisiko während der Fertigung effektiv zu reduzieren."



Schritt 27

Der Bereich innerhalb der Offset-Kontur wird entsprechend dem Parameter *taschen_tiefe* beidseitig-symmetrisch extrudiert und aus dem Grundkörper ausgeschnitten. Jedoch müssen unmittelbar vor dem Abschluss dieser Extrusionsoperation sowohl die linke als auch die rechte Formhälfte wieder eingeblendet werden.

- Volumenkörper > Extrusion > Parameter: *Taschen_Tiefe*



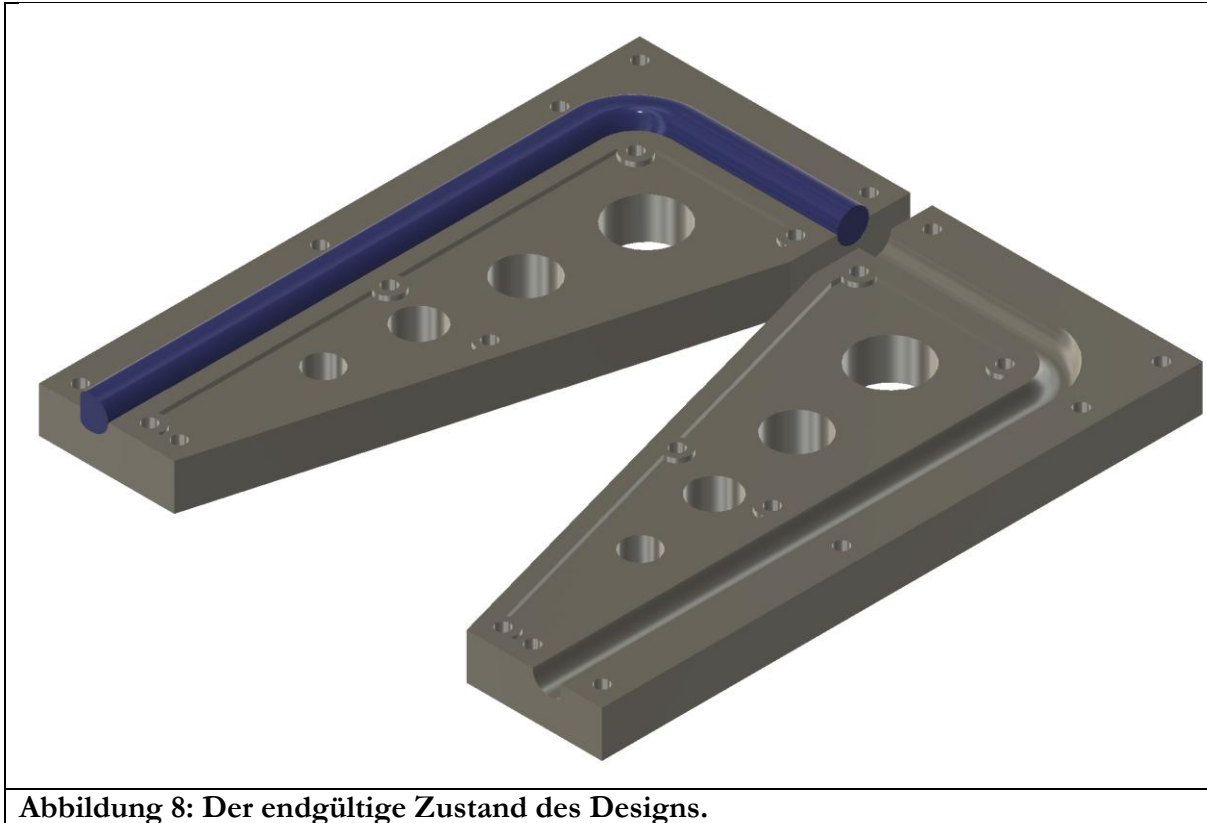


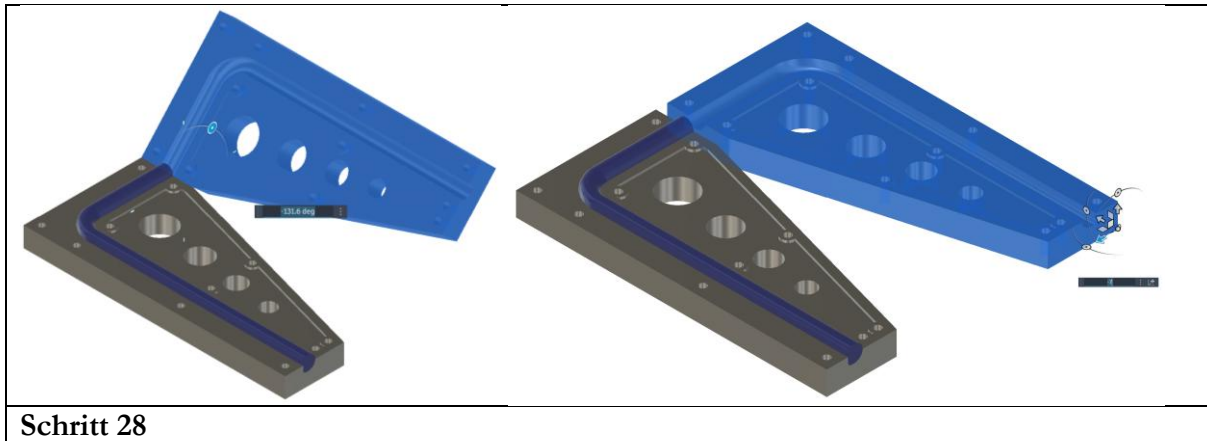
Abbildung 8: Der endgültige Zustand des Designs.

Erstellung der CAM-Strategien und Werkzeugwegplanung

Die im Inventar der Schule vorhandenen Fräsen waren für das Projekt ausreichend und wurden für die Fertigung genutzt. Sowohl das Design als auch die CAM-Programmierung wurden gezielt auf die Spezifikationen dieser vorhandenen Maschinen abgestimmt. Alle im Fräsprozess verwendeten Materialien sind in Anhang A aufgeführt.

Schritt 28

Während die linke Formhälfte in ihrer ursprünglichen Position verbleibt, wird die rechte Formhälfte um 180 Grad aufgeklappt, wobei die Trennkante an der kürzesten Seite als Drehachse dient. Ziel dieses Verfahrens ist es, die simultane Bearbeitung beider Formteile in einer einzigen Aufspannung auf der Maschine zu ermöglichen. Dieser Ansatz steigert die Formgenauigkeit erheblich, reduziert die Anzahl der Werkzeugwechsel und senkt die Bearbeitungszeit drastisch. Anschließend wird diese Formkomponente in der Z-Achse um -7 mm verschoben. Der Fräserdurchmesser für das Ausschneiden der Außenkonturen der Formen beträgt 6 mm, weshalb das zugesetzte Aufmaß von +1 mm eine vollkommen ausreichende Toleranz darstellt.



Schritt 28

Strategie und Werkzeugwegplanung

Nullpunkt (WCS): Unterseite-Mitte des Bauteils. Die Definition des Z-Nullpunkts auf der Spannfläche stellt sicher, dass mögliche Dickentoleranzen des Rohmaterials keinen Einfluss auf die Präzision der oberen Geometrien und Kanäle haben.

Maschinenkonfiguration: 3-Achs-CNC-Fräsmaschine.

Werkstoff: ED700 Tooling Board.

- Mit 6mm Schaftfräser:

Werkzeug-Parameter: $D_c = 6 \text{ mm}$, $z = 2$

- Planen: Planfräsen der Coupling-Oberfläche

- *Schnittdaten:* $n = 12000 \text{ U/min}$, $V_c = 226.2 \text{ m/min}$, $f_z = 0.033 \text{ mm/Zahn}$, $V_f = 800 \text{ mm/min}$

- Bohren: Löcher für die Befestigungsschrauben

- *Schnittdaten:* $n = 12000 \text{ U/min}$, $V_f = 800 \text{ mm/min}$

- 2D-Tasche: 2 mm Senkung der Taschen, um bei eventuellen Leckagen das Risiko des Verklebens zu verringern

- *Schnittdaten:* $n = 12000 \text{ U/min}$, $V_f = 800 \text{ mm/min}$

- Bohrfräsen: Entlastungslöcher

- *Schnittdaten:* $n = 12000 \text{ U/min}$, $V_f = 800 \text{ mm/min}$

- Mit 6mm Kugelpfäher:

Werkzeug-Parameter: $D_c = 6 \text{ mm}$, $z = 2$

- Kontur: Grobes und schnelles Schruppen des Kanals

- *Schnittdaten:* $n = 14000 \text{ U/min}$, $V_c = 263.9 \text{ m/min}$, $f_z = 0.05 \text{ mm/Zahn}$, $V_f = 1400 \text{ mm/min}$

- Steil und Flach: Feinschlichten des Kanals für eine möglichst glatte Oberfläche

- *Schnittdaten:* $n = 14000 \text{ U/min}$, $V_f = 1400 \text{ mm/min}$

- Mit 6mm Schruppfräser:
Werkzeug-Parameter: $D_c = 6 \text{ mm}$, $z = 2$
 - 2D-Kontur: Außenkontur der Form
 - *Schnittdaten*: $n = 12000 \text{ U/min}$, $V_f = 800 \text{ mm/min}$

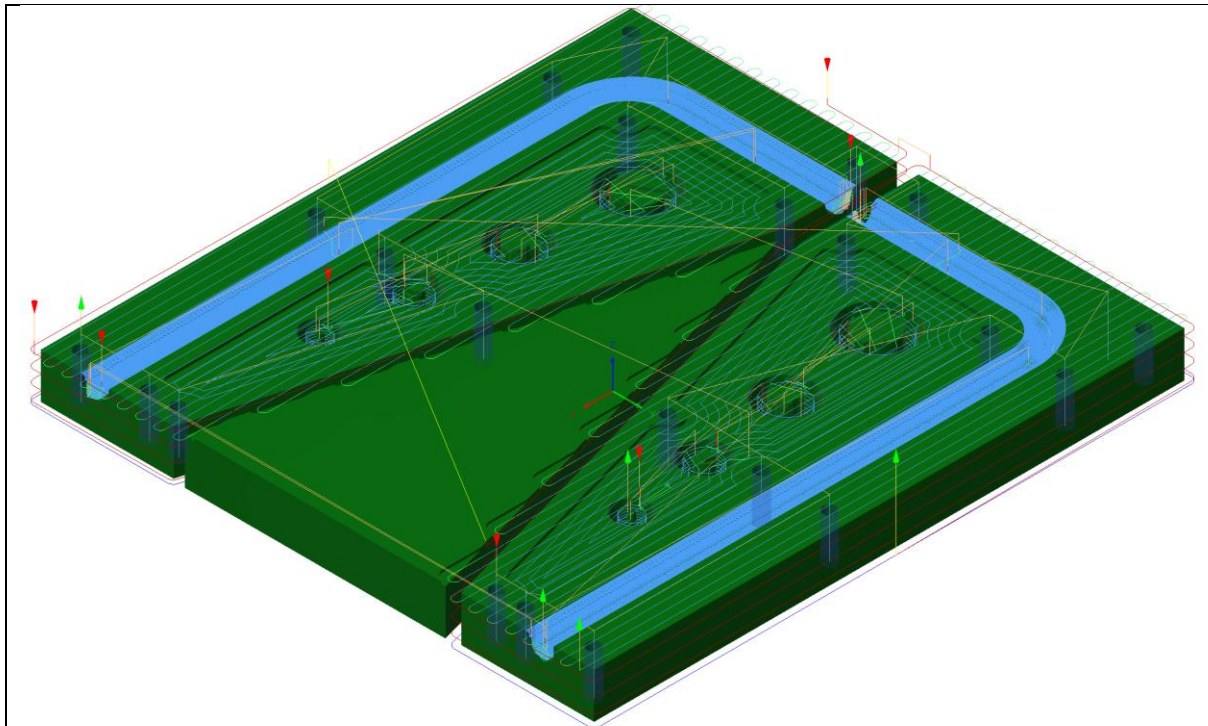


Abbildung 9: Werkzeugwege für den Formzuschnitt

Umsetzung der CAM-Programmierung

Schritt 29

Zur Definition neuer Werkzeuge und Schnittparameter wird die Werkzeugbibliothek in Autodesk Fusion aufgerufen. Zunächst werden die geometrischen Abmessungen des Fräasers mithilfe eines Messschiebers exakt ermittelt und unter der Registerkarte „Werkzeug“ eingetragen. Da insgesamt drei verschiedene Werkzeuge zum Einsatz kommen, wird dieser Vorgang unter Anpassung der jeweiligen Parameter wiederholt. Die nachfolgende Tabelle dient der Berechnung von Vorschub und Spindeldrehzahl. Obwohl die Frässpindel Drehzahlen von über 20.000 U/min erlaubt, wurde die Schnittgeschwindigkeit bewusst materialschonend abgesenkt, um eine thermische Überhitzung des Blockmaterials zu verhindern. Die detaillierten Parameter für die nachfolgend aufgeführten Bearbeitungsoperationen sind in den Abbildungen unter den jeweiligen Arbeitsschritten dargestellt.

$n = 1000 \cdot V_c / (\pi \cdot D_c)$ $V_f = n \cdot f_z \cdot Z$
V_c : Schnittgeschwindigkeit in m/min f_z : Zahnvorschub in mm/Zahn D_c : Schneiddurchmesser in mm Z : Zähnezahl n : Spindeldrehzahl V_f : Vorschubgeschwindigkeit in mm/min
Formel 1: Berechnungsformeln für die Schnittdaten

Werkzeug 1, 6mm Schaftfräser

- Fertigen > Verwalten > Werkzeugbibliothek > Benutzerbibliotheken > Lokal > Neues Werkzeug (Strg-n) > Schaftfräser > Allgemein > Beschreibung, 6mm Schaftfräser; Werkzeug > Siehe Bild (Schritt 29.1); Schnittdaten > Siehe Bild (Schritt 29.2).

Werkzeug 2, 6mm Kugelkopffräser

- Fertigen > Verwalten > Werkzeugbibliothek > Benutzerbibliotheken > Lokal > Neues Werkzeug (Strg-n) > Schaftfräser > Allgemein > Beschreibung, 6mm Kugelkopffräser; Werkzeug > Siehe Bild (Schritt 29.3); Werkzeug > Siehe Bild (Schritt 29.4).

Werkzeug 3, 6mm Schrappfräser

- Gleiche wie Werkzeug 1

2 - Ø6mm (6mm Flat Endmill)

Allgemein

Werkzeug

Schaft

Halter

Schnittdaten

Postprozessor

Schnittdaten

Default preset

Aluminum - Slotting

Aluminum - Roughing

Aluminum - Finishing

Brass - Slotting

Brass - Roughing

Brass - Finishing

Copper - Slotting

Copper - Roughing

Copper - Finishing

Low Carbon Steel - Slotting

Low Carbon Steel - Roughing

Low Carbon Steel - Finishing

High Carbon Steel - Slotting

High Carbon Steel - Roughing

High Carbon Steel - Finishing

Plastics - Slotting

Plastics - Roughing

Plastics - Finishing

Stainless Steel - Slotting

Stainless Steel - Roughing

Stainless Steel - Finishing

Titanium - Slotting

Titanium - Roughing

Titanium - Finishing

Tooling Board Roughing

Geschwindigkeit

Spindeldrehzahl

12000 U/min

Schnittgeschwindigkeit

226.19467 m/min

fx

Rampen-Drehzahl

12000 U/min

fx

Vorschubgeschwindigkeit

Schnittvorschub

800 mm/min

Vorschub pro Zahn

0.03333 mm

fx

Einfahrsvorschub

800 mm/min

fx

Ausfahrsvorschub

800 mm/min

fx

Übergangsvorschub

800 mm/min

fx

Helixvorschub

800 mm/min

Rampenwinkel

1 Grad

Vertikale Vorschubgeschwindigkeit

Eintauchvorschub

150 mm/min

Eintauchvorschub pro Umdrehung

0.0125 mm

fx

Durchgänge und Verknüpfung

Tiefenzustellung verwenden

☐

Querzustellung verwenden

☐

Kühlmittel

Deaktiviert

Schnitt 29.2

Abschlußarbeit, originale Zeichnung V17 /  1 - Ø6mm (6mm Ball Endmill)

Allgemein

Werkzeug

Schaft

Halter

Schnittdaten

Postprozessor



Schnittdaten

Default preset

Aluminum - Slotting

Aluminum - Roughing

Aluminum - Finishing

Brass - Slotting

Brass - Roughing

Brass - Finishing

Copper - Slotting

Copper - Roughing

Copper - Finishing

Low Carbon Steel - Slotting

Low Carbon Steel - Roughing

Low Carbon Steel - Finishing

High Carbon Steel - Slotting

High Carbon Steel - Roughing

High Carbon Steel - Finishing

Plastics - Slotting

Plastics - Roughing

Plastics - Finishing

Stainless Steel - Slotting

Stainless Steel - Roughing

Stainless Steel - Finishing

Titanium - Slotting

Titanium - Roughing

Titanium - Finishing

Tooling Board Epoxy

Tooling Board Epoxy Finishing

Geschwindigkeit

Spindeldrehzahl14000 U/min

Schnittgeschwindigkeit263.89378 m/minfx

Rampen-Drehzahl14000 U/minfx

Vorschubgeschwindigkeit

Schnittvorschub1400 mm/minfx

Vorschub pro Zahn0.05 mm

Einfahrsvorschub300 mm/min

Ausfahrsvorschub300 mm/min

Übergangsvorschub300 mm/min

Helixvorschub250 mm/min

Rampenwinkel2 Grad

Vertikale Vorschubgeschwindigkeit

Eintauchvorschub250 mm/min

Eintauchvorschub pro Umdrehung0.01786 mmfx

Durchgänge und Verknüpfung

Tiefenzustellung verwenden☐

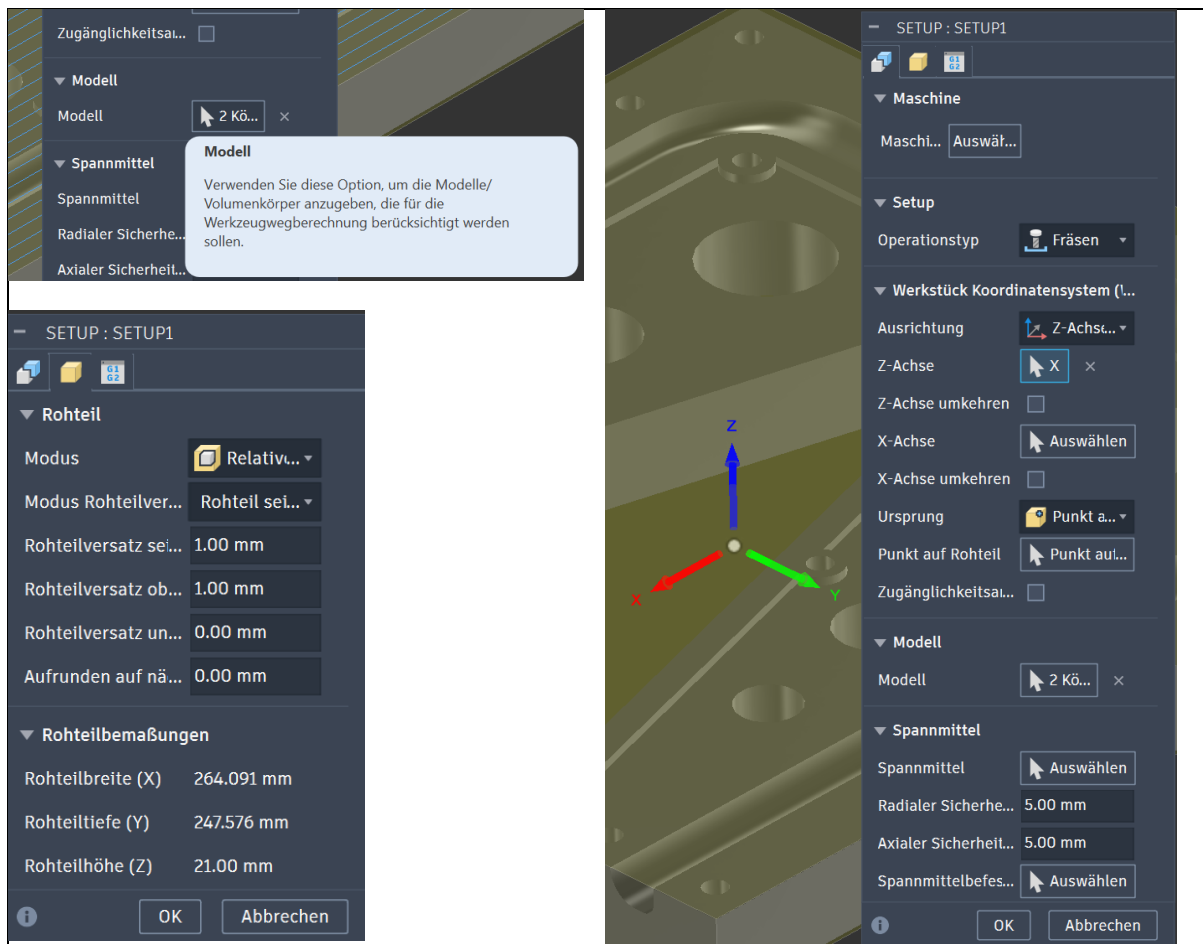
Querzustellung verwenden☐

KühlmittelDeaktiviert▼

Schritt 29.4

Schritt 30

Ein Setup wird erstellt. Die rechte und linke Abdeckung werden im Modell-Tab ausgewählt. Da das aktuelle Koordinatensystem der Zeichnung für die Bearbeitung des Bauteils nicht geeignet ist, wird eine senkrecht zu dieser Oberfläche ausgerichtete Z-Achse benötigt, um die Innenflächen des Modells zu bearbeiten. Zu diesem Zweck wird die Z-Achse des Modells mit der X-Achse der Zeichnung vertauscht. Als Ursprung des Bauteils wird die untere Mitte gewählt. Anschließend werden die Rohteilabmessungen definiert. Das Hauptziel hierbei ist es, sicherzustellen, dass das Rohteil größer als das eigentliche Modell ist. Bei Bedarf kann dieser Schritt später mit präziseren Maßen aktualisiert werden, die direkt vom realen Rohteil genommen werden.



