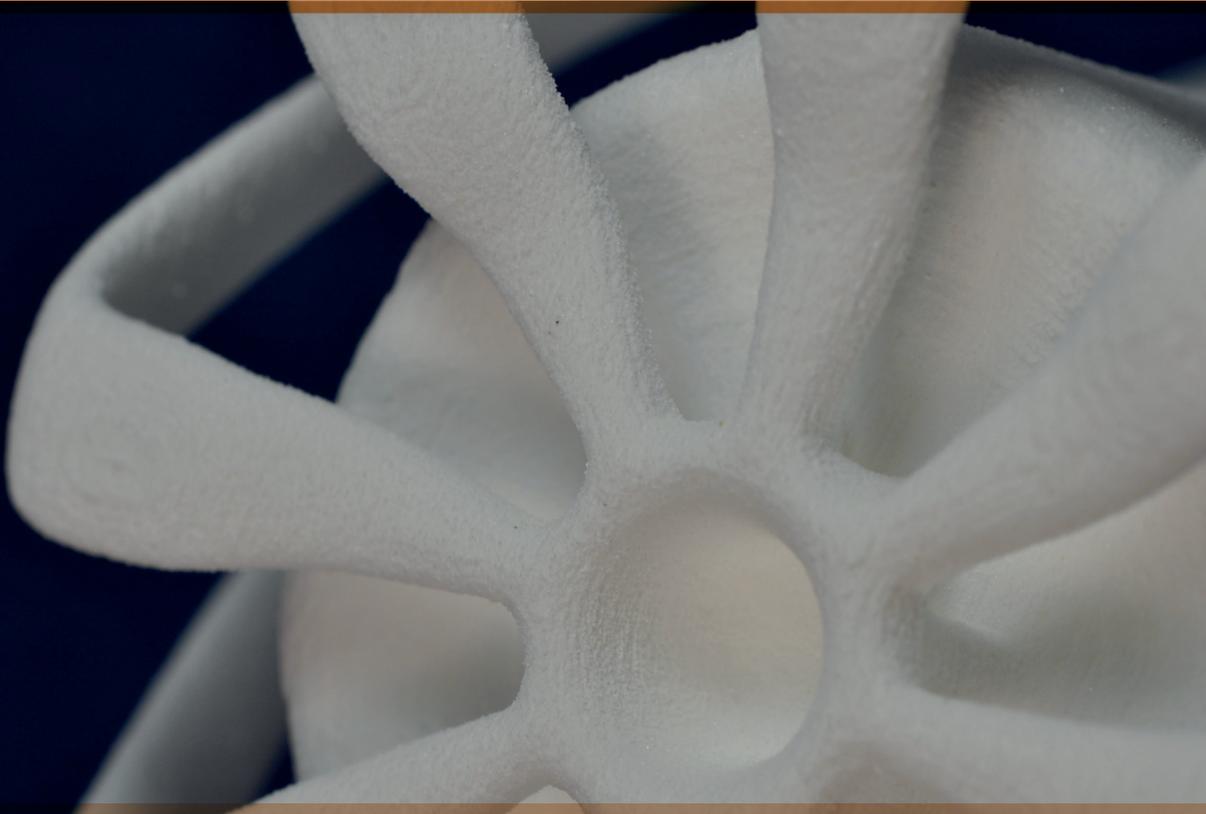


Wolfgang Kollenberg

Additive Fertigung keramischer Komponenten

Grundlagen und Anwendungen



Additive Fertigung keramischer Komponenten

Wolfgang Kollenberg

Additive Fertigung keramischer Komponenten

Grundlagen und Anwendungen

1. Auflage 2020

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über **www.dnb.de** abrufbar.

Additive Fertigung keramischer Komponenten

Grundlagen und Anwendungen

Wolfgang Kollenberg

1. Auflage 2020

ISBN: 978-3-8027-3114-3 (Print)

ISBN: 978-3-8027-3116-7 (eBook)

