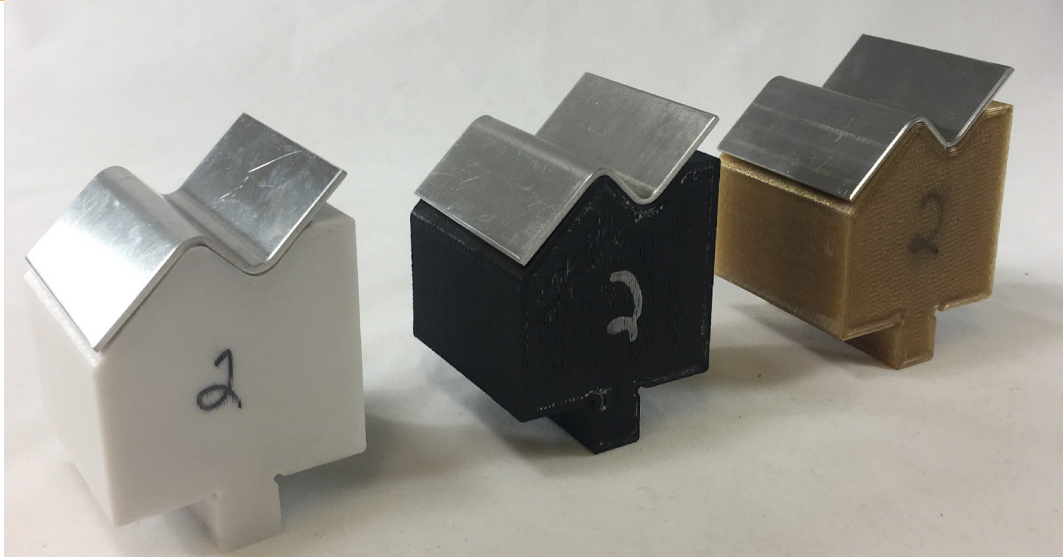


# Additive Fertigung für individuelle Metallform- werkzeuge



# Additive Fertigung für individuelle Metallformwerkzeuge

Dieses Whitepaper stellt die Ergebnisse einer Fallstudie vor, die den Einsatz von FDM® additiver Fertigung zur Herstellung von individuellen Blechformwerkzeugen vorsieht. Die Entwicklung und die Verarbeitungstechniken sind in diesem Anwendungsfall zwar recht spezifisch, können aber auf die meisten Anwendungsbereiche im Formwerkzeugbau für Metallverarbeitung übertragen werden.

## Abschnitt 1 – Anwendungsübersicht

Herkömmliche Abkantwerkzeuge werden aus typischerweise aus Stahlsorten wie A2, D2 oder 4140 hergestellt. Diese Werkzeuge sind in Standardformaten serienmäßig bei verschiedenen Herstellern (Wilson, Wila, Mate) erhältlich. Wenn jedoch ein individuelles Werkzeug erforderlich ist, nehmen Kosten und Vorlaufzeiten erheblich zu. Während des Konstruktionsprozess kommt es nach der Überprüfung der Passform und Funktion häufig zu Überarbeitungen. Durch diese Überarbeitungen kommen noch weitere Kosten und noch längere Vorlaufzeiten für ein ohnehin schon teures spezifisches Werkzeug hinzu.

Eine Möglichkeit, die Werkzeugkosten in dieser Entwicklungsphase möglichst gering zu halten, bietet die additive Fertigung zur Herstellung von Werkzeugen mit kundenspezifischer Geometrie. Additive Fertigung ermöglicht den Druck zahlreicher Iterationen von kundenspezifischen, komplexen Formen, ohne die Kosten und Vorlaufzeiten, die mit der Überarbeitung eines Metallwerkzeugs verbunden sind. Die Stratasys FDM-Technologie bietet die Möglichkeit, Drucke aus hochstabilen Thermoplasten zu erstellen, die dem Verformungsdruck für dünne Metallbleche standhalten. Additiv hergestellte Werkzeuge können als Produktionswerkzeug für Stückzahlen von 500 bis 1000 Stück verwendet werden, je nach Baumaterial, Form und Werkzeugmaterial. Für Volumen von mehr als 1000 Stück empfiehlt sich weiterhin der Einsatz von Standardmetallwerkzeugen.