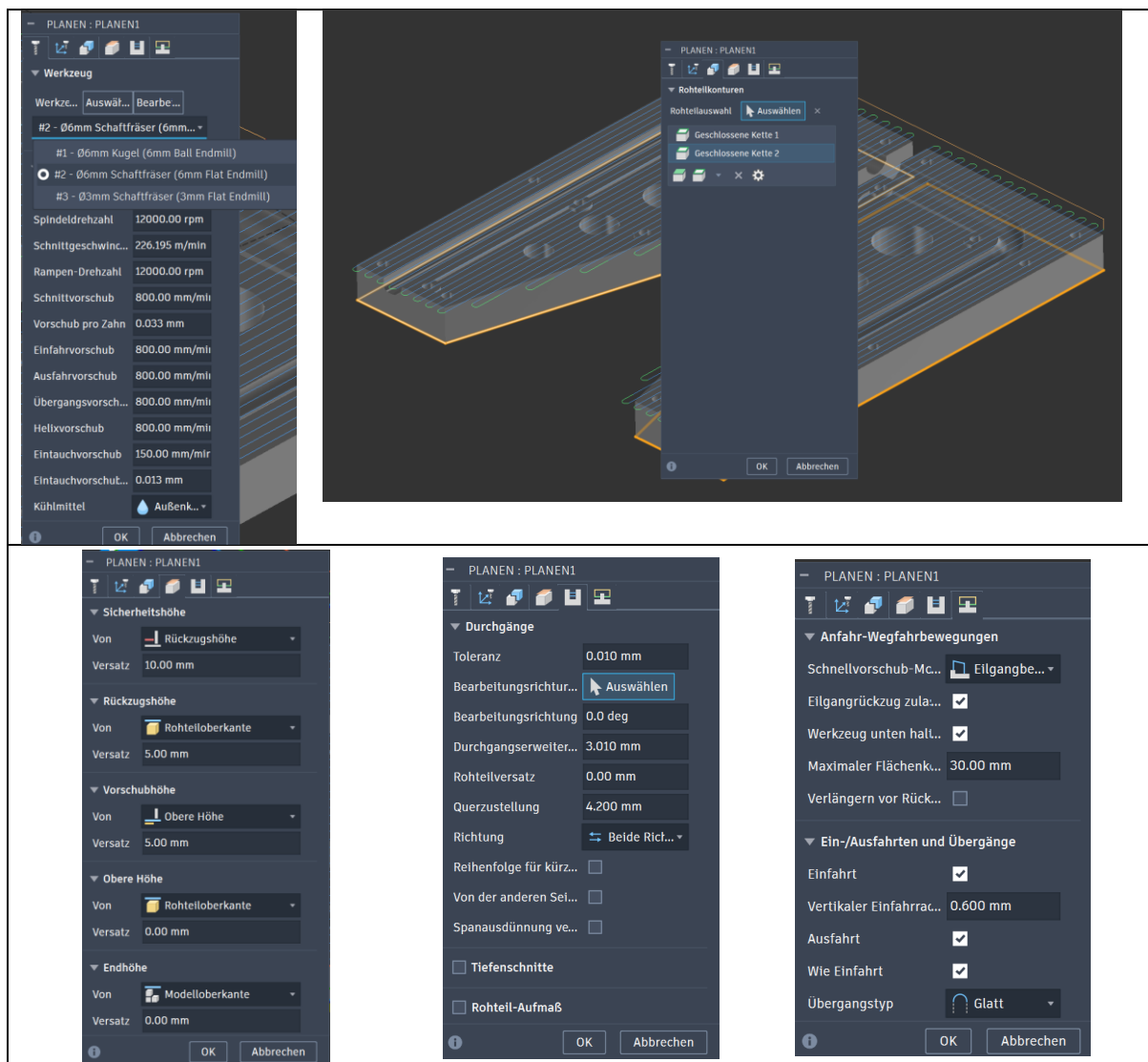
Schritt 30

- Fertigen > Fräsen > Setup > Neues Setup > Modell (Linke und Rechte Klappe);
Werkstück Koordinatensystem > Ausrichtung Z-Achse/-Ebene und X-Achse, Z-Achse (Fertigung) mit X-Achse (Ursprung);
Rohteil Tab > Modus, Relative Quadergröße > Modus Rohteilversatz, Rohteil Seitlich und Unten/Oben hinzufügen > Rohteilversatz seiten und oben 1mm,

Schritt 31

Um Sägespuren und Ungenauigkeiten auf der Oberfläche zu beseitigen, wird die obere Oberfläche des Modells mit der Planfräsen-Funktion geglättet. Die in diesem Schritt getätigten Eingaben in den Fertigen-Innenmenü-Reitern wie Werkzeug, Multi-Achsen, Geometrie, Höhen, Durchgänge und An- und Wegfahrbewegungen werden in den folgenden Schritten nicht mehr wiederholt, es sei denn, sie ändern sich oder werden geändert. (Schritt 32 bis Schritt 37)

- Fräsen > 2D > Planen > Werkzeug > Auswählen, *6mm Schaftfräser*, siehe Bild (Schritt 31.1);
Geometrie > Rohteilkonturen > Auswählen, *Geschlossene Kette (Untere Außenkonturen des Bauteils)*



Schritt 31

Schritt 32

Die Befestigungslöcher werden eingebracht. Hierfür wird die Bohren-Funktion verwendet. Parameter: *Befestigungsschrauben_Durchmesser* wird eines der zuvor mit 6 mm bemessenen Löcher ausgewählt. Anschließend aktivieren wir im Geometrie-Reiter das Kontrollkästchen „Gleicher Durchmesser“, um alle Löcher mit demselben Durchmesser automatisch auszuwählen. Unten, in den Abbildungen zu Schritt 32, sind die entsprechenden Parameter dargestellt.

- Fräsen > Bohren > Bohren,

BOHREN : BOHREN1

Werkzeug: Auswähl... Bearbeit...

#2 - Ø6mm Schaftfräser (6mm Flat ...)

Schnittdaten

Voreinstellung: Default preset

Spindeldrehzahl: 12000.00 rpm

Schnittgeschwindigl...: 226.195 m/min

Eintauchvorschub: 150.00 mm/min

Eintauchvorschub pi...: 0.013 mm

Kühlmittel: Außenküh...

Schneide, Schaft und Halter

OK Abbrechen

BOHREN : BOHREN1

Geometrie

Auswahlmodus: Flächen

Bohrungsflächen: 2 Flächen

Gleichen Durchmesser...: ☒

Nur gleiche Bohrungstl...: ☐

Nur gleiche obere Höc...: ☐

Auf Okklusionen prüfen: ☐

Werkzeugbegrenzung: Auswählen

Bohrungssegmente aut...: ☐

Nach Tiefe sortieren: ☐

Sortieren: Kleinsten Abs...

Reihenfolge umkehren: ☐

Modell: ☒

Flächen vermeiden/bearbeiten

Absolute Werte anzeig...: ☐

Flächengruppen: Gruppe

Gruppe...: Modell

Radial: 0.00 mm

Axial: 0.00 mm

Gesamtes radiales Roh...: 0.00 mm

Gesamtes axiales Roh...: 0.00 mm

OK Abbrechen

BOHREN : BOHREN1

Zyklus

Zyklusart: Spanbruch - Teil...

Einstechtiefe: 1.500 mm

Reduzierung der Einste...: 0.00 mm

Minimale Einstechtiefe: 1.500 mm

Aufaddierte Einstechtie...: 10.00 mm

Spanbruchabstand: 0.120 mm

Verweilzeit: 0.00 s

OK Abbrechen

BOHREN : BOHREN1

Anfahr-Wegfahrbewegungen

Kollisionen ignorieren: ☐

Rückzugsart: Kollisionen v...

Schnellvorschub-Modus: Eilgangbewe...

Sicherheitsabstand: 2.00 mm

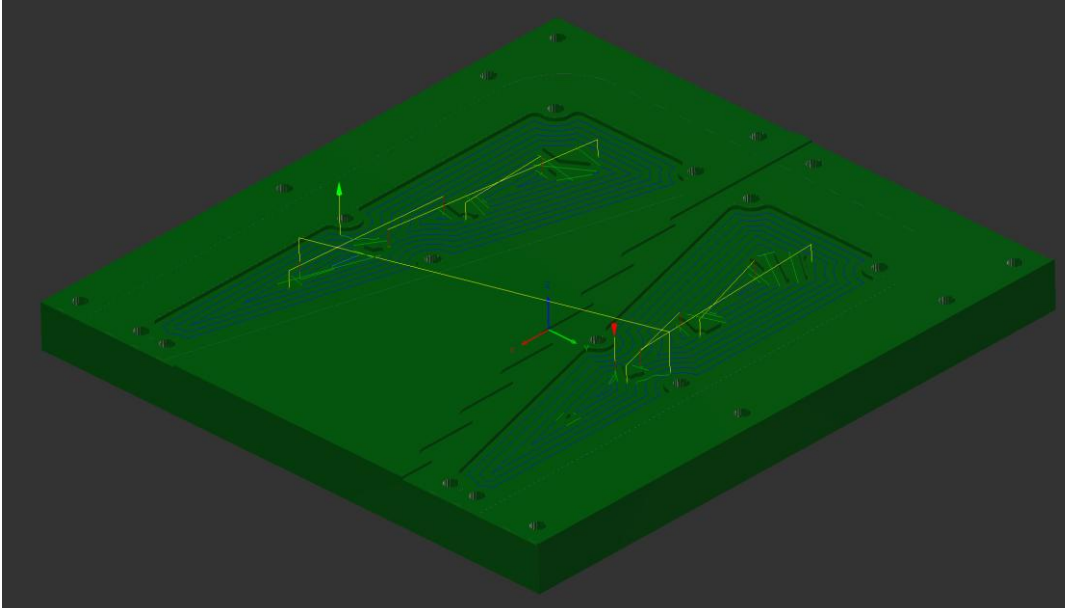
OK Abbrechen

Schritt 32

Schritt 33

Um die Tasche in der Mitte des Bauteils zu bearbeiten, wird die 2D-Tasche-Funktion verwendet. Im Geometrie-Reiter werden die Taschen auf beiden Deckeln ausgewählt. Die entsprechenden Eingaben sind der Abbildung zu Schritt 33 unten dargestellt.

- Fräsen > 2D > 2D-Tasche,



2D-TASCHE : 2D-TASCHE1

Werkzeug

Werkzeug Auswählen... Bearbeiten...

#2 - Ø6mm Schaftfräser (6mm Flat Endm...)

Schnittdaten

Voreinstellung: Default preset

Spindeldrehzahl: 12000.00 rpm

Schnittgeschwindigkeit: 226.195 m/min

Rampen-Drehzahl: 12000.00 rpm

Schnittvorschub: 800.00 mm/min

Vorschub pro Zahn: 0.033 mm

Einfahrsvorschub: 800.00 mm/min

Ausfahrsvorschub: 800.00 mm/min

Übergangsvorschub: 800.00 mm/min

Helixvorschub: 800.00 mm/min

Eintauchvorschub: 150.00 mm/min

Eintauchvorschub pro L...: 0.013 mm

Kühlmittel: Außenkühlur...

OK Abbrechen

2D-TASCHE : 2D-TASCHE1

Geometrie

Taschenauswahl Auswählen x

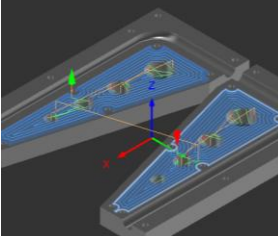
Taschen 1

Taschen 2

☐ Restmaterialbearbeitung

☐ Rohsteilkonturen

OK Abbrechen



2D-TASCHE : 2D-TASCHE1

Durchgänge

Toleranz: 0.100 mm

Seitliche Kompensation: Links

Minimaler Schneidradial...: 0.00 mm

Reihenfolge beibehalten: ☐

Beide Richtungen: ☐

Maximale Querstelli...: 3.600 mm

Morph-Spiralen-Bearb...: ☐

Querstellungssplitzer...: ☐

Glättungsabwchung: 0.100 mm

☐ Tiefenschnitte

☐ Schlichtdurchgänge

☒ Rohsteil-Aufmaß

Radiales Rohsteil-Aufmaß...: 0.500 mm

Axiales Rohsteil-Aufmaß: 0.500 mm

☐ Glättungsfilter

☐ Vorschuboptimierung

OK Abbrechen

2D-TASCHE : 2D-TASCHE1

Anfahr-Wegfahrbewegungen

Schnellvorschub-Modus: Eilgangbewe...

Eilgangrückzug zulassen: ☒

Sicherheitsabstand: 1.00 mm

Werkzeug unten halten: ☒

Maximaler Flächenkont...: 50.00 mm

Abhebhöhe: 0.00 mm

Ein-/Ausfahrten und Übergänge

Einfahrt: ☒

Horizontaler Einfahrtrac...: 0.600 mm

Sweeping-Einfahrwinkel: 90.0 deg

Linearer Einfahrabstand: 0.600 mm

Lotrecht: ☐

Vertikaler Einfahrradius: 0.600 mm

Ausfahrt: ☒

Wie Einfahrt: ☒

Materialeinfahrt

Rampen/Helixyp: Spirale

Rampen/Helixwinkel (C...): 1.0 deg

Maximale Rampentiefe...: 20.00 mm

Rampensicherheitshöhe: 2.500 mm

Radialer Helix-Sicherh...: 0.00 mm

Spiralförmiger Rampen...: 5.700 mm

Minimaler Rampendurc...: 3.00 mm

Positionen

Vorbohrpositionen: Auswählen

Bevorzugte Einfahrposi...: Auswählen

Ausfahrpositionen: Auswählen

OK Abbrechen

Schritt 33

Schritt 34

Für das Bohren der großen Löcher wird die Bohrfräsen-Funktion verwendet. Die 4 großen Löcher mit unterschiedlichen Durchmessern in der Mitte des Bauteils werden im Geometrie-Reiter ausgewählt. Wie in der Abbildung zu Schritt 34 unten dargestellt, wird der Arbeitsschritt mit den Eingaben abgeschlossen.

- Fräsen > 2D > Bohrfräsen,

BOHRFRÄSEN : BOHRFRÄSEN1

Werkzeug: #2 - Ø6mm Schaftfräser (6mm Flat Endm...)

Schnittdaten:

- Voreinstellung: Default preset
- Spindeldrehzahl: 12000.00 rpm
- Schnittgeschwindigkeit: 226.195 m/min
- Rampen-Drehzahl: 12000.00 rpm
- Schnittvorschub: 800.00 mm/min
- Vorschub pro Zahn: 0.033 mm
- Einfahrsvorschub: 800.00 mm/min
- Ausfahrsvorschub: 800.00 mm/min
- Übergangsvorschub: 800.00 mm/min
- Helixvorschub: 800.00 mm/min
- Eintauchvorschub: 150.00 mm/min
- Eintauchvorschub pro L.: 0.013 mm
- Kühlmittel: Außenkühlur...

Geometrie:

Auswahlmodus: Flächen

Auswahl Kreisförmige L.: 8 Flächen

Gleichen Durchmesser ...

Nach Tiefe sortieren

Sortieren: Kleinster Abs...

Reihenfolge umkehren

Durchgänge:

Toleranz: 0.010 mm

Rampenwinkel verwenden: ☒

Winkel: 4.0 deg

Kompensationstyp: Im Computer

Mehrere Durchgänge: ☐

Schlichtdurchgänge: ☐

Durchgänge wiederhol...: ☐

Richtung: Gleichlauf

Ein-/Ausfahrten und Übergänge:

Schnellvorschub-Modus: Eilgangbewe...

