

## Farbige Prototypen als Werkzeug für den Konstrukteur

Prof. Dr.-Ing. Andreas Gebhardt, Dipl.-Des. Frank-Michael Schmidt,

FH Aachen, Fachbereich Maschinenbau und Mechatronik,  
Lehrgebiet Hochleistungsverfahren der Fertigungstechnik und Rapid Prototyping.

### Einleitung

Physische Prototypen, also Anschauungs- und Funktionsmodelle nach den generativen oder Rapid Prototyping (RP) Verfahren haben sich in diesem Zusammenhang vor allem als Hilfsmittel zur effektiven Kommunikation und zur Evaluierung von Produkteigenschaften einen festen Platz in der Produktentstehung erworben. Die positiven Effekte der etablierten RP Verfahren sind unumstritten.

Einfachere, schnellere und wirtschaftlichere Maschinen (Prototyper, Fabrikator), vor allem auch für die Büroumgebung, geben neue Impulse im Sinne der Optimierung der heutigen Verfahren. Eine neue Dimension verspricht die Option „Farbe“ der bisher fast ausschließlich monochromen Modelle. Ist Farbe nur „nice to have“ oder welchen Effekt haben farbige Modelle als Werkzeug von Konstrukteuren und Produktentwicklern? Welche Perspektiven bietet „Farbe“ darüber hinaus?

### Generative Fertigung und Farbe

Generative Fertigungsprozesse und die dafür eingesetzten Materialien sind eng miteinander



**Bild 1** Farbliche Erscheinungsform unterschiedlicher generativer Fertigungsverfahren

gekoppelt. Die meisten der heute verfügbaren generativen Anlagen verwenden ausschließlich auf sie abgestimmte und damit proprietäre Materialien. Der Fertigungsprozess steht dabei im Mittelpunkt. Oft müssen mechanisch-technologische Eigenschaften wie Zugfestigkeit hinter den Anforderungen des Bauprozesses zurückstecken. So ist bei der Stereolithographie die Fähigkeit zur Strahlenvernetzung eine elementare Voraussetzung für den Bauprozess und damit weit wichtiger als andere Eigenschaften wie Elastizität oder Farbe.

Bei den meisten generativen Fertigungsprozessen ergibt sich dann auch eine material- und prozessabhängige und daher den Prozess zwar kennzeichnende aber im Sinne der Produktdefinition oder der Konstruktion undefinierte Farbe. **Bild 1** zeigt einige Beispiele für unterschiedliche generative oder Rapid Prototyping (RP) Prozesse und die sich dabei ergebenden Farben. Es sind dargestellt (im Uhrzeigersinn von links oben): 3D Printing (3DP), Stereolithographie, Laminated Object Manufacturing (LOM), Lasersintern und Fused Deposition Modeling (FDM).

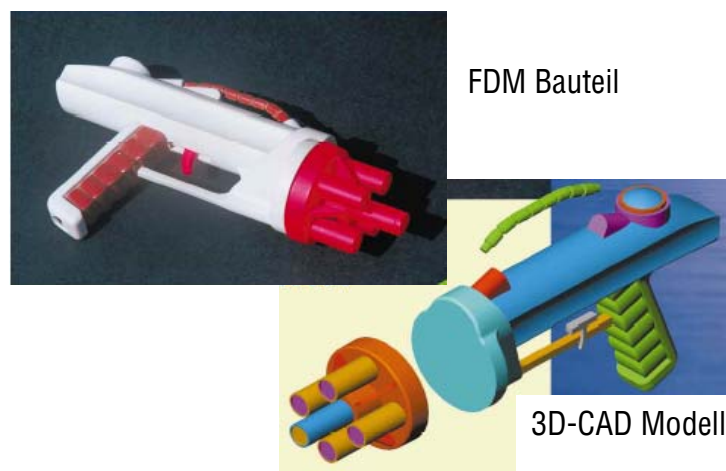
Generativ gefertigte Bauteile haben demnach keine definierte Farbe. Generativ gefertigte Modelle zeigen zudem vergleichsweise unattraktive monochromatische Farben, die durch die Ausgangsmaterialien bestimmt wird.