# Additive Fertigung für individuelle Metallformwerkzeuge

## Abschnitt 2 - Individuelle Form vs. Standardbiegungen

Speziell angepasste Werkzeuge werden häufig für die Erstellung komplexer Formen verwendet, die mit herkömmlichen Werkzeugen für V-Matrizen-Abkantpressen nicht geformt werden können, wie in Abbildung 2-1 dargestellt. Zu solchen Formen gehören beispielsweise Stanzungen, Versatzbiegungen oder Rippen, die vornehmlich zur Aussteifung und Verstärkung eines Bauteils dienen, ohne zusätzliches Material dafür aufzuwenden.

### 2.1 Versatzbiegungen

Die in Abbildung 2-2 gezeigte Versatzbiegung wird auch als Joggle-Biegung bezeichnet. Diese Art der Biegung wird meist in der Metallblechfertigung verwendet, bei der zwei gegensätzliche Biegungen einander näher gebracht werden, als dies mit einem herkömmlichen V-Abkantwerkzeug möglich wäre.

Versatzbiegungen werden hauptsächlich dazu verwendet, einem Bauteil zusätzliche Steifigkeit zu verleihen oder einen Versatz für die Überlappung von zwei zusammengesetzten Teilen herzustellen. Versatzbiegungen weisen zwei große Vorteile auf. Einerseits sind sie genauer – der Versatz (Abstand zwischen den Biegungen) und die Winkel werden eher durch die Werkzeugform bestimmt und sind nicht allzu sehr durch die Spuren und den Kolben der Abkantpresse abhängig. Andererseits sind sie kostengünstiger, da sie Zykluszeiten verkürzen. Statt zwei einzelne Biegungen zu erstellen, werden beide Biegungen gleichzeitig in demselben Kolbenzyklus erstellt.

Es wird empfohlen, Versatzwerkzeuge mit einem Radius der 2-fachen Materialstärke des zu formenden Bauteils zu konstruieren. Kleinere Radien sind zwar möglich, führen jedoch zu einem schnelleren Verschleiß, da ein geringer Flächenbereich des Radius höheren Lasten ausgesetzt wird.

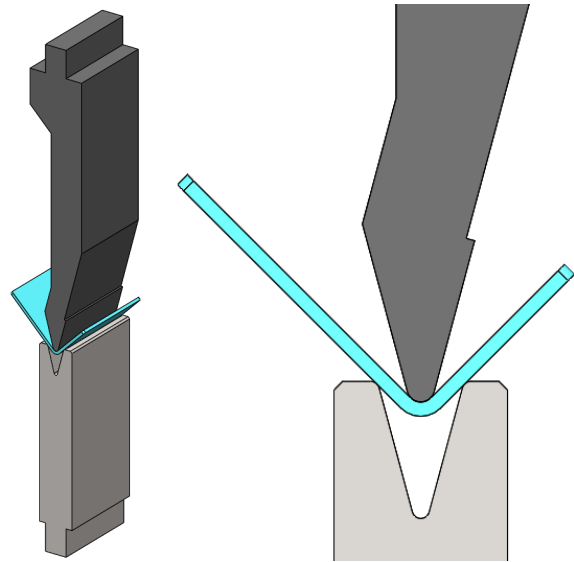


Abbildung 2-1: Werkzeug einer Standard-V-Abkantpresse

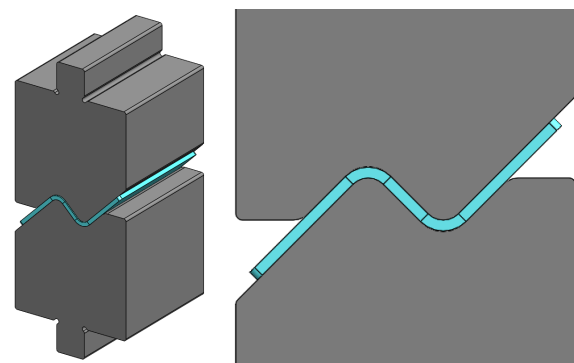


Abbildung 2-2: Versatzbiegewerkzeug



# Additive Fertigung für individuelle Metallformwerkzeuge

## 2.2 Rippen

Wie auch die Versatzbiegungen werden auch die Rippen genutzt, um Metallblechteilen zusätzliche Steifigkeit zu verleihen. Zu den herkömmlichen Formen gehören V-, Trapez- oder Rundquerschnitte (siehe Abbildung 2-3). Solche einzigartigen Formen können nicht mit einem traditionellen V-Abkantwerkzeug erstellt werden.