Sicherheitsabstand: 2.00 mm

Horizontaler Ein-/Ausf...: 0.600 mm

Lineare Ein-/Ausfahr...: 0.300 mm

Vertikaler Ein-/Ausfahr...: 0.600 mm

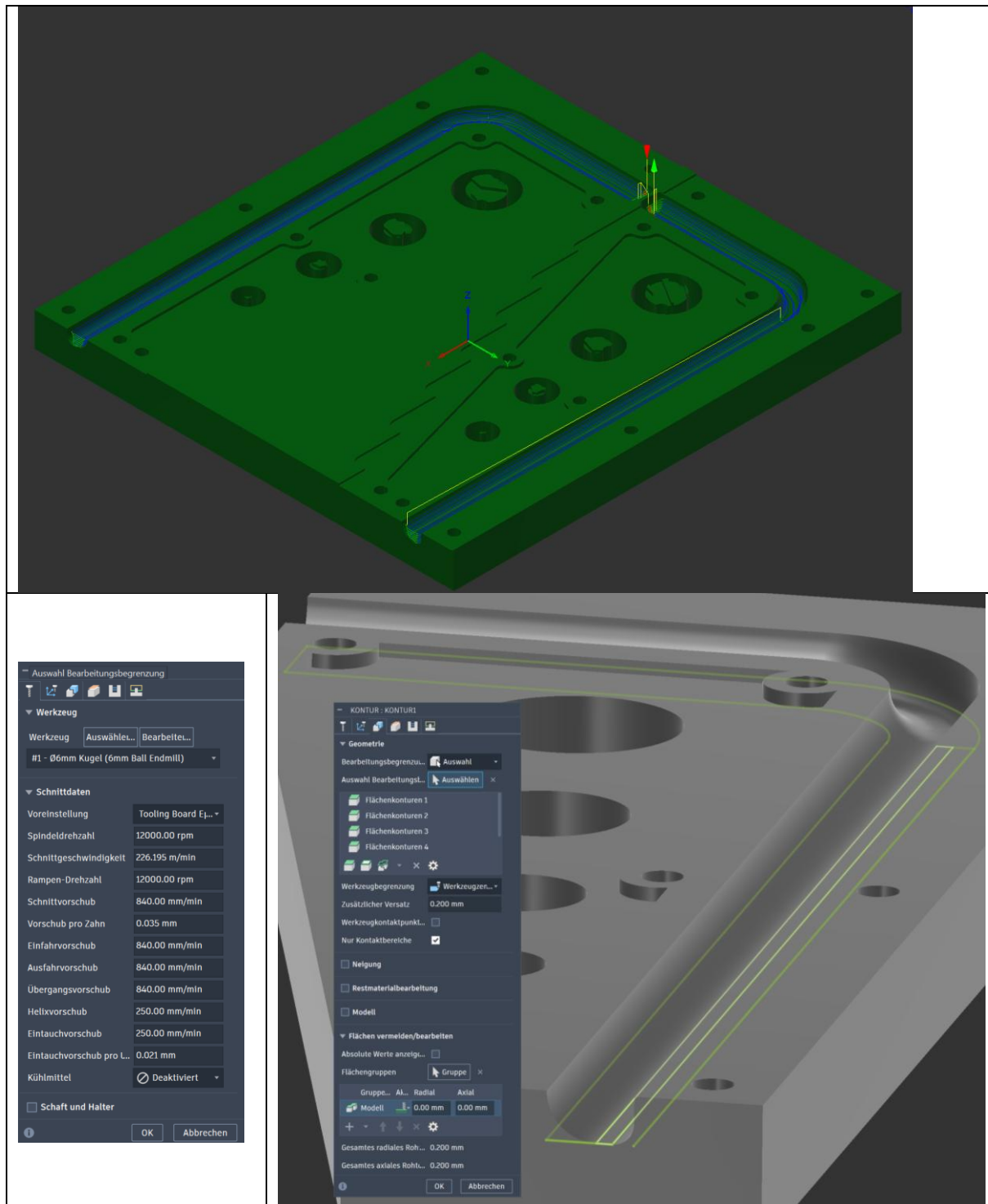
Ein-/Ausfahrt zur Mitte: ☐

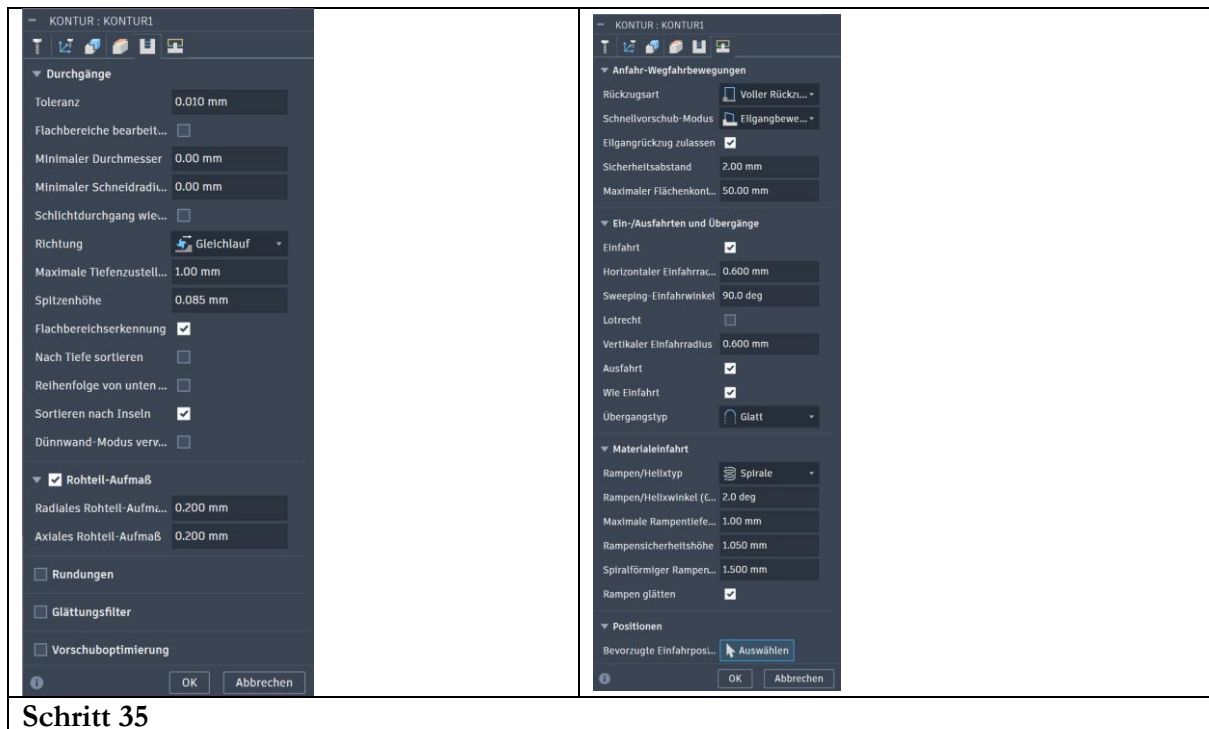
Schritt 34

Schritt 35

In diesem Schritt wird mit dem Kugelpkopffräser fortgefahren. Für das erste und grobe Fräsen des Kanals wird die 3D-Kontur-Funktion verwendet. Im Geometrie-Reiter muss jede Kanaloberfläche einzeln ausgewählt werden.

- Fräsen > 3D > Kontur> Werkzeug, 6mm Kugelpkopffräse
Für weitere Eingaben siehe die entsprechenden Abbildungen unten.



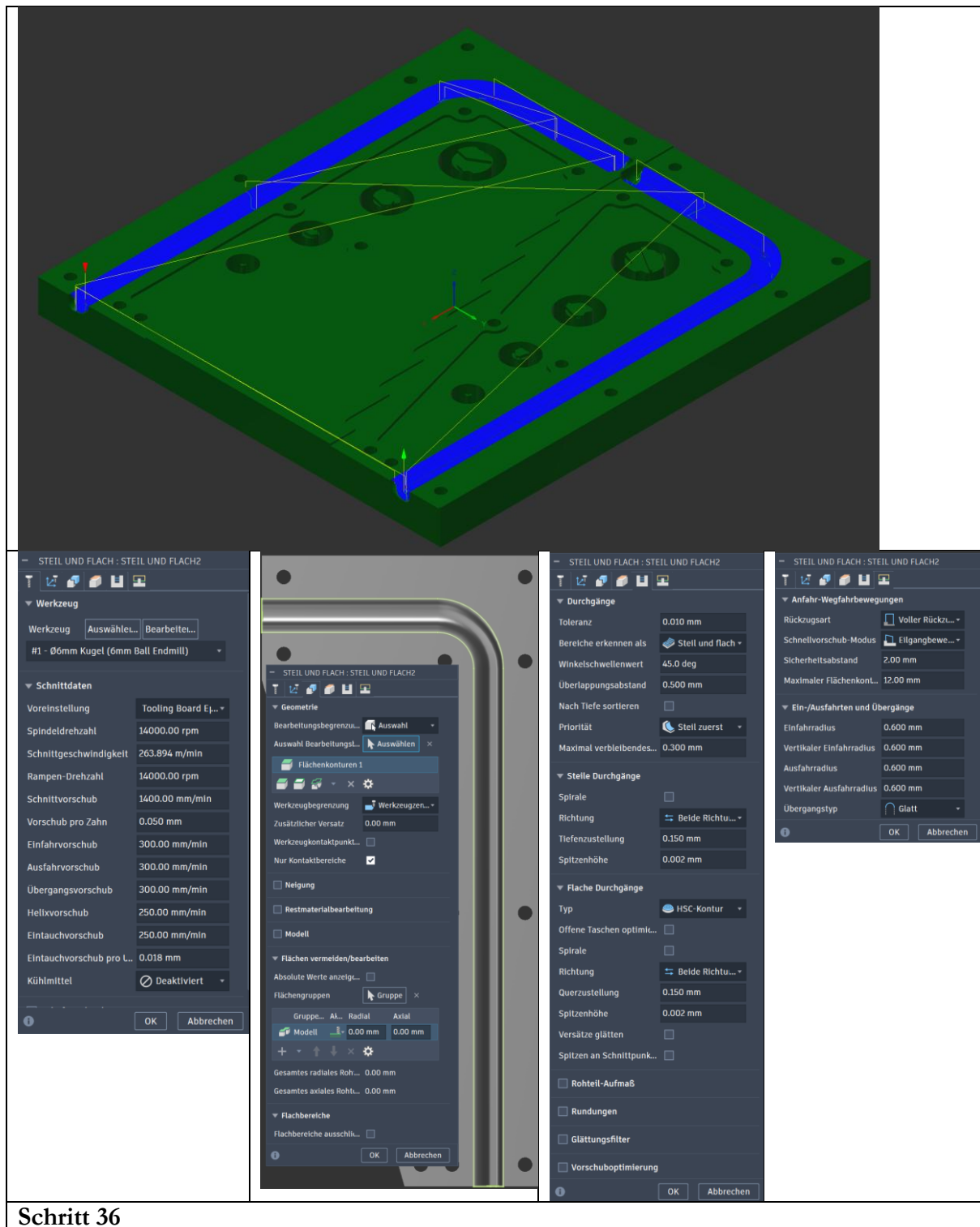


Schritt 35

Schritt 36

Mit der Funktion „Steil und Flach“ wird der Feinschnitt durchgeführt. Auch in diesem Schritt wird der Kugelpkopffräser verwendet. Der hier durchzuführende Prozess kann eigentlich auch durch die Duplikation und anschließende Wiederverwendung der 3D-Kontur-Operation erfolgen. Ein wichtiger Parameter hierbei ist die Spitzenhöhe oder die maximale Tiefenzustellung im Durchgänge-Reiter. Die Feinheit der Oberflächenqualität hängt direkt davon ab, wie klein die Spitzenhöhe gewählt wird.

- Fräsen > 3D > Kontur> Werkzeug, 6mm Kugelpkopffräse



Schritt 36

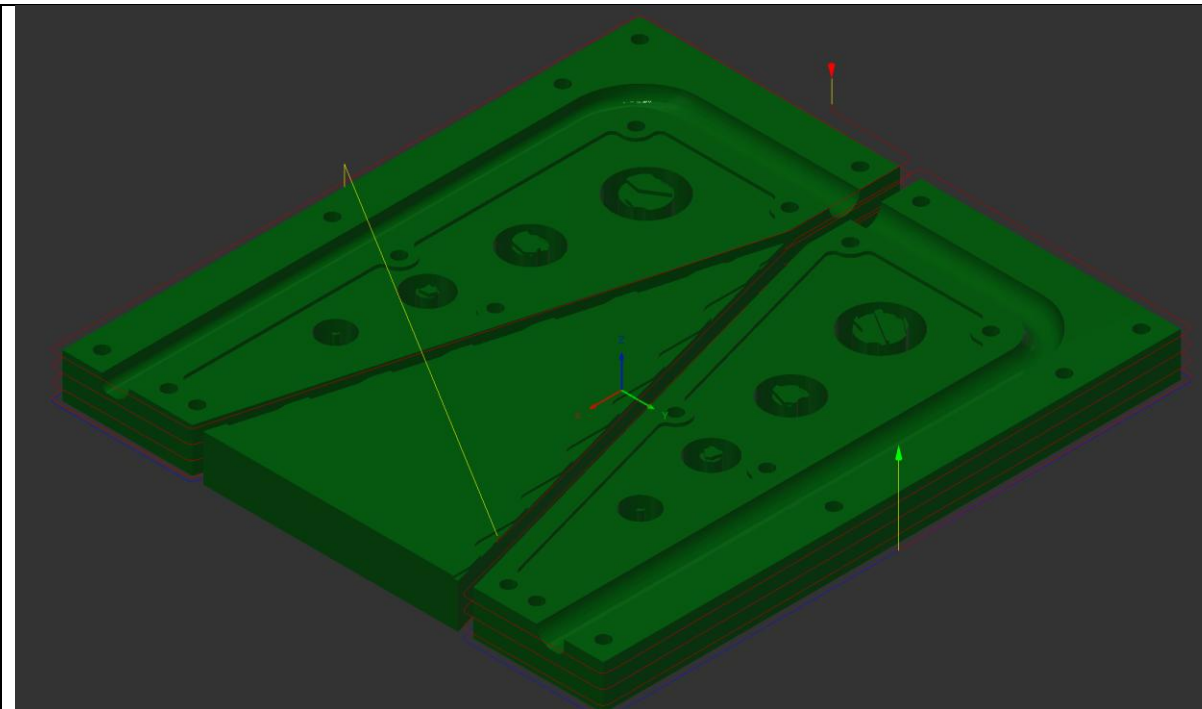
Schritt 37

Das Fräsen des Kanals ist vollständig abgeschlossen. In diesem Schritt werden die Außenkonturen der Formteile geschnitten. Der für diesen Schnitt bevorzugte Fräser ist ein Schrappfräser. Da die Teile durch doppelseitiges Klebeband fixiert sind, könnte die durch einen Standard-Helixwinkel und eine glatte Schneidkante erzeugte axiale Zugkraft (nach oben gerichtet) die Teile von den Klebeflächen ablösen. Aus diesem Grund wurde dieses Risiko durch den Einsatz eines

Schruppfräasers eliminiert. Bei Bedarf kann der Schnitt auch mit einem normalen Schaftfräser durchgeführt werden.

Anstatt schrittweise zu fräsen (Step-Down), wurde in diesem Schritt eine Helix-Schnittstrategie mit einem Winkel von $0,5^\circ$ gewählt. Das Ziel dieser Methode ist es, das Risiko des Ablösens des doppelseitigen Klebebandes durch plötzliche Stoßbelastungen zu minimieren, die axiale Belastung des Werkzeugs konstant zu halten und durch das Vermeiden von Ein- und Ausfahrspuren eine gleichmäßigere Oberflächenqualität zu erzielen.

- Fräsen > 3D > Kontur > Werkzeug, 6mm Schruppfräser



2D-KONTUR : 2D-KONTUR2

Werkzeug:

#2 - Ø6mm Schaftfräser (6mm Flat Endm...)

Schnittdaten

Voreinstellung: Tooling Board R...

Spindeldrehzahl: 12000.00 rpm

Schnittgeschwindigkeit: 226.195 m/min

Rampen-Drehzahl: 12000.00 rpm

Schnittvorschub: 800.00 mm/min

Vorschub pro Zahn: 0.033 mm

Einfahrsvorschub: 800.00 mm/min

Ausfahrsvorschub: 800.00 mm/min

Übergangsvorschub: 800.00 mm/min

Helixvorschub: 800.00 mm/min

Eintauchvorschub: 150.00 mm/min

Eintauchvorschub pro L...: 0.013 mm

Kühlmittel:

2D-KONTUR : 2D-KONTUR2

Geometrie

Konturauswahl:

Geschlossene Kette 1

Geschlossene Kette 2

☐ Haltestege

☐ Restmaterialbearbeitung

☐ Rohteilkonturen

2D-KONTUR : 2D-KONTUR2

Durchgänge

Toleranz: 0.010 mm

Seitliche Kompensation: ☒ Links

Kompensationstyp: ☒ Im Computer

Minimaler Schneidrad...: 0.00 mm

Glättungsabweichung L...: 0.00 mm

Mehrere Schlichtdurch...: ☐

Schlichtvorschub: 800.00 mm/min

Schlichtdurchgang wie...: ☐

Überlappung bei Schlic...: 0.00 mm

Endabstand Ein-/Ausfa...: 0.00 mm

Außenecken-Modus: ☒ Um Ecken rol...

Tangentieller Verlänger...: 0.00 mm

Reihenfolge beibehalten: ☐

Beide Richtungen: ☐

☐ Schruppdurchgänge

☐ Tiefschnitte

☐ Rohteil-Aufmaß

☐ Glättungsfilter

☐ Vorschuboptimierung

2D-KONTUR : 2D-KONTUR2

Anfahr-Wegfahrbewegungen

Schnellvorschub-Modus:

Eilgangrückzug zulassen: ☒

Sicherheitsabstand: 1.00 mm

Werkzeug unten halten: ☐

Abhebhöhe: 0.00 mm

Ein-/Ausfahrten und Übergänge

Einfahrt: ☐

Ausfahrt: ☐

☒ Materialeinfahrt

Rampen/Helixwinkel (...): 0.5 deg

Maximale Rampentiefe...: 20.00 mm

Rampensicherheitshöhe: 2.500 mm

Positionen

Vorb Bohrpositionen:

Bevorzugte Einfahrposi...:

Ausfahrpositionen:

