

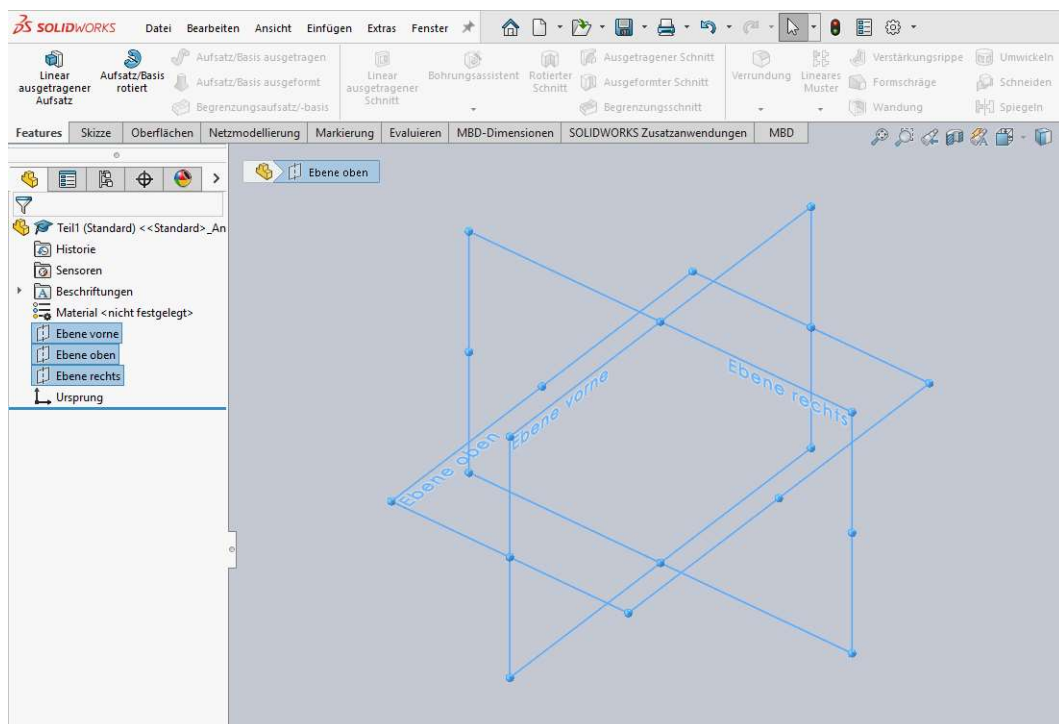
3D-Druck – Von der Formel zum fertigen Objekt

Text: Gernot Polivka (TU, Wien), gernot.polivka@gmail.com

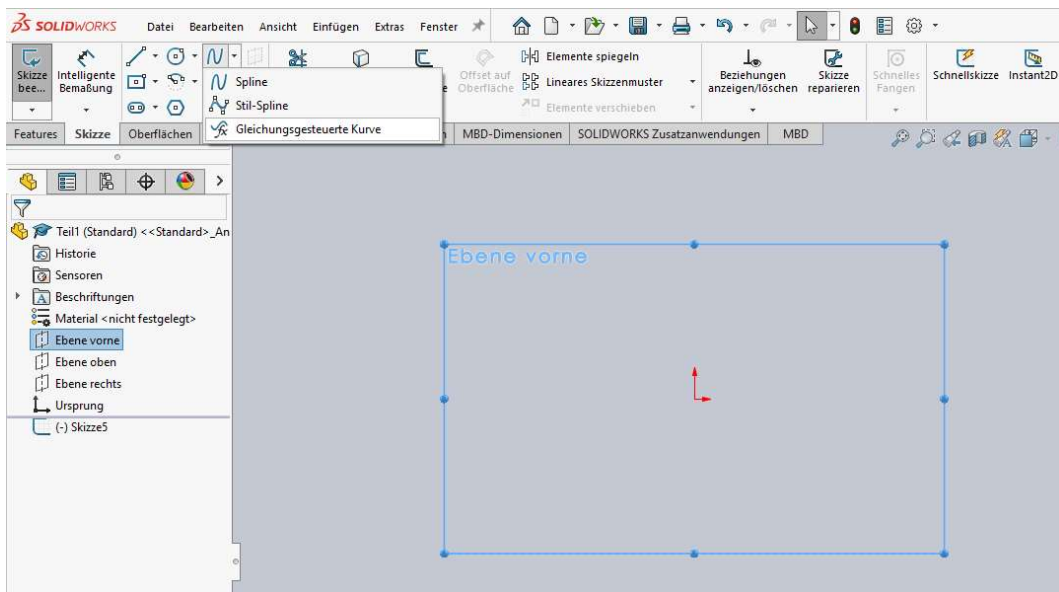
Formel

Obwohl SolidWorks auch Funktionen für kompliziertere (z.B. [löffelförmige](#)) Gebilde bereitstellt, tut man (ähnlich wie für die Lesbarkeit eines Programmcodes) auch hier gut daran eine möglichst einfache und nachvollziehbare Konstruktionsabfolge zu wählen. Die charakteristische Besonderheit des 2Lapps, sich als Schnittmenge zweier parabolischer Zylinder darstellen zu lassen spielt uns hier in die Karten.

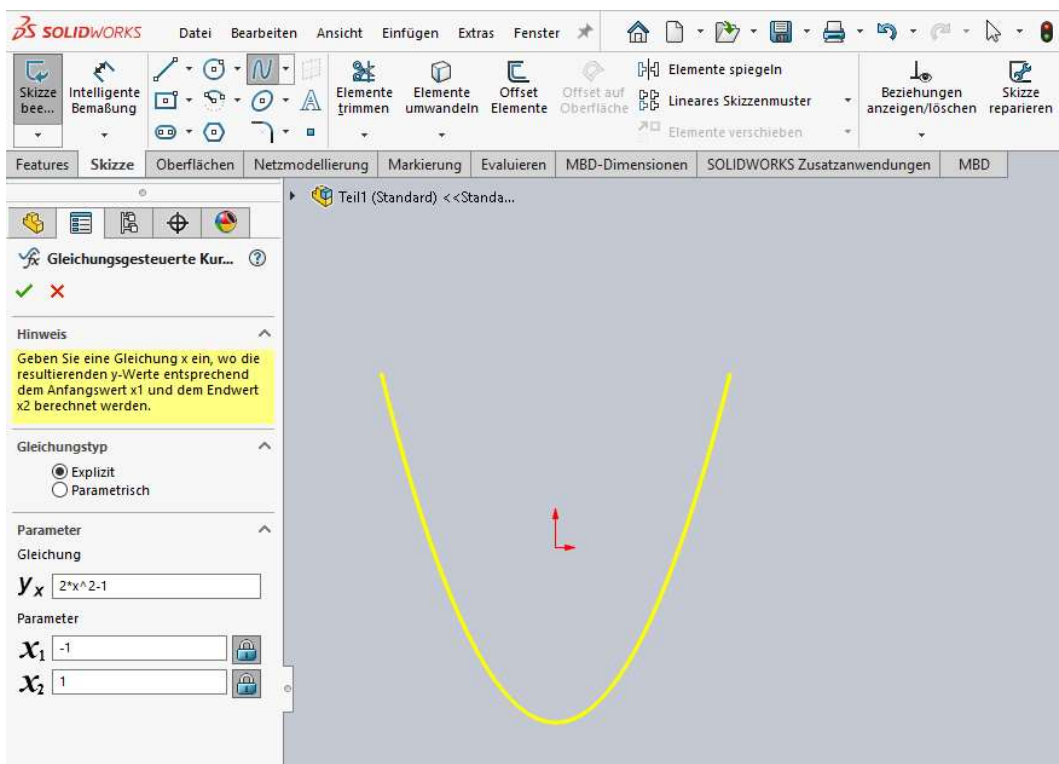
Zunächst wird im linken Menü eine Ebene ausgewählt, auf der unsere erste Parabel liegen soll. Falls man z.B. von SketchUp kommend die Anzeige-Option „Um Bühnenboden drehen“ aktiviert hat (die Kamera bleibt immer waagrecht bezüglich der „Ebene oben“) bietet es sich an für die Parabeln die „Ebene vorne“ und die „Ebene rechts“ zu verwenden, weil die Austragungen so immer auch waagrecht bezüglich der Kamera verlaufen. Hier sei für die erste Parabel die „Ebene vorne“ gewählt, weswegen mit einem Rechtsklick auf dieselbe eine deckungsgleiche Skizze erzeugt wird.