### Beeinflussung der Farbe

Definiert farbige generativ gefertigte Bauteile waren zunächst vor allem durch Lackieren nach dem Bauprozess zu erhalten. Das ging meist mit einer Verbesserung der Oberfläche einher, wie z.B. beim Vakuumgießen.

Einfarbige, monochrome Bauteile direkt aus dem Fabrikator erhält man durch Verwendung gefärbter Ausgangsmaterialien.

Die Verwendung von in der Masse eingefärbten Drähten (FDM, **Bild 2**) und einfarbigem Binder (3DP) liegt nahe und hat dazu geführt, dass diese Verfahren schon früh farbige Bauteile präsentiert haben. Die Farben dienten daher zunächst nur zur Kennung von Einzelteilen, aber auch von Konstruktionsständen, Beiträgen unterschiedlicher Lieferanten etc. Mehrfarbige Bauteile entstanden durch Montage mehrerer Einzelteile mit unterschiedlichen Farben. Für das ABS Material des FDM Prozesses stehen die Farben weiß, rot, blau, grün, gelb und schwarz zur Verfügung. Kundenfarben sind grundsätzlich möglich.



**Bild 2** 3D-CAD Modell und farbiges FDM Bauteil einer Spielzeug Wasserpistole (Stratasys)

Die Binder des 3DP Verfahren können mit unterschiedlichen Farben versehen werden. Die Farben sind einfacher zu wechseln, weil nicht das Pulver, sondern der leicht auszutauschende Binder mit Farbe versehen wird.

Bei allen Verfahren, bei denen die Strahlabsorption des Baumaterials eine Rolle spielt, also bei der Stereolithographie inklusive der Polymerdruckverfahren, beim Lasersintern und beim Schicht Laminat Verfahren (LOM) kann die Farbe des Baumaterials zwar grundsätzlich geändert werden, sie ist aber wegen der Wechselwirkung der Strahlung mit dem Material nicht ohne Schwierigkeiten von Bauprozess zu Bauprozess zu verändern. Ein Wechsel der Farben im laufenden Bauprozess ist praktisch nicht möglich.

Aktuell (2005) werden monochrome farbige Modelle vor allem deshalb propagiert, weil einfarbige, matte, opaque, vorzugsweise dunkelblaue oder graue Oberflächen bezüglich Details und Kantenqualität besser beurteilt werden können als transluzente. Objet hat mit dieser Motivation ein VeroBlue genanntes Acrylat für ihren PolyJet Prozess vorgestellt (**Bild 3**).



**Bild 3:** PolyJet Bauteil mit transluzentem und eingefärbtem (VeroBlue) Material (Objet)

Die Verwendung von farbigen Folien (LOM), farbigem Pulver (SLS) oder eingefärbten Harzen (SL) ist grundsätzlich möglich, wird aber kaum angewandt.

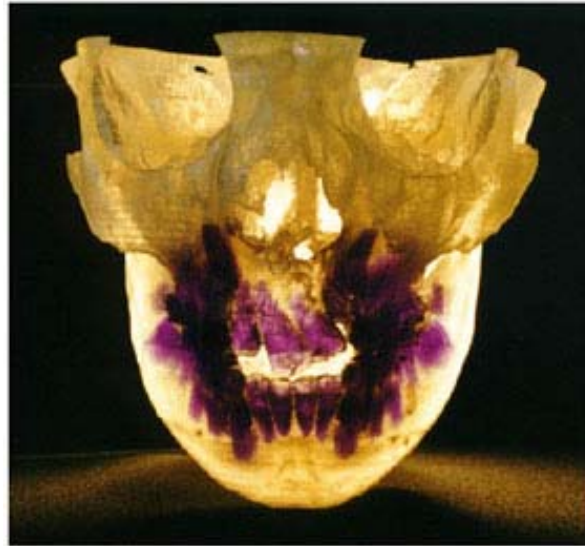
Die Farben verändern sich mit der Zeit und beeinflussen auch die mechanisch-technologischen Eigenschaften des Bauteils.

Eine, auch vollständig monochrome Einfärbung mit von Bauteil zu Bauteil unterschiedlichen Farben ist mit keinem kommerzialisierten Prozess möglich.