© 2020 Vulkan-Verlag GmbH

Friedrich-Ebert-Straße 55, 45127 Essen, Deutschland

Telefon: +49 201 820 02-0, Internet: www.vulkan-verlag.de

Projektmanagement: Marie-Therese Hanschmann, Vulkan-Verlag GmbH, Essen

Lektorat: Marie-Therese Hanschmann, Vulkan-Verlag GmbH, Essen

Herstellung: Nilofar Mokhtarzada, Vulkan-Verlag GmbH, Essen

Umschlaggestaltung: Melanie Zöllner, Vulkan-Verlag GmbH, Essen

Titelbild: © WZR ceramic solutions GmbH, Rheinbach

Satz: Brigitte Schmidt, Schmidt Media Design, München

Das Werk einschließlich aller Abbildungen ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen. Der Erwerb berechtigt nicht zur Weitergabe des eBooks an Dritte.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autor und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----|
| Vorwort | 1 |
| 1. Einleitung | 4 |
| 2. Die Prozesskette der Additiven Fertigung | 12 |
| 2.1 Vorgeschaltete Prozesse | 14 |
| 2.1.1 CAD-Volumenmodelle | 15 |
| 2.1.2 Voxelmodelle | 20 |
| 2.1.3 STL-Format, AMF, 3MF | 21 |
| 2.1.4 Schichtzerlegung (Slicing) | 24 |
| 2.1.5 Stützstrukturen (Support) | 26 |
| 2.2 Nachgeschaltete Prozesse | 26 |
| 3. Allgemeine Grundlagen | 30 |
| 3.1 Rheologie disperser Systeme | 30 |
| 3.2 Oberflächenspannung | 38 |
| 3.3 Strömungsdynamik | 40 |
| 3.4 Tropfenbildung | 42 |
| 3.5 Packungsdichte von Partikeln | 49 |
| 4. Verfahren der Additiven Fertigung | 62 |
| 4.1 Terminologie | 63 |
| 4.2 Verfahren mit selektiver Verfestigung | 65 |
| 4.2.1 Vat Polymerisation | 65 |
| 4.2.2 Binder Jetting | 89 |
| 4.2.3 Powder Bed Fusion | 125 |
| 4.2.4 Sheet Lamination | 132 |
| 4.3 Verfahren mit selektiver Abscheidung | 135 |
| 4.3.1 Material Jetting | 135 |
| 4.3.2 Material Extrusion | 144 |
| 4.3.3 Directed Energy Deposition | 163 |
| 5. Potenziale der Additiven Fertigung | 174 |
| 5.1 Design und Konstruktion | 176 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 5.2 | Gefügedesign und Materialkombinationen | 182 |
| 5.2.1 | Gradierte Strukturen | 186 |
| 5.2.2 | Multi-Material Strukturen. | 192 |
| 5.2.3 | Metamaterialien. | 194 |
| 5.3 | Einsatz präkeramischer Polymere | 198 |
| 5.4 | Kombination von Verfahren | 200 |
| 5.4.1 | Kombination additiver Verfahren. | 200 |
| 5.4.2 | Kombination konventioneller und additiver Formgebung. | 200 |
| 5.4.3 | Indirekte Verfahren | 201 |
| 6. | Reifegrad und Vergleich der additiven Verfahren | 208 |
| 7. | Anwendungsbeispiele und Potenzialabschätzung | 218 |
| 7.1 | Gießertechnik | 220 |
| 7.2 | Medizintechnik. | 225 |
| 7.3 | Brennhilfsmittel | 229 |
| 7.4 | Katalysatorträger | 231 |
| 7.5 | Analysentechnik | 232 |
| 7.6 | Schmuck | 232 |
| 7.7 | Kunst und Design | 233 |
| 8. | Ausblick | 240 |

Vorwort



Die Additive Fertigung erschließt mit Kunststoffen und Metallen immer mehr Anwendungsgebiete und hat inzwischen einen hohen Bekanntheitsgrad in der Öffentlichkeit erreicht. In vielen Bereichen deuten sich umfassende Veränderungen durch den Einsatz der Additiven Fertigung an. In den letzten 30 Jahren haben zahlreiche Forschungsarbeiten die Grundlage dazu gelegt, dass die Additive Fertigung nun auch für keramische Komponenten in die industrielle Umsetzung gelangt.

Mit diesem Buch soll dem Leser ein umfassender Überblick über die unterschiedlichen Verfahren, deren Grundlagen und deren Potenzial zur industriellen Umsetzung gegeben werden. Der Einstieg in die Thematik wird durch theoretische Grundlagen vermittelt, die bei den unterschiedlichen Prozessen wirkenden Einflussgrößen werden vorgestellt und die auf die Eigenschaften eines Bauteils wirkenden Aspekte diskutiert.

Selbstverständlich können trotz der angestrebten Ausführlichkeit nicht alle Fragen beantwortet werden. Bei der Fülle der fast täglich neu erscheinenden Veröffentlichungen ist es auch nicht möglich, alle Aspekte der Forschung umfassend darzustellen.

Das Buch ist ein Versuch, den Stand von Wissenschaft und Technik zur Additiven Fertigung keramischer Komponenten zusammenzustellen. Der eine oder andere Leser wird Lücken finden. Für jeden Hinweis auf notwendige Ergänzungen bin ich daher dankbar.

Mein Dank gilt dem Vulkan-Verlag, der es übernommen hat, dieses Buch herauszugeben.

Wolfgang Kollenberg

Rheinbach, im Januar 2020

1. Einleitung

1. Einleitung

Die Additive Fertigung erschließt mit Kunststoffen und Metallen immer mehr Anwendungsgebiete und hat inzwischen auch in der Öffentlichkeit einen hohen Bekanntheitsgrad erreicht. Häufig wird in den Medien der Begriff „3-D-Druck“ als *Synonym* für die Additive Fertigung verwendet. Während „3-D-Druck“ das „Ausdrucken“ von Gegenständen aller Art beschreibt, veranschaulicht der Begriff „Additive Fertigung“ jedoch besser, dass es sich hier um ein professionelles Produktionsverfahren handelt, das sich deutlich von konventionellen Fertigungsmethoden unterscheidet. Unter dem Begriff „Additive Fertigung“ werden alle Prozesse zusammengefasst, die dazu dienen, durch Verbinden von Material, Bauteile aus 3-D-Daten selektiv, in aller Regel Schicht für Schicht, herzustellen [1].

Konventionelle Formgebungsverfahren wie das Schmieden (ca. 8000 v. Chr.) oder das Gießen (ca. 3000 v. Chr.) entwickelten sich über Jahrtausende hinweg zum heute etablierten industriellen Standard. Auch relativ junge Verfahren wie etwa das Fräsen (ca. 1820) oder das industrielle Schweißen (ca. 1900) basieren auf Jahrtausenden alten Prinzipien (Bohren – ca. 38000 v. Chr. und Feuerschweißen – ca. 3000 v. Chr.). Mit der Entwicklung der konventionellen Verfahren haben sich Qualitätsstandards etabliert, die auch an die Additive Fertigung gestellt werden. Unternehmen stehen heute zum ersten Mal einem Verfahren gegenüber, das standardisierte Qualitätsanforderungen noch vor dem Erreichen eines einheitlichen industriellen Fertigungsstandards erfüllen muss [2].

