

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Pfrommer, Udo; Hentschel, Bernd; Hüsener, Thorsten**

## **Rapid-Prototyping im wasserbaulichen Versuchswesen**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102276>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Pfrommer, Udo; Hentschel, Bernd; Hüsener, Thorsten (2015): Rapid-Prototyping im wasserbaulichen Versuchswesen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Wasserbauwerke - Vom hydraulischen Entwurf bis zum Betrieb. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 67-72.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



## **Rapid-Prototyping im wasserbaulichen Versuchswesen**

Dipl.-Ing. (FH) Udo Pfrommer, Bundesanstalt für Wasserbau  
Dipl.-Ing. Bernd Hentschel, Bundesanstalt für Wasserbau  
Dipl.-Ing. (FH) Thorsten Hüsener, Bundesanstalt für Wasserbau

### **Einleitung**

Das wasserbauliche Versuchswesen erfährt in Hinsicht auf den Bau gegenständlicher Modelle zurzeit einen Wandel. Nachdem der klassische Modellbau aufgrund seiner Komplexität und einer Vielzahl einzelner Arbeitsschritte in der Vergangenheit oft sehr zeitaufwendig war bzw. von den numerischen Modellmöglichkeiten infolge der schnelleren Modellerstellung abgelöst schien, kommen im Labor der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) mittlerweile Fertigungsverfahren zum Einsatz, welche es ermöglichen, den Modellbau rapide zu beschleunigen. Einige der verwendeten Fertigungsverfahren werden dem Rapid-Prototyping zugeordnet. Bei diesem Fertigungsverfahren werden 3D-CAD-Daten ohne Zwischenschritte in Modellbauteile umgesetzt. Solche 3D-CAD-Daten liegen der BAW immer häufiger in Form von 3D-Bauwerkskonstruktionen, hochaufgelösten digitalen Geländemodellen (DGN) oder großflächigen Sohlpeilungen vor. Anhand von Fallbeispielen sollen die derzeitigen und auch die in Zukunft möglichen Anwendungsgebiete im wasserbaulichen Versuchswesen aufgezeigt werden.

### **Rapid-Prototyping**

Rapid-Prototyping bedeutet allgemein übersetzt so viel wie „schneller Bau eines Modells“ und beschreibt Methoden, die es erlauben, schon in der Vorserienphase auch komplexe Funktionsmodelle zu bauen. Dadurch ist es in der industriellen Produktion möglich, frühzeitig Fehler oder Schwächen der Produkte zu erkennen und in die Planung einzugreifen. Auch die BAW, als zentrale Dienstleister für die Beratung und Unterstützung der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), nimmt mit ihren gegenständlichen Modellen oft schon in der Planungsphase Einfluss. Im Gegensatz zur Industrie ist es im wasserbaulichen Versuchswesen jedoch nicht alltäglich, wie z.B. in der Automobilindustrie, aus digitalen 3D-CAD-Konstruktionen ohne viele Zwischenschritte schnell, genau und kostengünstig hochaufgelöste, reproduzierbare und funktionsfähige Modelle zu erstellen. Dieses Ziel sollte erreicht werden, um den Aufwand bei der Modellerstellung zu minimieren und gleichzeitig die Genauigkeit der gegenständlichen Modelle zu erhöhen.

Dazu muss geklärt werden, wie die verschiedenen Rapid-Prototyping-Verfahren genau funktionieren und welche davon im wasserbaulichen Versuchswesen angewendet werden können. Das Rapid-Prototyping ist eine Spezialform des normalen Prototypings, wobei die Vorgehensweise ihren Ursprung in der Fertigungstechnik hat. Hier findet eine automatisierte Produktion von Prototypen statt, bei der die Informationen über Maße und Beschaffenheit in Form von digital bestehenden Modellen (i.d.R. 3D-CAD-Daten) maschinell verarbeitet werden. Die für diese Verfahrensgruppe relevante Datenschnittstelle ist das STL-Format (Exportformat von Standard CAD Software). In

Tabelle 1 sind die im wasserbauliche Versuchswesen einsetzbaren Rapid-Prototyping-Verfahren aufgeführt:

*Tabelle 1: Im wasserbaulichen Versuchswesen einsetzbare Rapid-Prototyping-Verfahren*