### **Partielle Farbgebung**

Für Stereolithographiebauteile stand als erstes ein ursprünglich von ZENECA entwickeltes Harz zur Verfügung, das partiell eingefärbt werden kann. Dazu wurde das Bauteil zunächst wie ein monochromes belichtet und so verfestigt. Anschließend wurden die Bereiche, die eingefärbt werden sollten, nochmals mit höherer Laserleistung nachbelichtet, Es sind dazu keine Modifikationen an der Maschine und nur marginale an der Maschinensteuerung und dem

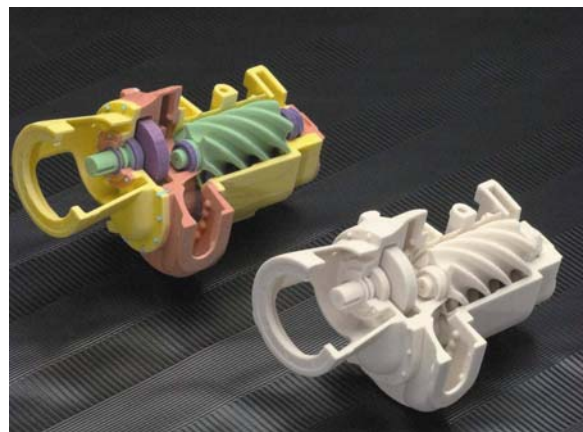
Datensatz notwendig. Es wird, wie bei einer Doppelbelichtung in der Fotografie, lediglich die gleiche Schicht mit modifizierter Geometrie nochmals gebaut.  
Es gibt einige Grundfarben: rot, blau grün. Da die Farbe als Zusatz im Harz eingearbeitet ist, muss sich der Anwender vor dem Baubeginn auf eine Farbe festlegen und kann diese nur mit dem gesamten Harzinhalt wechseln (**Bild 4**).



**Bild 4** Schädelmodell (Sterolithographie) mit eingefärbten Bereichen (ZENECA, Materialise)

Der größere Nachteil besteht darin, dass die latent eingebrachte Farbe mittels UV Strahlung aktiviert wird, und natürlich auch auf andere als die Laserstrahlquelle im Fabrikator reagiert. Intensive UV Bestrahlung durch die Sonne färbt beispielsweise das gesamte Bauteil. Die Farbe ist also nicht dauerhaft (nachhaltig).

Der erste Ansatz zur kontinuierlichen individuellen Einfärbung von Bauteilen im Prozess kam 1999 von der Z-Corporation. Die Idee bestand darin, einfach den wasserbasierenden Binder einzufärben und unterschiedliche Farben dadurch zu realisieren, dass analog zum Ink-Jet Printer System mehrere parallel geschaltete Düsen mit unterschiedlichen (Grund) Farben (CMY und Schwarz) eingesetzt wurden.



**Bild 5** Monochromes und im Prozess gefärbtes Bauteil (Z-Corp)

Die Technik entspricht der Bubble-Jet Technik. Es werden auch die Original Canon- und HP Bubble Jet Düsenköpfe eingesetzt. Die gegenüber der Papiertechnik weitaus höhere Menge an Binderflüssigkeit wurde realisiert, indem die kleinen Tanks der Druckköpfe mit externen Reservoirs verbunden wurden.

Mit der Z-Corp Ink-Jet Technologie ist eine kontinuierliche Einfärbung der Bauteile möglich. Zum ersten Mal können die Bauteiloberflächen nicht nur mit Farben, sondern mit Texturen belegt werden (**Bild 5, Bild 7**).

### **Datenformate**

Generative Fertigungsanlagen die farbige Bauteile herstellen, können mit traditionellen geometrieorientierten STL-Datensätzen nicht angesteuert werden. Die STL-Datenstruktur bietet zwar durchaus Platz für zusätzliche Informationen, sie würde aber in jedem Fall immer das ganze Dreieck betreffen. In Bit-Maps abgespeicherte Farb- oder Materialinformationen sind damit nicht darzustellen. Ansätze zur Erweiterung des STL-Formates haben sich daher bisher nicht durchgesetzt.

Insbesondere für die Herstellung farbiger Bauteile werden an Stelle des STL Formates heute das „Polygon File“-Format (PLY), und vor allem das „Virtual Reality Modeling Language“-Datenformat (VRML) eingesetzt. Neben den triangulierten Hüllmaschen werden zusätzlich Farbuweisungen editiert. Das VRML-Datenformat 1997 (VRML 2 manchmal auch VRML II) bindet auch Farbinformationen zur Objektgeometrie mit ein. VRML 97 ist seit Dezember 1997 ISO standardisiert (ISO/IEC DIS 14772-1, 1997) und wird von einschlägigen Programmen unterstützt (z.B. 3D Studio).