Schritt 37

Erstellung des NC-Programms

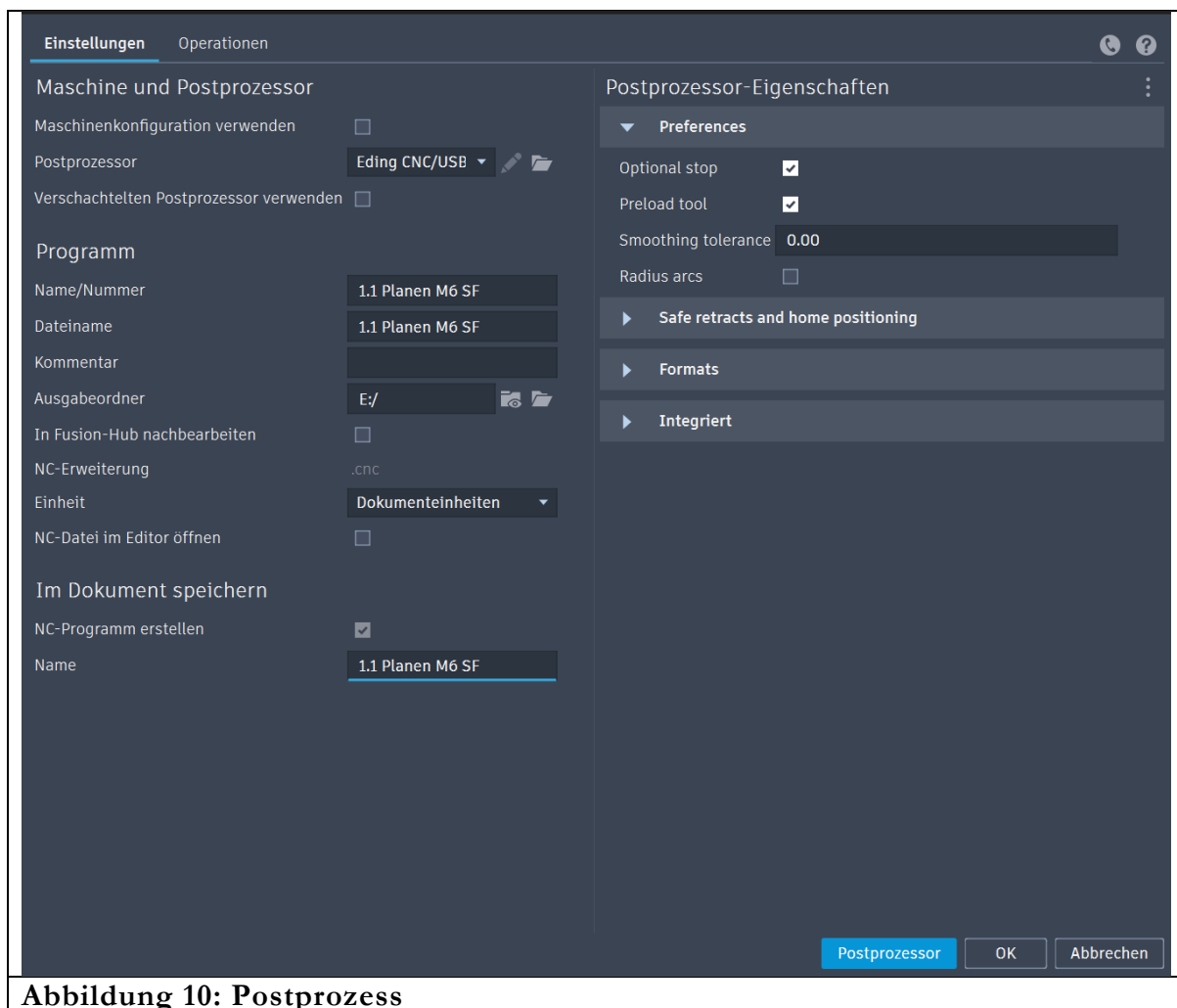
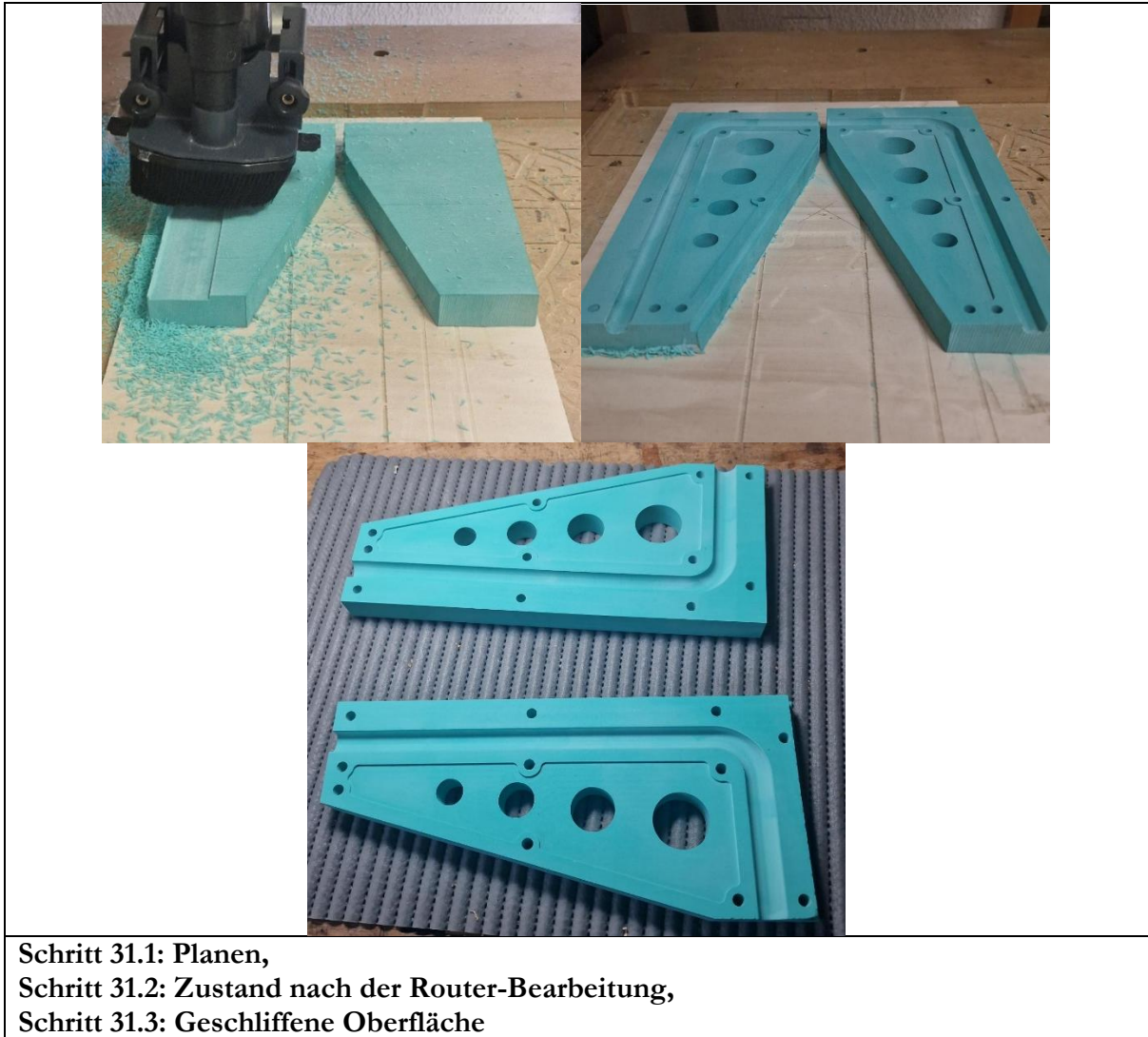


Abbildung 10: Postprozess

Die Hammer CNC-Maschine arbeitet mit der Eding CNC-Steuerung. Die Fräsprogramme können nach Bedarf entweder als ein einziges Programm oder separat geschrieben werden. In dieser Arbeit wird das separate Schreiben bevorzugt. In der obigen Abbildung zeigt das Programm Nummer 1.1 den Planen-Prozess mit einem 6 mm Schaftfräser.

Fräsen

Arbeitsschutz- und Prozesshinweise: Während der Bearbeitung von Blockmaterialien ist bei allen Fertigungsschritten, bei denen Staub oder Späne entstehen, sowie bei der anschließenden Reinigung eine Atemschutzmaske der Schutzklasse FFP3 oder einer vergleichbaren Spezifikation zwingend zu tragen. Zudem wird die Verwendung von Schutzhandschuhen und einer Schürze als persönliche Schutzausrüstung dringend empfohlen. Nach dem Fräsprozess des Bauteils wird ein Nassschleifverfahren nahegelegt, um die Oberflächenqualität zu optimieren und die Staubentwicklung zu minimieren.



Das Formmaterial mit den Abmessungen $500 \times 250 \times 50$ mm wurde zunächst auf einer Bandsäge grob entlang seiner Konturen zugeschnitten und anschließend in Längsrichtung mittig vertikal geteilt, um eine Bauteildicke von jeweils 23–25 mm zu erzielen. Unter den an der Hochschule verfügbaren CNC-Maschinen wurde die Maschine der Marke Hammer für den Einsatz ausgewählt. Der Hauptgrund für diese Entscheidung waren Maß- und Oberflächenfehler, die im Laufe des Jahres bei anderen auf der größeren schwarzen CNC-Maschine gefrästen Bauteilen auftraten. Um eine sichere Fixierung zu gewährleisten, wurde eine Multiplexplatte, deren Abmessungen größer als das Werkstück waren (ca. $250 \times 400 \times 12$ mm), auf dem CNC-Maschinentisch verschraubt. Anschließend wurde das Werkstück mithilfe eines hochfesten doppelseitigen Klebebands auf dieser Multiplex-Unterlage stoffschlüssig fixiert. Solange kein Werkzeugwechsel vorgenommen wurde, wurden die Koordinaten nicht geändert. Bei einem Werkzeugwechsel wurde lediglich die Z-Achse gereset.

Schleif- und Polierprozess der Formoberfläche.

Schritt 38

Prozess des Entgratens der Formoberfläche nach der CNC-Bearbeitung stellt sich wie folgt:

- Die Formtrennebenen wurden mit einer Flachfeile (Hieb 4) entgratet.
- Das Innere der Nut wurde nacheinander bearbeitet, bis eine vollkommen spiegelglatte Oberfläche erreicht wurde:
 - Schleifpapier der Körnung 600 ,
 - Schleifpapier der Körnung 1000,
 - Schleifpapier der Körnung 2000
 - Micromesh-Schleifpapier der Körnung 2400,
 - Micromesh-Schleifpapier der Körnung 3600,
 - Micromesh-Schleifpapier der Körnung 6000,
 - Micromesh-Schleifpapier der Körnung 8000,
 - VIK-COMPOSITE GmbH SK2TR000-3. Bis zur vollkommen glatten Versiegelung der Oberfläche wurden ungefähr 7 Schichten aufgetragen.
 - Semiperm® Monofilm: 5 Schichten / Mikon 2480 Trennmittel 5 Mal.
- Nach dem ersten Aushärtungsversuch traten im Formteil feine Risse auf, daher wurde der Schleifprozess erneut durchgeführt. Ich vermute, dass dies darauf zurückzuführen ist, dass eine größere Menge als die empfohlene Menge aufgetragen wurde. Anschließend wurde die Oberfläche erneut unklebrig gemacht.
 - VIK-COMPOSITE GmbH SK2TR000-3 1 Schicht, (siehe Abb. 12)
 - Semiperm® Monofilm 1 Schicht.

Wirksamkeitsprüfung von Versiegler ve Trennmittel im Vorversuch

Um die Funktionalität ve Hitzebeständigkeit von Versiegler und Trennmittel zu überprüfen, wurde ein Vorversuch mit einer CFK-Testprobe durchgeführt.

Um das Risiko des Anklebens an der Form zu minimieren, wurde auch die Außenfläche der Form mit Versiegler und Trennmittel behandelt. Auf die eine Seite der Form wurde Mikon 2480 und auf die andere Seite Semiperm® Monofilm aufgetragen. Danach wurden Epoxidharzfilm und trockenes 3K-Carbonegewebe darauf aufgebracht und die Form für den Härtingsprozess in den Ofen gegeben.



Abbildung 11: Testen der Oberflächenreinheit und der Antihafteffekt nach dem Auftragen von Versiegler und Trennmittel.



Abbildung 12: Mikrorisse

In der folgenden Tabelle sind die Werte des Härtingsprozesses aufgeführt.

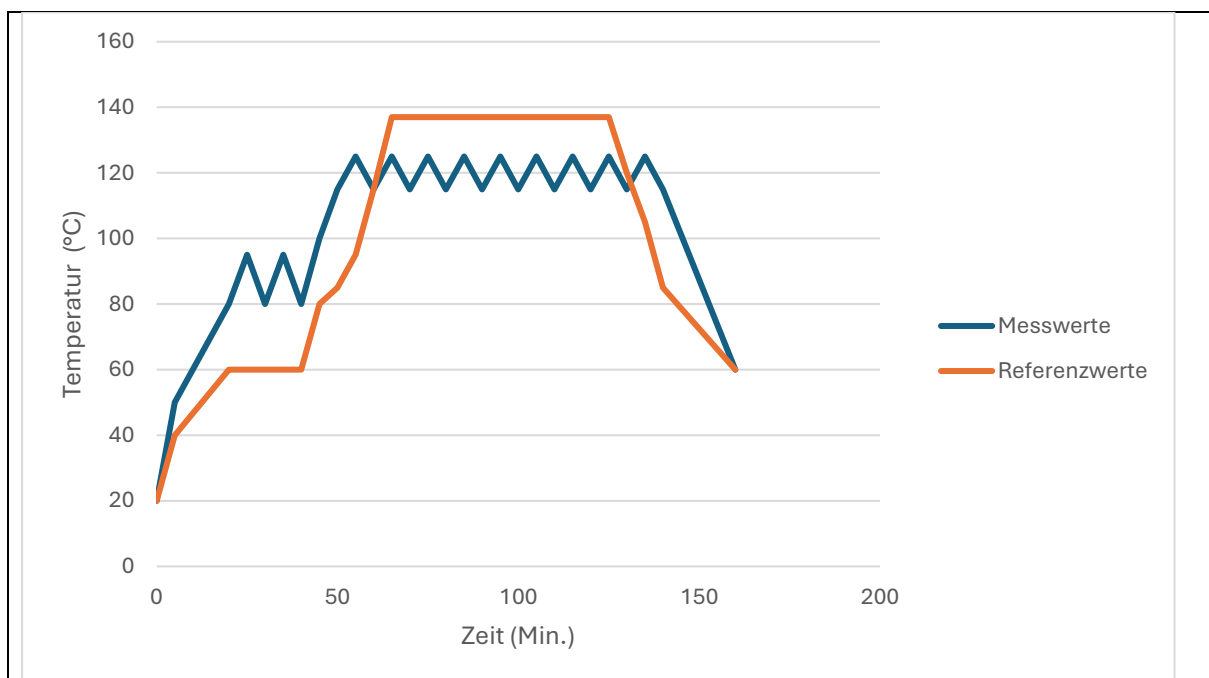


Abbildung 13: Temperaturverlauf bei der Wärmebehandlung einer CFK-Testprobe

Beide Testobjekte wurden erfolgreich und rückstandsfrei aus der Form entformt.

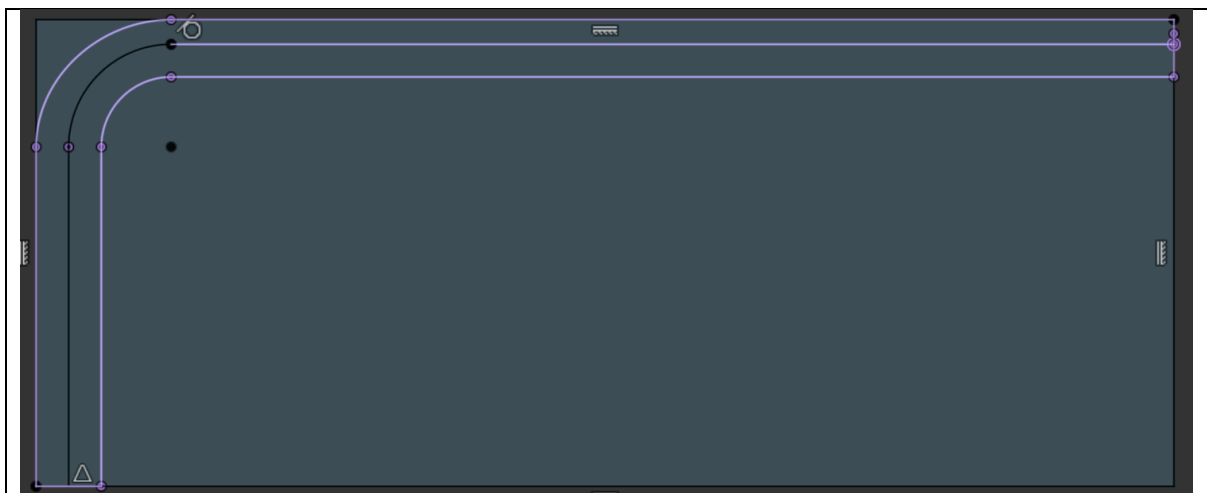
Ein Zweiter form zur Handlaminierung

Wichtiger Hinweis: Diese zweite Form wurde im Trial-and-Error-Verfahren für das Carbonfaser-Layup hergestellt. Die praktischen Erfahrungen im Einsatz haben gezeigt, dass diese Form ineffizient ist. Von einer zukünftigen Nutzung dieses Formenkonzepts wird daher abgeraten. Um Zeit zu sparen, kann ab diesem Abschnitt direkt mit der „Vorbereitung des Bauteils für den Aushärtungsprozess“ fortgefahren werden.

Schritt 39

Eine neue Konstruktion wird geöffnet. Aus der 1. Konstruktion wird nur das parametrisch modellierte Stab-Modell importiert. Anschließend wird eine Skizze auf der ZY-Ebene geöffnet. Die Fläche des Stabs, die diese Achse schneidet, wird als Schnittmenge herangezogen. Danach wird ein Rechteck gezeichnet, das dieses Bauteil umschließt und dessen Kanten und Ecken schneidet. In der Mitte des Griffteils, wo sich das O-Profil befindet, wird eine Linie gezeichnet. Die Linien, an denen der Halbkreis rechts und links vom D-Profil endet, werden projiziert. Anschließend werden diese beiden Linien mit einem tangentialen Bogen verbunden.

- Konstruktion > Einfügen > *Erste Zeichnung* > Ableiten, Körper: *Stab*
- Erstellen > Skizze erstellen > Ebene ZY
- Erstellen > Projizieren/Einschließen > Schnittmenge
- Erstellen > Rechteck mit zwei Punkten
- Abhängigkeiten > Horizontal/Vertikal, Koinzident
- Abhängigkeiten > Mittelpunkt
- Erstellen > Projizieren/Einschließen > Projizieren (Die Kante, an der der Halbkreis im D-Profil endet)
- Erstellen > Bogen > Tangentialbogen

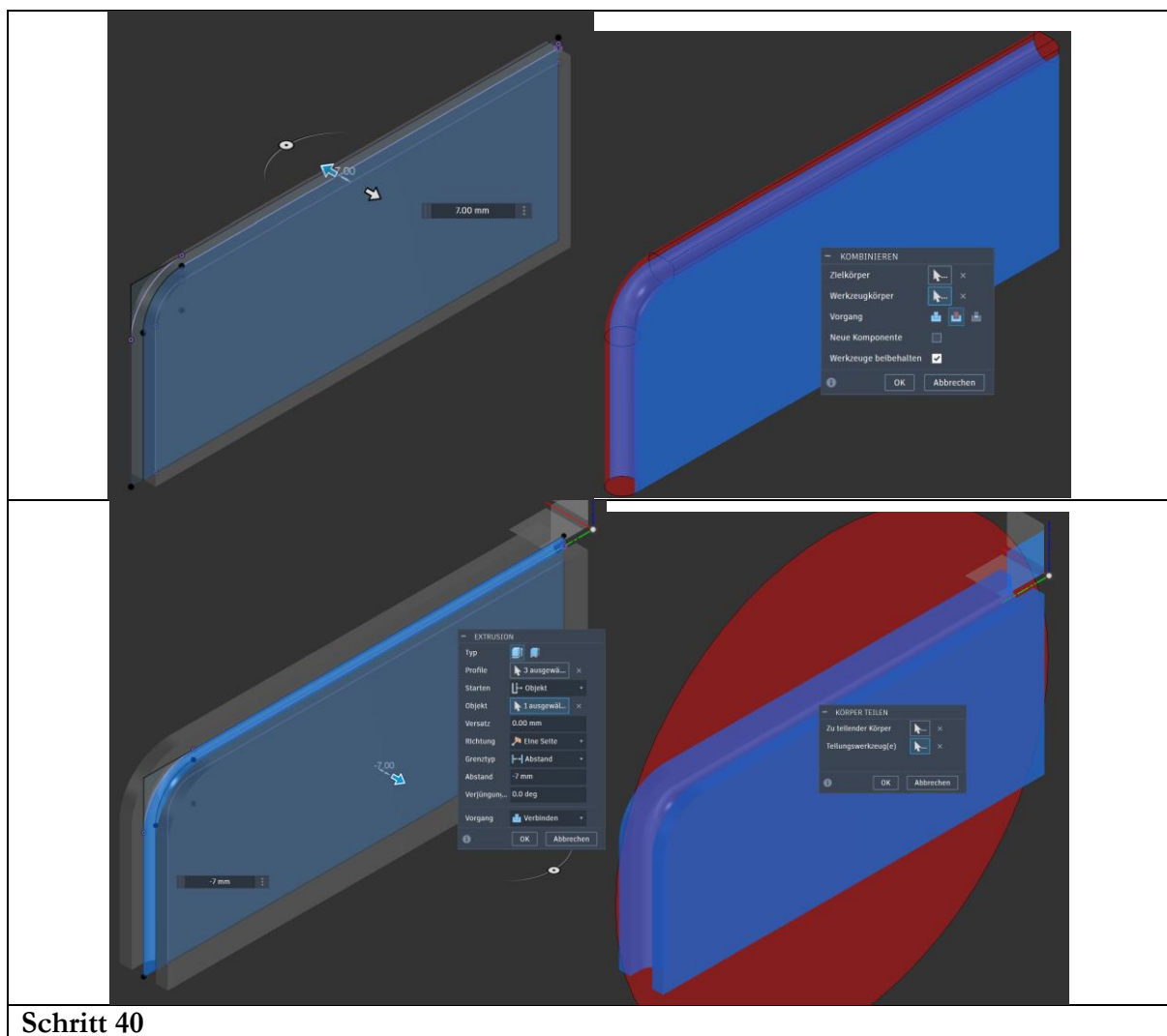


Schritt 39

Schritt 40

Das geschlossene Profil unterhalb der Mittellinie wird symmetrisch um den Gesamtdurchmesser extrudiert. Anschließend wird der Stab mittels Kombinieren (Ausschneiden) aus dem Formmodell herausgeschnitten, wobei das Kontrollkästchen "Werkzeug beibehalten" aktiviert ist. Danach werden die Stab-Konturlinien in der Skizze und der darunter liegende Teil ausgehend von den Außenflächen des Objekts um den halben Durchmesser extrudiert. Dies wird symmetrisch in die andere Richtung wiederholt. Die Form wird genau in der Mitte unter Verwendung der YZ-Ebene als Werkzeug über Körper teilen in zwei Hälften geschnitten. Dieses Trennen in zwei Hälften erfolgt ausschließlich, um die Bearbeitung auf der CNC zu erleichtern.