Die Form- bzw. Fertigungsverfahren werden nach DIN 8580 in sechs Hauptgruppen eingeteilt (**Bild 1.1**):

- 1. Urformen
- 2. Umformen
- 3. Trennen
- 4. Fügen
- 5. Beschichten
- 6. Stoffeigenschaften ändern.

Die in den Hauptgruppen 1 bis 4 eingesetzten Verfahren bestimmen die Form des Werkstücks und seinen stofflichen Zusammenhalt, die Verfahren der Hauptgruppen 5 und 6 zielen auf die Beeinflussung

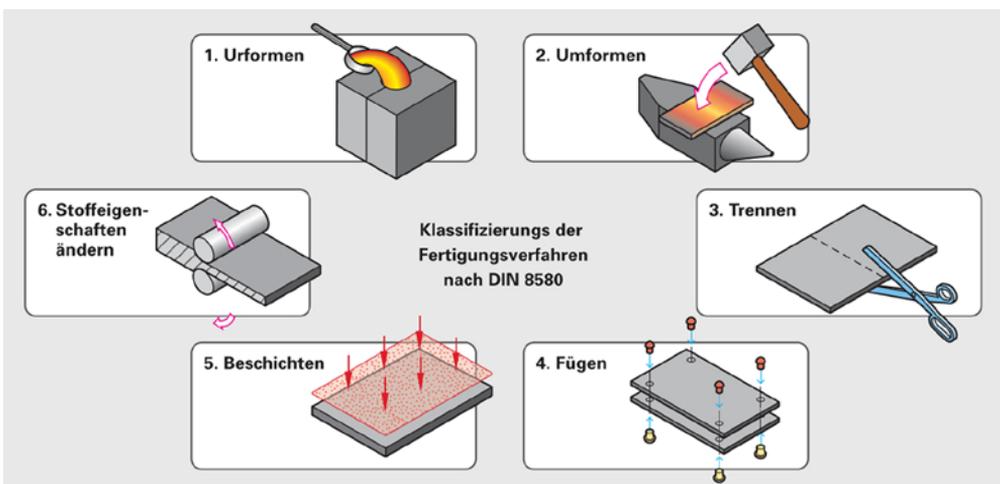


Bild 1.1: Einteilung der Formgebungsverfahren nach DIN 8580 [3]

seiner Stoffeigenschaften ab [3]. Die Additive Fertigung ist bis heute keiner Gruppe der DIN 8580 zuzuordnen. Auch wenn einige Autoren sie der Gruppe „Urformen“ zuordnen, so finden sich unter den Additiven Verfahren auch Aspekte der anderen Gruppen. Diesem Umstand hat der DIN Rechnung getragen und mit der Revision der DIN 8580 begonnen [4]. Durch die teilweise grundlegend neuen Ansätze der Additiven Fertigung sind zur industriellen Nutzung darüber hinaus neben dem Fertigungsprozess auch Herausforderungen in den Bereichen der Produktplanung, der Konstruktion und der Qualitätssicherung zu bewältigen [2].

Bei diesen klassischen Fertigungsverfahren kann man vereinfachend auch zwischen formativen und subtraktiven Verfahren unterscheiden. Damit werden zwei grundlegende Nachteile der klassischen Fertigungsverfahren deutlich: Entweder wird ein Werkzeug für die Formgebung benötigt oder es wird Materialverlust bei der subtraktiven Fertigung in Kauf genommen. Mit den Verfahren der Additiven Fertigung werden beide Nachteile überwunden.

Für die Additive Formgebung werden also keine Werkzeuge eingesetzt und es wird im Wesentlichen nur das Material benötigt, das für das Formteil gebraucht wird. Insbesondere kann man drei Vorteile hervorheben:

- Additive Verfahren bieten Zeit- und Kostenvorteile, da sie keine Werkzeuge benötigen: Die Herstellung von Werkzeugen für Spritzguss, Pressen, Extrusion usw. ist mit einem erheblichen Zeitaufwand verbunden. Darüber hinaus unterliegen Werkzeuge in der Keramikindustrie einem hohen Verschleiß, dem zwar durch Einsatz von Hartmetall entgegengewirkt werden kann, der aber letztendlich einen bedeutenden Kostenfaktor ausmacht.
- Additive Verfahren sind materialeffizient und ressourcenschonend: Für die Herstellung eines Bauteils wird nur das Material verbraucht, das tatsächlich im Bauteil enthalten ist. Durch die Fertigung entstehen keine nennenswerten Abfälle.
- Additive Verfahren bieten ein Maximum an geometrischer Freiheit: Die Formgebung ist nicht durch eine notwendige „Entformbarkeit“ aus einem Werkzeug limitiert. Damit lassen sich – unter den Einschränkungen der keramikgerechten Konstruktion – beliebige Geometrien erzeugen. Dies ist auch im Hinblick auf bionische Strukturen (z. B. beim Knochenaufbau oder bionisch-inspirierte Leichtbaustrukturen für technische Anwendungen) bzw. die Topologie Optimierung von Bedeutung.

In den 1980er Jahren wurde der Begriff „Rapid Prototyping“ für die neue Verfahrenstechnik geprägt. Die Zielsetzung war, in kurzer Zeit Prototypen bereitzustellen. Hierdurch konnte die Produktentwicklung beschleunigt werden. Die Materialien wiesen aber noch nicht die Eigenschaften auf, die von den späteren Produkten erwartet wurden. Erst durch die weitere Verbesserung der Verfahren und Materialien können heute zunehmend Komponenten hergestellt werden, die bedarfsgerechte Eigenschaften aufweisen.