Eine sehr gute Diskussion des VRML Formates und seiner Wechselwirkung mit generativen Fertigungsanlagen findet sich in bei Ming und Gibson (siehe Literatur).

### **Wozu Farbe?**

Der Konstrukteur von Kunststoff Formteilen, und der steht heute im Vordergrund der Anwendungen von generativen Fertigungsverfahren, benötigt zunächst keine Farbe. Die Bauteile erhalten Ihre Farbe durch das Material, aus dem sie endgültig gemacht werden. Die Werkzeuge sind lediglich für die Geometrie verantwortlich und daher per se farblos.

Bei der traditionellen Anwendung von generativen Bauteilen als Prototypen und Muster vermisst kaum jemand die Farbe. Wozu also Farbe? Die wichtigsten Gründe für den Einsatz farbiger Bauteile sind:

#### ***Das Bauteil kann leichter beurteilt werden, wenn es farbig ist***

Vom Konstrukteur

Der Konstrukteur hat sich sehr schnell daran gewöhnt, im Verlauf seines 3D Entwurfs unterschiedliche Farben zu verwenden. Das erleichtert die Entwurfssystematik, hilft noch Unerledigtes zu markieren und ermöglicht es, Zeichnungsstände auseinander zu halten. Es ist daher sicher von Vorteil, wenn die Bauteile, die zur Unterstützung der Produktentstehung hergestellt werden, in gleicher Weise eingefärbt sind.

Vom Anwender

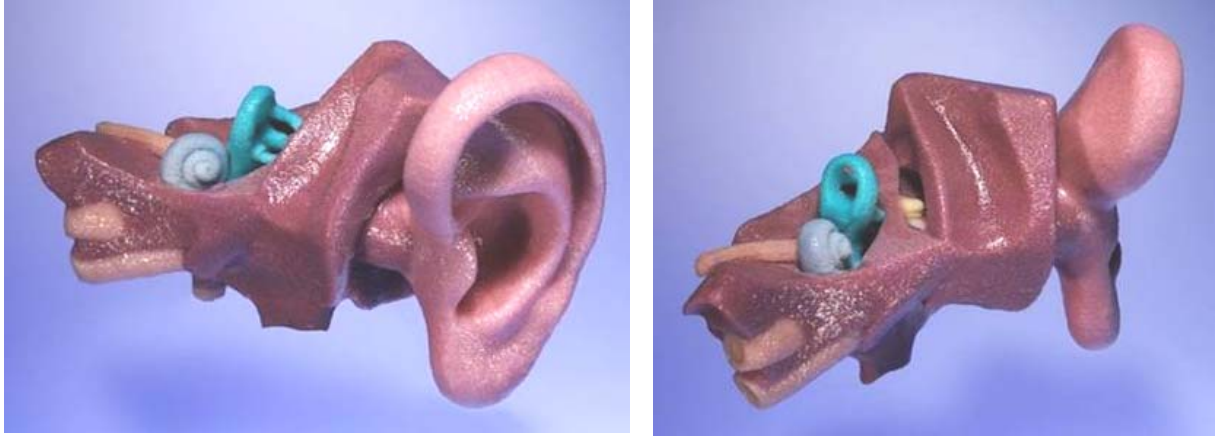
Bauteile, die als Muster oder Prototypen eingesetzt werden, haben vor allem eine Kommunikationsfunktion. Diese wird durch farbige Texturen wirkungsvoll unterstützt. Farbe strukturiert das Bauteil und lenkt den Blick auf das Wesentliche.

Beide Effekte werden aus dem Beispiel von **Bild 5** unmittelbar deutlich.



**Das Bauteil kann nur beurteilt oder eingesetzt werden, wenn es Farbinformationen enthält**

Zu dieser Gruppe gehört vor allem didaktisches Lehrmaterial, z.B. für die Ausbildung von Medizinern das zwingend Farbe erfordert. An dem Beispiel des Schnittmodells des Ohres wird auch unmittelbar deutlich, wo der Unterschied zwischen direkter Einfärbung und nachträglicher



**Bild 6** 3D-Printing Modell für die medizinische Ausbildung

Lackierung liegt: Alle sichtbaren Oberflächen weisen Farbe auf, auch wenn sie einer Lackierung nicht zugänglich sind.

