

# Additiv oder subtraktiv – eine wirtschaftliche Betrachtung

D. Nikolay<sup>1</sup>, W. Kollenberg<sup>1</sup>

**Kurzfassung:** Als ein Vorteil der additiven Fertigung werden geringere Kosten bei der Herstellung von Einzelteilen und kleinen Stückzahlen genannt. In diesem Beitrag wird untersucht, unter welchen Bedingungen additiv gefertigte Bauteile günstiger oder teurer als konventionell hergestellte Bauteile sind. Dazu werden zwei unterschiedliche Bauteile mit zwei verschiedenen Herstellungsverfahren, der CNC-Bearbeitung und der Vat Photopolymerisation, auf ihre Wirtschaftlichkeit hinsichtlich der Parameter Herstellzeit, Herstellkosten und Materialeffizienz untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Vorteile der additiven Fertigung dann voll ausgeschöpft werden, wenn Bauteile effizient und komplex gestaltet werden.

**Abstract:** One of the advantages of additive manufacturing is the cost benefit in the production of individual parts and small batches. In this paper it is investigated under which conditions additive manufactured components are cheaper or more expensive than conventionally manufactured components. For this purpose, two different components produced with two production methods, CNC machining and Vat photopolymerization, are examined with regard to their economic efficiency in terms of production time, production costs and material efficiency. The results show that the advantages of additive manufacturing are fully exploited when components are designed efficiently and complex.

**Keywords:** Additive Fertigung, subtraktive Fertigung, CNC-Bearbeitung, Vat Photopolymerisation, Wirtschaftlichkeit

## 1. Einleitung

Zu den Vorzügen der additiven Fertigung wird allgemein der Kostenvorteil bei der Herstellung von Einzelteilen und kleinen Losgrößen gezählt. Hier ist der Wegfall der Werkzeugkosten der ausschlaggebende Faktor. Die Beschaffungskosten von Werkzeugen werden erst bei genügend großen Stückzahlen refinanziert. Ein weiterer Vorteil ist, dass keine Wartezeit auf die Lieferung des Werkzeugs die rasche Fertigung behindert. Die Formgebungsverfahren, die den Einsatz von Werkzeugen erfordern (Pressen, Spritzguss, usw.), werden zusammenfassend als formative Verfahren bezeichnet. Auf diese Verfahren bezieht sich auch die häufig zitierte Darstellung der Kosten in Abhängigkeit von der Stückzahl (Bild 1). Sie veranschaulicht qualitativ, dass ab einer bestimmten Losgröße die Kosten von Werkzeugen nicht mehr den prägenden

Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Formgebung haben.

Neben formativen und additiven Verfahren gibt es aber auch die subtraktiven Verfahren. Hierunter sind unter anderem Verfahren wie Drehen, Schleifen, Fräsen oder Bohren zu verstehen. Diesen ist gemeinsam, dass durch den Abtrag von Material die endgültige Kontur des Bauteils entsteht. Der Vorteil dieser Technik ist, dass sehr schnell aus einem Halbzeug auf Basis von CAD-Daten ein Bauteil angefertigt werden kann. Nachteilig ist dagegen der bei der Bearbeitung erzeugte Abfall (zerspantes Material, das als Schleifstaub entsorgt wird sowie Reststücke, die meist nicht weiterverwendet werden können), durch den die Materialeffizienz sehr ungünstig ausfällt. Gegenüber der spanenden Bearbeitung von Metallen, wo die Späne standardmäßig recycelt werden, muss bei der Keramik der Schleifstaub entsorgt werden.

Bei der Bearbeitung von Keramiken wird zwischen Grün-, Weiß- und Hartbearbeitung unterschieden. Die Hartbearbeitung nach dem Sinterprozess wird meist eingesetzt, um Bauteile in die geforderten maßlichen Toleranzen zu bringen. Die Grünbearbeitung erfolgt an ungebrannten Halbzeugen, die meist isostatisch gepresst sind. Die Weißbearbeitung nimmt eine Zwischenstellung ein: Hierzu werden die Halbzeuge vorgesintert, so dass sie eine kreideähnliche Festigkeit erhalten. Bei Grün- und Weißbearbeitung muss die Schwindung beim Sintern berücksichtigt und der Formkörper mit Aufmaß hergestellt werden.