Eine weitere Verkürzung der Entwicklungszeiten ergibt sich durch die Additive Fertigung von Werkzeugen bzw. Formen – ein Anwendungsfeld, das unter dem Begriff „Rapid Tooling“ bekannt ist. Im Bereich der keramischen Werkstoffe kann man hierbei beispielsweise zwei Aspekte unterscheiden: Einerseits können keramische Bauteile mit additiv gefertigten Kunststoff-Formen hergestellt werden, andererseits können keramische Formen und Gießkerne im Metallguss eingesetzt werden.

Die Additive Fertigung ist als Hilfsmittel bei der Produktentwicklung im Alltag der Teilnehmer einer VDI-Umfrage angekommen: 71,54 % setzen sie für die Fertigung von Prototypen und Pilotserien ein. Auch für die Herstellung von Fertigungswerkzeugen und Montagetools wird die Additive Fertigung zunehmend genutzt. Lediglich 12,71 % der Befragten nutzen die Additive Fertigung für die Produktion kompletter Endprodukte des eigenen Unternehmens [5].

Verfolgt man die Literatur zum Thema „Additive Fertigung“ bzw. „Additive Manufacturing“, so findet man eine Fülle von unterschiedlichen Begriffen und Wortschöpfungen. Unternehmen und Wissenschaftler tendieren dazu, Verfahren, die sie modifiziert oder neu entwickelt haben, jeweils neue und eigene Namen zu geben. Zwar ist das aus Sicht des Marketings nachvollziehbar, jedoch führt die Vielzahl unterschiedlicher Begriffe eher zur Verunsicherung der potenziellen Anwender.

In den Medien hat sich – verfahrensunabhängig – der Begriff „3-D-Druck“ etabliert. Das führt häufig zu Verwechslungen mit dem ursprünglich gleichnamigen „Pulver-Binder-Verfahren“. Auch die Bezeichnung „3-D-Drucker“ für alle in der Additiven Fertigung eingesetzten Maschinen ist in den Medien heute üblich und setzt sich auch in der Fachliteratur zunehmend durch.

Seit einigen Jahren werden auf nationaler wie internationaler Ebene Bemühungen unternommen, um zu einer einvernehmlichen Terminologie zu gelangen. Dies ist eine grundsätzliche Voraussetzung, um die Additive Fertigung in der Produktion einzuführen. Nur, wenn alle an der Wertschöpfungskette Beteiligten das gleiche Verständnis der benutzten Begriffe haben, ist die Umsetzung möglich.

In Deutschland war es der VDI, der als Erster mit einer Richtlinie Verfahren und Begriffe definierte. Der VDI hat mit der Richtlinie VDI 3404 im Jahr 2009 die erste technische Regel weltweit zum Thema Additive Fertigung veröffentlicht [6]. Heute arbeiten sechs Fachausschüsse, teils in mehreren Arbeitsgruppen, daran, das VDI-Richtlinienwerk zum Thema Additive Fertigung um neue Aspekte zu erweitern und bereits veröffentlichte Richtlinien zu aktualisieren. Alle aktuellen Ergebnisse werden in der Richtlinienreihe VDI 3405 veröffentlicht. Auf www.vdi.de/3405 ist eine stets aktualisierte Liste aller veröffentlichten und in Bearbeitung befindlichen Richtlinien des VDI zu den Additiven Fertigungsverfahren zu finden. International wird in der DIN EN ISO / ASTM 52900 [1] die Terminologie der Additiven Fertigung festgelegt, die auch in diesem Buch befolgt wird.

VDI-Richtlinien gelten wie Normen als „Anerkannte Regeln der Technik“. Dieser Begriff ist auch juristisch vom „Stand der Technik“ zu unterscheiden. Spätestens seit der „Kalkar-Entscheidung“ des Bundesverfassungsgerichtes [7], mit dem sich das Gericht der sogenannten „Drei-Stufen-Theorie“ angeschlossen hat, ist inhaltlich strikt zwischen diesen beiden Begriffen zu unterscheiden.

In der „Drei-Stufen-Theorie“ bilden die „Anerkannten Regeln der Technik“ die unterste Stufe. Diese Regeln sind allgemein anerkannt und basieren auf einem breiten fachlichen Konsens. Der „Stand der Technik“ ist dagegen weit anspruchsvoller. Hier werden alle technischen Neuerungen berücksichtigt. Am dynamischsten ist der „Stand von Wissenschaft und Technik“, weil dieser die neuesten technischen und wissenschaftlichen Erkenntnisse umfasst und er insbesondere nicht durch das gegenwärtig Realisierte und Machbare begrenzt wird [8].

In Anlehnung an die juristische Definition [9] gilt:

- „Anerkannte Regeln der Technik“ sind schriftlich fixierte technische Festlegungen für Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen, die nach vorherrschender Auffassung der beteiligten Kreise (Fachleute, Anwender, Verbraucherinnen und Verbraucher und öffentliche Hand) geeignet sind, vorgegebene Ziele zu erreichen und die sich in der Praxis allgemein bewährt haben oder deren Bewährung nach herrschender Auffassung in überschaubarer Zeit bevorsteht.
- „Stand der Technik“ ist der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen, der nach herrschender Auffassung führender Fachleute das Erreichen eines vorgegebenen Zieles gesichert erscheinen lässt. Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen oder vergleichbare Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen müssen sich in der Praxis bewährt haben oder sollten – wenn dies noch nicht der Fall ist – möglichst im Betrieb mit Erfolg erprobt worden sein.
- „Stand von Wissenschaft und Technik“ ist der Entwicklungsstand fortschrittlichster Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen, die nach Auffassung führender Fachleute aus Wissenschaft und Technik auf der Grundlage neuester wissenschaftlich vertretbarer Erkenntnisse im Hinblick auf vorgegebene Ziele für erforderlich gehalten werden und das Erreichen dieses Ziels gesichert erscheinen lassen.