## 2.3 Versenkungen/Stanzungen

In der Luft- und Raumfahrt und der Automobilindustrie weisen Blechteile oft Bereiche auf, in denen Material zur Gewichtsreduzierung ausgespart wird. Formwerkzeuge, die der Form des Ausschnitts entsprechen, werden an diesen Stellen verwendet, um eine Vertiefung oder eine Aufweitung zur Wiederherstellung der Steifigkeit hinzuzufügen. Zwar sind solche Werkzeuge im Handel erhältlich, beschränken sich dabei aber auf die Standardformen und -größen und können für Hersteller sehr teuer ausfallen. Ein Vergleich: Das in Abbildung 2-4 gezeigte 2,5 Zoll-Stanzwerkzeug kann in 3,25 Stunden mit einem Materialaufwand von 58 US\$ aus Polycarbonat gedruckt werden. Ein serienmäßig erstelltes Werkzeug würde hingegen 130 US\$ kosten und müsste vom Anbieter erst geliefert werden. Durch den Einsatz additiver Fertigung können Standardformwerkzeuge und benutzerspezifischen Formen, wie beispielsweise die in Abbildung 2-4 und 2-5 gezeigten dreieckigen oder rechteckigen Stanzformen, schnell und kostengünstig erstellt werden.

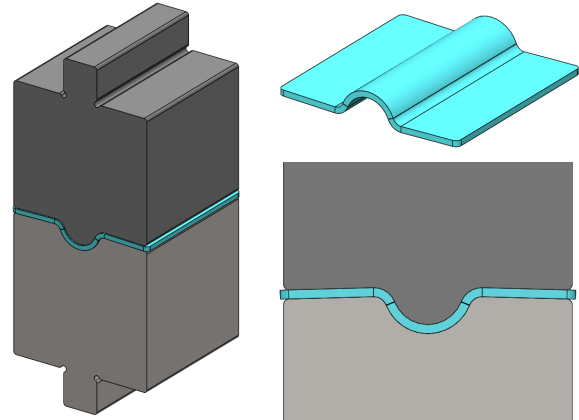


Abbildung 2-3: Rundaussteifungen



Abbildung 2-4: Benutzerspezifisches Stanzwerkzeug aus Polycarbonat

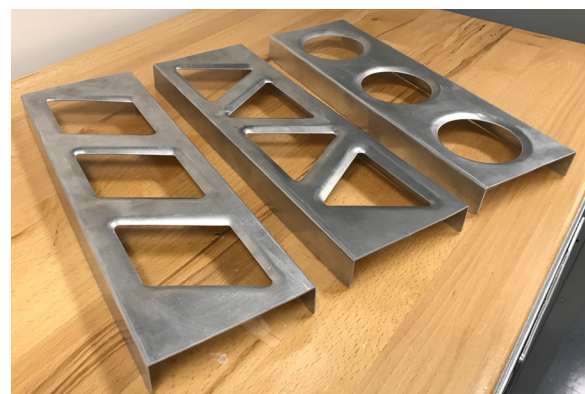


Abbildung 2-5: Beispiele für Formteile mit den in Abbildung 2-4 gezeigten Stanzwerkzeugen

# Additive Fertigung für individuelle Metallformwerkzeuge

## Abschnitt 3 – Materialempfehlungen und Verfahrenstechniken

### 3.1 Material

Die FDM-Technologie bietet die Möglichkeit, mit einer großen Auswahl an Thermoplasten mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften zu drucken. Bei FDM-Formwerkzeugen ist eine, bei der Materialauswahl zu berücksichtigende wichtige Eigenschaft, die Druckfestigkeit. Die Ausrichtung des Modells für den Druck ist genauestens zu berücksichtigen, da die Druckfestigkeit des Materials je nach Ausrichtung des Werkzeugs unterschiedlich ausfällt. Für Metallformwerkzeuge kann jedes FDM-Material eingesetzt werden; Stratasys empfiehlt jedoch FDM Nylon 12CF, Polycarbonate (PC), ULTEM™ 1010 Resin oder ULTEM™ 9085 Resin, da diese eine hohe Druckfestigkeit aufweisen.