Die Fertigung von Zahnersatz aus  $ZrO_2$  mittels Weißbearbeitung zeigt, dass die Bearbeitung ein wirtschaftlicher Prozess sein kann. Hier werden individuelle Produkte serienmäßig gefertigt. Durch einen hohen Digitalisierungsgrad der gesamten

## Autoren



DR. DIETER NIKOLAY (d.nikolay@wzr.cc) arbeitet seit 2001 bei der WZR ceramic solutions GmbH in unterschiedlichen Positionen. Aktuell leitet er im Bereich Engineering die Entwicklung und Produktion. Seit 2013 ist er zudem Lehrbeauftragter für „Additive Fertigung keramischer Bauteile“ an der Hochschule Koblenz, Fachbereich Werkstofftechnik Glas und Keramik in Höhr-Grenzhausen.



PROF. DR. WOLFGANG KOLLENBERG (w.kollenberg@wzr.cc) promovierte 1984 an der RWTH Aachen und habilitierte 1992 an der TU Berlin. Von 1979 – 1987 arbeitete er an der RWTH Aachen und von 1987 – 1990 bei dem Projektträger im Forschungszentrum Jülich. Von 1990 – 1996 war er in Leitungsfunktionen beim Deutschen Institut für Feuerfest und Keramik GmbH tätig. 1996 schloss sich die Gründung der WZR ceramic solutions GmbH an, die er als Geschäftsführender Gesellschafter leitet.

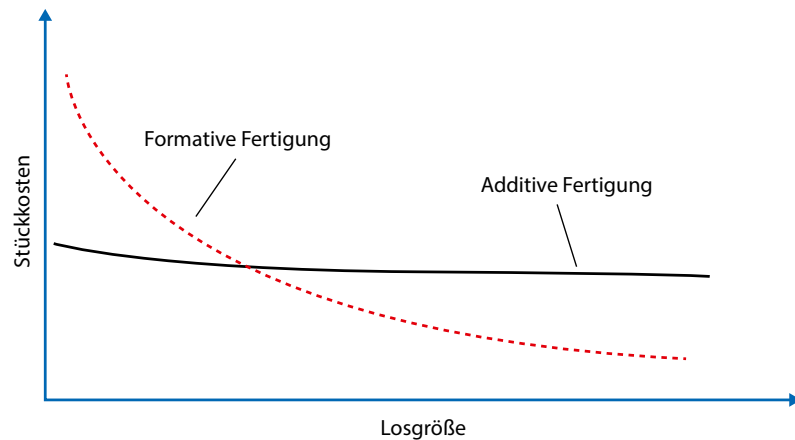


Bild 1 Qualitativer Zusammenhang zwischen Stückkosten und Losgröße (© WZR)

Prozesskette ist eine kostengünstige Fertigung möglich, selbst wenn nur ein Bruchteil des Halbzeugs tatsächlich für Produkte verwendet und der überwiegende Rest entsorgt wird.

Additive und subtraktive Fertigung sind also grundsätzlich eine kostengünstige Alternative zur Herstellung von Einzelteilen und keramischen Bauteilen in kleiner Losgröße. Im Folgenden sollen beide Verfahren unter wirtschaftlichen Aspekten vergleichend betrachtet werden. Die grundlegenden Überlegungen werden durch konkrete Beispiele und Preisvergleiche ergänzt.

## 2. Subtraktive Fertigung

Unter dem Begriff subtraktive Fertigung werden alle Bearbeitungsprozesse wie Drehen, Fräsen, Schleifen oder Bohren zusammengefasst, denen gemein ist, dass der Formkörper durch Entfernen von Material entsteht. In der Regel werden dazu 3- oder 5-Achs-CNC-Bearbeitungsmaschinen eingesetzt. Während für die Hartbearbeitung Diamantwerkzeuge eingesetzt werden, reichen für die Grün- und Weißbearbeitung meist konventionelle Fräswerkzeuge aus. Um die Geometrie des Bauteils in den Bearbeitungsprozess zu übertragen, müssen die CAD-Daten des Bauteils im CAM-System bearbeitet werden. Hier werden die zu verwendenden Werkzeuge und alle Prozessschritte (Werkzeug-Drehzahl, Bewegungsrichtung und Verfahrensgeschwindigkeit, Zustellung, usw.) festgelegt und die Werk-

zeugbahnen definiert. Im Falle der Grün- und Weißbearbeitung ist das Aufmaß zur Kompensation der Schwindung einzurechnen. Am Ende wird der Code für den gesamten Bearbeitungsprozess erstellt und als CAM-Programm an die Maschine geschickt.