Verfahren	Werkstoffe
3D-CNC-Fräsen	Metalle, Kunststoffe, Beton
2D / 3D-CNC-Styrocut	Styropor, Styrodur, EPP und anderen Schäumen
Contour Crafting (CC)	Beton
Fused Deposition Modeling (FDM)	ABS, Polylactide
Multi Jet Modeling (MJM)	Thermoplaste, Photopolymere, Sand, u.w.
Strahlschmelzverfahren	Metalle, Kunststoffe, Keramiken

### 3D-Druckverfahren

Verfahren wie FDM, MJM und auch das CC, die das Material schichtweise auftragen (additive Fertigungsverfahren), bezeichnet man auch als 3D-Druck. Für die einzelnen Verfahren werden sehr unterschiedliche Materialien verwendet. In Hinblick auf die Anforderungen an die Modelle bzw. Prototypen im wasserbaulichen Versuchswesen kommen nur Materialien in Frage welche bei dem Kontakt mit Wasser nicht wasserlöslich sind und formstabil bleiben. Sie sollten auch die für die verwendeten Modellgesetze erforderliche Rauheit aufweisen. Erste Erfahrungen haben gezeigt, dass das Fused-Deposition-Modeling (FDM; deutsch: Schmelzschicht-Verfahren) in Verbindung mit dem Werkstoff Polylactide (PLA) derzeit in Hinsicht auf Materialeigenschaft und Genauigkeit das zweckmäßigste 3D-Druckverfahren für die Anwendung im wasserbaulichen Versuchslabor ist (Bild 1).



(Quelle: [www.stratasys.com](http://www.stratasys.com))

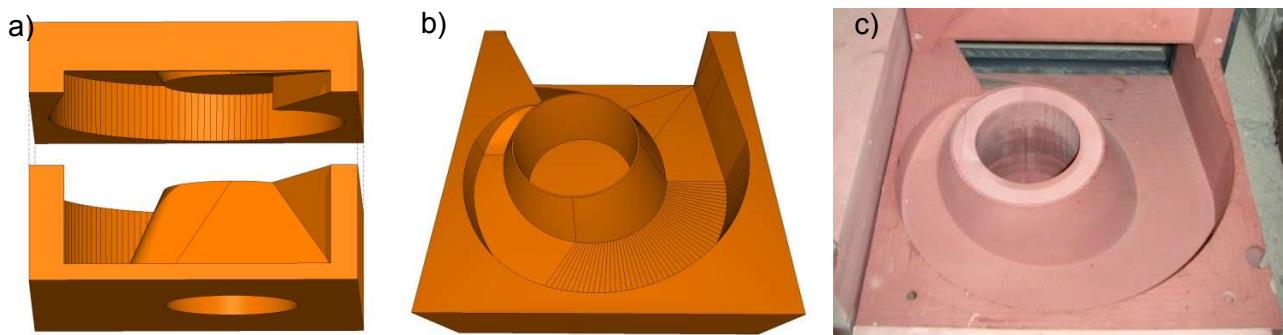


**Bild 1:** a) 3D-Drucker der Firma Stratasys; b) Tischmodell eines Piano-Key-Wehr

Das FDM-Verfahren basiert auf der Verflüssigung eines drahtförmigen Kunststoff- oder Wachsmaterials durch Erwärmung und der anschließenden Erkaltung des Materials am gewünschten Ort. Der Aufbau eines Körpers erfolgt indem wiederholt jeweils zeilenweise eine Arbeitsebene abgefahren und Material aufgetragen wird, sodass eine Form schichtweise entsteht. Die kleinste Schichtdicke und somit auch die Genauigkeit liegen derzeit bei etwa 0,18 mm. Mit den aktuell verfügbaren Druckern können Vollkörper und Hohlkörper mit einer Größe von bis zu 1 m x 0,6 m x 1 m gefertigt werden (z.B. Additively Ltd., 2015). Die Belastbarkeit von beweglichen Teilen im Versuchsbetrieb, wie z.B. einer Aufsatzklappe (inkl. der Scharniere) an einem Modellwehr, wurde bisher noch nicht geprüft, da hierzu vom Hersteller kaum Aussagen gemacht werden. Komplexe und größere Bauwerke können bisher noch nicht als Gesamtmodell mit dem 3D-Druckverfahren erstellt werden, sondern nur im Verbund mit anderen Techniken z.B. dem 3D-CNC-Fräsen.