Für eine junge Technologie wie die Additive Fertigung ist diese Betrachtung notwendig, da sie dem Anwender eine entsprechende Sicherheit auch im juristischen Sinn vermittelt. Für vertragliche Vereinbarungen zwischen Hersteller und Lieferant sind die „Anerkannten Regeln der Technik“ von größter Bedeutung. Bei der Additiven Fertigung werden die Produktionsabläufe deutlich komplexer, wenn der „Hersteller“ aus unterschiedlichen Parteien besteht. Wenn beispielsweise der Kunde ein

Ersatzteil bei einem Lieferanten bestellt, das aber bei einem lokalen Dienstleister oder sogar von ihm selbst „gedruckt“ wird, erscheint die Frage der Gewährleistung in einem neuen Zusammenhang. Eine entsprechende Richtlinie ist in Vorbereitung [10]. An dieser Stelle sei auf weiterführende Literatur verwiesen [11], [12].

Keramische Werkstoffe treten in der öffentlichen Wahrnehmung weniger als Metalle und Kunststoffe auf – abgesehen von Porzellan, Sanitärkeramik oder Fliesen. Sie sind jedoch bei fast allen technischen Prozessen von großer Bedeutung. Als Strukturkeramik kommen sie in besonders abrasiven und/oder korrosiven Umgebungen zum Einsatz, ihre Biokompatibilität prädestiniert Keramiken für Implantate in der Medizin und bei allen Hochtemperatur- und Schmelzprozessen finden Feuerfest-Keramiken eine Anwendung. Funktionskeramiken sind in der Elektronik unverzichtbar als Isolatoren, Halbleiter, Kondensatoren, Sensoren oder auch Piezoaktoren. Aufgrund dieser weitreichenden Anwendungsgebiete ist es selbstverständlich, dass auch für Keramiken die additive Formgebung neue Möglichkeiten eröffnet.

Die Additive Fertigung keramischer Komponenten befindet sich in einer frühen Entwicklungsphase. Im Vergleich zu Metallen und Kunststoffen ist die Verarbeitung keramischer Rohstoffe weit weniger verbreitet; die industrielle Umsetzung steht erst am Anfang. Der Umfang „Anerkannter Regeln der Technik“ ist noch vergleichsweise gering. Der „Stand der Technik“ beschränkt sich auf sehr wenige Beispiele. So ist es die Aufgabe dieses Buches, den „Stand von Wissenschaft und Technik“ für die Additive Fertigung keramischer Komponenten zusammenzustellen. Der technologische Reifegrad und die Potenziale zur industriellen Umsetzung werden umfassend diskutiert und bewertet.

Betrachtet man die Anzahl der weltweiten Veröffentlichungen zum Thema Additive Fertigung von Keramik (**Bild 1.2**), so wird deutlich, dass die Anzahl der Veröffentlichungen erst in den letzten Jahren deutlich zugenommen hat. Davon stammen die meisten Veröffentlichungen aus den USA und China, gefolgt von Deutschland (**Bild 1.3**). Die Additive Fertigung mit Keramik ist demzufolge ein Thema, das noch sehr intensiv wissenschaftlich begleitet wird. Dabei ist zu beobachten, dass das akademische Interesse eher auf die Erforschung neuer Verfahren als auf die industrielle Umsetzung fokussiert.

Für die Keramikindustrie, insbesondere in Deutschland, war die *ceramitec* 2015 in München in diesem Zusammenhang von besonderer Bedeutung. Erstmals präsentierte ein Keramikproduzent (Schunk Ingenieurkeramik GmbH, Willich) großformatige, additiv hergestellte Komponenten aus SiSiC. Damit nahm das Interesse an der Additiven Fertigung in der Keramikindustrie deutlich zu. Neue Möglichkeiten im Bereich Technische Keramik boten sich auch durch die von der österreichi-

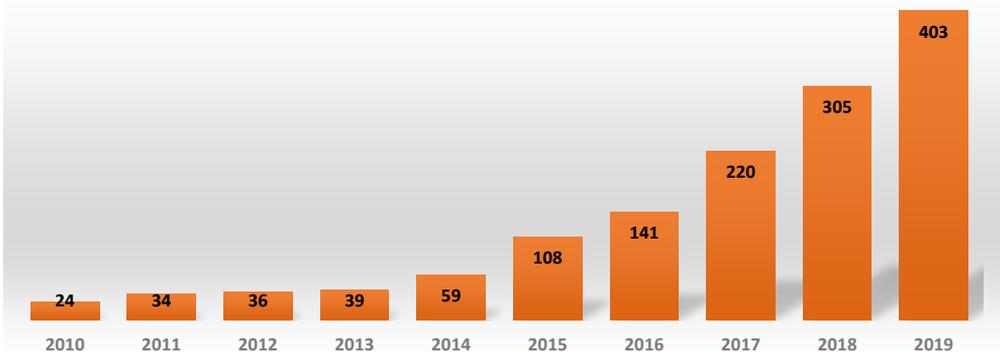


Bild 1.2: Anzahl der weltweiten Veröffentlichungen zum Thema „Additive Manufacturing Ceramic“ bzw. „3D Printing Ceramic“ seit 2010 (Quelle: Web of Science)