Die für die Grün- oder Weißbearbeitung eingesetzten Halbzeuge müssen homogen und frei von Rissen und Poren sein. Die notwendige Qualität wird durch isostatisches Pressen erzielt. Im Bereich der Halbzeuge für Dentalanwendungen („Blanks“) hat es sich etabliert, dass Scheiben axial gepresst und anschließend isostatisch nachverdichtet werden. Um die ausreichende Festigkeit des Grünlings zu gewährleisten, werden entsprechende Additive bei der Formgebung zugesetzt. Während der Bearbeitung dürfen keine zu großen Spannungen auf den Grünling wirken, da ansonsten Risse induziert werden, die möglicherweise erst nach dem Sintern auftreten und schlimmstenfalls im Einsatz zum Versagen des Bauteils führen.

Voraussetzung für eine gute Oberflächenqualität ist die Verwendung feinsten Pulver, da bei der Grün- und Weißbearbeitung nur ganze Partikel abgetragen werden können. Werden alle Anforderungen beachtet, können bei der Grünbearbeitung Endmaßtoleranzen im Bereich der DIN 2768m (Tabelle 1) nach dem Sintern erzielt werden [1].

Für die Weißbearbeitung werden die Halbzeuge soweit gesintert, dass eine Verfestigung ohne Eintritt der Schwindung erzielt wird. Diese Vorsintertemperatur liegt bei

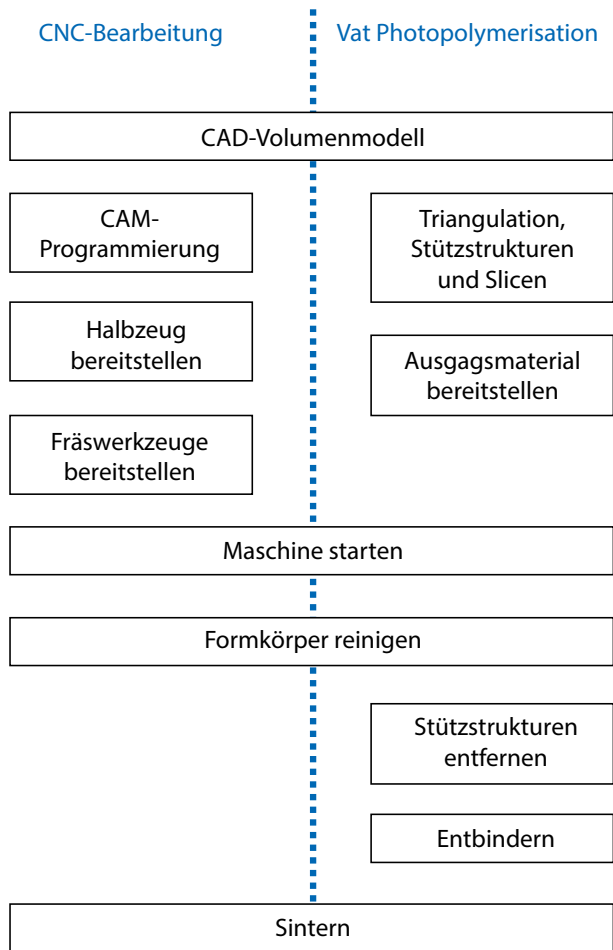


Bild 2 Vergleich der Prozesse: CNC-Bearbeitung und Vat Photopolymerisation (© WZR)

mit selektiver Verfestigung zählen Vat Photopolymerisation und Binder Jetting, zu den Verfahren mit selektiver Abscheidung Material Extrusion und Material Jetting. Die hier gewählte Terminologie entspricht dem international verbindlichen Standard ISO/ASTM 52900:2018.

Die additive Fertigung folgt im Allgemeinen einer Prozesskette, deren Grundlage ein CAD-Volumenmodell ist. Die äußere Geometrie wird durch Triangulation abgebildet. Die so erzeugten Daten werden standardmäßig im STL-Format gespeichert. Als notwendige Voraussetzung für die Fertigung wird das Geometriemodell anschließend mathematisch in Schichten gleicher Stärke zerlegt. Dieser Vorgang wird als „Slicen“ bezeichnet. Jede dieser Schichten beinhaltet demnach eine 2,5-dimensionale Geometrieinformation für das Bauteil. Die nach dem Modell rechnerisch erzeugten Schichten werden anschließend auf der entsprechenden Maschine physikalisch realisiert. Diese Vorgehensweise eröffnet die Möglichkeit, sehr komplexe Geometrien herzustellen. Ein wesentlicher Einfluss auf die Oberflächenqualität und Maßhaltigkeit wird durch die Schichtdicke vorgegeben. Diese variiert je nach Verfahren zwischen  $\leq 10 \mu\text{m}$  und  $\geq 100 \mu\text{m}$ .