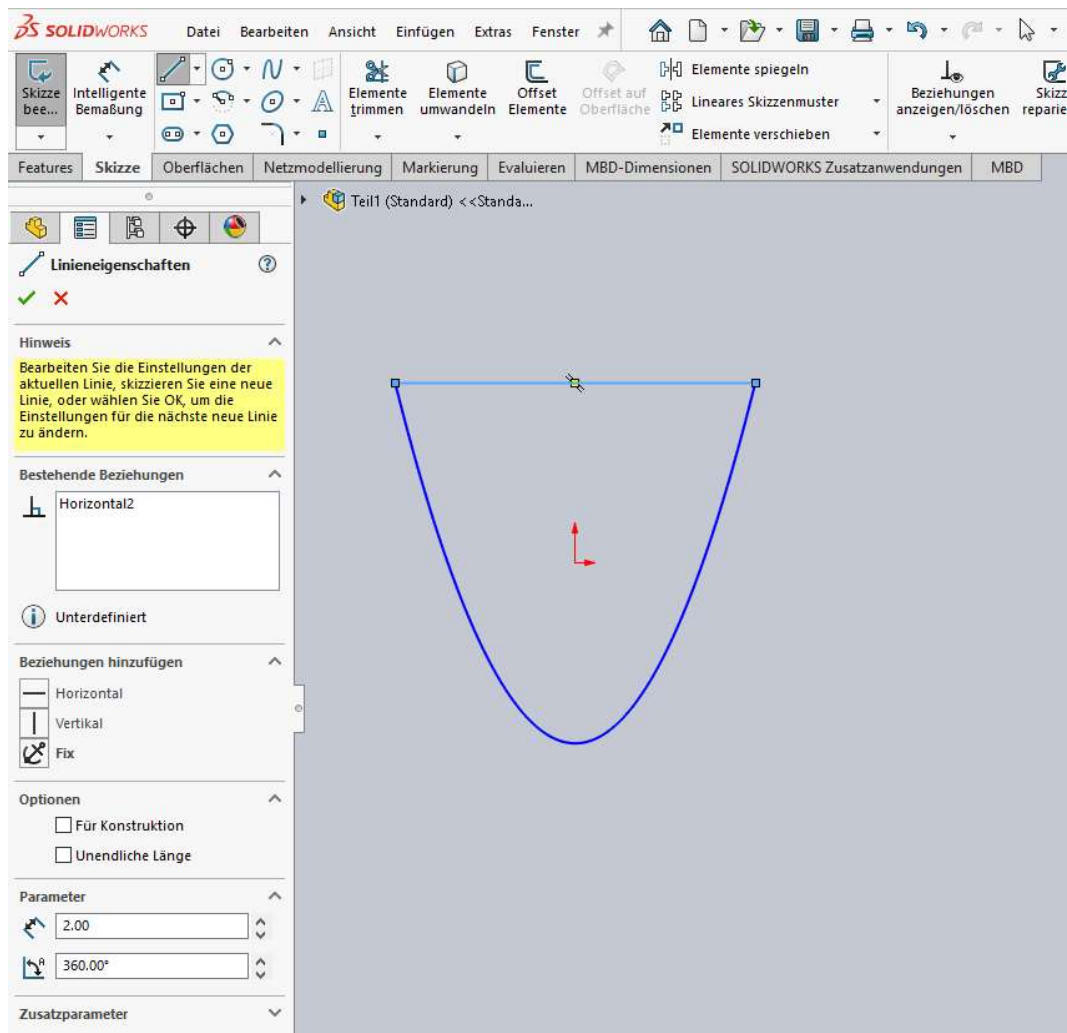
Die Ansicht wird nun automatisch so gedreht, dass man frontal auf die neu erstellte und deswegen noch leere Skizze schaut. Anschließend kann im oberen Menü unter der Registerkarte „Skizze“ die Funktion „Gleichungsgesteuerte Kurve“ ausgewählt werden.



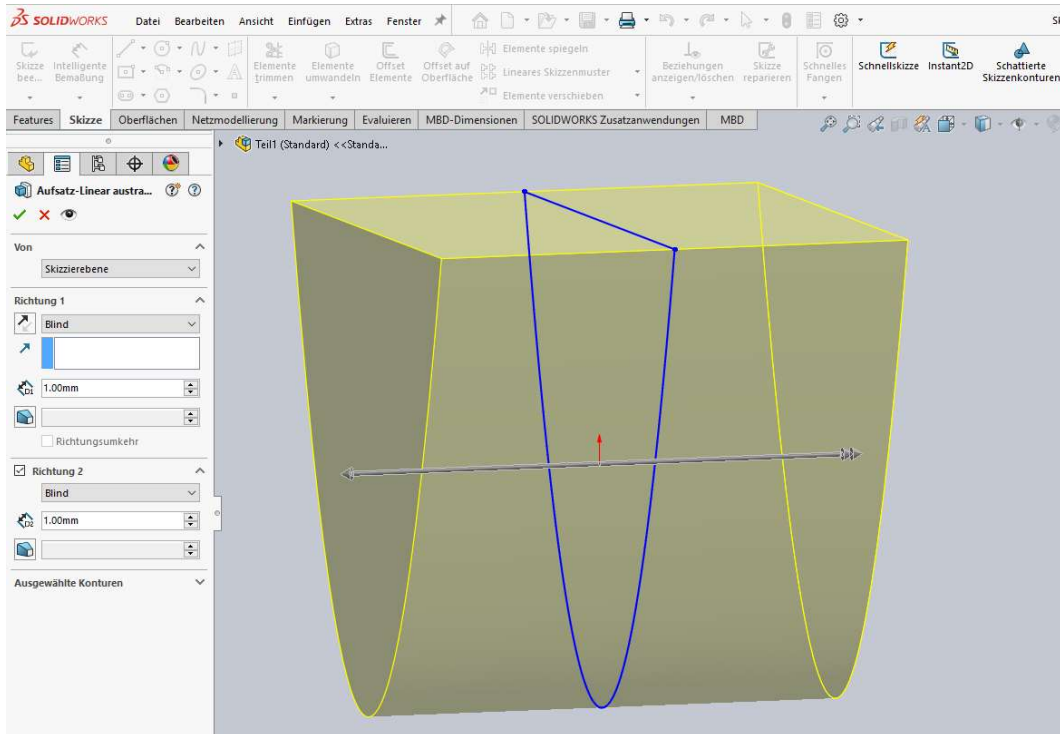
Um das 2Lapp im Nachhinein ohne großen Rechenaufwand auf jede beliebige Größe skalieren zu können, wählen wir hier die Gleichung $2x^2 - 1$ zwischen den Grenzen -1 und 1 , sodass das fertige 2Lapp die Scheitellänge 2 hat bzw. sein Schatten auf der xy -Ebene dem Einheitskreis entspricht. Das -1 rührt daher, dass es in der Regel von Vorteil ist das Zentrum eines symmetrischen Körpers im Ursprung zu platzieren.