Ein zweite wichtige Gruppe sind Bauteile, bei denen es auf die Oberflächengestaltung besonders ankommt. Dazu gehören vor allem solche, die mit Texturen versehen sind. Diese haben für den Konstrukteur eine besondere Qualität, weil sie Produkteigenschaften visualisieren, die von der geometrisch-mechanischen Konstruktion allein nicht erfasst werden.



**Bild 7** Farbige Textur auf einem 3D Printing Bauteil (Z-Corp)

### ***Das Bauteil selbst ist der 3-dimensionale Träger der Farbinformationen***

In die Konstruktion fließen eine große Anzahl von als Nebenrechnungen aufzufassenden Simulationen zur Validierung einzelner Details ein. Die Ergebnisse solcher Rechnungen, beispielsweise zur Simulation von Belastungen in Bauteilen (FEM), Strömungsverläufen (CFD), Füllsimulationen (Moldflow) und ähnlichem können mit Hilfe der farbigen Bauprozesse direkt auf die Oberflächen der Bauteile aufgebracht und unmittelbar im Kontext mit der Geometrie beurteilt werden. Der Konstrukteur kann auf diese Weise wichtige Beiträge zur Absicherung seines Entwurfes präsentieren und diskutieren, ggf. auch Alternativen archivieren. Komplexe Zusammenhänge können so auch Nicht – Fachleuten verständlich gemacht werden.

Die Beispiele auf **Bild 8** zeigen (im Uhrzeigersinn) die Ergebnisse einer Füllsimulation einer Handyschale, die Ergebnisse von Belastungsuntersuchungen mittels einer FEM Analyse an einer Felge und an einer Turbinenschaufel und thermisch induzierte Spannungen am Segment eines Leitschaukelringes (Düsensegment) einer Gasturbine und an einem Brennkammerelement.



**Bild 8** Farbige 3D Printing Bauteile als 3-dimensionales Display der Ergebnisse von Simulationsrechnungen

### **Anforderungen an die Eigenschaft „Farbe“, Stand der Technik und Problemfelder**

In der industriellen Produktion werden Farben heute mit automatisierten Farbmessverfahren kontrolliert. Erwartet werden definierte und reproduzierbare Eigenschaften wie: Farbton,

Sättigung, Brillanz, Kontrast und Konturenschärfe. Die Farben sollen nicht nur reproduzierbar sein, sondern ihre Eigenschaften auch dauerhaft behalten, also farbecht und farbstabil sein.

Alle diese Anforderungen stellen heute noch Problemfelder bei direkt eingefärbten generativen Bauteilen dar. Insbesondere existieren folgende Schwierigkeiten:

Die Farben haben Pastellton-Charakter. Leuchtende Farben sind nur mit erheblicher Nacharbeit zu erzielen.

Die Farben sind nicht definiert. Dies gilt sowohl in Bezug auf Farbtabelle (z.B. RAL) als auch bezüglich der Farbtreue sowohl innerhalb eines Bauprozesses und von Bauprozess zu Bauprozess. Die Farben verändern sich durch Umwelteinflüsse wie Licht, Sauerstoff oder Feuchtigkeit. Die Effekte sind in **Bild 9** gut zu sehen.



In Abhängigkeit vom Farbton variiert der Farbeindruck von Bauprozess zu Bauprozess



**Bild 9** Farbcharakter „Pasteltöne“ und ungewollte Farbvariation im Verlauf eines Bauprozesses (oben) und von Bauprozess zu Bauprozess (unten)

Der Farbprozess trägt relativ viel Feuchtigkeit in den Prozess ein. Das führte zu Rückwirkungen auf die mechanischen Eigenschaften der Bauteile. Die neueste Maschinengeneration (Spektrum Z510, 2005) ist deshalb mit einer integrierten Heizung ausgestattet, die eine kontrollierte Bauteilfeuchtigkeit ermöglicht.