- Erstellen > Extrusion, Parameter: *Durchmesser / 2* (Symmetrisch)
- Ändern > Kombinieren
- Erstellen > Extrusion, Starten: *Objekt* (Rechte und Linke Seiten des Objekts), Parameter: *Durchmesser/2*
- Ändern > Körper Teilen, Werkzeugkörper: *YZ Ebene*

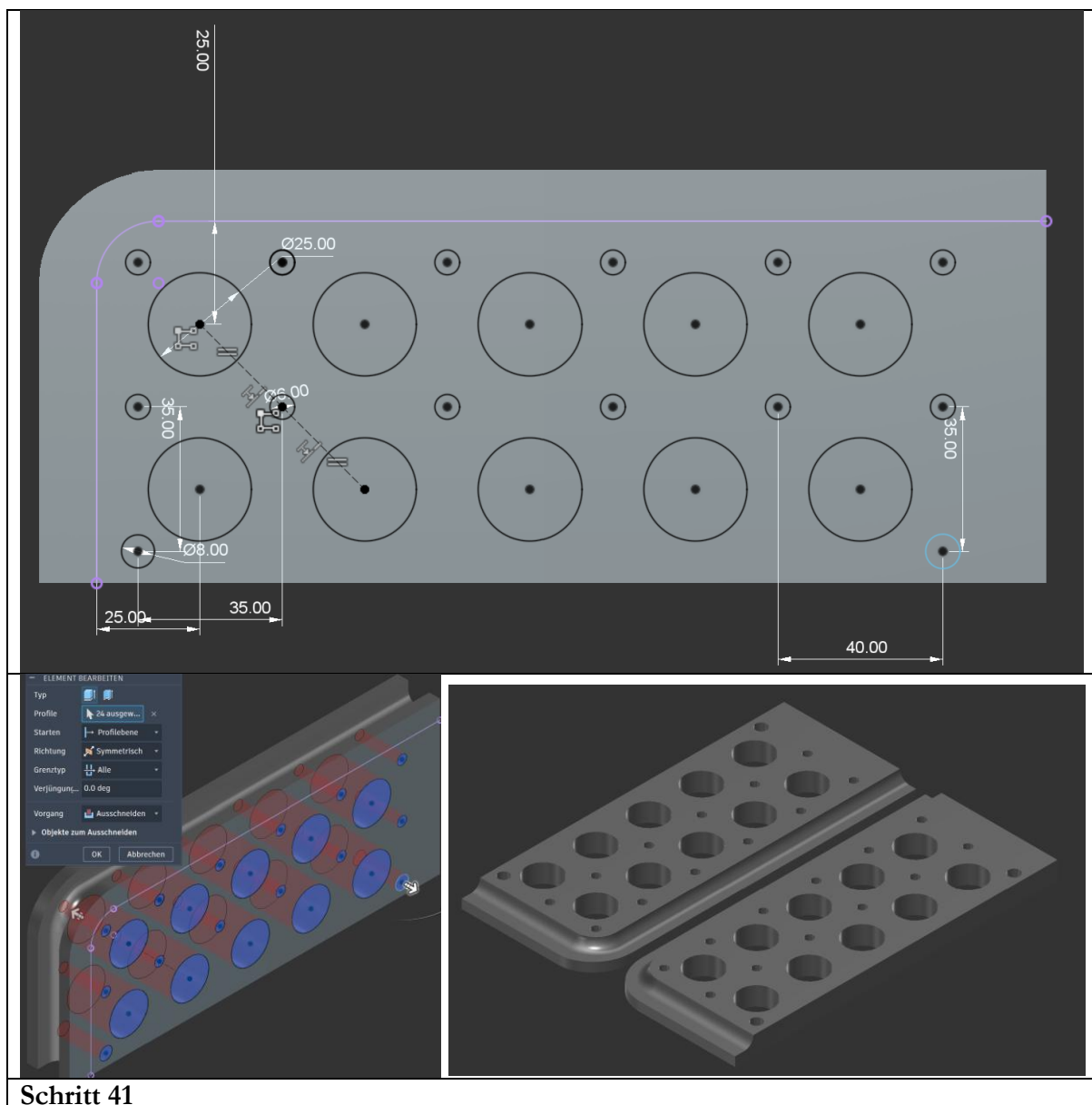


Schritt 40

Schritt 41

In diesem Schritt wird eine zweite Skizze geöffnet, indem die Außenfläche des Bauteils als Ebene genommen wird. Der tiefste Bereich der Formaussparung wird projiziert. Anschließend werden darin nach persönlicher Präferenz mehrere Kreise gezeichnet, um das Bauteil zu erleichtern. Diese Kreise werden durch Extrusion ausgeschnitten und entleert. Danach wird das Bauteil so aufgeklappt, dass die Innenflächen nach oben zeigen, um die einfache Bearbeitung im Fertigungsmodul zu ermöglichen.

- Skizze > Erstellen > Kreis
- Erstellen > Rechteckige Anordnung



Schritt 41

Fertigung zweiter Form

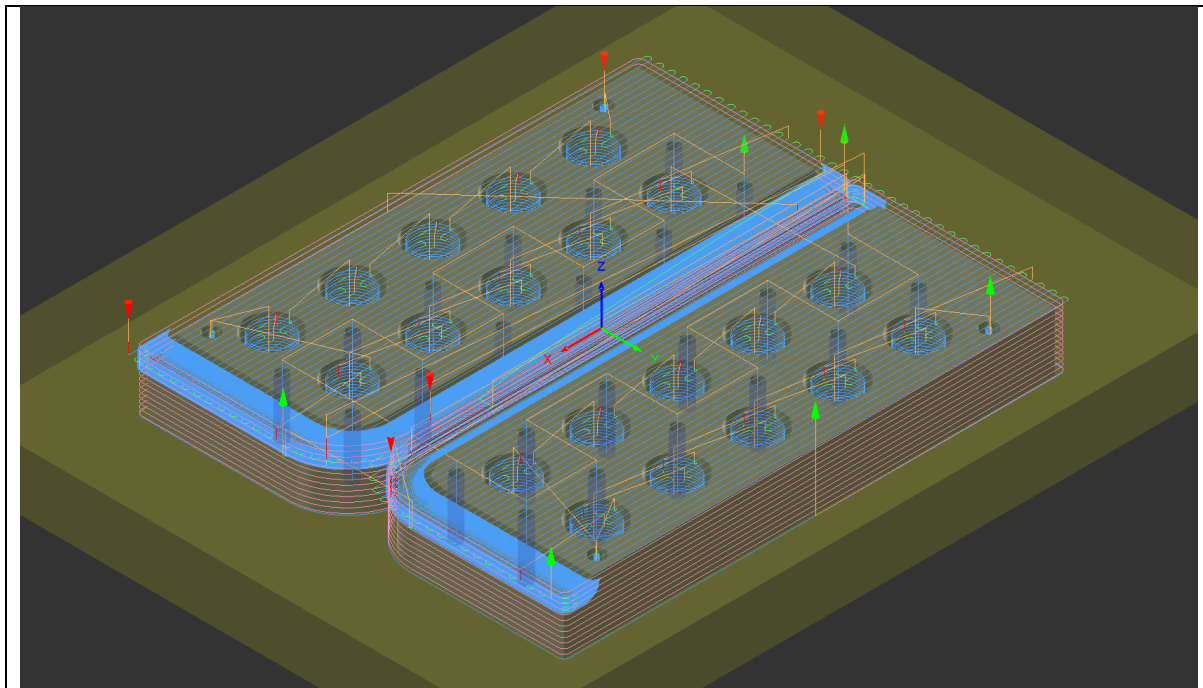
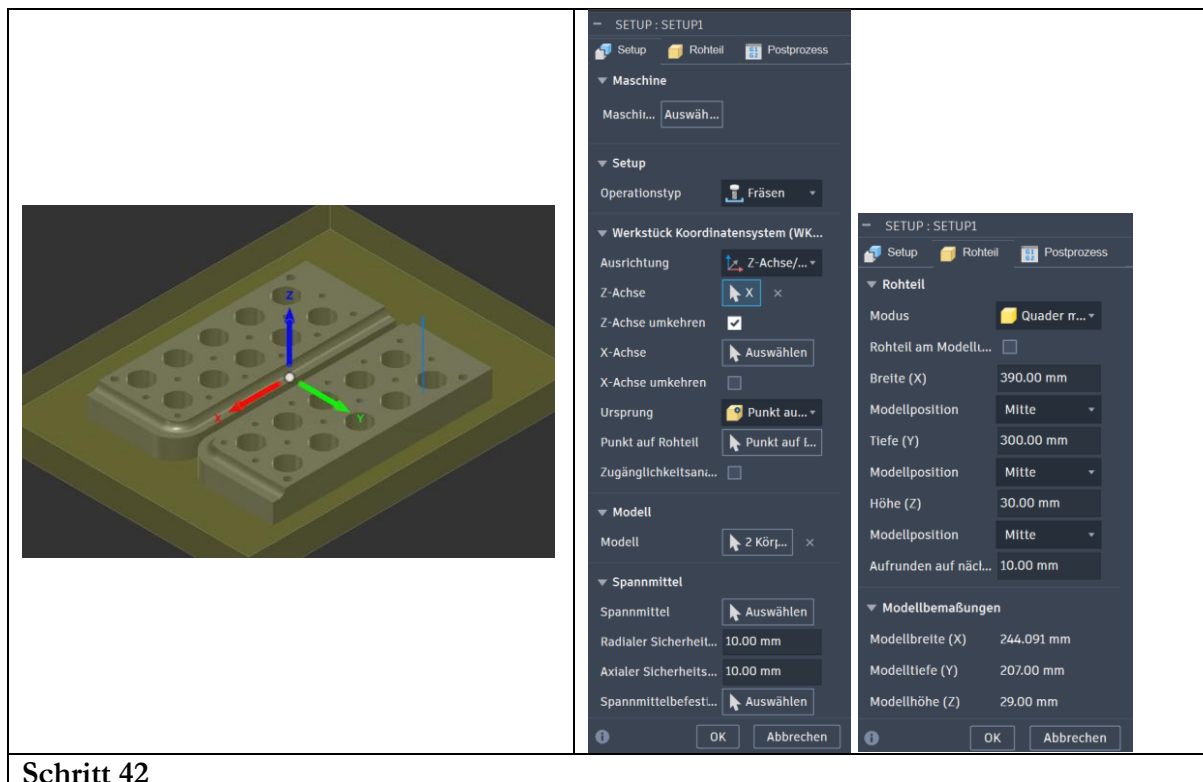


Abbildung 14: Werkzeugwege für den Formzusschnitt 2

Schritt 42

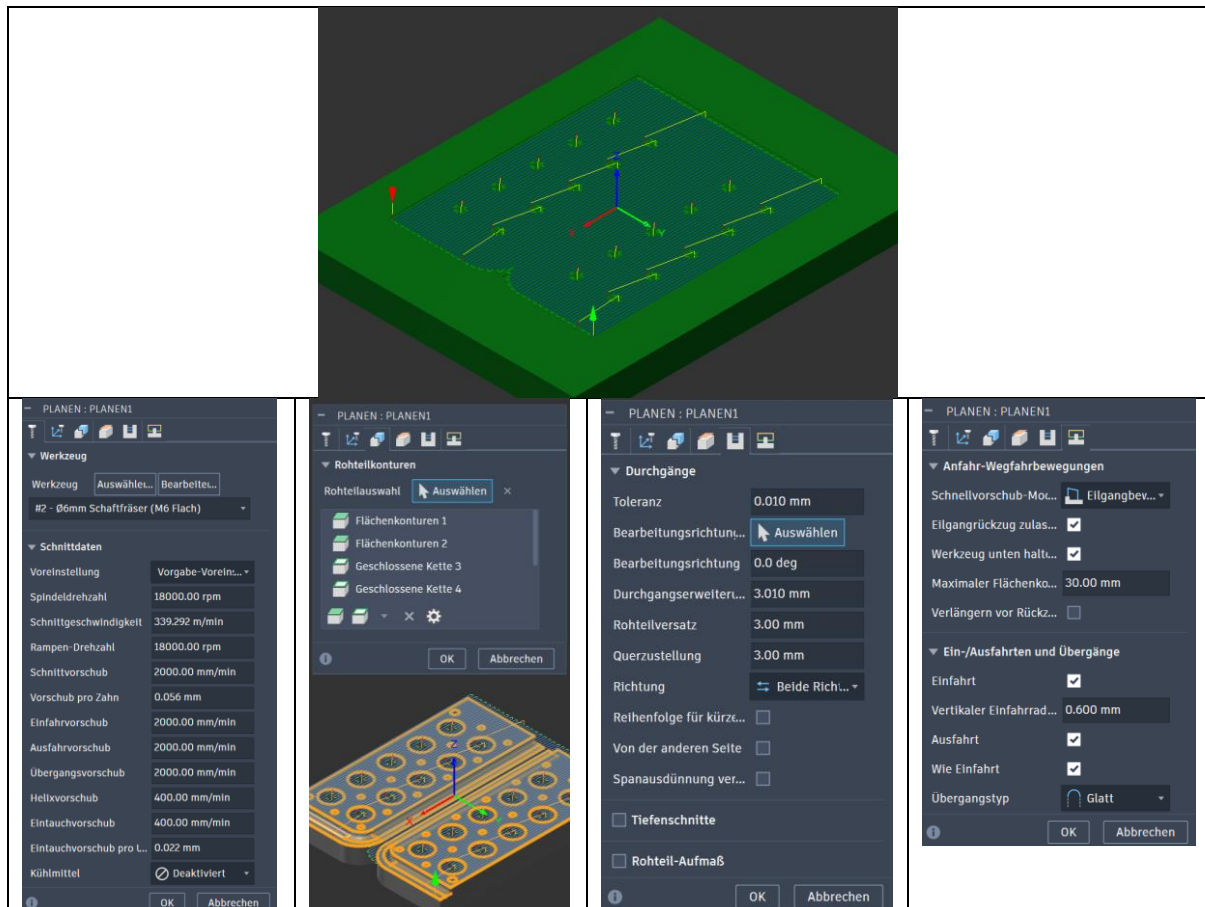
Das Setup für das Bauteil wurde auf Basis der Abmessungen des vorhandenen MDF-Blocks erstellt. Die Ausrichtung der Z-Achse wurde entsprechend angepasst.



Schritt 43

Das Setup für das Bauteil wurde im Fertigungsbereich erstellt. Dabei wurde der WCS-Ursprung auf den oberen Mittelpunkt des Modells festgelegt. Kritische Parameter und Schritte wie die Achsausrichtung wurden analog zum ersten Setup eingerichtet und übernommen. Die Rohteilabmessungen wurden auf die realen Maße des vorhandenen MDF-Blocks angepasst. Als erster Arbeitsschritt wurde eine Oberflächen-Operation durchgeführt, um die Oberfläche zu planen.

- Fräsen > 2D > Planen > Werkzeug, 6mm Schaftfräse

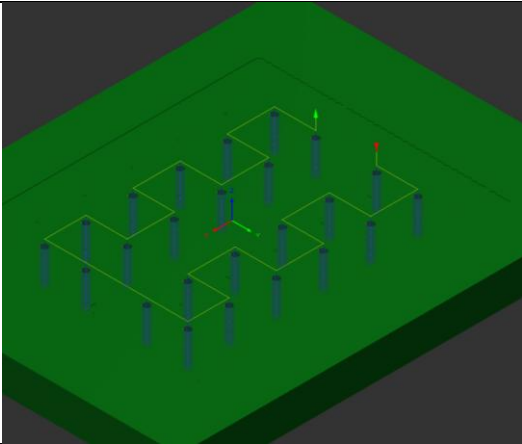


Schritt 43

Schritt 44

In diesem Arbeitsschritt wurden Bohrungen mit kleinem Durchmesser eingebracht.

- Fräsen > Bohren > Bohren > Werkzeug, 6mm Schaftfräse



BOHREN : BOHREN1

Werkzeug

Werkzeu... Auswäh... Bearbel...

#2 - Ø6mm Schaftfräser (M6 Flac...

Schnittdaten

Voreinstellung Vorgabe-Vo...

Spindeldrehzahl 18000.00 rpm

Schnittgeschwindi... 339.292 m/min

Eintauchvorschub 400.00 mm/min

Eintauchvorschub p... 0.022 mm

Kühlmittel Außenkü...

☐ Schneide, Schaft und Halter

OK Abbrechen

BOHREN : BOHREN1

Geometrie

Auswahlmodus ☒ Flächen

Bohrungsflächen ☒ Planen

Gleichen Durchmes... ☒

Nur gleiche Bohrer... ☐

Nur gleiche obere L... ☐

Auf Okklusionen pr... ☐

Werkzeugbegrenzu... ☒ Auswählen

Bohrungssegment... ☐

Nach Tiefe sortieren ☐

Sortieren ☒ Kleinsten...

Reihenfolge umke... ☐

☐ Modell

Flächen vermeiden/bearbeiten

Absolute Werte anz... ☐

Flächengruppen ☒ Gruppe

Grup... Al... Radial Axial

Mod... 0.00 mr 0.00 mr

Gesamtes radiales ... 0.00 mm

Gesamtes axiales F... 0.00 mm

OK Abbrechen

BOHREN : BOHREN1

Zyklus

Zyklusart Spanbruch ...

Einstechtiefe 5.00 mm

Reduzierung der Ei... 0.00 mm

Minimale Einstech... 5.00 mm

Aufaddierte Einstec... 5.00 mm

Spanbruchabstand 0.120 mm

Verweilzeit 0.00 s

OK Abbrechen

BOHREN : BOHREN1

Anfahr-Wegfahrbewegungen

Kollisionen ignorie... ☐

Rückzugsart ☒ Kollision...

Schnellvorschub-M... ☒ Eilgangb...