### 3.2 Verarbeitung

Die Versatzkanten werden mit einer massiven Füllung und vier Konturen für besonders hohe Steifigkeit verarbeitet. Die Rasterwinkel und Konturen sind bei bestimmten Bauteilen des äußeren Werkzeugpfads parallel. Dadurch entsteht ein Luftspalt, da der Rasterwerkzeugpfad nicht genau mit der Kante der Kontur übereinstimmt. Um das zu korrigieren, wurde der Rasterwinkel auf 70° geändert (siehe Abbildung 3-1). Bei bestimmten Formen müssen Rasterwinkel und -breite gegebenenfalls angepasst werden, um Luftspalte im Werkzeug zu vermeiden.

Tabelle 3-1: Druckfestigkeit von FDM-Material in XZ- und ZX-Richtung

| Material          | Druckfestigkeit (in PSI) |        |
|-------------------|--------------------------|--------|
|                   | XZ                       | ZX     |
| PC                | 10.000                   | 9.200  |
| ULTEM™ 1010 Resin | 19.500                   | 15.100 |
| ULTEM™ 9085 Resin | 26.200                   | 13.100 |
| FDM® Nylon 12CF   | 9.670                    | 13.310 |

XZ = X or "on edge"

XY = Y or "flat"

ZX = or "upright"

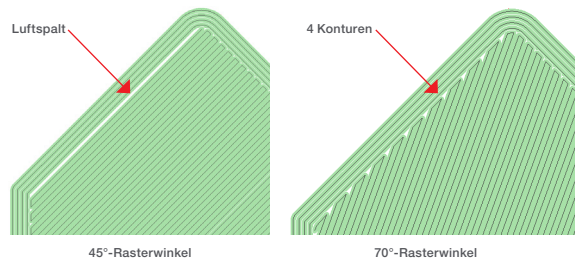
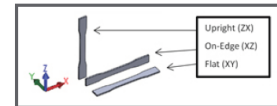