Für den hier durchgeführten Vergleich wurde das Verfahren Vat Photopolymerisation ausgewählt. Grundlage des Verfahrens sind Polymere, die mit Licht aushärten. Für keramische Prozesse werden Pulver mit Photopolymeren zu einer viskosen Paste gemischt. Der Aufbau des Formkörpers erfolgt durch lagenweise Belichtung. Nach der Fertigung des Grünlings erfolgt ein Entbinderungsprozess, der mehrere Tage in Anspruch nimmt. Nach dem Sintern erhält

ZrO<sub>2</sub>-Halbzeugen zur Herstellung von Zahnrestorationen bei 900 °C bis 1050 °C. Die Temperatur wird vom Pressdruck bei der Herstellung der Halbzeuge beeinflusst. Übliche Härtewerte der Weißlinge liegen bei 3 – 5 GPa [2]. Die erreichbaren Endmaßtoleranzen liegen im Bereich der DIN 2768f (Tabelle 1).

### 3. Additive Fertigung

Die unterschiedlichen Verfahren der additiven Fertigung haben gemeinsam, dass der Aufbau des Formkörpers schichtweise erfolgt und das Ausgangsmaterial entweder flächig aufgebracht und selektiv verfestigt, oder selektiv in Form von Tropfen oder Strängen abgelegt wird. Zu den Verfahren

Tabelle 1 Grenzabmaße für Längenmaße nach DIN 2768 (Auszug) [1] (© WZR)

Toleranzklasse	Grenzabmaße [mm] für Nennmaßbereich [mm]				
	0,5 – 3	> 3 - 6	> 6 - 30	> 30 - 120	> 120 - 400
f (fein)	± 0,05	± 0,05	± 0,10	± 0,15	± 0,20
m (mittel)	± 0,10	± 0,10	± 0,20	± 0,30	± 0,50
c (grob)	± 0,20	± 0,30	± 0,50	± 0,80	± 1,20
v (sehr grob)	-	± 0,50	± 1,00	± 1,50	± 2,50

man Bauteile mit einer guten Oberfläche und einem dichten Gefüge. Die Eigenschaften sind mit konventionell gefertigten Bauteilen vergleichbar [3].

#### 4. Vergleich der Prozesse

Um die im Folgenden vergleichend dargestellten Kosten nachvollziehen zu können, ist es notwendig die beiden Prozesse CNC-Bearbeitung und Vat Photopolymerisation zu vergleichen. In Bild 2 sind die einzelnen Prozessschritte skizziert. Beide Verfahren benötigen eine digitale Vorbereitung. Im Falle der Bearbeitung muss, basierend auf den CAD-Daten, die CAM-Programmierung durchgeführt werden. Der Aufwand ist deutlich größer im Vergleich zur weitgehend automatisierten Datenvorbereitung für die additive Fertigung. Ein Prozessschritt der nur für die CNC-Bearbeitung zutrifft, ist die Überprüfung und Bereitstellung der Fräswerkzeuge. Bei der Vat Photopolymerisation müssen im Vorfeld der Herstellung Stützstrukturen ergänzt werden, die das Bauteil im Herstellungsprozess stützen und an der Bauplattform befestigen. Ähnlich wie bei der CAM-Programmierung im Falle der CNC-Bearbeitung unterstützt auch hier die Maschinensoftware, ebenfalls muss auch hier durch den Bediener eingegriffen und ergänzt werden. Die Stützstrukturen werden nach dem Bauprozess meist manuell wieder entfernt. Die Entbinderung der additiv gefertigten Bauteile verlängert die Lieferzeit deutlich.

Für den nachfolgenden Vergleich wird davon ausgegangen, dass die Grünbearbeitung mit einer 5-Achs CNC-Fräse durchgeführt wird, die Herstellung mittels Vat Photopolymerisation erfolgt mit einer CeraFab 7500 von Lithoz. Es werden zwei Bauteile vorgestellt, die jeweils mittels Grünbearbeitung und alternativ mittels Vat Photopolymerisation hergestellt werden sollen. Als Werkstoff wird  $Al_2O_3$  mit einer Reinheit von > 99 % genutzt, also ein C799 (Bezeichnung nach DIN EN 60672).

##### 4.1. Beispiel 1: Bauteil „Düse“

Dieses Bauteil ist ein klassisches Frästeil, das auch mit einer einfachen 3-Achs Bearbeitungsmaschine hergestellt werden könnte.