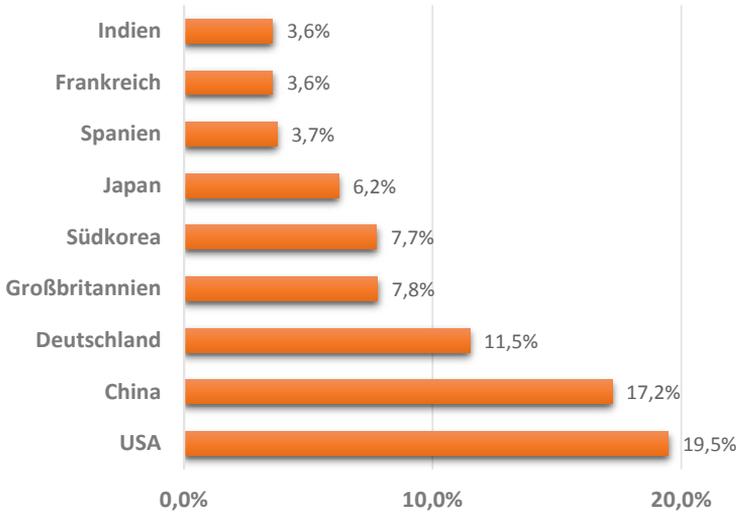


Bild 1.3: Von den weltweiten Veröffentlichungen zum Thema „Additive Manufacturing Ceramic“ bzw. „3D Printing Ceramic“ von 2010 bis 2018 stammen 80 % aus den aufgeführten Ländern (Quelle: Web of Science)

schen Firma Lithoz zur Serienreife entwickelten Maschine CeraFab 8500, die die Fertigung kleiner, hoch präziser Bauteile ermöglicht.

In den letzten Jahren hat das Interesse an der industriellen Umsetzung der Additiven Fertigung keramischer Komponenten deutlich zugenommen. Dabei stellt die neue Technik ein reines Formgebungsverfahren dar. Die grundsätzlichen Prozessschritte der keramischen Fertigung bleiben bestehen. Allerdings ist zu beachten, dass die additive Formgebung nur ein Teilschritt ist. Die Additive Fertigung lässt sich grundlegend in eine Abfolge verschiedener Schritte gliedern (**Bild 1.4**). Dies verdeutlicht, dass die unterschiedlichen Verfahren nur den Aspekt der Realisierung betreffen, das eigentlich zu fertigende Produkt jedoch das Resultat eines deutlich umfassenderen Prozesses ist, der in Kapitel 2 diskutiert wird.



Bild 1.4: Die Prozessschritte der Additiven Fertigung

In Kapitel 3 werden einige grundlegende Aspekte diskutiert, die verfahrensübergreifend von Bedeutung sind.

Für die Additive Fertigung keramischer Komponenten stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung, die jeweils spezifische Vorteile und Limitierungen haben. Diese werden ausführlich in Kapitel 4 dargestellt. Für die industrielle Umsetzung sind kommerziell verfügbare Maschinen von großer Bedeutung, daher werden auch diese aufgeführt.

Die Potenziale der Additiven Fertigung werden in Kapitel 5 diskutiert, insbesondere unter dem Aspekt „Design und Konstruktion“.

In Kapitel 6 werden die Verfahren der Additiven Fertigung keramischer Komponenten vergleichend bewertet und ihr technischer Reifegrad wird analysiert.

Größere Anwendungsgebiete, soweit sie heute zumindest ansatzweise zu erkennen sind, werden in Kapitel 7 vorgestellt.

Da das hier behandelte Thema in einer raschen Entwicklungsphase ist, in der es fast täglich neue Pressemitteilungen und Veröffentlichungen gibt, wird in Kapitel 8 ein Ausblick gegeben.

Literatur

- [1] DIN EN ISO / ASTM 52900: Additive Fertigung – Grundlagen – Terminologie. 2018
- [2] Büsching, J.; Brandis, R.; Kruse, A.; Jahnke, U.; Koch, R.: Industrielle Einführung der Additiven Fertigung. In: wt Werkstattstech. online, 108 (2018), S. 413-418
- [3] Berger, U.; Hartmann, A.; Schmid, D.: 3D-Druck – Additive Fertigungsverfahren. 2. Auflage. Verlag Europa-Lehrmittel, Haan, 2017
- [4] DIN: Revision der Grundlagennorm DIN 8580 „Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung“. Pressemitteilung, 02.05.2018
- [5] VDI: Additive Fertigung – 3-D-Druckverfahren sind Realität in der industriellen Fertigung. VDI-Statusreport, 2019
- [6] VDI-Richtlinie 3405: Additive Fertigungsverfahren. Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen. Beuth Verlag, Berlin, 2009
- [7] BVerfG: Beschluss vom 08.08.1978 – 2 BvL 8/77. openJur 2011, 92758, 1978
- [8] Seibel, M.: Abgrenzung der „anerkannten Regeln der Technik“ vom „Stand der Technik“. In: NJW, 41 (2013), S. 3.000-3.004
- [9] Bundesministerium der Justiz: Handbuch der Rechtsförmlichkeit. 60 (2008) 160
- [10] VDI-Richtlinie 3405, Blatt 5: Rechtliche Aspekte der additiven Fertigungsverfahren. Prozesskette und Datenumwandlung. 2020
- [11] Leupold, A.: 3D Printing. Recht, Wirtschaft und Technik des industriellen 3D-Drucks. C.H.Beck, München, 2017
- [12] Brisch, K. M.; Müller-ter Jung, M.: 3D Printing. Rights to Data and IT Security in the Field of Additive Manufacturing. In: dotmagazine, online issue, 2017