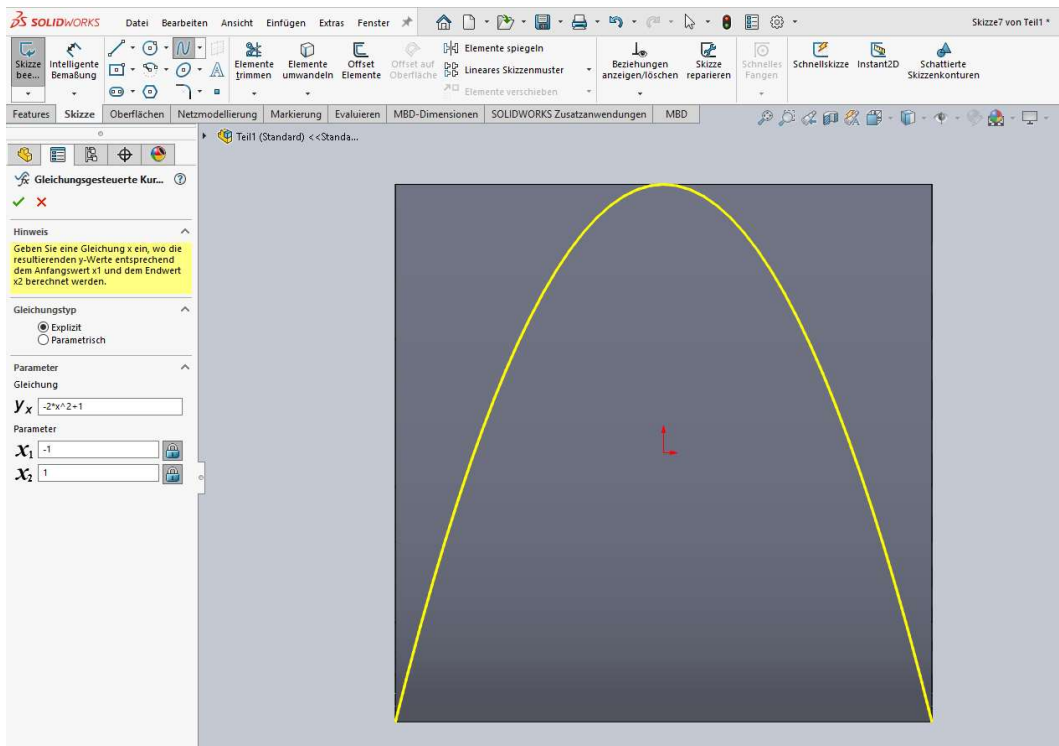
Nach der Bestätigung der Funktionsparameter durch Klick auf das grüne Hackerl im linken oberen Eck des seitlichen Menüs muss man die Form noch schließen um sie anschließend austragen (= aus der Ebene ziehen) zu können. Hier reicht eine waagerechte Linie. Wir erhalten ein Parabelsegment:



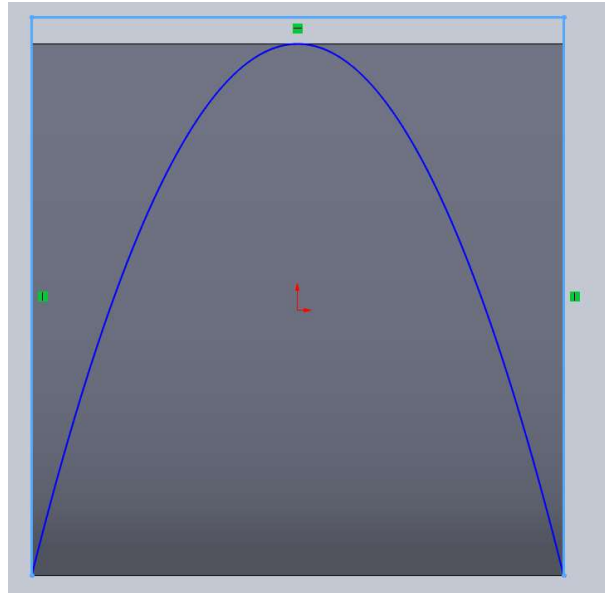
Nun wechselt man im oberen „Command Manager“-Menü in den Reiter „Features“ und wählt „Linear ausgetragener Aufsatz“. Aufgrund der gewählten Scheitellänge $s = 2$ beträgt die Gesamttiefe 2mm. Um jedoch das Zentrum weiterhin in der Mitte zu halten, sollte man statt 2 mm in eine Richtung jeweils 1 mm in gegensätzliche Richtungen austragen:



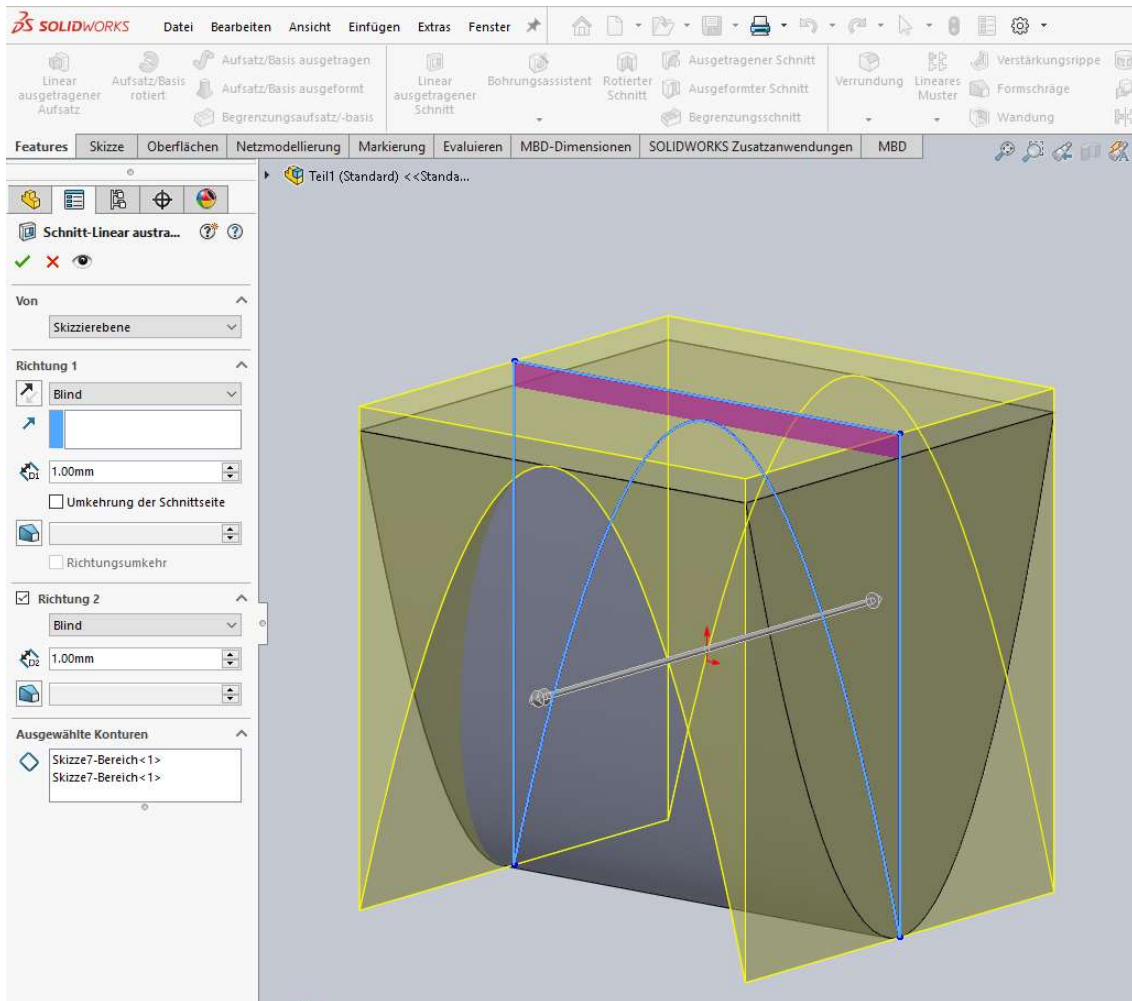
Vom entstandenen parabolischen Zylinder-Abschnitt gilt es in der Folge die Schnittmenge mit einem identischen, senkrecht darauf stehenden Abschnitt zu bilden – bzw. den Überstand abziehen. Ähnlich wie zuvor wird dazu eine Skizze erzeugt – nun allerdings auf der „Ebene rechts“. Eine „Gleichungsgesteuerte Kurve“ liefert die kopfüberstehende Parabel $-2x^2 + 1$.