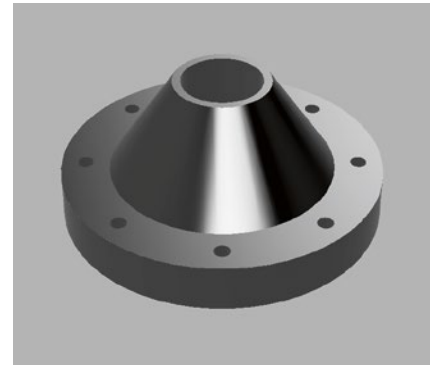
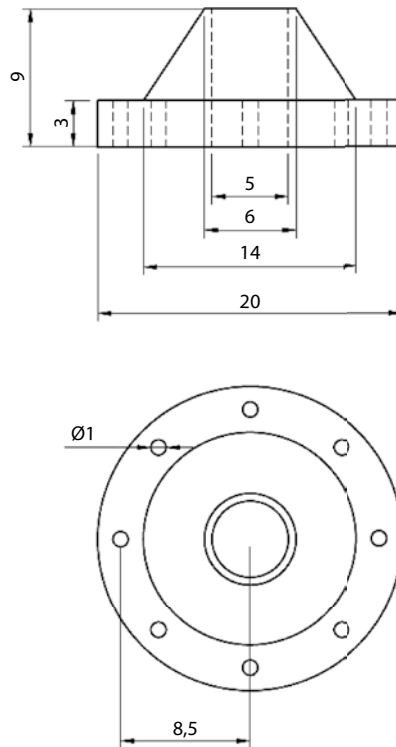


Bild 3 Bauteil „Düse“, links: Auszug aus der technischen Zeichnung, rechts: Ansicht der CAD-Daten (© WZR)

Die Konstruktion erfolgte wie für Metallteile üblich, es wurden keine keramischen Konstruktionsrichtlinien berücksichtigt, wie es oftmals gängige Praxis ist. Das Teil hat einen Durchmesser von 20 mm und eine Höhe von 9 mm. In Bild 3 sind links Auszüge aus der technischen Zeichnung und rechts eine Ansicht der CAD-Daten zu sehen.

Die Kalkulation der Herstellkosten in Abhängigkeit von der Stückzahl zeigt für die CNC-Bearbeitung eine Abnahme der Teilkosten von 526 € bei einer Stückzahl von eins

über 140 € bei einer Stückzahl von zehn bis zu 106 € bei einer Stückzahl von 50. Wird das Bauteil mittels Vat Photopolymerisation hergestellt, kostet ein Stück 351 €, zehn kosten 207 € und 50 Stück kosten 191 €. In Bild 4 sind die Stückkosten in Abhängigkeit von Stückzahl und Fertigungsverfahren aufgetragen: der Break-Even liegt hier unterhalb von zehn Teilen, bei geringerer Stückzahl ist die Herstellung mittels Vat Photopolymerisation günstiger, bei größerer Stückzahl ist sie günstiger mittels CNC-Bearbeitung.

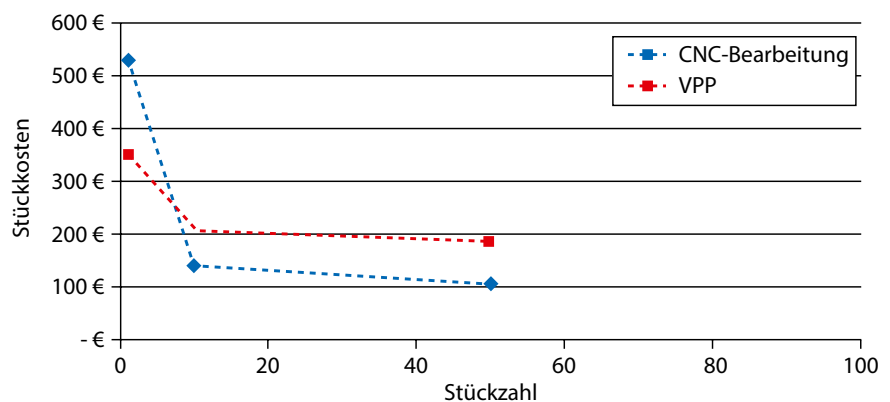


Bild 4 Bauteil „Düse“, Stückkosten in Abhängigkeit von Stückzahl und Herstellungsverfahren. Blau: CNC-Bearbeitung, rot: Vat Photopolymerisation (VPP) (© WZR)

Der Vergleich der Herstellzeiten wurde für die Stückzahl zehn betrachtet: für die CNC-Bearbeitung wurde für die CAM-Programmierung und das Fräsen von zehn Teilen ein Tag veranschlagt, das Brennen der Teile kann innerhalb von zwei Tagen erfolgen, sodass sich eine Gesamtbearbeitungsdauer von drei Tagen ergibt. Bei Nutzung der Vat Photopolymerisation kann die Herstellung von zehn Teilen ebenfalls innerhalb von einem Tag erfolgen, das Reinigen und Entbindern erfordert sechs Tage, das Sintern kann ebenfalls innerhalb von zwei Tagen erfolgen. Damit resultiert eine Gesamtbearbeitungsdauer von neun Tagen.