Abbildung 3-1: Luftspalt zwischen Raster und Kontur

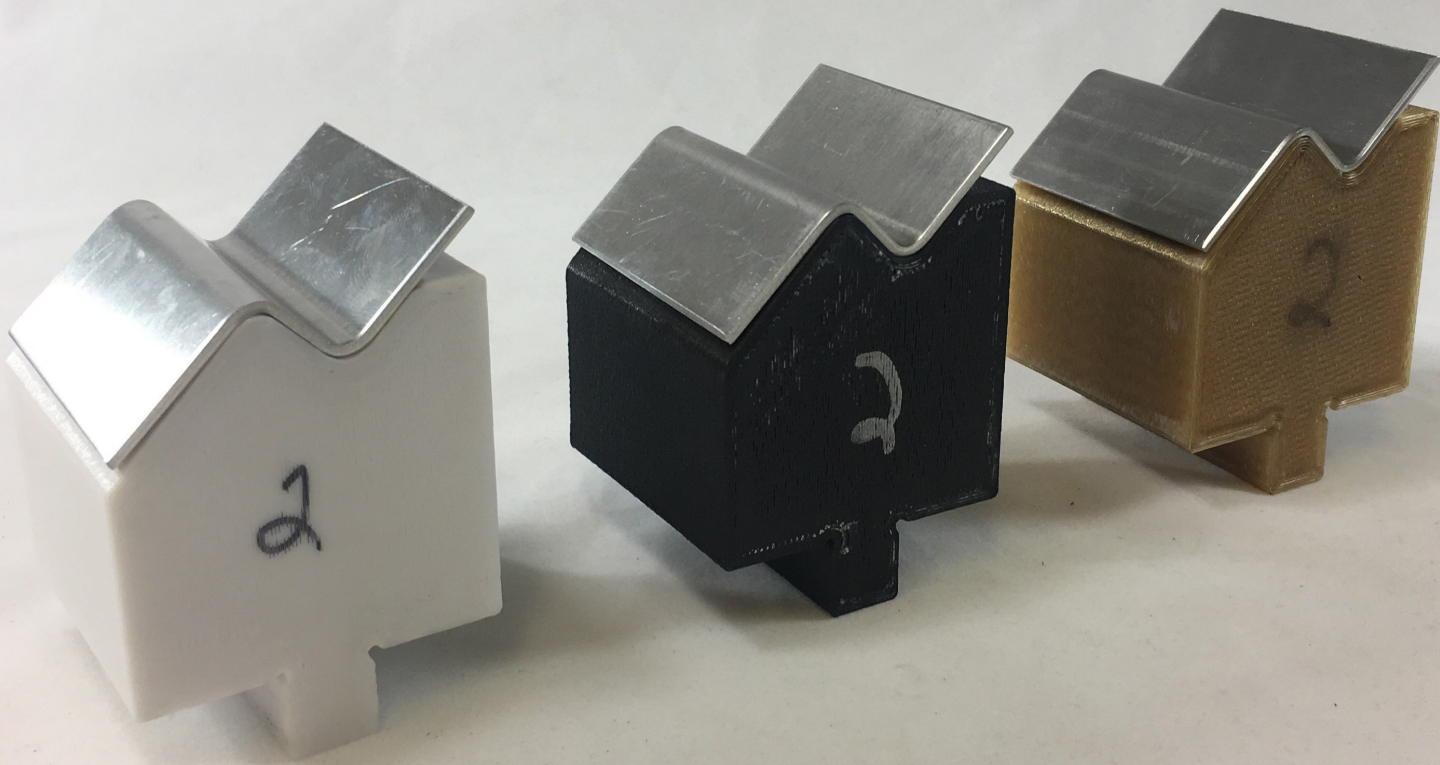


Abbildung 4-1: Versatzwerkzeuge aus PC, Nylon 12CF und ULTEM™ 1010 Resin.

## Abschnitt 4 – Testergebnisse

### 4.1 Versatzbiegewerkzeug – Aluminium

Die in Abbildung 2-2 gezeigten Versatzwerkzeuge wurden zu Testzwecken aus ULTEM™ 1010 Resin, Nylon 12CF und Polycarbonat gedruckt. Bei Einsatz in einer 60-Tonnen-Abkantpresse wurde jedes Werkzeug in 100 Zyklen bei einem Verformungsdruck von 6 Tonnen und einem Biegemaß von 16 (1,62 mm) für Aluminium 5052 eingesetzt. Die Teile 1, 50 und 100 wurden auf ihren Versatzabstand und -winkel mit einem Mikroskop der Bauart Keyence VHX 6000 vermessen. Sowohl Winkel als auch Versatz blieben während der gesamten Proben konsistent mit sehr geringen Abweichungen bei allen drei Materialien. In Abbildung 4-2 ist das 100. geformte Teil mit dem Werkzeug aus FDM Nylon 12CF zu sehen und in Tabelle 4-1 ist zu entnehmen, wie nah die gewünschten Messwerte an den Nennwerten lagen. Herkömmliche Toleranzen bei der Metallblechverarbeitung betragen  $\pm 1^\circ$  für Winkelmaße und  $\pm 1$  mm für Längenmaße. Die mit FDM-Werkzeugen geformten Bauteile liegen innerhalb dieser Toleranzen und zeigen ihr Anwendungsmöglichkeiten.

Tabelle 4-1: Teileabmessungen

|                | Nennwert | Messwert | Abweichung |
|----------------|----------|----------|------------|
| Winkel 1       | 90°      | 89,88°   | -0,12°     |
| Winkel 2       | 90°      | 89,57°   | -0,43°     |
| Versatzabstand | 15,88 mm | 15,88 mm | -0,3 mm    |