### 3D-CNC-Fräsen

Das 3D-CNC-Fräsen ist ein subtraktives Fertigungsverfahren womit das spanabhebende Bearbeiten von Materialien mittels eines Fräswerkzeuges gemeint ist. Wird es mit CNC-Fräsen durchgeführt welche 5 oder mehr Achsen steuern können so wird auch häufig der Begriff 3D-CNC-Fräsen verwendet. Ursprünglich wurde das 3D-CNC-Fräsen dem normalen Prototyping zugeordnet. Im Gegensatz zu früher kann heute auf spezielle CNC-Software verzichtet werden. Die CAD-Daten können direkt in die Fräsmaschine eingelesen und verarbeitet werden. Somit haben auch die 3D-Frästechniken einen Workflow, der dem des Rapid-Prototyping entspricht. Die Genauigkeit und Oberflächenqualität beim Fräsen ist oft höher als bei den anderen hier vorgestellten Verfahren. Allerdings ist die Komplexität der Bauteile eingeschränkt, da subtraktive Verfahren keine Hohlräume innerhalb eines Bauteils erzeugen können. Das Bauteil, wie z.B. ein komplettes Kraftwerksmodell (Bild 2a), muss hierzu im Gegensatz zum 3D-Druck im Vorfeld in einem CAD-Programm in mehrere Einzelteile (Bild 2b) zerlegt und nach der Fertigstellung zusammengesetzt werden.



*Bild 2 a) Füllmuschel eines Kraftwerkseinlaufes(CAD); b) zerlegtes Einzelteil (CAD) für die 3D-CNC-Fräse; c) Fertiges 3D-CNC-Modell beim Einbau in ein gegenständliches Modell*

Als Werkstoff wird meist das im Modellbau etablierte PU-Blockmaterial (Bild 3a) verwendet. Es besteht aus einem Polyurethan-Harz, welches mit einem Füllstoff (Microballons) vermischt wird. Je nach Anwendungsbedarf ist der Werkstoff in verschiedenen Härtegraden erhältlich. Um Kosten und

Material zu sparen, werden bei großen Modellen die Rohlinge aus PU-Blöcken mit einer Wasserstrahlschneidemaschine (Bild 3b) vorgeschritten und anschließend verklebt. Im Anschluss werden die verklebten Rohlinge in der 3D-CNC-Fräse (Bild 3c) mit einer Genauigkeit von bis zu 0,05 mm abgefräst und ggf. mit einem Finish (Schleifen, Spachteln, Lackieren) versehen. Sind alle Einzelbauteile hergestellt, werden diese mit Hilfe von Passungen zusammengesetzt.



*Bild 3 a) PU-Blockmaterial in verschiedenen Härtegraden; b) Wasserstrahlschneidemaschine; c) Fräskopf mit bearbeitetem PU-Blockmaterial einer 3D-CNC-Fräse;*

### Anwendungsmöglichkeiten im wasserbaulichen Versuchslabor

Im Jahr 2006 wurden die ersten Modelle im wasserbaulichen Versuchslabor der BAW im Rapid-Prototyping-Verfahren für Untersuchungen an einem aerodynamischen Modell anfertigt. Auch hier wurden CAD-Daten in Form eines DGN (Bild 4a) in einem CAD Programm so vorbereitet, dass einzelne PU-Platten (Bild 4b) mit einer 3D-CNC-Fräse gefräst (Bild 4c) und im Anschluss im Luftlabor zu einem Flächenmodell zusammengesetzt werden konnten.