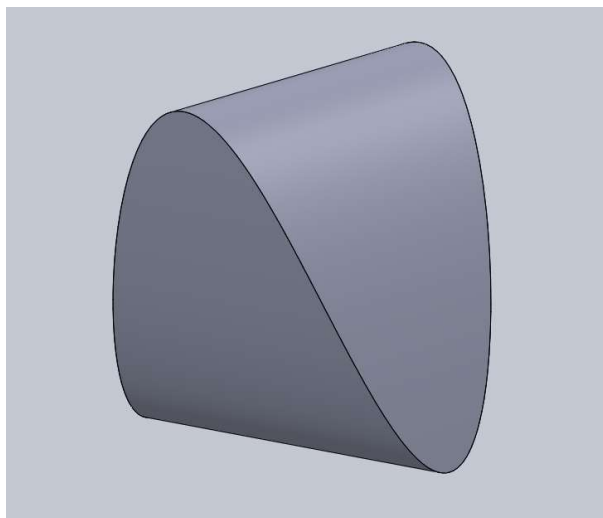
Auch hier muss die Parabel wieder geschlossen werden. Obwohl der nachfolgende Schnitt auch funktioniert, wenn die obere waagerechte Begrenzungslinie den Scheitel der Parabel schneidet, tut man sich einen Gefallen die Linie ein klein wenig höher zu setzen. Andernfalls gibt es zwei unabhängige Teilflächen, die man beim Austragen einzeln anzuwählen wären.



Nun kann mit der Funktion „Linear ausgetragener Schnitt“ vom zuvor konstruierten parabolischen Zylinder das nicht zur Schnittmenge gehörende Material entfernt werden. Hier ist wieder darauf zu achten, dass der Schnitt jeweils zu 1 mm in beide Richtungen erfolgt. Die hier gewählte Vorgangsweise erspart die Konstruktion des zweiten parabolischen Zylinders, wo das 2Lapp mittels einer booleschen Operation („Features“ → „Kombinieren“ → „Gemeinsam“) aus der Überschneidung zweier Volumenkörper zu erstellen wäre.



Übrig bleibt das fertige 2Lapp:

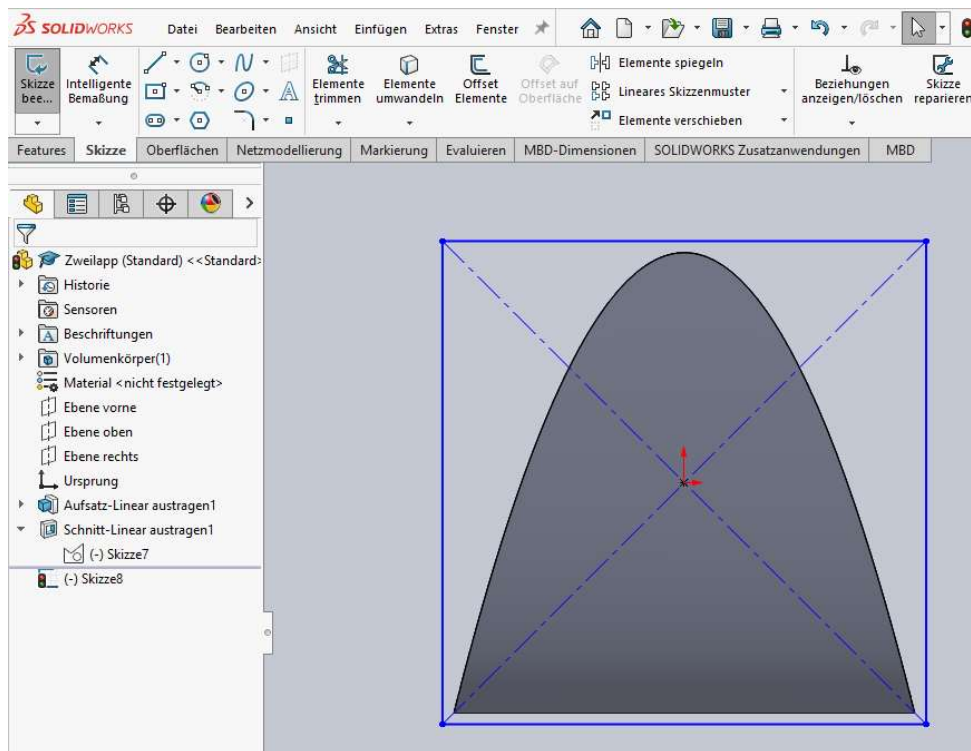


3D-Druck – Vorbereitung

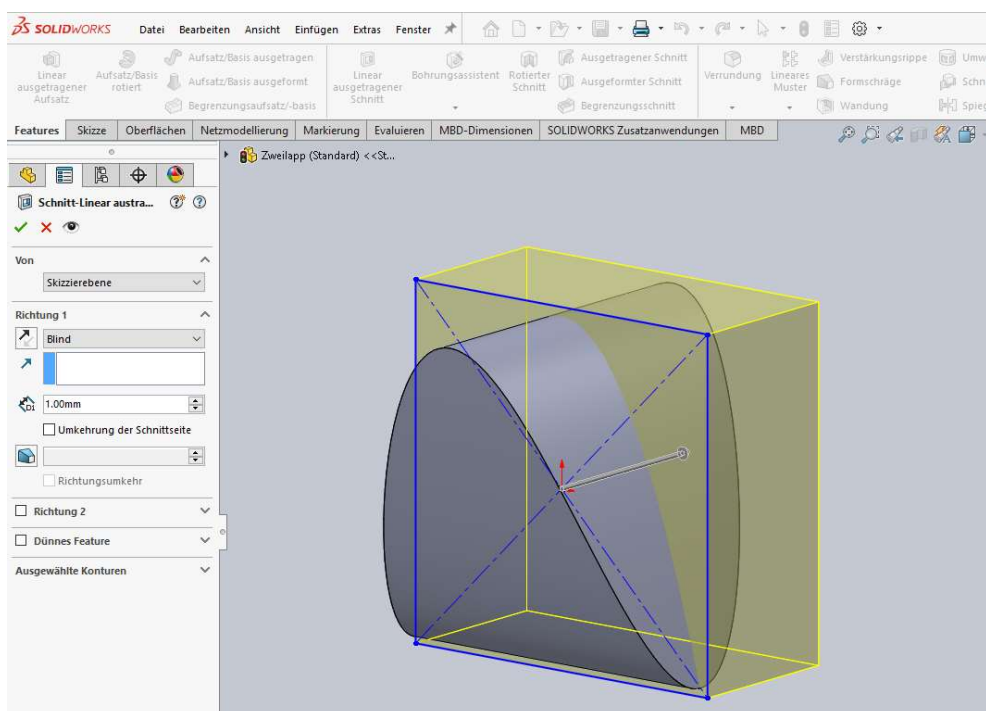
So schön der 2Lapp auch anmutet, so problematisch seine Form für den 3D-Druck. Abgesehen von den Überhängen, die im unteren Bereich den empfohlenen Grenzwert von 45° gegenüber dem Boden deutlich unterschreiten, gibt es aufgrund der Krümmung auch keine plane Auflagefläche, die groß genug wäre, das Objekt während des Drucks stabil auf dem Druckbett zu halten. Nachdem dies aber ein allbekanntes Problem von Standard-FDM-Druckern ist, bietet so gut wie jeder Slicer (im Anschluss betrachtet) die Möglichkeit, automatisch eine geeignete Stützstruktur zu generieren. Diese wird wie eine Art Gerüst unter den Überhängen des Objektes platziert und kann nach dem Druck idealerweise einfach weggebrochen werden. Trotz fortgeschrittener Optimierung der Schnittstellen zwischen Objekt und Stützstruktur erkennt man dennoch einen kleinen Unterschied in der Struktur (siehe Bild unten – links: Oberseite, rechts: Unterseite, Stützstruktur bereits entfernt). Gleichzeitig wird zur Haftungsverbesserung meist die erste Schicht zugunsten der Auflagefläche vergrößert. Zur sauberen Entfernung des so entstehenden Randes, dem sogenannten „Brim“, ist unter Umständen ein Teppichmesser von Nöten.