2. Die Prozesskette der Additiven Fertigung

2. Die Prozesskette der Additiven Fertigung

Für alle keramischen Werkstoffe gilt das gleiche verfahrenstechnische Grundprinzip: Aus Rohstoffen wird ein Körper geformt und unter Einwirkung von Temperatur verfestigt. Neben der Komplexität und Reproduzierbarkeit der Geometrien müssen insbesondere die grundlegenden Werkstoffeigenschaften durch die Formgebung auf das Bauteil übertragen werden. Dem jeweils gewählten Formgebungsverfahren muss eine entsprechende Aufbereitung der Pulver und Additive vorhergehen. Diese hat die Aufgabe, je nach Verfahren, optimale Granulate, Massen oder Suspensionen bereitzustellen, die eine homogene Dichte und Verteilung aller Komponenten im Formkörper gewährleisten. Je nach Formgebungsverfahren können Abweichungen von dem generellen Fertigungsschema, wie es **Bild 2.1** zeigt, auftreten.

Wesentliche Eigenschaften des späteren Werkstoffes werden bereits mit der Auswahl der Pulver festgelegt. Um nicht nur nach chemischen und mineralogischen Gesichtspunkten eine Auswahl zu treffen, müssen die durch die Pulverherstellung bedingten Eigenschaften (Korngröße, spezifische Oberfläche, Reinheit usw.) beachtet werden.

In den letzten Jahrzehnten hat es im Bereich der Technischen Keramik eine erhebliche Steigerung an Forschungs- und Entwicklungserfolgen gegeben. Aber während die Umsatzzahlen im Bereich der Funktionskeramik um mehr als 30 % jährlich gestiegen sind, bleiben im Bereich der Strukturkeramik die Umsatzsteigerungen deutlich hinter den Erwartungen zurück. Als wesentlicher Grund sind die hohen Fertigungskosten anzusehen [1].

Insbesondere die Fertigung komplexer Bauteile in engen Toleranzen ist – nicht zuletzt auch aufgrund der Schwindung während des Sinterprozesses – problematisch. Die häufig notwendige Bearbeitung nach dem Brand ist aufgrund der hohen Härte sehr aufwendig. Bei entsprechender Festigkeit ist eine Bearbeitung auch schon nach der Formgebung – die sogenannte „Grünbearbeitung“ – möglich. Insbesondere im Bereich der Dentalkeramik hat sich eine weitere Variante – die sogenannte „Weißbearbeitung“ – etabliert. Dazu werden Halbzeuge bei niedriger Temperatur vorgesintert und mit entsprechenden Schwindungsmaßen bereitgestellt.

Die Herstellung Technischer Keramik erfordert ein hohes Maß an Prozessfähigkeit und Prozesssicherheit. Aufgrund der kostenintensiven Fertigung müssen alle Prozessschritte von einer strengen Qualitätsüberwachung begleitet werden, um die Kosten durch Ausschuss nach dem Brand zu minimieren.

Wird die Additive Fertigung als Formgebungsverfahren für die Herstellung keramischer Bauteile eingesetzt, stellt sich als wesentliche Änderung in der Prozesskette der Wegfall eines Werkzeuges dar (**Bild 2.2**). Damit verbunden sind Zeit- und Kosteneinsparungen:

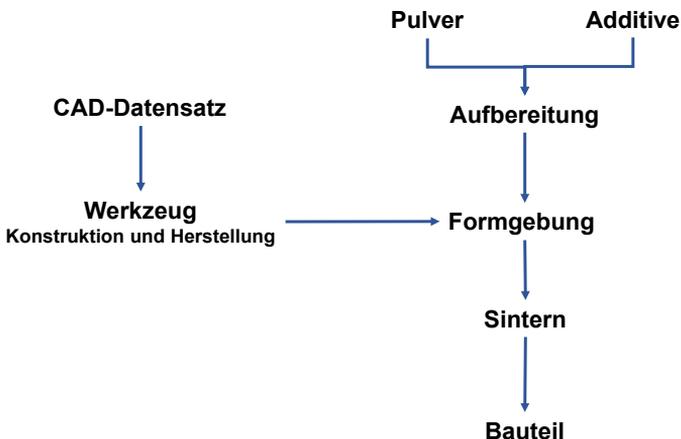
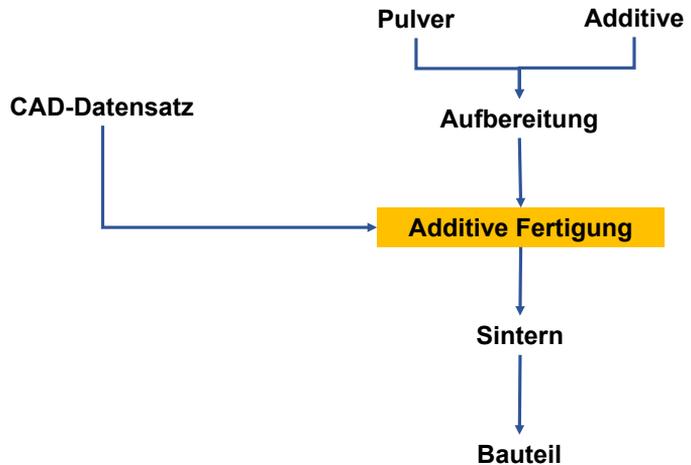