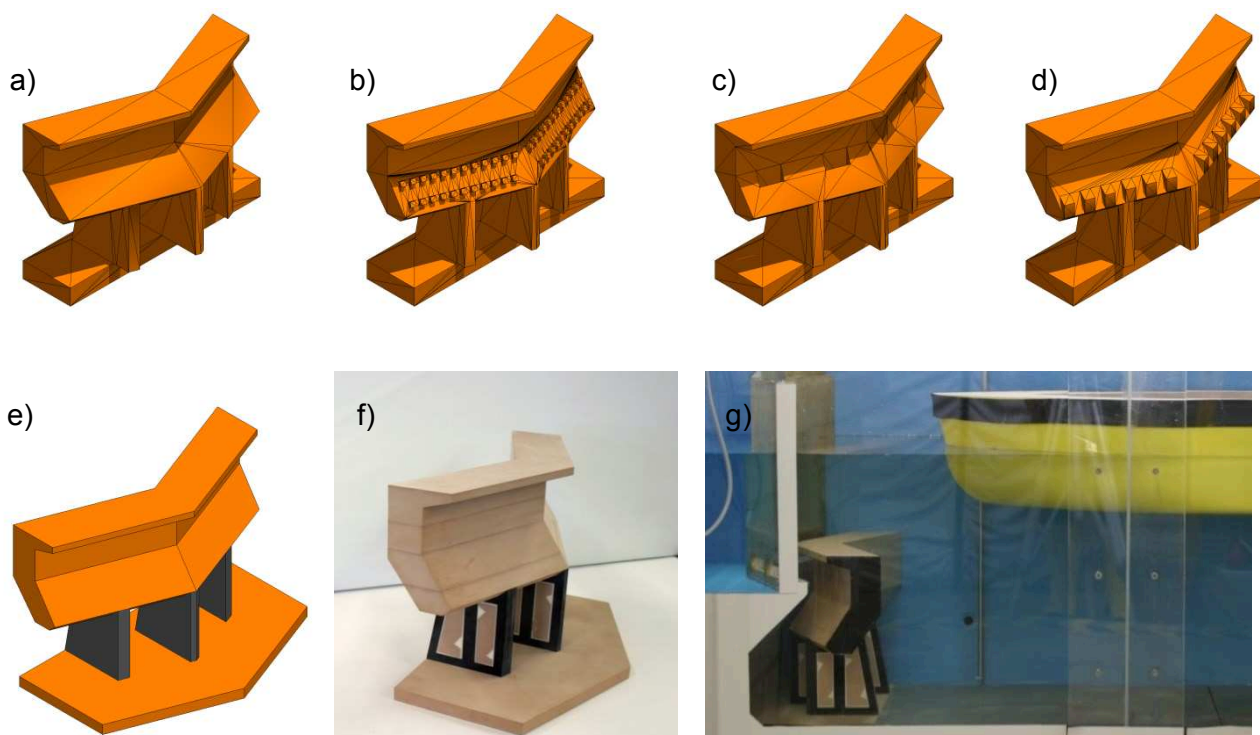


*Bild 4: a) CAD-Daten des DGN; b) gefräste PU-Platte; c) zusammengesetztes Modell*

Theoretisch können auch ganze Bauwerksmodelle wie z.B. eine Schleuse im Maßstab 1:25 mit Längen von bis zu 5 m inklusive der beweglichen Teile wie die Füll- und Entleerorgane als Gesamtmodell hergestellt werden. Realisiert wurde solch ein großes Modell aus Kostengründen bislang noch nicht. Berücksichtigt man jedoch die Entwicklungsgeschwindigkeit des Rapid-Prototyping der letzten Jahre, so sind in naher Zukunft auch solche Modelle bei vergleichbaren Kosten wie im klassischen Modellbau realisierbar. Auch das Herstellen großer Flächenmodelle (Längen > 30 m)

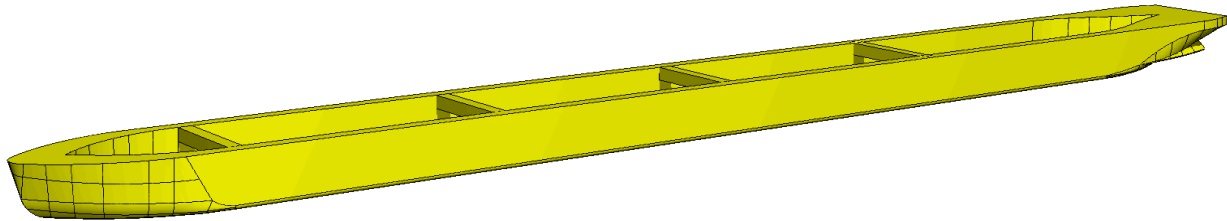
ist mit diesem Verfahren grundsätzlich möglich und wird zurzeit auch für ein Flussmodell geprüft. Als Werkstoff soll hier jedoch ein kostengünstigeres Material (zum Beispiel Gasbeton) verwendet werden. Weiterhin ist für die Anwendung in Flussmodellen die Methode des Contour Crafting, also praktisch das „Drucken“ mit Beton, sehr interessant.