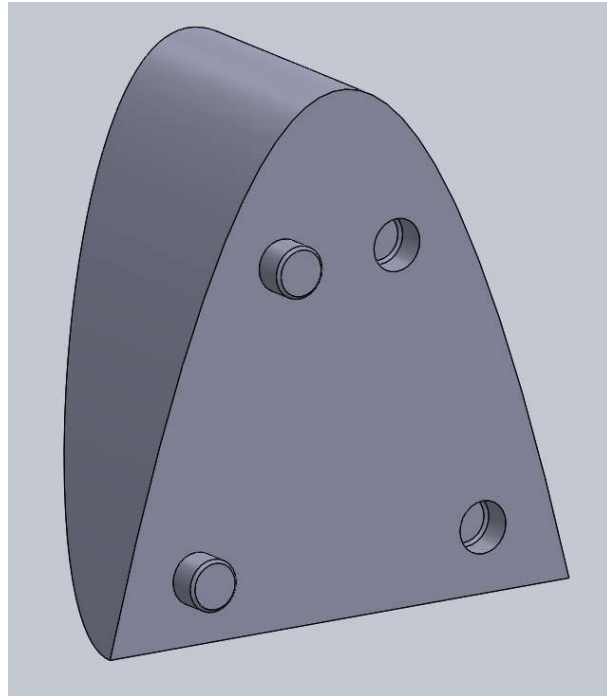
Eine Alternative ist daher das 2Lapp in zwei Hälften zu teilen. Dazu kann man eine weitere Skizze auf der „Ebene rechts“ erstellen, auf welcher man ein Rechteck zeichnet. Die genaue Größe ist dabei unwichtig, solange das gesamte 2Lapp eingeschlossen ist.



Anschließend verwendet man in der Registerkarte „Features“ wieder „Linear ausgetragener Schnitt“, wählt die Tiefe zu 1 mm und bestätigt die Eingabe mit dem grünen Hackerl links oben. Es sei erwähnt, dass dies nicht die einzige symmetrische Schnittfläche ist. Eine Alternative wäre z. B., das 2Lapp horizontal zu teilen (rechteckige Schnittfläche), was die Auflagefläche ebenfalls vergrößern, allerdings die Überhänge nicht gänzlich eliminieren würde.

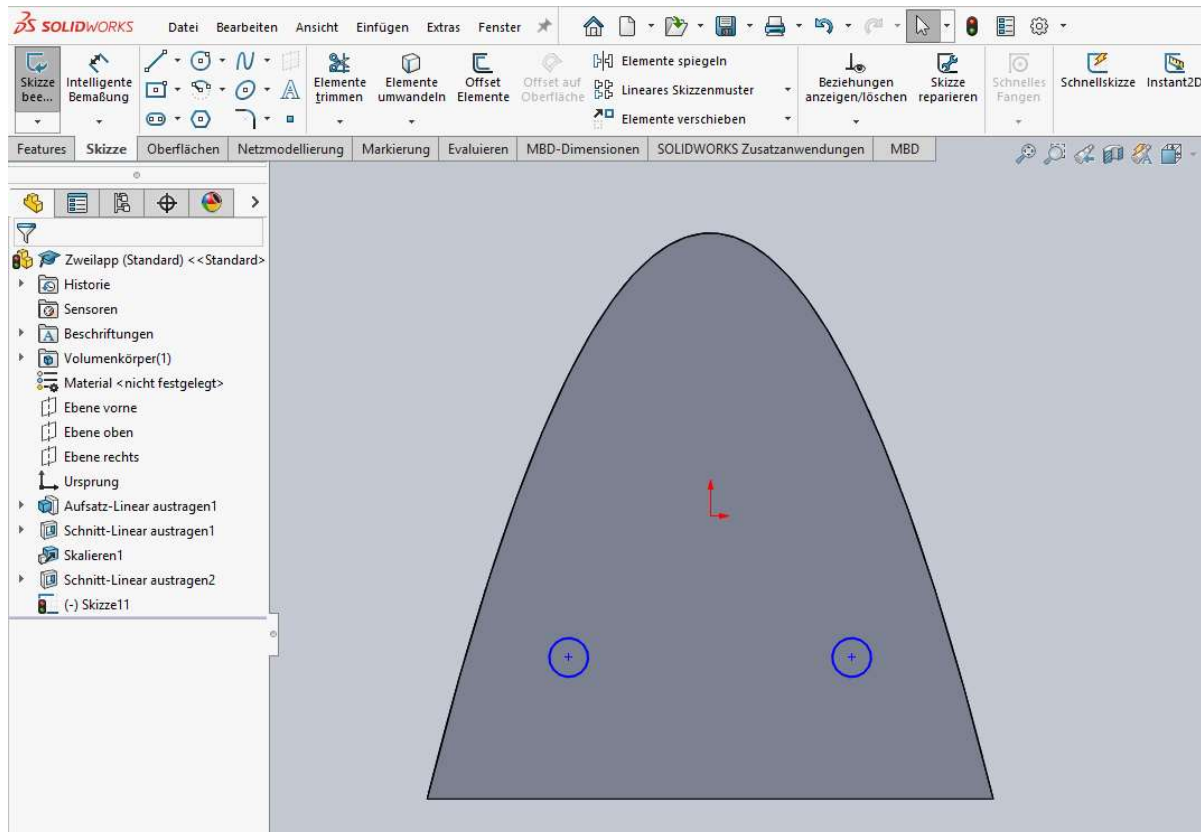


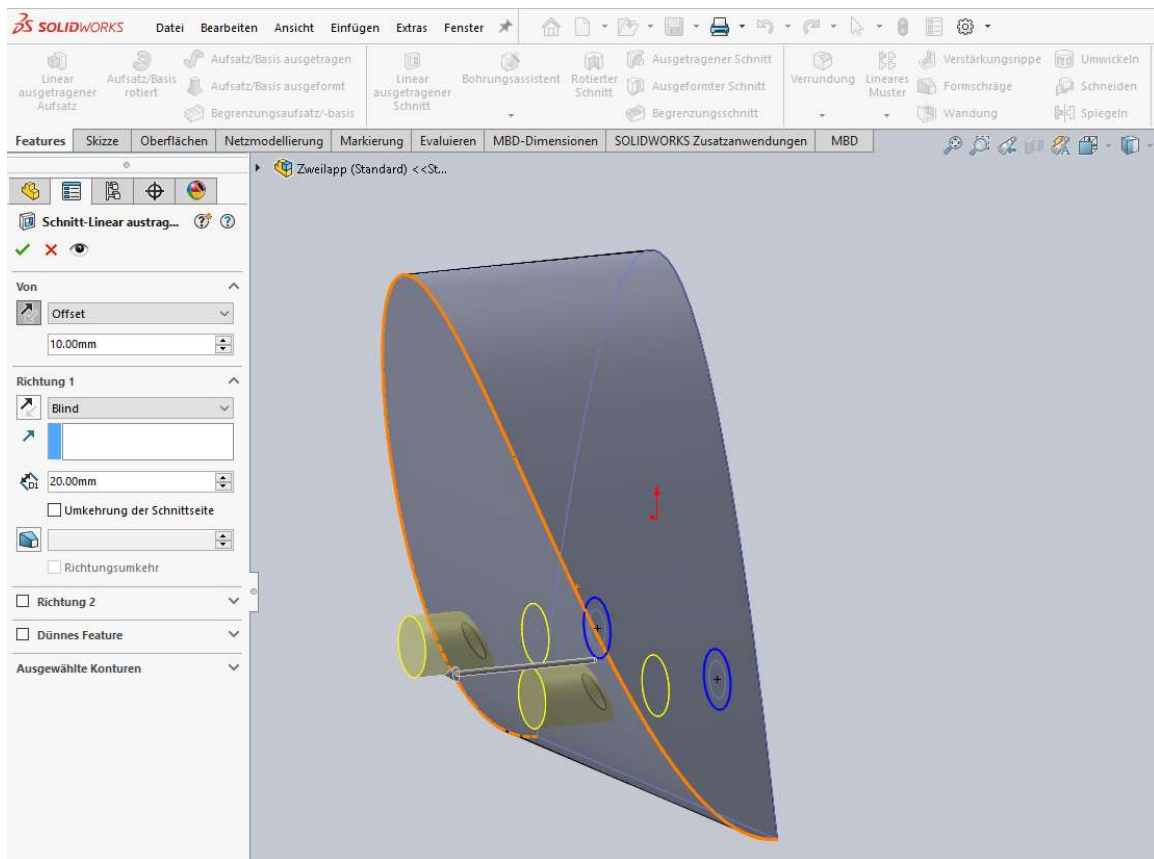
Ein Problem gelöst, ergibt sich die neue Herausforderung die beiden Hälften nachträglich wieder möglichst passgenau zusammenzufügen. Dabei immer elegant: identische Teilstücke, die sich ohne zusätzliche Elemente werkzeuglos kombinieren lassen, wie beispielsweise LEGO-Steine oder Kabelschleppketten.