Sicherheitsabstand 2.00 mm

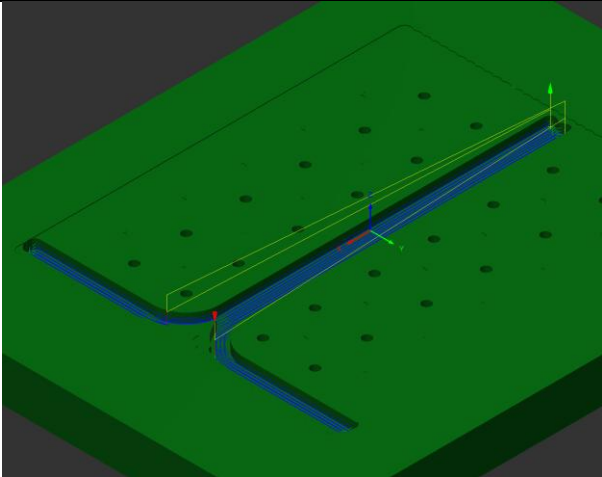
OK Abbrechen

Schritt 44

Schritt 45

In diesem Arbeitsschritt wird die Nut geschruppt. Der wichtigste Punkt hierbei ist, dass ein Aufmaß für die Schlichtbearbeitung definiert wurde. Dementsprechend wurde die Nut schmaler als der originale Stab gefräst. In dieser Operation wurden kreisförmige Flächen explizit von der Auswahl ausgeschlossen.

- Fräsen > 2D > 2D-Tasche > Werkzeug, 6mm Schaftfräse



2D-TASCHE : 2D-TASCHE1

Werkzeug

Werkzeug... Auswäh... Bearbet...

#2 - Ø6mm Schaftfräser (M6 Flac...)

Schnittdaten

Voreinstellung Vorgabe-Vol...

Spindeldrehzahl 18000.00 rpm

Schnittgeschwindi... 339.292 m/min

Rampen-Drehzahl 18000.00 rpm

Schnittvorschub 2000.00 mm/mir

Vorschub pro Zahn 0.056 mm

Einfahrsvorschub 2000.00 mm/mir

Ausfahrsvorschub 2000.00 mm/mir

Übergangsvorschub 2000.00 mm/mir

Helixvorschub 400.00 mm/min

Eintauchvorschub 400.00 mm/min

Eintauchvorschub j... 0.022 mm

Kühlmittel ☒ Deaktivik...

OK Abbrechen

2D-TASCHE : 2D-TASCHE1

Geometrie

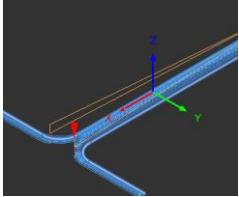
Taschenauswahl Auswäh...

Taschen 1

☐ Restmaterialbearbeitung

☐ Rohteilkonturen

OK Abbrechen



2D-TASCHE : 2D-TASCHE1

Durchgänge

Toleranz 0.100 mm

Seitliche Kompens... Links

Minimaler Schneid... 0.00 mm

Reihenfolge beibet... ☐

Beide Richtungen ☒

Maximale Querst... 2.00 mm

Morph-Spiralen-Be... ☒

Querststellungsspl... ☐

Glättungsabweich... 0.100 mm

Tiefenschnitte

Maximale Schrapp... 2.00 mm

Anzahl Schlichttief... 0

Schlicht-Tiefenzust... 0.200 mm

Wandkonik (Grad) 0.0 deg

Gleichmäßige Tiefe... ☒

Nach Tiefe sortieren ☐

Ebenenweise seitli... ☐

☐ Schlichtdurchgänge

Rohteil-Aufmaß

Radiales Rohteil-Au... 0.650 mm

Axiales Rohteil-Au... 0.650 mm

☐ Glättungsfilter

☐ Vorschuboptimierung

OK Abbrechen

2D-TASCHE : 2D-TASCHE1

Anfahr-Wegfahrbewegungen

Schnellvorschub M... Ellgangb...

Eilgangrückzug zul... ☒

Sicherheitsabstand 1.00 mm

Werkzeug unten ha... ☒

Maximaler Flächen... 50.00 mm

Abhebhöhe 0.00 mm

Ein-/Ausfahrten und Übergänge

Einfahrt ☒

Horizontaler Einfal... 0.600 mm

Sweeping-Einfahr... 90.0 deg

Linearer Einfahrabs... 0.600 mm

Lotrecht ☐

Vertikaler Einfahr... 0.600 mm

Ausfahrt ☒

Wie Einfahrt ☒

Materialeinfahrt

Rampen/Helixtyp Spirale

Rampen/Helixwink... 2.0 deg

Maximale Rampent... 2.00 mm

Rampensicherheits... 2.500 mm

Radialer Helix-Sich... 0.00 mm

Spiralförmiger Ram... 5.700 mm

Minimaler Rampen... 3.00 mm

Positionen

Vorbohrpositionen Auswählen

Bevorzugte Einfahr... Auswählen

Ausfahrpositionen Auswählen

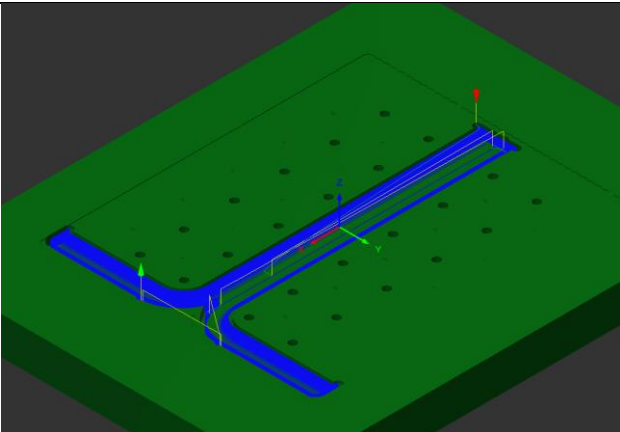
OK Abbrechen

Schritt 45

Schritt 46

In diesem Arbeitsschritt wurden die Nut sowie die radialen und planen Flächen des Modells auf Endmaß geschlichtet. Um einen Werkzeugwechsel zu vermeiden, wurde diese Operation mit einem Schaftfräser durchgeführt. Im Gegensatz zur ersten Form spielt eine Oberflächenqualität mit sehr engen Toleranzen bei dieser Umformform keine kritische Rolle. Der kritischste Parameter auch dieses Arbeitsschrittes ist das Aufmaß.

- Fräsen > 2D > 2D-Tasche > Werkzeug, 6mm Schaftfräse



KONTUR : KONTUR2 (2)

Werkzeug

Werkzeug... Auswäh... Bearbei...

#2 - Ø6mm Schaftfräser (M6 Flac...

Schnittdaten

Voreinstellung Vorgabe-Vo...

Spindeldrehzahl 18000.00 rpm

Schnittgeschwindi... 339.292 m/min

Rampen-Drehzahl 18000.00 rpm

Schnittvorschub 2000.00 mm/mir

Vorschub pro Zahn 0.056 mm

Einfahrsvorschub 2000.00 mm/mir

Ausfahrsvorschub 2000.00 mm/mir

Übergangsvorschub 2000.00 mm/mir

Helixvorschub 400.00 mm/min

Eintauchvorschub 400.00 mm/min

Eintauchvorschub j... 0.022 mm

Kühlmittel Deaktiv...

☐ Schaft und Halter

OK Abbrechen

KONTUR : KONTUR2 (2)

Geometrie

Bearbeitungsbegre... Auswahl

Auswahl Bearbeitu... Ausw...

Flächenkonturen 1

Flächenkonturen 2

Flächenkonturen 3

Flächenkonturen 4

Werkzeugbegrenzu... Werkzeug...

Zusätzlicher Versatz 0.650 mm

Werkzeugkontaktp... ☐

Nur Kontaktbereich... ☐

☐ Neigung

☐ Restmaterialbearbeitung

☐ Modell

Flächen vermeiden/bearbeiten

Absolute Werte anz... ☐

Flächengruppen Gruppe

Grup... Al... Radial Axial

Modi... 0.00 mr 0.00 mr

Gesamtes radiales ... 0.650 mm

Gesamtes axiales R... 0.650 mm

OK Abbrechen

KONTUR : KONTUR2 (2)

Durchgänge

Toleranz 0.010 mm

Flachbereiche bear... ☐

Minimaler Durchm... 0.00 mm

Minimaler Schneid... 0.00 mm

Schlichtdurchgang... ☐

Richtung Beide Ric...

Maximale Tiefenzu... 0.141 mm

Spitzenhöhe 0.100 mm

Flachbereichserker... ☒

Nach Tiefe sortieren ☐

Reihenfolge von ur... ☐

Sortieren nach Ins... ☒

Dünnwand-Modus ... ☐

☒ **Rohteil-Aufmaß**

Radiales Rohteil-Au... 0.650 mm

Axiales Rohteil-AuL... 0.650 mm

☐ Rundungen

☐ Glättungsfilter

☐ Vorschuboptimierung

OK Abbrechen

KONTUR : KONTUR2 (2)

Anfahr-Wegfahrbewegungen

Rückzugsart Voller Rü...

Schnellvorschub-M... Eilgangb...

Eilgangrückzug zul... ☒

Sicherheitsabstand 1.141 mm

Maximaler Flächen... 50.00 mm

Ein-/Ausfahrten und Übergänge

Einfahrt ☒

Horizontaler Einfal... 0.600 mm

Sweeping-Einfahr... 90.0 deg

Lotrecht ☒

Vertikaler Einfahr... 0.600 mm

Ausfahrt ☒

Wie Einfahrt ☒

Übergangstyp Gerade L...

Materialeinfahrt

Rampen/Helixyp Eintauch...

Rampensicherheits... 0.148 mm

Rampen glätten ☐

Positionen

Bevorzugte Einfahr... Auswählen

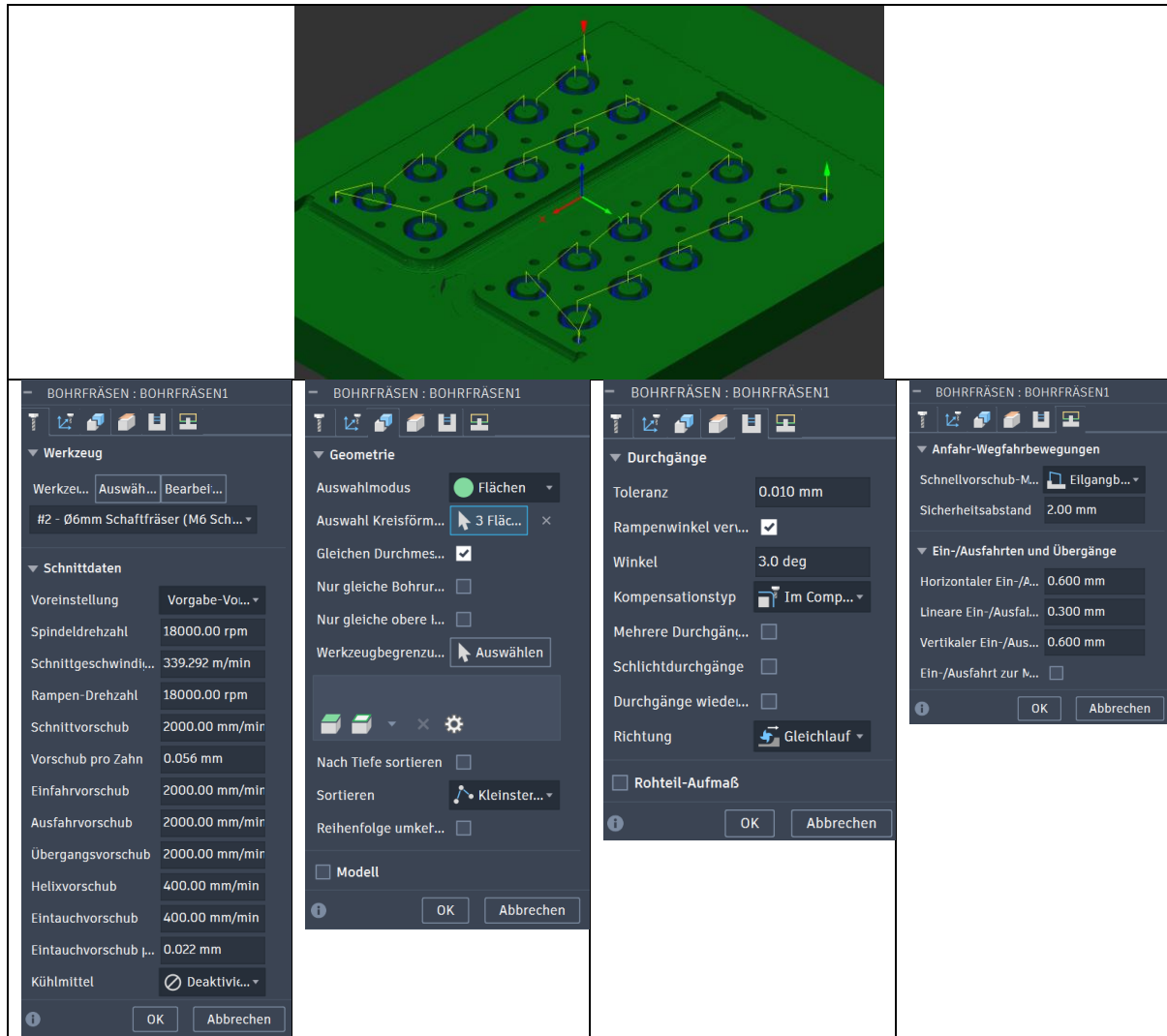
OK Abbrechen

Schritt 46

Schritt 47

Anschließend werden auch die großen Bohrungen des Modells eingebracht. Es erfolgt keine Sonderbearbeitung, da es kein Aufmaß belassen.

- Fräsen > 2D > Bohrfräsen > Werkzeug, 6mm Schaftfräse

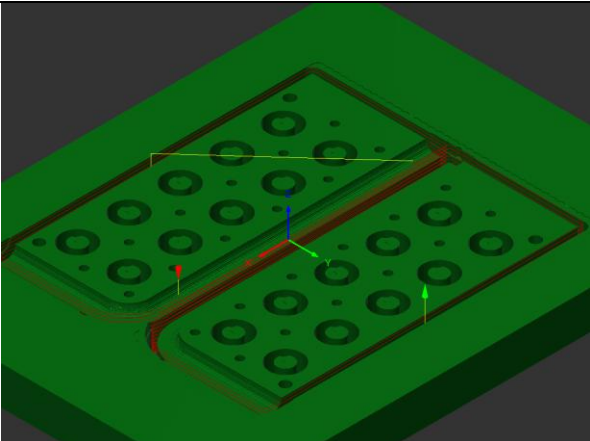


Schritt 47

Schritt 48

Die Außenkonturen des Modells werden mittels einer Helix-Eintauchbewegung gefräst, um das Bauteil aus dem Rohteil herauszutrennen. Hierbei wird ein Rampenwinkel von 0,5 Grad oder weniger dringend empfohlen. Mit diesem Arbeitsschritt ist die CAM-Programmierung für die zweite Form abgeschlossen. Das NC-Program wird erneut auf Basis der Vorgaben aus dem ersten Arbeitsgang erstellt, woraufhin der Zuschnitt erfolgt.

Fräsen > 2D > 2D-Kontur > Werkzeug, 6mm Schaftfräse



2D-KONTUR : 2D-KONTUR1

Werkzeug

Werkzeug... Auswäh... Bearbei...

#2 - Ø6mm Schaftfräse (M6 Sch...

Schnittdaten

Voreinstellung	Vorgabe-Voi...
Spindeldrehzahl	18000.00 rpm
Schnittgeschwindi...	339.292 m/min
Rampen-Drehzahl	18000.00 rpm
Schnittvorschub	2000.00 mm/mir
Vorschub pro Zahn	0.056 mm
Einfahrsvorschub	2000.00 mm/mir
Ausfahrsvorschub	2000.00 mm/mir
Übergangsvorschub	2000.00 mm/mir
Helixvorschub	400.00 mm/min
Eintauchvorschub	400.00 mm/min
Eintauchvorschub j...	0.022 mm
Kühlmittel	Außenkü...

OK Abbrechen

2D-KONTUR : 2D-KONTUR1

Geometrie

Konturauswahl Auswählen

Geschlossene Kette 1

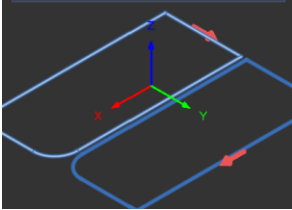
Geschlossene Kette 2

☐ Haltestege

☐ Restmaterialbearbeitung

☐ Rohteilkonturen

OK Abbrechen



2D-KONTUR : 2D-KONTUR1

Durchgänge

Toleranz 0.010 mm

Seitliche Kompens... Links

Kompensationstyp Im Comp...

Minimaler Schneld... 0.00 mm

Glättungsabweich... 0.00 mm

Mehrere Schlichtd... ☐

Schlichtvorschub 2000.00 mm/mir

Schlichtdurchgang... ☐

Überlappung bei St... 0.00 mm

Endabstand Ein-/Al... 0.00 mm

Außenecken-Modus Um Eckel...

Tangentieller Verlär... 0.00 mm

Reihenfolge beibef... ☐

Beide Richtungen ☐

☐ Schruppdurchgänge

☐ Tiefenschnitte

☒ Rohteil-Aufmaß

Radiales Rohteil-Al... 0.00 mm

Axiales Rohteil-Aul... 2.00 mm

☐ Glättungsfilter

☐ Vorschuboptimierung

OK Abbrechen

2D-KONTUR : 2D-KONTUR1

Anfahr-Wegfahrbewegungen

Schnellvorschub-M... Eilgangb...

Eilgangrückzug zul... ☒

Sicherheitsabstand 1.00 mm

Werkzeug unten ha... ☐

Abhebhöhe 0.00 mm

Ein-/Ausfahrten und Übergänge

Einfahrt ☐

Ausfahrt ☐

☒ **Materialeinfahrt**

Rampen/Helixwink... 0.2 deg

Maximale Rampent... 40.00 mm

Rampensicherheits... 2.500 mm

Positionen

Vorbohrpositionen Auswählen

Bevorzugte Einfahr... Auswählen

Ausfahrpositionen Auswählen

OK Abbrechen

Schritt 48

4. Laminationsstrategie und Materialeinsatz

Strategie

Um das Bauteil unter Werkstattbedingungen und mit den verfügbaren Fertigungswerkzeugen mit der höchstmöglichen Steifigkeit und Bauteilqualität herzustellen, wurde folgende Fertigungsstrategie gewählt. Das Bauteil wird nicht als Vollmaterial, sondern mit einem im Inneren platzierten Silikonschlauch-Mandrel gefertigt. Durch das Einblasen von Luft in das Mandrel wird ein Druck von den inneren Schichten nach außen ausgeübt. Bei diesem Prozess wird das Bauteil theoretisch etwas an Steifigkeit verlieren. Ein Vollzylinder gleicher Durchmesser ist steifer als ein Hohlrohr. Im Folgenden werden anhand der entsprechenden mechanischen Formeln die Biegesteifigkeit sowie das Verhältnis von Materialvolumen bzw. Gewicht für den Fall eines ausgehöhlten Zylinders berechnet.¹⁶

$I_{\text{Voll}} = \frac{\pi \cdot D^4}{64}$ $I_{\text{Hohl}} = \frac{\pi \cdot (D_a^4 - D_i^4)}{64}$
D _a : Außendurchmesser D _i : Innendurchmesser I: Flächenträgheitsmoment

Querschnittform	Flächenträgheitsmoment (I in mm ⁴)	Relative Biegesteifigkeit (Verlust (-) Gewinn (+))	Materialvolumen / Gewicht (Ersparnis (-) / Mehrgewicht (+))
M6 Vollmaterial	63,62	3,4% (-96,6%)	18,4% (-81,6%)
M6 ID2	62,83	3,3% (-96,7%)	16,3% (-83,7%)
M6 ID3	59,64	3,2% (-96,8%)	13,8% (-86,2%)
M6 ID4	51,05	2,7% (-97,3%)	10,2% (-89,8%)
M10 Vollmaterial	490,87	26,0% (-74,0%)	51,0% (-49,0%)
M10 ID4	478,31	25,4% (-74,6%)	42,9% (-57,1%)
M10 ID6	427,26	22,7% (-77,3%)	32,7% (-67,3%)
M10 ID8	289,81	15,4% (-84,6%)	18,4% (-81,6%)
M14 Vollmaterial	1885,74	Referenzwert (100 %)	Referenzwert (100 %)

¹⁶ Vgl. Callister/Rethwisch 2020, S. 624, Gleichung 16.22.