Neben Herstellkosten und -dauer ist die Materialeffizienz, also das Verhältnis von verwendetem Rohmaterial zu fertigem Bauteil, ein wichtiger Parameter zur vergleichenden Bewertung von Herstellungsverfahren. Bei der CNC-Bearbeitung wurde davon ausgegangen, dass ein Halbzeug mit den exakten Außenmaßen des Bauteils genutzt wird. In der Praxis ist das selten der Fall, da meist auf vorhandene Formen zur Halbzeugherstellung zurückgegriffen werden muss. Die Wahl fällt dann auf das Halbzeug mit dem geringsten Übermaß. Bei der Vat Photopolymerisation wurde angenommen, dass eine Materialausnutzung von 100 % möglich ist. Diese Annahme ist ebenso idealisiert, da meist Stützstrukturen hergestellt werden müssen und Material bei der Reinigung verloren geht.

Das Halbzeug zur Herstellung der Düse hat ein Bauteilvolumen von  $2,83 \text{ cm}^3$ . Die Düse selbst hat ein Bauteilvolumen von  $1,24 \text{ cm}^3$ , was einer Materialausnutzung von 44 % und einem zerspannten Volumen von 56 % entspricht. Die Materialausnutzung der CNC-Bearbeitung von 44 % steht in Konkurrenz zu einer Ausnutzung von 100 % bei der Vat Photopolymerisation.

#### 4.2. Beispiel 2: Bauteil „Filtergehäuse“

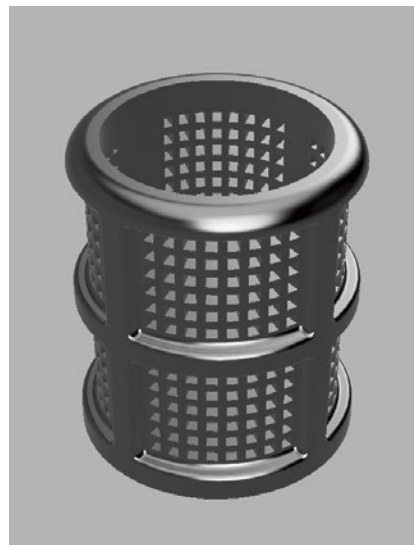
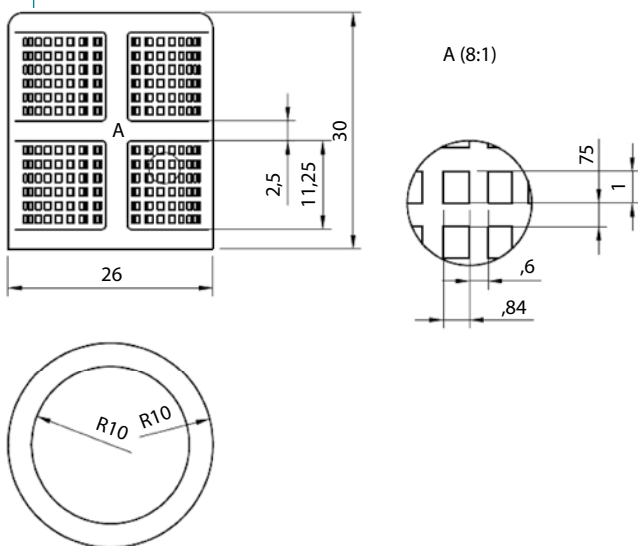
Die Konstruktion dieses Bauteils ist an die Möglichkeiten der additiven Fertigung angepasst. Zudem wurden keramische Konstruktionsrichtlinien berücksichtigt und Ecken und Kanten gerundet ausgeführt. Das Bauteil enthält Vierkant-Bohrungen mit einer Kantenlänge von 1 mm. Diese lassen sich mit rotierenden Werkzeugen nicht herstellen. Bei der CNC-Bearbeitung müssen stattdessen runde Bohrungen eingebracht werden, insgesamt 384 Stück. Das Bauteil ist mit dieser Einschränkung mittels 5Achs CNC-Bearbeitung herstellbar. Insgesamt betrachtet handelt es sich hier um ein sehr aufwändig zu produzierendes Teil. In Bild 5 sind links Auszüge aus der technischen Zeichnung und rechts eine Ansicht der CAD-Daten des Bauteils zu sehen.