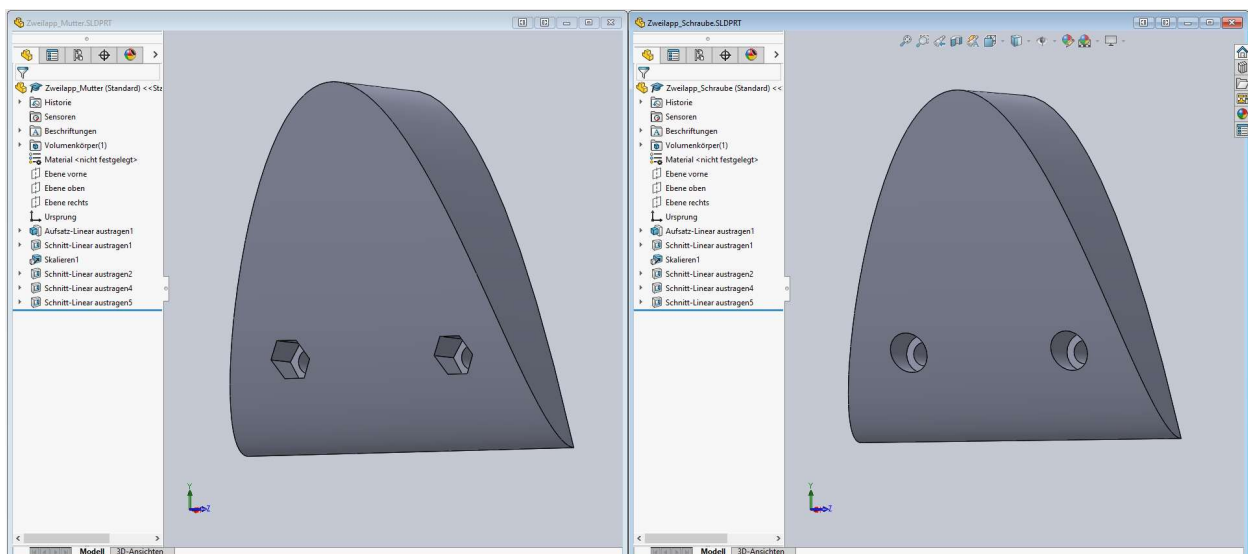
Abgesehen von der schwierigen Wahl der richtigen Toleranzen für eine gute Klemmwirkung bräuchte man wegen der überstehenden Noppen abermals eine Stützstruktur unter der gesamten Auflagefläche. Als Kompromiss zwischen einfacher Konstruktion und Druckbarkeit wird im Folgenden eine Variante mit Schrauben vorgestellt.

Nach dem Skalieren des 2Lapps um den Faktor 40 auf die Scheitellänge von 80 mm mit der Funktion "Einfügen→Features→Skalieren", wird mithilfe eines Rechtsklicks auf die Schnittfläche in dem sich öffnende Kontextmenü zunächst eine neue Skizze erstellt. Jeweils 20 mm in x und y -Richtung vom Koordinatenursprung entfernt, werden Kreise mit einem Durchmesser von 5.5 mm für zwei M5-Inbusschrauben gezeichnet. Um einen etwaigen Text auf der gekrümmten Oberfläche nicht zu beeinträchtigen, wurde auf ein Loch im Scheitelbereich vorläufig verzichtet. Mit „Linear ausgetragener Schnitt“ können die Löcher fertiggestellt werden. Die Tiefe muss dabei nur ausreichend sein, um den gesamten Körper zu durchdringen.



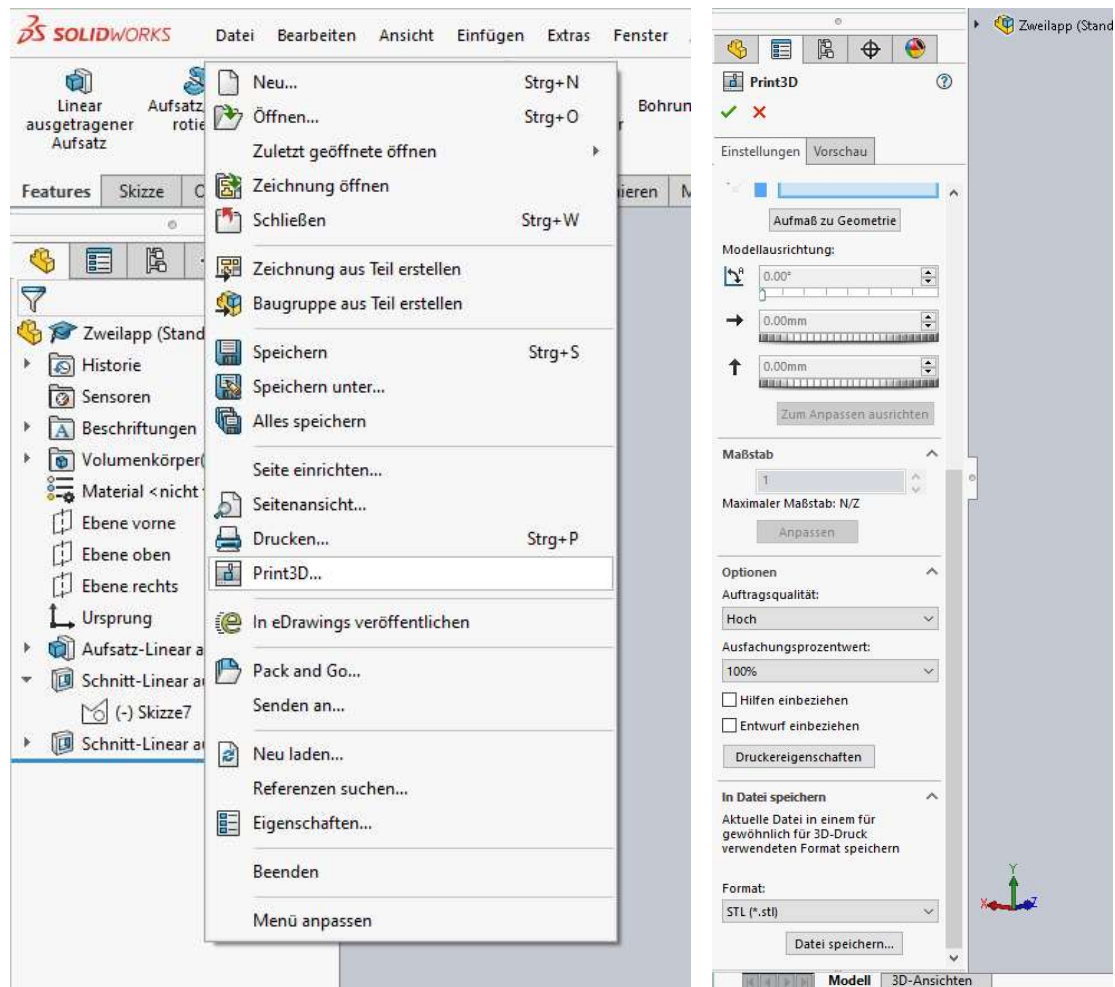


Eine erneute Skizze auf derselben Schnittfläche erlaubt das Versenken der Schraubenköpfe. Dazu werden konzentrisch zu den eben erstellten Löchern zwei weitere Kreise mit einem Durchmesser von 9 mm gezeichnet. Um nicht das gesamte Loch aufzuweiten, sondern eine Auflagefläche für den Kopf zu schaffen kann man bei der Funktion „Linear ausgetragener Schnitt“ unter dem Reiter „Von“ einen Offset wählen. Für Schrauben mit einer Gesamtlänge von 25 mm bieten sich 10 mm (auf jeder Hälfte +5 mm Mutternhöhe) an. Für die Konstruktion des Gegenstücks wird eine Kopie der Zeichnung mit „Speichern unter“ angelegt, bei der die 9 mm Kreise gegen Sechsecke mit einem Inkreisdurchmesser bzw. einer Schlüsselweite von 8.2 mm zu ersetzen sind. Es folgt der Export für den 3D-Druck.