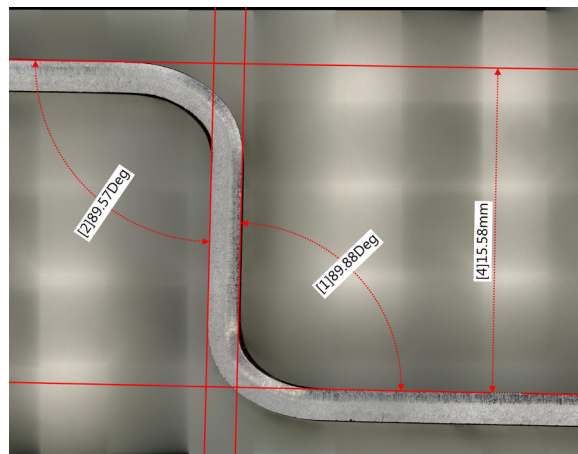


Abbildung 4-2: Teileabmessungen nach dem 100. verformten Teil



# Additive Fertigung für individuelle Metallformwerkzeuge

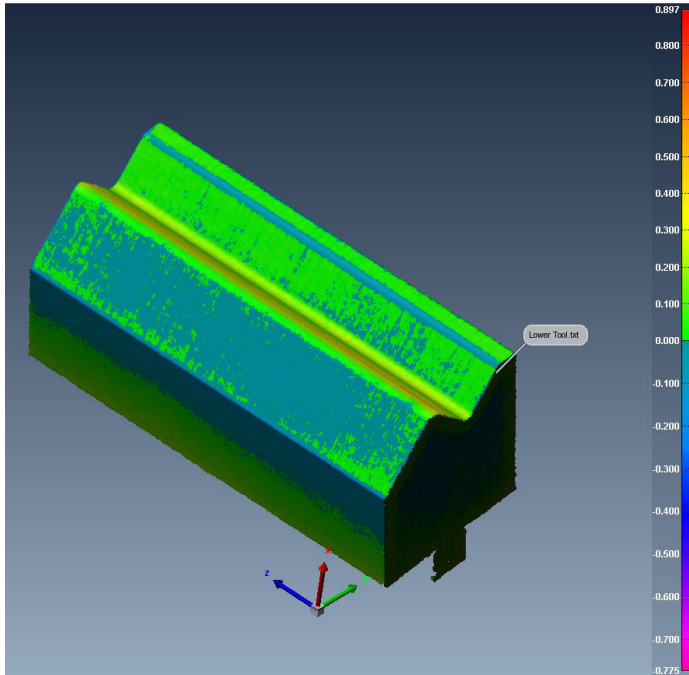


Abbildung 4-3: 3D-Scan eines gedruckten Werkzeugs

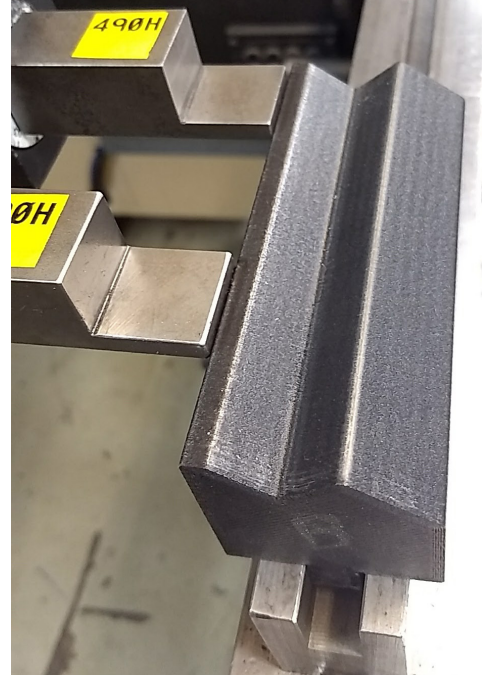


Abbildung 4-4: Gedrucktes Werkzeug in einer Abkantpresse

## 4.2 Versatzbiegewerkzeug – Stahl

In einem weiteren Testlauf wurden ähnliche Versatzformen mit einem Werkzeug aus FDM Nylon 12CF, allerdings mit einem Biegemaß von 16 (1,52 mm) und für kalt gewalzten Stahl, verwendet. Das Werkzeug wurde in 250 Zyklen bei einem Verformungsdruck von 90 kN (9 Tonnen) eingesetzt und jeweils nach 50 Zyklen mit einer CMM (Coordinate Measuring Machine) vermessen. Auch hier wies das Werkzeug keinen besonders hohen Verschleiß auf. Nur der Werkzeugradius wies Veränderungen in den Abmessungen auf. Er fing bei Testbeginn bei 3,2 mm an und verflachte sich leicht auf 3,6 mm – ein Verlust von etwa 12 %. Es erzeugte aber weiterhin dimensionsstabil geformte Bauteile. Ein 3D-Scan des Werkzeugs nach 250 Zyklen ergab gegenüber den Nenn-CAD-Daten bestätigte Dimensionsabweichungen von 0,4 mm, die durch CMM-Messungen festgestellt wurden.