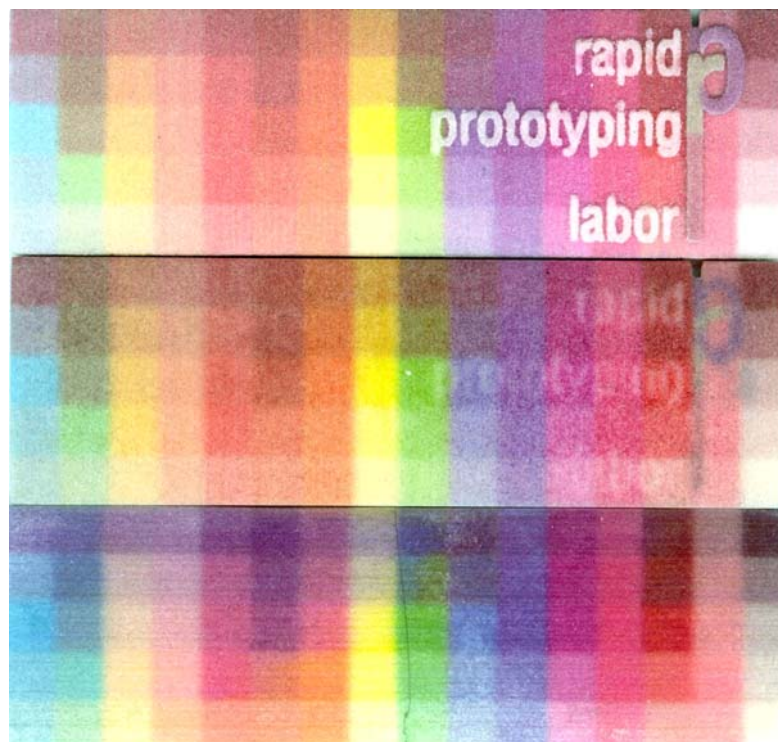
Die Farbe steckt im Binder, das Pulver ist weiß und wird benetzt, aber nicht durchgefärbt. Die Spitzen der relativ groben Pulverpartikel erscheinen dadurch heller (**Bild 10**).





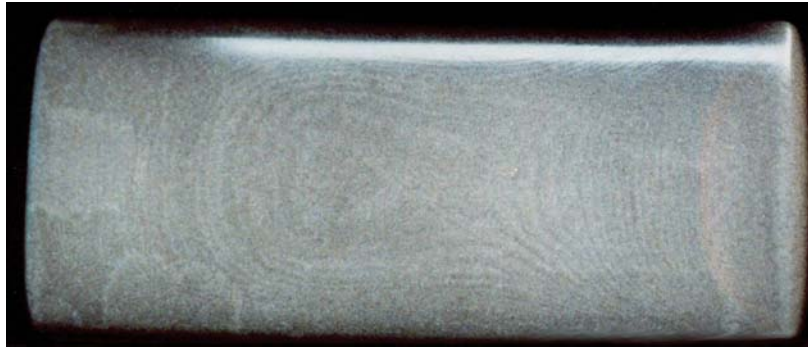
**Bild 10** Oberflächenstruktur eines farbigen 3D Printing Bauteiles

Nacharbeit wie Schleifen verbessert in Kombination mit Infiltrieren einerseits die Farbqualität, andererseits werden die weißen Pulverkörner in der recht groben Oberfläche dabei angeschliffen und es entstehen durch die wachsenden Weiß-Anteile noch blässere Farben. Die Nacharbeit verschiebt zudem das Farbprofil (**Bild 11**).



**Bild 11** Farbverschiebung eines 3D Printing Bauteiles durch Nacharbeit (Schleifen)

Graue und schwarze Farbtöne sind besonders schwierig herzustellen. Moiré-Effekte und Farbsäume bereiten Probleme (**Bild 12**).