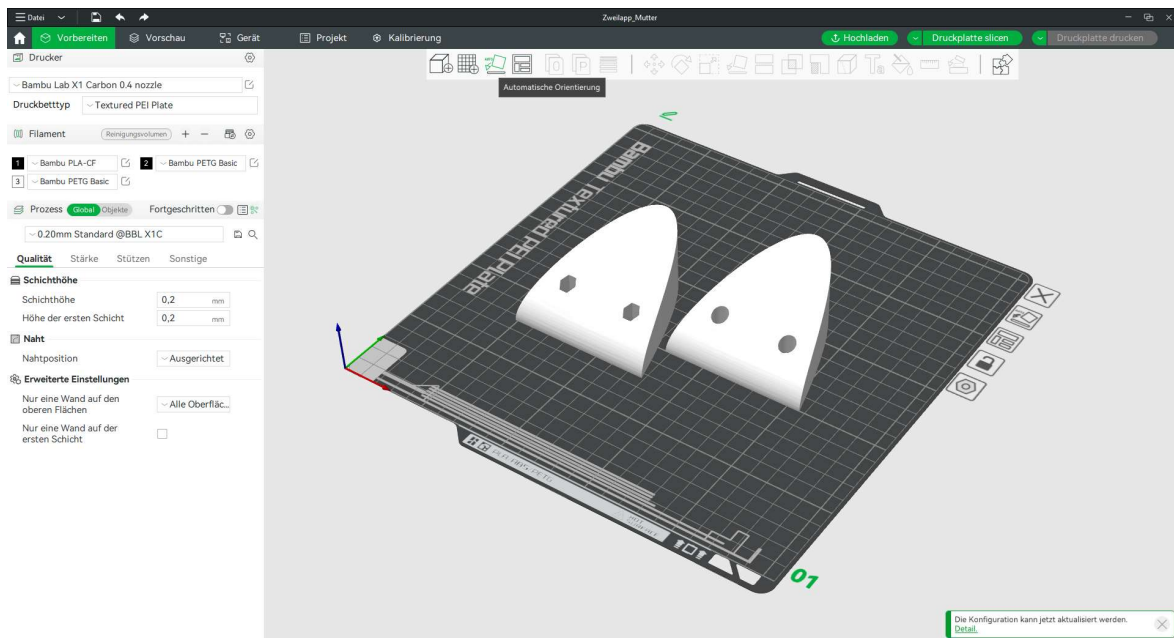
Export für den 3D-Druck

Auch für den Export gibt es bei SolidWorks eine eigene Funktion „Print3D“, die unter „Datei“ zu finden ist. Ganz unten im erscheinenden Sub-Menü kann man das gewünschte Format auswählen. Die voreingestellte Option STL („Stereolithografie“) hat sich in der Branche etabliert und ist daher im Hinblick auf die Kompatibilität eine gute Wahl. Trotzdem sollte man sich stets auch das SolidWorks-Original-Modell aufheben, da das nachträgliche Verändern einer sogenannten .stl-Datei – aufgrund der darin vorgenommenen Näherung des Körpers mittels Dreiecksfacetten und damit einhergehendem Verlust der Konstruktionsvorschriften – nicht ganz trivial ist.

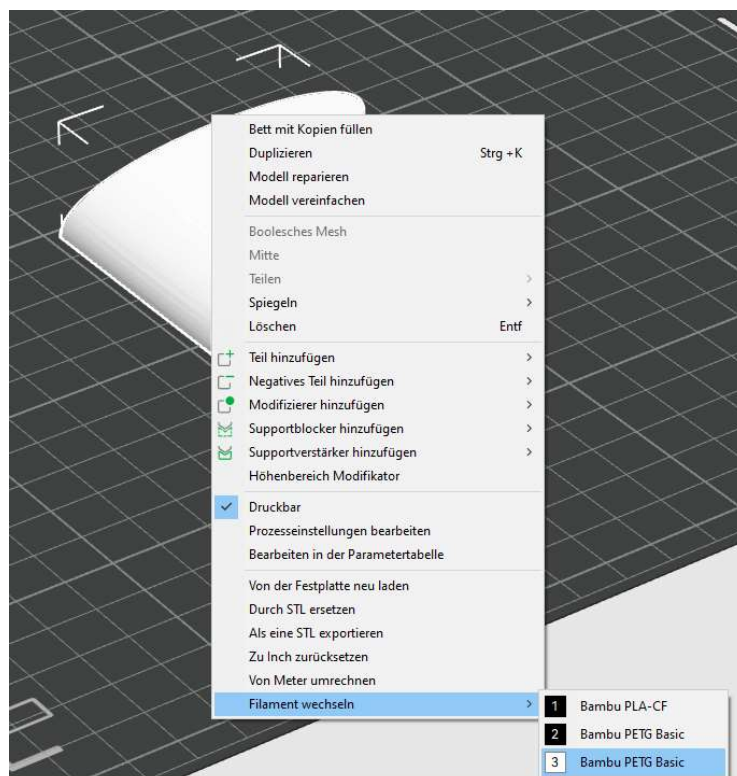


Hat man die .stl-Datei exportiert, kann man sie mit einem Slicer öffnen. Dieses Programm, meistens vom Hersteller in einer an den Drucker angepassten Version mitgeliefert, wandelt die rein geometrischen Informationen der .stl-Datei in Anweisungen für Motoren und Extruder des 3D-Druckers, den sogenannten G-Code (Geometric Code) um. Einer der sequentiell abgearbeiteten Befehle kann beispielsweise die Form `G1 X50 Y30 F2500` haben, was so viel bedeutet wie „fahre in einer geraden Linie auf die Position $x=50$, $y=30$ mit einer Geschwindigkeit von 2500 mm/min“. Darüber hinaus sind auch die materialspezifischen Informationen wie Extruder- und Druckbetttemperatur enthalten: `M104 S200 T0` (heize den Extruder T0 auf 200 °C auf) mit anschließendem `M109 S200 T0` (warte bis die Temperatur des Extruders T0 200 °C erreicht hat).

Hat man die .stl-Datei beispielsweise im Bambu-Studio (= Slicer-Software für 3D-Drucker der Firma Bambu Lab) geöffnet, bleibt aufgrund der meist ausgereiften Voreinstellungen für so gut wie jedes Material nicht mehr viel zu tun: Nach Auswahl des Körpers gilt es die beste Ausrichtung für den Druck zu finden. Dies kann durch manuelles Drehen geschehen, in der Regel gibt es mittlerweile allerdings schon eine Funktion, die den Körper automatisch optimal orientiert.