M14 ID6	1822,12	96,6% (-3,4%)	81,6% (-18,4%)
M14 ID8	1684,69	89,3% (-10,7%)	67,3% (-32,7%)
M14 ID10	1394,87	74,0% (-26,0%)	49,0% (-51,0%)
M18 Vollmaterial	5153	273,3% (+173,3%)	165,3% (+65,3%)
M18 ID12	4134,26	219,2% (+119,2%)	102,0% (+2,0%)
M18 ID14	3266,41	173,2% (+73,2%)	81,6% (-18,4%)
M18 ID16	1927,33	102,2% (+2,2%)	55,1% (-44,9%)

Laut der obigen Tabelle führt die Verwendung eines Dorns mit einem Außendurchmesser von 8 mm bei einem geraden Rohr zu einem relativen Biegesteifigkeitsverlust von etwa 10%. Wenn man berücksichtigt, dass an der Innenkante der L-Form die höchste Spannungskonzentration auftritt, könnte der Verlust noch höher sein. Daher handelt es sich hierbei um einen Kompromiss: Diese Entscheidung wurde im Zuge der Optimierung getroffen, um das mit einer Außenform hergestellte Rohr formal korrekt, präzise und exakt zu produzieren. Bei der Auswahl der Silikonschlauchdicke und der Verbindungselemente wurde Teilen der Vorzug gegeben, die leicht auf dem Markt erworben werden können und eine praktische Verfügbarkeit aufweisen. Die ausgewählten Teile sind in Anhang A detailliert aufgeführt.

Laut Herstellerangaben ist die verwendete UD-Kohlefaser mit 39 % Epoxidharz imprägniert.¹⁷ Dieses UD-Produkt wird nicht noch einmal extra mit Epoxidharz verstärkt. Denn an der Außen- und Innenschicht wurde ein Schlauch verwendet. Da der Schlauch nicht als Prepreg geliefert wird, muss dieses trockene Gewebe zusätzlich mit Epoxidharz imprägniert werden. Der Tenex 200 Tex 3k Schlauch mit einem Durchmesser von 14 mm ist mit einer Masse von 16 g/m angegeben.¹⁸ Die Masse des Epoxidfilms ist mit 147 g/m² angegeben.¹⁹ Wenn der trockene Kohlefaserschlauch in der innersten und äußersten Schicht zu 40 Gew.-% mit Epoxidharz imprägniert werden soll, müssen für jede 1 Einheit CF 1,4 Einheiten Epoxidfilm verwendet werden. Die entsprechende Berechnung befindet sich unten.

Die Oberflächenfläche eines 1 m langen Schlauchs mit 14 mm Durchmesser:

$$A = \pi \cdot d \cdot L$$

$$A \approx 3.1416 \cdot 0.014 \cdot 1 \approx 0.0439 \text{ m}^2$$

Das Gewicht eines 1 m langen Gewebes mit 14 mm Durchmesser ist mit 13,6 g angegeben. Das Flächengewicht:

¹⁷R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH: R&G SIGRAPREG® UD-Kohlegelege-Prepreg U230, online im Internet unter: <https://www.r-g.de/art/192230060-SUD> (abgerufen am 25.06.2026).

¹⁸R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH: Kohlefaserschlauch ø 18mm, online im Internet unter: <https://www.r-g.de/art/202100> (abgerufen am 25.06.2026).

¹⁹R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH: Kohlefaserschlauch ø 18mm, online im Internet unter: <https://www.r-g.de/art/202100> (abgerufen am 25.06.2026).

$$AW = \frac{13.6}{0.042} 0.04413.6 \approx 309 \text{ g/m}^2$$

Für CFK mit einem Epoxidharzanteil von 40 %:

$$\frac{40}{60} \approx 0.667$$

$$W_{\text{Epoxid}} = 0.667 \times 309 \approx 206 \text{ g}$$

Der Epoxidfilm beträgt 176 g/m². Die erforderliche Fläche für einen Epoxidfilm mit einer Masse von 206 g:

$$A_{\text{Epoxidfilm}} = \frac{206}{147} \approx 1.40 \text{ m}^2$$

Zusammenfassend müssen für die Imprägnierung von 309 g/m² Kohlefaser mit 40 % Harz pro 1 m² jeweils 1,4 m² Epoxidfilm aufgetragen werden. Wenn der Schlauch mit diesem sehr klebrigen Epoxidfilm in Kontakt kommt, bleibt er kleben und lässt sich nicht mehr ziehen oder formen. Um die Anwendung zu praktizieren, wurde daher festgestellt, dass die Platzierung unter der letzten UD-Schicht die machbarste Methode ist. Für den inneren Schlauch mit 8 mm Durchmesser wurde ein 35 mm breiter Streifen Epoxidfilm auf die UD-Schicht aufgebracht, und für den 14 mm großen Schlauch auf der äußersten Schicht wurde ein 61 mm breiter Streifen verwendet.

$$A_{\text{Epoxidfilm}} = 1.4 \cdot \pi \cdot d$$

Wickelmethode

Zwei Stahlrohre mit einem Außendurchmesser von 6 mm wurden geölt und in einen ID6/OD 8 mm Silikonschlauch mit einer Mindestlänge von 350 mm geschoben. Anschließend wurde Trennmittel auf den Silikonschlauch aufgetragen. Nach dem Trocknen des Trennmittels wurde der CF-Schlauch über den Silikonschlauch gezogen und durch Spannen gestrafft. Danach wurde ein Epoxidfilm aufgeklebt, der etwa das 1,5-fache des Außenumfangs abdeckt. Anschließend wurde ein ca. 310 mm breites UD-Prepreg-Stück, was etwa 9 Lagen entspricht, fest darum gewickelt. Für Probe 1 wurde der Epoxidfilm spiralförmig auf die Rolle gewickelt. Danach wurde diese Methode eingestellt, und 5 cm vor dem Ende der Rolle wurde ein 5 cm langer Epoxidfilm auf das UD-Prepreg geklebt und die Rolle vollständig um das Bauteil gewickelt. Anschließend wurde das Bauteil in einen Beutel gelegt und für 10-20 Minuten im Gefrierfach gelagert; über das gefrorene und bei dieser Temperatur nicht mehr klebrige Rohr wurde eine letzte Schicht Schlauch gezogen. Danach wurden die Stahlrohre herausgezogen und aus dem Bauteil entfernt. Anschließend wurde das Bauteil von Hand gebogen, und die im Bauteil entstandenen Falten

wurden durch Andrücken so weit wie möglich geglättet. Das Bauteil wurde in die mit Trennmittel beschichtete Form eingelegt. Probe 1 und Probe 6 wurden nach der oben genannten Methode hergestellt.

Bei Probe 2 wurde kein äußerer Schlauch umgewickelt, und das Knitter- und Faltverhalten der UD-Fasern nach dem Biegen wurde beobachtet. Dieses Knitterverhalten rührt von dem in den Prepregs enthaltenen klebrigen Epoxidharz her und konnte während des Prozesses nicht korrigiert werden. Es wird erwartet, dass diese Fasern mit Falten und Knitterstellen einen großen Teil ihrer Stiffness verlieren. Unten zeigt Abbildung 15 Darstellungen des Prozesses.

		Stahlrohr, Silikon-Mandrel und die erste Lage des ca. 8 mm großen Schlauchs
		UD-Wicklung
		Spiralförmige Epoxidfilmwicklung auf der Rolle und Messung 13,5 mm. Nach dem ersten Mal wurde auf die spiralförmige Wicklung verzichtet und der Epoxidfilm auf die letzten Zentimeter der Rolle geklebt.
		Das Bauteil nach dem Einfrieren, nachdem der letzte Schlauch darübergezogen, von Hand gebogen und in die Form eingelegt wurde.
Abbildung 15: Wickelmethode		

Handlaminieren

Für das Handlaminieren wurde eine zweite Form hergestellt. Die Beschreibung zur Konstruktion der zweiten Form befindet sich zwischen Schritt 39 und Schritt 48. Diese Form wurde nur als Hilfe für die Kohlefaser entworfen, die im Handauflegeverfahren geformt wird. Sie wird in der Aushärtungsphase nicht verwendet. Die zweite Form wurde etwa -0,6 mm schmaler als das symmetrisch herzustellende Bauteil gefertigt. Auf diese Weise wurde es so konzipiert, dass es einen Gesamtdurchmesser von 14 mm aufweist, wenn der Schlauch über die handlaminieren Fasern gezogen wird. In der Breite von 5 bis 20 mm variierende UD-Prepreg-Streifen wurden zugeschnitten und unter Spannung in diese Form eingelegt. Auf die Unterseite der Form wurden 8-10 Lagen aufgebracht. Anschließend wurden Stahlrohre, ein Silikonschlauch und ein Schlauch mit 8 mm Durchmesser vorbereitet, mit Epoxidfilm umwickelt, auf diese Lagen gelegt und an den rechten, linken und dann oberen Abschnitten erneut unter Spannung ein UD-CF-Handlaminat durchgeführt. Im Allgemeinen wurde zwischen der äußersten 1. und 2. Lage mit Epoxidfilmstreifen bis zu einer Gesamtbreite von 40 mm verstärkt. Verdrehungen und Crimping wurden erneut beobachtet, wenn auch nicht so stark wie bei der Wickelmethode. Anschließend wurde dieses Bauteil für 10-20 Minuten im Gefrierfach gelagert, woraufhin der Schlauch darübergezogen wurde.



Vorbereitung des Bauteils für den Aushärtungsprozess

Nachdem das Bauteil in die Form eingelegt worden war, wurde die Form mithilfe von Schrauben handfest verschlossen. Anschließend wurden die Silikonschlauchenden mit der an das Fahrradventil angeschlossenen Schlauchleitung verbunden. Der perforierte mittlere Teil der Form wurde mit einem 2 mm dicken Ahornfurnier überbrückt, um zu verhindern, dass die Vakuumfolie in die Löcher gezogen wird und reißt, und anschließend mit zwei Lagen Saugvlies umwickelt. In diesem Zustand wurde das Bauteil in eine Schlauchfolie eingelegt, woraufhin das Vakuumventil

durch Durchstechen der Folie festgeschraubt wurde. Die Vakuumfolie wurde mit Dichtband luftdicht verschlossen. Anschließend wurde das System unter Vakuum gesetzt und abgewartet, bis die Dichtigkeit gewährleistet war. Der Zustand des Bauteils vor dem Einbringen in den Ofen ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Nach dem Platzieren im Ofen, dessen Innenraum mit Aluminiumfolien und Keramikfliesen ausgekleidet war, wurde die Vakuumpumpe wieder angeschlossen und der Aushärtungsprozess durchgeführt.



Abbildung 17: Verschraubte und mit Ahornfurnier überbrückte Formenstruktur.

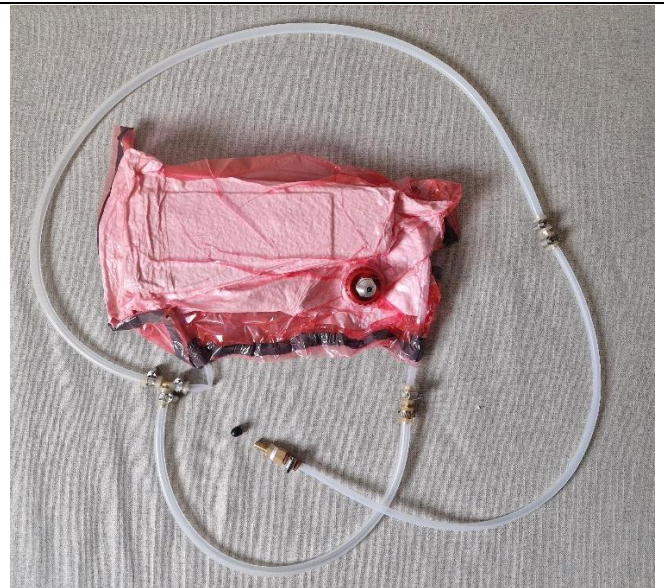


Abbildung 18: Auf die Form angewendetes Vakuumfolien- und Silikonschlauchsystem.

5. Aushärtung des CFK

Damit die Verbundstruktur ihre endgültigen mechanischen Eigenschaften erreicht, die Formstabilität gewährleistet ist und die Matrixstruktur vollständig vernetzt wird, wurde das Bauteil einem kontrollierten Aushärtungszyklus unterzogen. Der Aushärtungsprozess wurde so nah wie möglich an den Richtlinien des Herstellers durchgeführt. Anstelle eines Industrieofens oder Autoklaven, die eine exakte Umsetzung des Prozesses ermöglichen würden, wurde jedoch ein einfacher Haushaltsbackofen mit instabiler und unpräziser Temperatur- und Zeitkontrolle verwendet. Im Gegensatz zu Industrieöfen arbeiten Haushaltsbacköfen mit einer einfachen Ein/Aus-Thermostatsteuerung, was zu ständigen Temperaturschwankungen durch Hysterese führt. Die ungleichmäßige Wärmeübertragung durch die oberen und unteren Heizelemente sowie das Fehlen einer präzisen Luftzirkulation führen zu einer inhomogenen Wärmeverteilung im Ofen. Dies erzeugt regionale Temperaturgradienten auf dem hergestellten Bauteil, was zu einer heterogenen chemischen Schrumpfung und einer unvollständigen Aushärtung führen kann. Es wird davon ausgegangen, dass die im Ofen platzierten Keramikfliesen und Aluminiumfolien-Füllstoffe sowie die Positionierung des Bauteils in einer 4 cm dicken Epoxidform die

Auswirkungen dieser Temperaturschwankungen erheblich dämpfen. Der Hersteller gibt für das ED700 Tooling Board keine Daten zur Wärmeleitfähigkeit oder spezifischen Wärmekapazität an. Die Wärmekapazität von Epoxidkunststoffen an diesem Punkt des Materialspektrums wird jedoch mit 1490–2000 J/kg.K und die Wärmeleitfähigkeit mit 0.18–0.5 W/m.K angegeben. Diese Referenzwerte verdeutlichen, dass das im Formenmaterial verwendete Epoxidharz eine hohe Wärmekapazität sowie eine geringe Wärmeleitfähigkeit aufweist und somit einen isolierenden Charakter zeigt.²⁰ Es wird prognostiziert, dass das Epoxid-Formenmaterial das Bauteil vor den im Haushaltsbackofen auftretenden Temperaturschwankungen schützt. Andererseits bringt diese Isolationseigenschaft die Notwendigkeit mit sich, das Bauteil über einen längeren Zeitraum im Ofen zu belassen. Aus diesem Grund wurde vor Beginn der Ofenaushärtung das Ausmaß der Abweichung im Ofen gemessen. Diese Messung ist in der folgenden Tabelle dargestellt und enthält die vom Ofen angezeigte Temperatur, die gemessenen Minimal- und Maximaltemperaturen sowie den Zeitraum, in dem diese Schwankung aufgetreten ist. Die Messungen wurden mit einem Temperaturmessgerät vom Typ Voltcraft K102 durchgeführt. Vor der Messung wurde das Gerät zur Sicherstellung der Genauigkeit mit Eiswasser und kochendem Wasser kalibriert.

Angezeigte Temperatur °C	Gemessene Temperatur °C		Differenz °C	% Änderung	Zeit Minute ~
	Max	Min			
50	61,3	48,8	12,5	25,0%	12
75	78,9	71,4	7,5	10,0%	11
100	106,6	96,7	9,9	9,9%	12
125	132,7	117,3	16,4	12,3%	15
Tabelle 4: Temperaturabweichungen des Haushaltsbackofens					

²⁰ Ashby, Materials Selection, S. 510; Ebd., S. 512.

Die Aushärtungsprozesse wurden unter Berücksichtigung dieser Zyklen in enger Anlehnung an den in der folgenden Grafik dargestellten Verlauf durchgeführt.

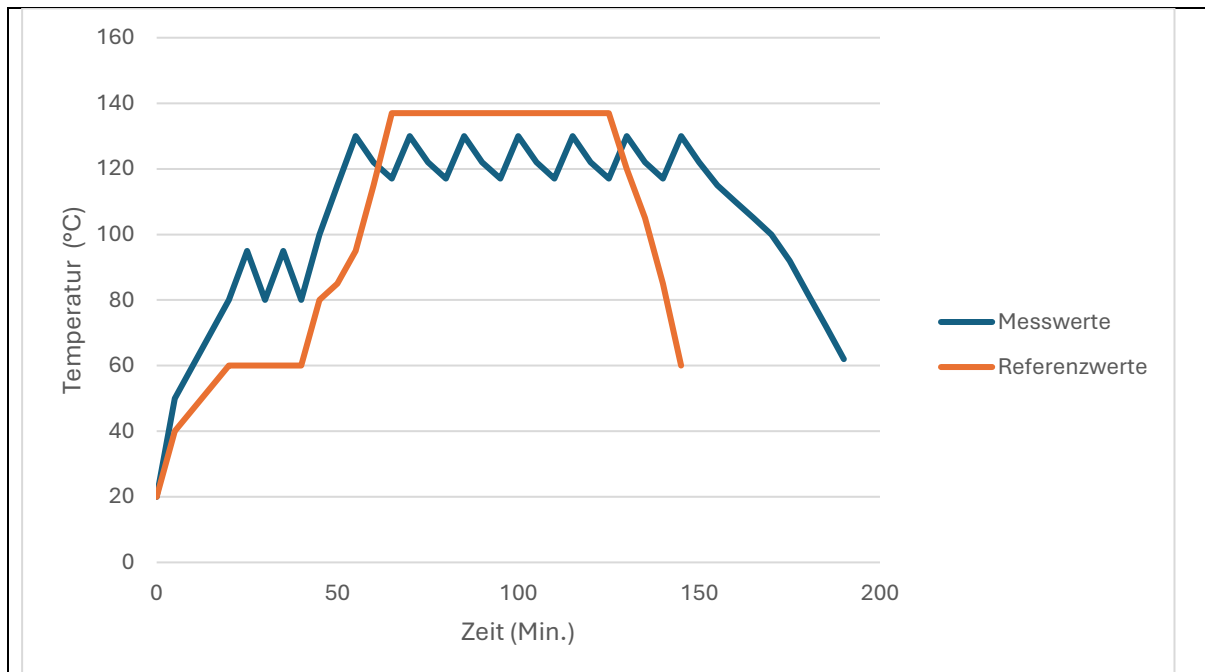


Abbildung 19: Temperaturprofil des Aushärtungsprozesse

Während des Aushärtungsprozesses wurde der Silikonschlauch innerhalb des Bauteils stufenweise mit 1 bar bei 80°C, 2 bar bei 100°C und 3 bar bei 120°C beaufschlagt. Bei der Herstellung des dritten Bauteils platze der Silikonschlauch an einer Stelle außerhalb der Form. Nach diesem Vorfall wurde für die nachfolgenden Bauteile ein neuer, wandstärkerer Silikonschlauch verwendet und das gleiche Verfahren erfolgreich durchgeführt.