**Bild 12** Moiré-Effekte und Farbsäume bei grauen und schwarzen Bauteilen

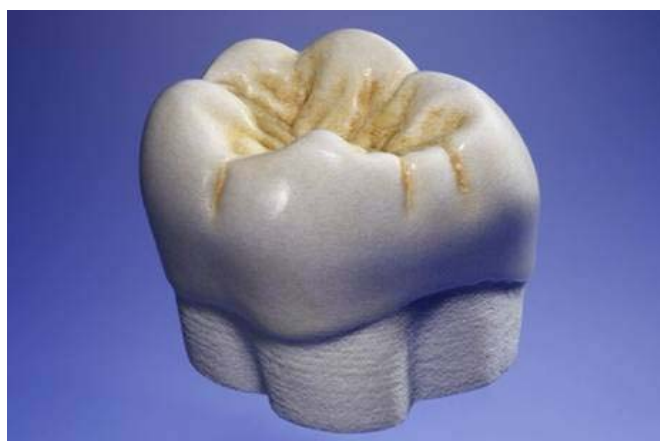
### **Post Processing und Finishing**

Gute Oberflächen und damit einhergehende befriedigende Farbwirkungen sind nur mit sorgfältiger Nacharbeit zu erzielen. Die manuelle Tätigkeit dauert häufig länger als der eigentliche generative Bauprozess.

Als Ergebnis lassen sich dann aber auch die unterschiedlichsten Oberflächen, beispielsweise Naturstein-Effekte oder natürliche Zahnfärbungen nachempfinden( **Bild 13**, **Bild 14**).



**Bild 13** Farbige 3D Printing Bauteil nach dem Bauprozess (links) und nach dem manuellen Finishing (rechts)



**Bild 14** Farbige 3D Printing Bauteil nach dem manuellen Finishing

### Zukünftige Entwicklungen

Um die Nachteile der heutigen Verfahren zu beseitigen haben Forscher von Huntsman eine Modifikation des 3DP Verfahrens wie es vom MIT patentiert und von Z-Corp angepasst worden ist entwickelt.

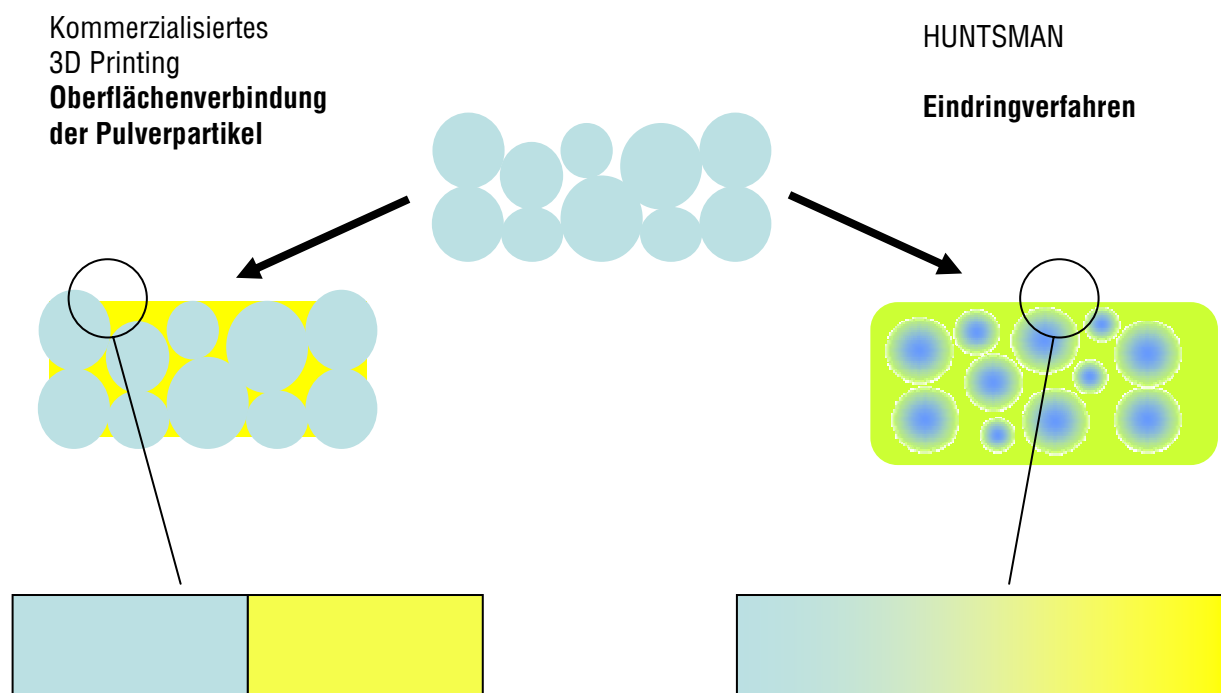
Der wasserbasierende Binder wird zu Gunsten eines druck- und vernetzbaren Polymerbinders aufgegeben, als Pulver wird ein Polymer verwendet. Das Pulver-Binder System wird zudem so modifiziert, dass der Binder vom Pulver aufgesaugt wird und dadurch eine gleichmäßige Durchfärbung ohne sichtbare Grenzflächen (seamless bonding) erzielt wird.