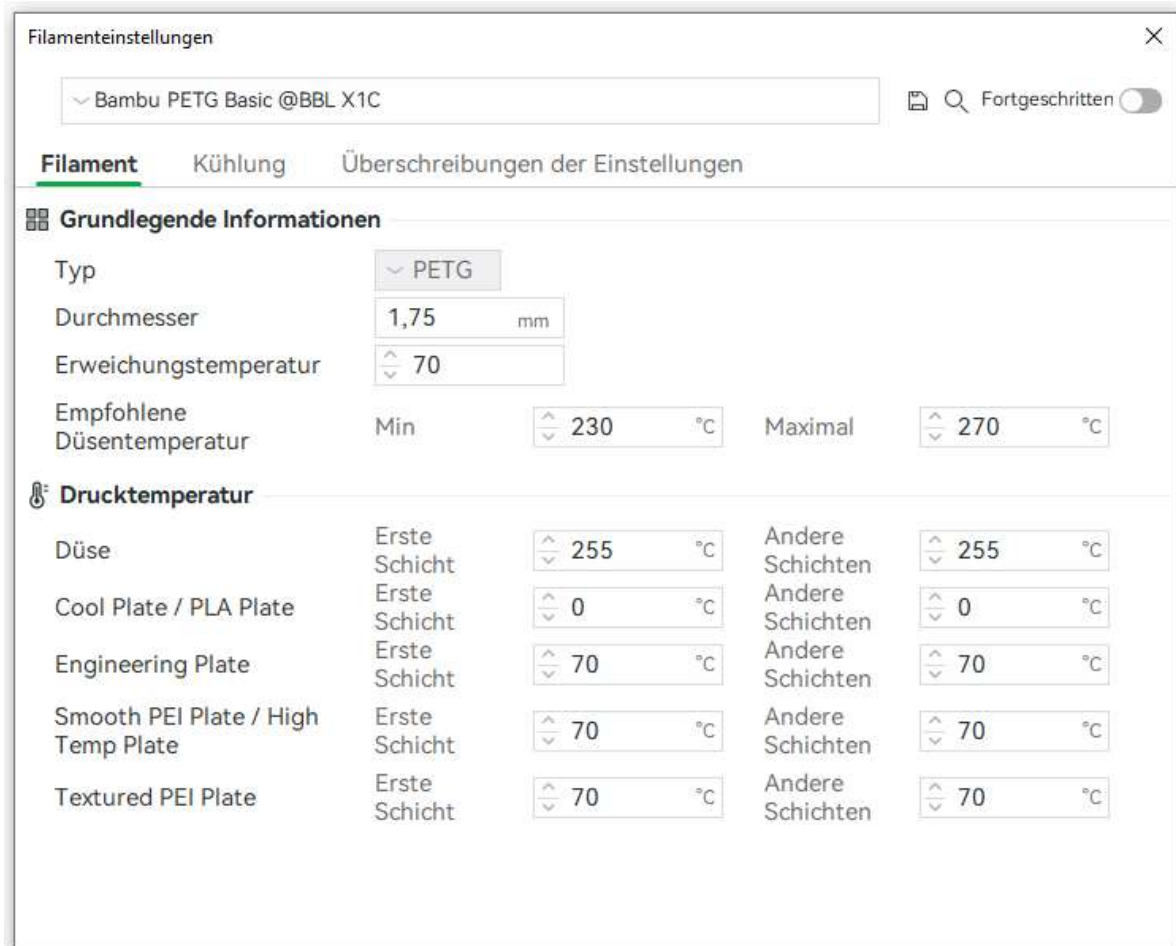
Nach einem Rechtsklick auf ein Objekt kann das Material ausgewählt werden, wodurch auch die entsprechenden Extruder- und Betttemperaturen geladen werden. Die Auswahl der richtigen Farbe im Slicer ist nur relevant, falls der Drucker über ein automatisches Materialsystem verfügt.



Grundsätzlich ist man damit fertig und kann durch einen Klick auf „Druckplatte slicen“ die begehrte G-Code-Datei für den Drucker erstellen. Der Vollständigkeit halber soll davor aber noch auf die wichtigsten Parameter eingegangen werden.

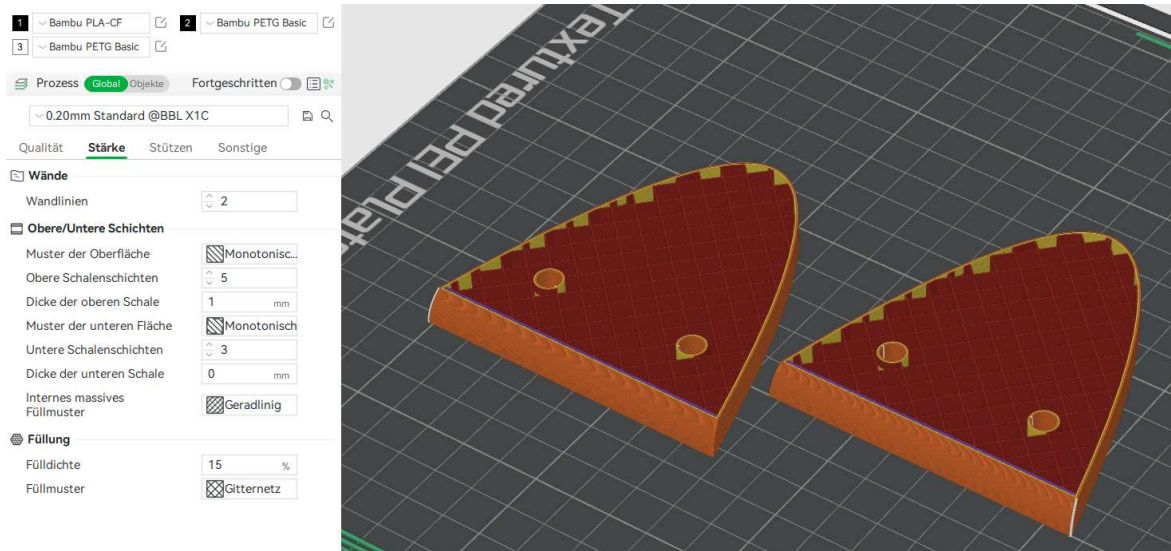
Druck-Parameter

Obwohl bei moderner Slicer-Software meist zugunsten ausgiebig getesteter Voreinstellungen in ein Sub-Menü ausgelagert, sind die Temperaturen von Extruder und Druckbett bei anspruchsvollen Objekten entscheidend für den Erfolg.



Wie so oft gilt es auch hier ein Optimum zu finden. Bei niedrigen Extruder-Temperatur kühlt der aus der Düse tretende Kunststoff schneller ab, wodurch das Durchhängen bei brückenartigen Überhängen reduziert wird. Gleichzeitig nimmt allerdings auch die Kohäsion zwischen den Schichten ab, weil die Energie zum oberflächlichen Aufschmelzen der darunterliegenden Schicht fehlt. Eine zu hohe Temperatur kann hingegen durch ein zu langsames Abkühlen und eine dadurch erhöhte Verformbarkeit des bereits gedruckten Teils die Maßhaltigkeit beeinträchtigen. Da die Entscheidung, das 2Lapp in zwei (gleichgroßen) Teilen herzustellen, genau darauf abgezielt hat gut druckbare Formen zu erhalten, sollten die voreingestellten Werte auf jeden Fall zum Erfolg führen.

Eine andere, vor allem für funktionale Elemente, beispielsweise ein Scharnier, wichtige Einstellung ist die Fülldichte und ggf. die Füllstruktur. Um Material zu sparen, wo es nicht zwingend erforderlich ist, werden 3D-Druck-Teile in der Regel nicht vollständig, sondern nur mit Stützstrukturen gefüllt. Als reines Deko-Element sind für das 2Lapp 15% Fülldichte erfahrungsgemäß ausreichend.



Der dritte erwähnenswerte Parameter ist die Schichtdicke. Insbesondere bei mäßig gekrümmten Flächen(abschnitten) – also genau bei dem 2Lapp – bestimmt sie die Haptik und das Aussehen der Oberfläche. Hier ist, im Bereich sinnvoller Werte [0.05, 0.5] mm (je nach Düsendurchmesser), eine Abwägung zwischen Druckgeschwindigkeit und Qualität zu treffen. Untenstehend sind zwei Beispiele für eine 0,4 mm und eine 0,2 mm Schichthöhe bei einem Düsendurchmesser von 0,4 mm.



Hat man die passenden Einstellungen ausgewählt wird nach dem Klick auf „Druckplatte slicen“ die G-code-Datei erstellt, welche entweder direkt über das Netzwerk oder mittels einer SD-Karte an den Drucker weitergegeben werden kann. Das Auswählen und Einlesen der Datei am Drucker sollte anschließend problemlos funktionieren, sodass man sich schon bald an seinem 2Lapp erfreuen kann.