Tabelle 4-2: Teileabmessungen

|                | Nennwert | Messwert<br>(250 Zyklen) | Abweichung |
|----------------|----------|--------------------------|------------|
| Winkel 1       | 104,84°  | 105°                     | 0,16°      |
| Winkel 2       | 104,84°  | 105,5°                   | 0,66°      |
| Versatzabstand | 19,05 mm | 18,59 mm                 | 0,46 mm    |

## Abschnitt 5 – Abwägungen

### 5.1 Lastauslegung

Die folgenden Werkzeuge wurden einem Verformungsdruck zwischen 50 und 100 kN (5 – 10 Tonnen) ausgesetzt und wiesen im belasteten Zustand keinerlei Probleme auf. Bitte beachten Sie dabei, dass sich der höchste Nenndruck einer Abkantpresse nach der Länge und der Verformung des Flächenbereichs richtet. Unter Berücksichtigung der beiden oben genannten Beispiele beträgt die Nennkraft pro Längen dieser Werkzeuge 0,8 – 1,2 kN/mm für höchste Lastbedingungen. Diese allgemein gültige Daumenregel kann für ähnliche aus Polycarbonat, FDM Nylon 12CF oder ULTEM™ 1010 Resin gedruckten Werkzeugen angewendet werden.

### 5.2 Maximale Materialdicke und Zyklen

Aluminium und Stahl sind die einzigen, im Rahmen der vorliegenden Fallstudie untersuchten Materialien. Es gibt noch eine Menge anderer Metalle, die mithilfe von Werkzeugen aus der additiven Fertigung verformt werden können. Die folgende Tabelle ist eine allgemeine Richtlinie für die maximalen Dicken, die in erheblichen Mengen erfolgreich umgeformt werden könnten. Möglicherweise können noch größere Abmessungen realisiert werden; allerdings richtet sich das nach der Art des zu verformenden Materials und der geometrischen Form des Werkzeugs.

Die Höchstanzahl der Zyklen, in denen Werkzeuge verwendet werden können, richten sich nach dem zu verformenden Material und der geometrische Form des Werkzeugs. Die o. g. Beispiele lagen bei 100 – 250 Zyklen und stellen eine gute Grundlage dar. Es ist zu erwarten, dass die Höchstzahl der Zyklen etwa bei 500 liegt. Unter bestimmten Umständen kann die Werkzeuglebensdauer bis zu 750 Zyklen erreichen. Ab 750 Stück empfiehlt sich

weiterhin der Einsatz von Metallwerkzeugen.

### 5.3 Rückfederungskompensation

Bei der Rückfederungskompensation ist genauso vorzugehen, wie beim Biegen von Metallblechen mit Metallwerkzeugen. Werkzeuge sollten entsprechend konstruiert sein, so dass Teile mit dem gedruckten Werkzeug überbogen werden können und dann auf das gewünschte Winkelmaß zurückfedern. Das richtet sich stets nach der Art

**Tabelle 5-1: Maximale Materialdicke**

| Material  | Stärkebereich |
|-----------|---------------|
| Stahl     | Bis zu ~2 mm  |
| Edelstahl | Bis zu ~2 mm  |
| Aluminium | Bis zu ~3 mm  |

**Tabelle 5-2: Werte für Rückfederung**

| Material             | Rückfederungs-kompensation (Grad) |
|----------------------|-----------------------------------|
| Edelstahl 304        | 2 - 3                             |
| Weiches Aluminium    | 1,5 - 2                           |
| Kalt gewalzter Stahl | 0,75 - 1                          |
| Warm gewalzter Stahl | 0,5 - 1                           |
| Kupfer und Messing   | 0 - 0,5                           |

des Materials und dem Biegewinkel, aber ein paar allgemeine Leitlinien sind in Tabelle 5-1 angeführt.

### Fazit

Metallformwerkzeuge aus additiver Fertigung sind eine mögliche Option für das Ausformen einzigartiger und benutzerspezifischer Formen bei einem Fertigungsvolumen von 100 – 500 Zyklen. FDM-Werkzeugbau eignet sich auch für Versatz- und Stanzwerkzeugen für dünnere Metallbleche. Es bietet erhebliche Zeit- und Kosteneinsparungen gegenüber herkömmlichen gekauften Metallformwerkzeugen

## HAUPTNIEDERLASSUNGEN

7665 Commerce Way,  
Eden Prairie, MN 55344 USA  
+1 952 937 3000 (international)  
+1 952 937 0070 (Fax)

1 Holtzman St., Science Park, PO Box 2496  
Rehovot 76124, Israel  
+972 74 745 4000  
+972 74 745 5000 (Fax)

stratasys.com  
Zertifiziert nach ISO 9001:2015

Stratasys GmbH  
Airport Boulevard B120  
77836 Rheinmünster, Deutschland  
+49 7229 7772-0  
+49 7229 7772 990 (Fax)