Die Wirkungsweise des „Jet Ingress Mechanisms“ wird auf **Bild 15** dargestellt.

Die Endfestigkeit wird sofort im Bauprozess erzielt und liegt deutlich höher als bei der Verwendung des wasserbasierenden Binders.

Die Bauteile sind dicht. Damit entfällt die Infiltration. **Bild 16** zeigt die REM Aufnahme eines Querschliffes. Die Schichtdicke beträgt ca. 160µm.

Der Erkenntnisse wurden in das EU Forschungsprogramm RAMA3D (<http://rama-3d.rtdproject.net/>) eingebracht und werden von einer multinational besetzten Forschergruppe weiterentwickelt.



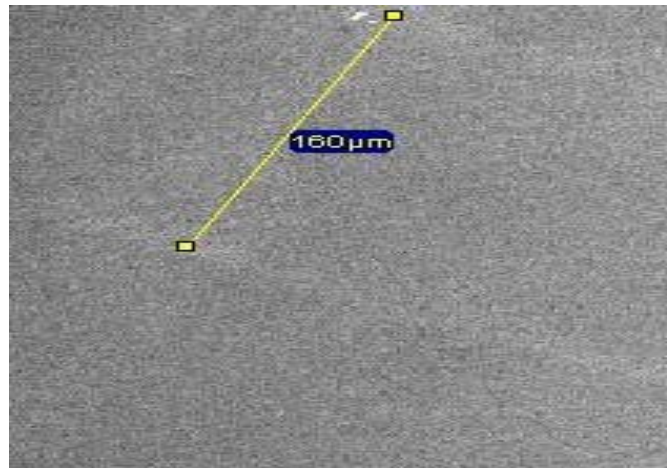
**Bild 15** Huntsman „Jet Ingress Mechanism“ Polymer Printing Verfahren ohne verfahrensbedingte Farbgrenzen (Ranjana C. Patel, PhD FRSC, Huntsman Advanced Materials)

Huntsman Jet Ingress Mechanism

System: Polymer Pulver / Vernetzbares Harz

Untersuchungen am Elektronenmikroskop  
(Bruker Instruments, 25 °C, Vakuum)

- Dichte interner Struktur
- Gute Verbindung zwischen den Schichten



**Bild 16** Huntsman Jet Ingress Mechanism. Dichte Bauteile und gute Schichthaftung.  
(Ranjana C. Patel, PhD FRSC, Huntsman Advanced Materials)

### Schlussbemerkung

Trotz vieler noch nicht befriedigender Eigenschaften und Details von farbigen Modellen steht dem Konstrukteur mit farbigen Modellen ein Werkzeug zur Verfügung, das es ihm erlaubt, seine eigene Arbeit und die Art wie er sie kommunizieren kann deutlich zu verbessern.

Langfristig wird es mit der Farbe bei der generativen Fertigungstechnik so sein, wie mit der Farbe in der Tageszeitung – sie wird zum Standard werden.

### Literatur und Informationen

#### Überblick über RP Verfahren

**Gebhardt, Andreas:** *Grundlagen des Rapid Prototyping*  
in: [www.rtejournal.de](http://www.rtejournal.de) Pfad: Ausgabe 1 (2004)

#### Hersteller

<http://www.zcorp.com/>

#### Informationen über das VRML Format

**Ling Wai Ming, Ian Gibson:** *Specification of VRML in Color Rapid Prototyping*  
Int. Journal of CAD-CAM, Vol 1, No. 1, pp1-9 (2002)

#### Anschrift der Verfasser

Fachhochschule Aachen  
Fachbereich Maschinenbau und Mechatonik (8)  
Rapid Prototyping Labor  
Goethestrasse 1  
52064 Aachen

<http://www.fh-aachen.de/GEBHARDT.html>  
Mail: [Gebhardt@fh-aachen.de](mailto:Gebhardt@fh-aachen.de)