Die Herstellkosten für dieses Bauteil wurden ebenfalls kalkuliert: Ein Filtergehäuse kann zum Preis von 1.690 € mittels CNC-Bearbeitung hergestellt werden, zehn

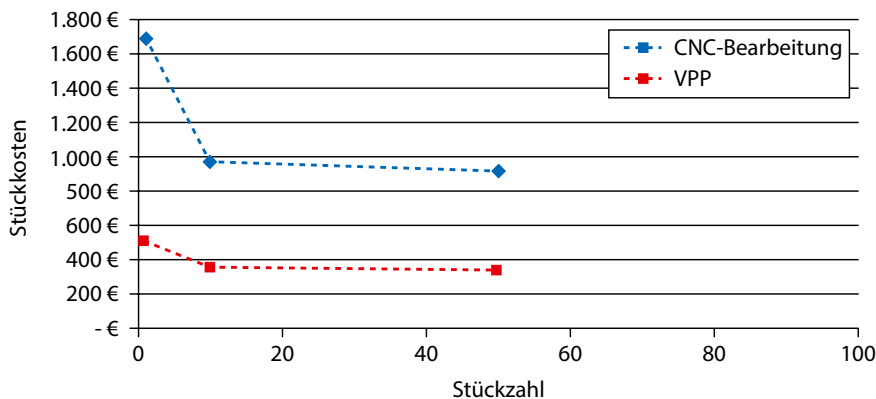
Teile zum Stückpreis von 982 €, 50 Teile zum Stückpreis von 919 €. Die Herstellung mittels Vat Photopolymerisation kostet für die Stückzahl eins 506 €, für zehn Teile 362 € und für 50 Teile 345 €. In Bild 6 sind die Stückkosten in Abhängigkeit von Stückzahl und Fertigungsverfahren aufgetragen: Hier gibt es keinen Break-Even Point, da unabhängig von der Stückzahl immer die additive Fertigung mittels Vat Photopolymerisation das günstigere Verfahren ist.

Die Herstdauer wurde auch für dieses Bauteil anhand von der Stückzahl zehn verglichen: die CAM-Programmierung und die CNC-Bearbeitung dauert im Zweischichtbetrieb vier Tage, das Brennen zwei Tage, womit eine Gesamtbearbeitungsdauer von sechs Tagen resultiert. Die Herstellung der Teile mittels Vat Photopolymerisation dauert drei Tage (ebenfalls im Zweischichtbetrieb), Reinigen und Entbindern erfordert sechs Tage, das Brennen zwei Tage was in einer Gesamtbearbeitungsdauer von elf Tagen resultiert.

Auch hier wurde die Materialeffizienz verglichen: Das Halbzeug für das Filtergehäuse hat ein Volumen von  $15,93 \text{ cm}^3$ . Das Filtergehäuse hat ein Bauteilvolumen von  $3,75 \text{ cm}^3$ , was einer Materialausnutzung von 24 % und einem zerspannten Volumen von 76 % entspricht. Die Materialausnutzung der CNC-Bearbeitung beträgt für dieses Bauteil also 24 % im Gegensatz zu 100 % bei der Vat Photopolymerisation.



**Bild 5** Bauteil „Filtergehäuse“, links: Auszug aus der technischen Zeichnung, rechts: Ansicht der CAD-Daten (© WZR)



**Bild 6** Bauteil „Filtergehäuse“, Stückkosten in Abhängigkeit von Stückzahl und Herstellungsverfahren. Blau: CNC-Bearbeitung, rot: Vat Photopolymerisation (VPP) (© WZR)

## 5. Bewertung

Für beide hier betrachteten Verfahren gilt, dass Werkstoffeigenschaften nach Norm (DIN EN 60672, also für ein C799) erreicht werden. Dies bedeutet konkret, dass die Biegefestigkeit > 300 MPa liegt, eine offene Porosität 0 Vol.-% erreicht wird und die Rohdichte bei min. 3,7 g/cm<sup>3</sup> liegt.

Bei beiden Verfahren können im Brennprozess Verzug und Risse in ähnlichem Maße entstehen.