Bei kleinskaligen Untersuchungen einzelner Bauwerkskomponenten wie z.B. einer Prallwand, welche zur Energieumwandlung im Oberhaupt einer Schleuse dient, kommt das Rapid-Prototyping-Verfahren immer häufiger bei Variantenstudien zum Einsatz. Das zu optimierende Bauteil wird im CAD-Programm variiert und kann direkt in den Prototypen umgewandelt werden. Bei der parallelen Durchführung von numerischen und gegenständlichen Untersuchungen ist die Modellgeometrie aufgrund der hohen Genauigkeit beim Rapid-Prototyping dann für beide Verfahren identisch. Bei einer entsprechenden Auflösung des numerischen Modells können geometrische Abweichungen beim Vergleich der Ergebnisse somit minimiert werden.



*Bild 5: a-e) Variantenstudien einer Prallwand (CAD-Konstruktion); f) Modell der Prallwand von Variante e (Peiler im 3D-Druck und Überarbeitung mit 3D-CNC-Verfahren) ; g) Prallwand im Schleusenversuchsstand mit Modellschiff;*

Das in dieser Untersuchung verwendete Modellschiff (Bild 5f) wurde ebenfalls im Rapid-Prototyping-Verfahren erstellt. Hier hat sich gezeigt, dass die Herstellungskosten gegenüber einem Modellschiff in klassischer Holzbauweise sogar geringer ausfallen. Als Grundlage für die Schiffsgeometrie stand wiederum die im numerischen Verfahren verwendete CAD-Datei des Modellschiffes (Bild 6) zur Verfügung.



*Bild 6: 3D-CAD-Datei des Modellschiffes*

### **Zusammenfassung und Ausblick**

Das Rapid-Prototyping-Verfahren ist ein Fertigungsverfahren, welches im wasserbaulichen Versuchswesen vor allem im Bauwerksbereich wirkungsvoll eingesetzt werden kann. Die direkte Verwendung der im CAD-Programm konstruierten 3D-Zeichnungen hat zahlreiche positive und vorteilhafte Aspekte:

- Die im klassischen Modellbau benötigten 2D-Werkstattpläne mit verschiedenen Ansichten und Bemaßungen entfallen komplett.
- 3D-CAD-Daten vom Auftraggeber können mit wenigen Arbeitsschritten (Reduzierung auf die hydraulisch relevanten Bauteile, Skalierung) zur Modellerstellung verwendet werden.
- Die Maßhaltigkeit der Bauteile ist höher als im klassischen Modellbau.
- Die exakte Reproduktion von Bauteilen ist gewährleistet.
- Bei hybriden oder vergleichenden Untersuchungen mit gegenständlichen und numerischen Modellen kann dieselbe 3D-CAD-Konstruktion verwendet werden.
- Je nach Fragestellung kann das Rapid-Prototyping sowohl Kosten als auch Zeit einsparen.

Als Verfahren kommen in Wasserbaulaboren derzeit hauptsächlich das 3D-CNC-Fräsen und das Heißdraht-Styropor-Schneiden zur Anwendung. Bei sehr komplexen Bauteilen ist jedoch eine Kombination aus 3D-Druck und 3D-CNC-Fräsen schon Realität. Damit stehen heute je nach Modellgröße, Komplexität und erforderlicher Genauigkeit mehrere sehr leistungsfähige Methoden zur Verfügung. Für die nahe Zukunft sind hier, insbesondere bei den 3D-Drucktechniken, noch vielversprechende Entwicklungen zu erwarten.

### **Literatur**

Additively Ltd. (2015): 3D-Druck verstehen, Fused Deposition Modeling, aufgerufen am 20.04.2015  
<https://www.additively.com/de/lernen/fused-deposition-modeling>