6. Ergebnisse

Für diese Arbeit wurden insgesamt 5 Proben hergestellt. Nachfolgend sind die wichtigsten Merkmale dieser Proben aufgeführt:

Probe 1

Es wurde im Wickelverfahren hergestellt. Es handelt sich um das erste vorbereitete Prüfmuster, das jedoch als viertes im Ofen ausgehärtet wurde. Aufgrund der hohen Klebrigkeit des Epoxidfilms auf der Oberlage wurde das Aufziehen des Flechtschlauchs zunächst blockiert. Um dieses Grenzflächenproblem zu lösen, wurde eine circa 5 cm längere Wicklung aus präprägniertem UD-Gewebe mit geringerer Klebrigkeit über den Film gelegt. Dadurch entstand eine weniger klebrige Unterlage, und der Flechtschlauch konnte schließlich erfolgreich aufgezogen werden. Während des gesamten Härtungsprozesses traten keine Probleme hinsichtlich des Innendrucks des Silikonschlauchs auf. Die Kohlefaserverteilung ist über das gesamte Bauteil homogen. Die Oberfläche weist eine feine Rauheit auf. An den Kreuzungspunkten der Flechtschlauchfasern

befinden sich prozessbedingt kleine, nicht mit Epoxidharz gefüllte Kavitäten; ein Abreißgewebe wurde auf der Außenschicht nicht verwendet. Das Endgewicht des Bauteils beträgt 46 Gramm. Aufgrund des fehlerfreien Innendrucks und gutes Ofenhärtungsverfahren wurde eine hohe und gleichmäßige Bondqualität erzielt. Das überschüssige Material verhinderte ein vollständiges Schließen der Form, wodurch eine geringe Menge in den Werkzeuggrennspace austrat; dieser Grat wurde nach dem Entformen durch leichtes Schleifen der Formtrennlinie erfolgreich nachgearbeitet. Das Verrutschen des Flechtschlauchs führte zu einem welligen Erscheinungsbild des Bauteils, was die visuelle Ästhetik beeinträchtigt. Durch das zusätzliche präprägnierte UD-Gewebe liegt der tatsächliche Faser-Volumenanteil über dem theoretisch berechneten Sollwert. Folglich ist das Bauteil für den Einsatz im Cellobau geeignet. Die verbleibende Oberflächenrauheit bietet einen begrenzten mechanischen Vorteil für die spätere Verklebung im Halsinneren.

Probe 2

Dieses Objekt ist für den Einsatz nicht geeignet. Um das Ausmaß des Crimps beim ersten Objekt zu beobachten, wurde es ohne Aufziehen eines Flechtschlauchs gebogen. Anschließend wurde es ausgehärtet, um die Funktionsweise des Ofens und die Qualität der Härtung zu überprüfen. Die Herstellung erfolgte im Wickelverfahren.

Probe 3

Objekt 3 ist für den Einsatz geeignet und wurde im Handauflegeverfahren hergestellt. Im unteren Teil des Objekts befindet sich mehr Material, im oberen Teil weniger. Das Gewicht beträgt ungefähr 32 Gramm. Ein Abreißgewebe wurde ordnungsgemäß auf die äußerste Oberfläche gewickelt. Es wurde 30% weniger Epoxidfilm als die erforderliche Menge verwendet. Die Oberfläche ist sehr rau, und die äußere Schicht ist nicht mit Epoxid versiegelt. Durch das Verrutschen des Flechtschlauchs ist die Form des Objekts deformiert, und es weist visuelle Mängel auf.

Probe 4

Objekt 4 ist für den Einsatz geeignet und wurde im Wickelverfahren hergestellt. Das Material ist symmetrisch und homogen verteilt. Das Gewicht beträgt 45 Gramm. In der äußeren Schlauchschicht sind Verschiebungen vorhanden. Der innere Schlauch ist mit ca. 1.4 Lagen Folie umwickelt. Unter dem äußeren Schlauch wurde eine ca. 5 cm breite Epoxidfolie verwendet. An der Innenkante haben sich Falten und Knicke gebildet, die manuell so weit wie möglich korrigiert wurden. Die Oberfläche ist rau, was ein erneutes Verkleben ermöglicht.

Probe 5

Dieses Objekt ist für den Einsatz geeignet und wurde im Handauflegeverfahren hergestellt. Im unteren Teil des Objekts befindet sich mehr Faser. Bei diesem Objekt wurde 30% mehr Epoxidfilm als erforderlich verwendet. Ein Abreißgewebe wurde auf die Oberfläche gewickelt, aber die Oberflächenqualität ist sehr schlecht. Während der Aushärtung dieses Objekts ist der

Silikonschlauch geplatzt. Im oberen Schwellenbereich des Objekts befindet sich ein großer Hohlraum. Die Verteilung des kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffes ist nicht homogen. Der Crimp in der Innenecke des L-Profils ist durch den Schlauch sichtbar. Das Gewicht beträgt ungefähr 35 Gramm.

Diskussion

Unter den Teilen erbrachten Probe 1 und Probe 4 die besten Ergebnisse. Die Oberflächenqualität der gerollten Teile ist gut, und ihre Steifigkeit lässt sich selbst durch einfaches manuelles Biegen beurteilen. Bei den handlaminieren Teilen 3 und 5 wurden Hohlräume oder strukturelle Unregelmäßigkeiten beobachtet. Die Wärmebehandlung aller Proben erfolgte kontrolliert. Das Epoxidharz wurde vollständig oder nahezu vollständig ausgehärtet. Die Oberflächen der Teile, bei denen Abreißgewebe verwendet wurde, sind sehr wellig; daher hätte Abreißgewebe für diesen Prozess nicht als Wicklung verwendet werden sollen. Bei allen Proben traten in der letzten Schicht Fehler und Knicke auf, was die visuelle Ästhetik des Produkts beeinträchtigt. Der mit Luft beaufschlagte Silikonschlauch hat sich im Ofen nach unten bewegt. Daher ist die Löcher an den Enden aller Probe nicht zentriert.

7. Fazit und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es für eine einzelne Person möglich ist, in einer Heim- oder Werkstattumgebung eine Produktionsqualität zu erreichen, die sehr nah an industrielle Standards heranreicht. Dank des entwickelten parametrischen Designs kann ein neues, skalierbares Design erstellt oder die bestehende Struktur geändert werden. Dies ermöglicht eine Anpassung an alle Mitglieder der Geigenfamilie oder ähnliche Instrumente, indem einfach die Designparameter geändert werden. Obwohl die Anfangsinvestition eine gewisse Finanzierung erfordert, können die Kosten für nachfolgende Produktionen auf einem sehr erschwinglichen Niveau gehalten werden. Die hohen Kosten bestimmter Produktionswerkzeuge wie CNC-Maschinen und der fehlende direkte Zugang für viele Geigenbauer stellen anfangs eine Herausforderung dar. Diese Maschinen sind jedoch heute zugänglicher als je zuvor, und es wird erwartet, dass ihre Kosten in Zukunft noch weiter sinken. Umfassende Informationen und Anleitungen werden im Internet unter dem 'Do It Yourself' (DIY)-Prinzip geteilt, die zeigen, wie man CNC-Maschinen zu Hause baut, die sogar Weichmetalle bearbeiten können. Ein Stab, der unter Verwendung kostenintensiver Produkte wie einem für die Carbonhärtung ausgelegten Ofen mit hoher Temperatur- und Wärmekontrolle, ultrahochmoduligen Carbonfasern, Phenolharz, Metallformen und Infusionsgeräten hergestellt wird, wird zweifellos die höchste Leistung zeigen. Da diese Arbeit jedoch aus Eigenmitteln finanziert wurde, musste das Projekt auf die Möglichkeiten eines Geigenbauers mit CNC-Zugang beschränkt und die Kosten optimiert werden. Epoxidharz-Formenmaterial ist für eine Produktion mit vielen Wiederholungen nicht geeignet. Wenn die Produktion hochskaliert werden soll, ist es ratsam, die Form aus Metall herzustellen. Zudem senkt eine Konstruktion, bei der mehrere Stäbe in eine Form passen, die Produktionskosten bei der Nutzung der Form. Eines der wichtigsten Ergebnisse der Studie ist, dass Prepregs für das Wickeln und Biegen dieses Produkts nicht geeignet sind. Für die Zukunft wird anstelle der Prepreg-Härtung die Vakuuminfusionstechnik empfohlen. Obwohl Faserverzug in den Teilen beobachtet wurde, ist der hergestellte Stab dennoch steif genug, um den Cellohals zu verstärken. In Zukunft können die akustischen Auswirkungen dieses Objekts auf das Instrument untersucht werden. Zudem kann durch Standard-Mechanikmessungen überprüft werden, wie steif die Teile sind und wie sie dem Biegen widerstehen.

8. Literaturverzeichnis.

Ashby, Michael F. Materials Selection in Mechanical Design, Oxford 2010.

Burgess, David: Stabilising Cello Necks, in: The Strad. Trade Secrets, Vol. 119 (August 2008, Nr. 1420)

Callister Jr., William D.; Rethwisch, David G.: Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach, International Adaptation, Newyork 2022.

Curtin Joseph: Adjustment to change, in: The Strad, Vol. 132 (August 2021, Nr. 1576).

Easy Composites Ltd (2026a): 200g 2/2 Twill 3k Carbon Fibre Cloth, online im Internet unter: <https://www.easycomposites.eu/200g-22-twill-3k-carbon-fibre-cloth> (abgerufen am 17.06.2026).

Easy Composites Ltd (2026b): 375g 5HS 6k Carbon Fibre Cloth, online im Internet unter: <https://www.easycomposites.eu/375g-5hs-6k--carbon-fibre-cloth> (abgerufen am 17.06.2026).

Easy Composites Ltd (2026c): 90g ProFinish Plain Weave 1k Carbon Fibre Cloth, online im Internet unter: <https://www.easycomposites.eu/90g-profinish-plain-weave-1k-carbon-fibre-cloth> (abgerufen am 17.06.2026).

Easy Composites Ltd (2026d): ED700 High Temperature Epoxy Tooling Board - Technical Datasheet, online im Internet unter: <https://media.easycomposites.eu/datasheets/EC-TDS-EP700-High-Temperature-Epoxy-Tooling-Board.pdf> (abgerufen am 07.06.2026).

Gay Daniel, Hoa Suong V., Composite Materials: Design and Applications, Boca Raton 2007.

Ham Jim: Innovation in Violin Making Cello Neck Reinforcement, in VSA, Vol XXIII, No 3., Kanada 2008.

Kudu Candeniz, Theoretische Material- und Geometrieoptimierung der Cello-Halsstabilität in CAD-Simulationen, Markneukirchen 2024.

R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH (2026): Produktkatalog und Technisches Datenblatt (SP-147060), online im Internet unter: <https://www.r-g.de/art/SP-147060> (abgerufen am 25.06.2026).

R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH (2026): R&G SIGRAPREG® UD-Kohlegelege-Prepreg U230, online im Internet unter: <https://www.r-g.de/art/192230060-SUD> (abgerufen am 25.06.2026).

R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH (2026a): Kohlefaserschlauch ø 18mm, online im Internet unter: <https://www.r-g.de/art/202100> (abgerufen am 25.06.2026).

Schryer Raymond, Installing a carbon-fibre reinforcement to a cello neck, in: The Strad. Trade Secrets, Vol. 126 (April 2015, Nr. 1500),

SGL CARBON SE (2026): Technical Data Sheet: Harzsysteme E320/E321/E322/E323 - Epoxid-Harzsysteme für SIGRAPREG® Prepregs, online im Internet unter: https://www.ezentrumbilder.de/rg/pdf/td_de_SIGRAPREG.pdf (abgerufen am 07.06.2026).

Verband Deutscher Geigenbauer und Bogenmacher e.V., Der Maßtabelle, 2009

9. Abbildungs-, Schritten- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: 18mm Profil und Querschnitt des Halses	11
Abbildung 2: Halsstärke am Sattel.....	19
Abbildung 3: Halsstärke am Fuß.....	19
Abbildung 4: 1×1 Leinwandgewebe	26
Abbildung 5: 5-bindiger Atlasgewebe	27
Abbildung 6: 2×2 KöperBindung	28
Abbildung 7: Gewebefbindungen Leinwand, Atlas- und Köperbindungen.....	29
Abbildung 8: Der endgültige Zustand des Designs.	44
Abbildung 9: Werkzeugwege für den Formzuschnitt.....	46
Abbildung 10: Postprozess	58
Abbildung 11: Testen der Oberflächenreinheit und der Antihafiwirkung nach dem Auftragen von Versiegler und Trennmittel.....	61
Abbildung 12: Mikrorisse.....	61
Abbildung 13: Temperaturverlauf bei der Wärmebehandlung einer CFK-Testprobe	61
Abbildung 14: Werkzeugwege für den Formzuschnitt 2	65
Abbildung 15: Wickelmethode.....	75
Abbildung 16: Handlaminieren.....	76
Abbildung 17: Verschraubte und mit Ahornfurnier überbrückte Formenstruktur.	77
Abbildung 18: Auf die Form angewendetes Vakuumfolien- und Silikonschlauchsystem.	77
Abbildung 19: Temperaturprofil des Aushärtungsprozesse.....	79
Tabelle 1: Parameterliste	13
Tabelle 2: Bestimmungskriterien fürs Formmaterial	33
Tabelle 3: Vom Unternehmen empfohlenes Härtingsverfahren	35
Tabelle 4: Temperaturabweichungen des Haushaltsbackofens.....	78
Schritt 1	14
Schritt 2	14
Schritt 3	14
Schritt 4	15
Schritt 5	15
Schritt 6	16
Schritt 7	16
Schritt 8	16
Schritt 9	17
Schritt 10	17
Schritt 11	18

Schritt 12	18
Schritt 13	19
Schritt 14	20
Schritt 15	21
Schritt 16	24
Schritt 17	24
Schritt 18	36
Schritt 19	37
Schritt 20	38
Schritt 21	38
Schritt 22	39
Schritt 23	40
Schritt 24	41
Schritt 25	41
Schritt 26	42
Schritt 27	43
Schritt 28	44
Schritt 29	47
Schritt 30	49
Schritt 31	50
Schritt 32	51
Schritt 33	52
Schritt 34	53
Schritt 35	54
Schritt 36	55
Schritt 37	56
Schritt 38	60
Schritt 39	62
Schritt 40	63
Schritt 41	64
Schritt 42	65
Schritt 43	66
Schritt 44	67
Schritt 45	68
Schritt 46	69
Schritt 47	70
Schritt 48	71

10. Danksagung

Ein besonderer Dank gilt Frau Dagmar Weller für die Unterstützung über die fünf Jahre hinweg. Mein Dank gilt Erik Schneiderei für den Wissensaustausch und das gemeinsame Überlegen. Ich möchte mich bei Kateryna Horodnianska für die Unterstützung bei den Werkstattarbeiten bedanken. Großen Dank an Lauritz Aigner für die Transportunterstützung mit dem Auto. Danke an Hannah Weidauer für ihre Zeit und ihre Unterstützung in der Bibliothek. Mein herzlicher Dank gilt Muhammad Shahkaram für seine ständige Unterstützung und Freundschaft.

Mein herzlicher Dank gilt allen, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben. Ein ebenso großer Dank geht an all jene, die es uns ermöglicht haben, über uns selbst hinauszuwachsen, und die historisch zur Entstehung und Bewahrung dieses Wissens beigetragen haben, insbesondere das Land Sachsen, die Deutsche Demokratische Republik und die Bundesrepublik Deutschland.

11. Selbständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit in allen Teilen selbstständig angefertigt und keine anderen als die in der Arbeit angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form in noch keiner anderen Prüfung vorgelegen hat. Mir ist bewusst, dass ich Autor/in der vorliegenden Arbeit bin und volle Verantwortung für den Text trage.

Ich erkläre, dass ich wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken – dazu gehören auch Internetquellen – übernommene Inhalte als solche kenntlich gemacht und die entsprechenden Quellen angegeben habe.

Mir ist bewusst, dass meine Arbeit auf Plagiate überprüft werden kann. Mir ist bekannt, dass es sich bei der Abgabe eines Plagiats um ein schweres akademisches Fehlverhalten handelt und dass Täuschungen nach der für mich gültigen Prüfungsordnung geahndet werden.

Zusätzlich versichere ich, dass ich auf künstlicher Intelligenz (KI) basierende Werkzeuge nur in Absprache mit den Prüfern verwendet habe. Dabei stand meine eigene geistige Leistung im Vordergrund, und ich habe jederzeit den Prozess steuernd bearbeitet.

Diese Werkzeuge habe ich im Quellenverzeichnis in der Rubrik „Übersicht verwendeter Hilfsmittel“ mit ihrem Produktnamen und einer Übersicht des im Rahmen dieser Prüfungs-/Studienarbeit genutzten Funktionsumfangs unter Angabe der Textstelle in der Arbeit vollständig aufgeführt. Ich versichere, dass ich keine KI-basierten Tools verwendet habe, deren Nutzung die Prüfer explizit schriftlich ausgeschlossen haben. Ich bin mir bewusst, dass die Verwendung von Texten oder anderen Inhalten und Produkten, die durch KI-basierte Tools generiert wurden, keine Garantie für deren Qualität darstellt.

Ich verantworte die Übernahme jeglicher von mir verwendeter maschinell generierter Passagen vollumfänglich selbst und trage die Verantwortung für eventuell durch die KI generierte fehlerhafte oder verzerrte Inhalte, fehlerhafte Referenzen, Verstöße gegen das Datenschutz- und Urheberrecht oder Plagiate.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form weder von mir noch von jemand anderem als Prüfungsleistung (d. h. weder an der AKS/WHZ noch andersorts) eingereicht und ist auch noch nicht veröffentlicht worden.

Ort, Datum

Unterschrift

Anhang A:

SIGRAPREG® UD-Kohlegelege-Prepreg U230	230 g/m², Prepreggewicht: 377 g/m²	2 m
Tenax® 200 tex (3k) Kohlefaserschlauch	Ø 14 mm / 45° / 3k	5 m
Tenax® 67 tex (1k) Kohlefaserschlauch	Ø 9,5 mm / 45° / 1k	5 m
Abreißgewebe	95 g/m² Leinwand	1 m²
Breatex™ Saugvlies	150 g/m²	1
SIGRAPREG® Epoxidharz-Film E322	147 g/m²	1
EP700 High Temp Epoxy Tooling Board	250 x 500mm	1
MDF-Formmaterial	350 x 150	1
Multiplex-Opferplatte	400 x 400	1
Vik-Composite SK2TR300-1 Versiegler	-	450 ml
Trennmittel Semiperm™ Monofilm	-	250 ml
Schmiermittel WD40	-	1
Vakuum-Folienschlauch (PA/PP/PA)	50 my	1
Vakuum-Dichtband ANTHRAZIT	3,2 x 12,7 mm x 7,6 m (bis 204 °C)	1
PTFE Dichtungsband	-	1
Vakuum-Sackverbinder	-	
Gerader Schlauchverbinder	M6	2
Schlauchverbinder Typ-T	M6	
Tank ventil 1/4 Zoll	BSPT	1
Messing Schlauchtülle	G1/4 Zoll	2
6mm Schlauchtülle	Messing	3
Schlauchschellen	6-12 mm	6
Silikon schlauch	ID6/OD8	1
Silikon schlauch	ID6/OD12	1
Stahl Strohalm	ID5/AD6 mm	2
Vakuumpumpe	-	1
Luftpumpe	-	1
Backofen	-	1
2-Kanal-Handthermometer	Volcraft K102	1
CNC-Portalfräsmaschine	Hammer HNC3 825	1
6mm Kugelkopffräse	Ø6 mm	1
6mm Schaftkopffräse	Ø6 mm	1
6mm Schruppfräse	Ø6 mm	1
Passtifte	Ø6 mm / 20mm	2

Möbelschrauben	M4 / Inbus	9
Hülsenmutter	M4/AD5 / Inbus	9
doppelseitiges Klebeband	Stark	1
Aluminiumfolie	-	1
Schneidematte	-	1
Schere	-	1
Schnitzer	-	1
Bügelsäge	-	1
Feile Hieb 4	-	1
Schleifpapier	400, 600, 800, 1500, 2400, 3600, 4000, 6000, 8000	1
Keramikfliese		2
Lineal	1m	1
Messschieber		1