Hinsichtlich Toleranzen und Maßhaltigkeit können Bearbeitungsmaschinen eine Präzision von < 10 µm erreichen, durch den Sinterprozess verschlechtern sich Toleranzen jedoch stellenweise deutlich. Präzision und Detaillierungsgrad werden in der Vat Photopolymerisation durch die Spot-Size (ca. 40 µm) und durch die Lagendicke (ca. 25-50 µm) definiert, womit der erreichbare Detaillierungsgrad vorgegeben ist.

Ausgehend vom qualitativen Zusammenhang zwischen Stückkosten und Losgröße in **Bild 1** wurden diese und andere Faktoren konkret anhand von zwei Bauteilen ermittelt. Die Ergebnisse können wie folgt bewertet werden:

- ▶ Es wurden zwei sehr unterschiedliche Bauteile als Kalkulationsgrundlage genommen, um Unterschiede auch bezogen auf konstruktive Aspekte deutlich zu machen: Die Düse ist ein sehr einfaches Bauteil, das nicht keramikgerecht konstruiert und nicht für die additive Fertigung optimiert ist. Das Filtergehäuse ist aufwändig herzustellen, keramikgerecht konstruiert und nutzt Mög-

lichkeiten, die die additive Fertigung bietet (Herstellung von quadratischen Bohrungen).

- ▶ Die einfache Düse kann bei Stückzahlen über zehn günstiger mittels CNC-Bearbeitung hergestellt werden, bei Herstellung des aufwändigen Filtergehäuses ist die Herstellung mittels Vat Photopolymerisation immer günstiger als die CNC-Bearbeitung.
- ▶ Die Herstelldauer ist für die CNC-Bearbeitung immer kürzer, dies wird vor allem durch den sehr langen Entbindungsprozess bedingt.
- ▶ Die Materialeffizienz bei der Nutzung subtraktiver Verfahren ist immer schlechter als bei der Nutzung additiver Verfahren. Wie viel schlechter ist abhängig von der Geometrie. Bei den konkreten Beispielen lag die Materialausnutzung zwischen 44 % und lediglich 24 %.

## 6. Fazit

Die Antwort auf die Frage, ob additiv gefertigte Bauteile günstiger oder teurer als konventionell hergestellte Bauteile sind, kann nie pauschal beantwortet werden. Die gängige Aussage ist, dass die Kosten insbesondere von der Stückzahl abhängen. Im vorliegenden Artikel wurden zwei sehr unterschiedliche Bauteile verglichen und deren Herstellungszeiten und -kosten konkret auf zwei Herstellungsverfahren bezogen. Der kalkulierte Preis ist immer abhängig von der Geometrie, abhängig von der Stückzahl und dem Formgebungsverfahren. Dies gilt für kon-

ventionelle Verfahren genau wie für die additiven Verfahren.

- ▶ Die Herstellzeit ist bei Vat Photopolymerisation durch die thermischen Prozesse bestimmt und immer länger als bei der CNC-Bearbeitung.
- ▶ Bei Einzelteilen ist in jedem Fall davon auszugehen, dass die additive Fertigung kostengünstiger ist als die subtraktive oder formative Fertigung.
- ▶ Komplexe Teile, bei denen bereits bei der Konstruktion die Vorteile der additiven Fertigung beachtet wurden, lassen sich additiv wirtschaftlicher herstellen.
- ▶ Einfache Teile (solche, die zum Fräsen konstruiert wurden) lassen sich bei größeren Stückzahlen mittels CNC-Bearbeitung wirtschaftlicher herstellen.
- ▶ Die Materialeffizienz ist bei additiven Verfahren deutlich besser als bei subtraktiven Verfahren.

Die Betrachtungen bestätigen, dass die Vorteile der additiven Fertigung erst dann ihr volles Potential entfalten können, wenn die Freiheit der Gestaltung genutzt und Bauteile effizient und komplex gestaltet werden. ◀

## Literaturhinweise

- [1] Böhmer, M.: Grünbearbeitung. in: W. Kollenberg (Hrsg.): Technische Keramik. 3. Auflage, Vulkan-Verlag, 2017
- [2] Buchner, K.-H., Förderer, T., Schomer, S., Stube, T.L.: Weißbearbeitung. in: W. Kollenberg (Hrsg.): Technische Keramik. 3. Auflage, Vulkan-Verlag, 2017
- [3] Kollenberg, W.: Additive Fertigung keramischer Komponenten. Vulkan-Verlag, 2020

1 WZR ceramic solutions GmbH, Rheinbach, [www.wzr.cc](http://www.wzr.cc)