Bild 2.1: Schematischer Ablauf der Fertigung keramischer Bauteile

Bild 2.2: Additive Fertigung als Teil der keramischen Prozesskette



- Zeit:
 - Die Herstellung von Werkzeugen dauert drei bis sechs Monate.
 - Ein Werkzeugwechsel an einer Maschine dauert mehrere Stunden.
- Kosten:
 - Aufgrund der starken abrasiven Beanspruchung ist die Standzeit der Werkzeuge begrenzt.
 - Der Einsatz von Hartmetall verlängert die Standzeit, erhöht aber deutlich die Kosten.
 - Die Werkzeuge müssen eingelagert werden und verursachen dadurch Raumkosten.

Der additiv gefertigte keramische Formkörper ist in aller Regel ein Grünling, der einer nachfolgenden thermischen Behandlung unterzogen wird. Insofern sind die Grundprinzipien des „keramikgerechten Konstruierens“ auch für die Additive Fertigung zu beachten. Vor dem Sinterprozess kann eine Entbinderung bei hohem organischem Anteil des Grünlings notwendig sein.

Die Additive Fertigung folgt im Allgemeinen einer Prozesskette, deren Grundlage ein CAD-Volumenmodell des zu fertigenden Bauteils 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, die dann physikalisch während des Bauprozesses in der Anlage erzeugt werden. Dieser Vorgang wird als „Slicen“ bezeichnet. Jede dieser Schichten beinhaltet demnach eine 2,5-dimensionale Geometrieinformation für das Bauteil. Diese Vorgehensweise eröffnet die Möglichkeit, sehr komplexe Geometrien herzustellen, die durch konventionelle oder spanende Verfahren nicht oder nur sehr aufwändig umzusetzen wären [2].

Der Prozess der Additiven Fertigung (**Bild 2.3**) besteht neben der eigentlichen Realisierung der Komponente aus verschiedenen vor- und nachgeschalteten Prozessschritten, die im

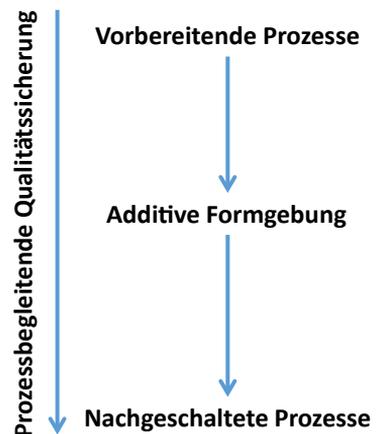


Bild 2.3: Zusammenfassende Darstellung der Prozesskette der Additiven Fertigung

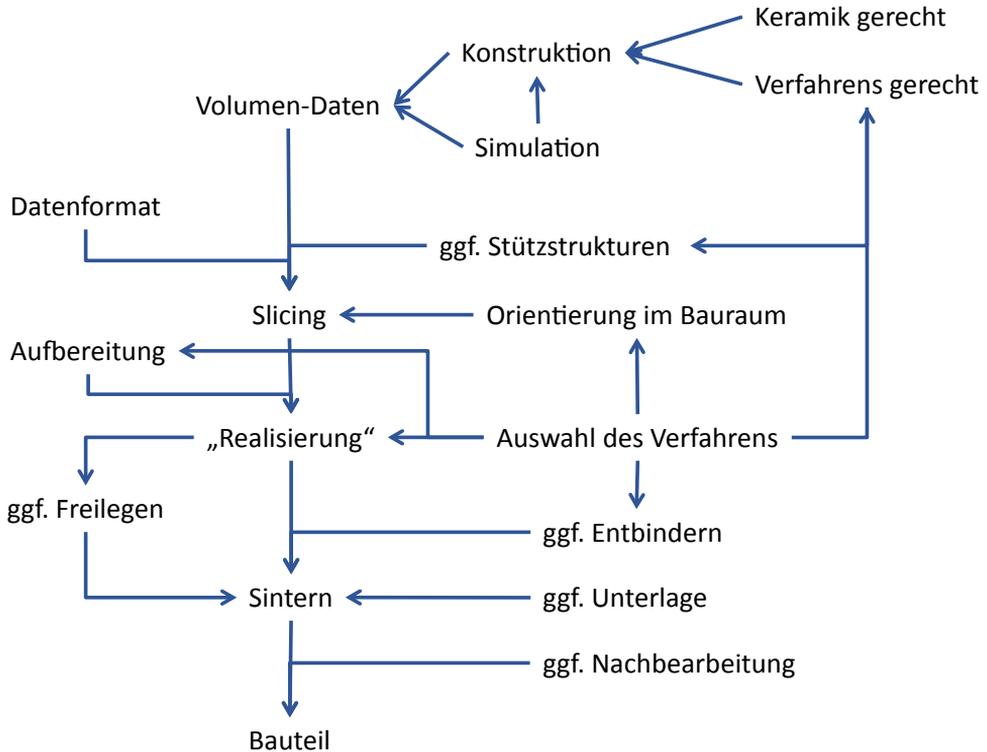


Bild 2.4: Einflussgrößen und Wechselwirkungen entlang der Prozesskette

Folgenden vorgestellt werden. Entlang der Prozesskette ergeben sich verschiedene Wechselwirkungen und Einflussgrößen, die bei der Additiven Fertigung keramischer Komponenten zu beachten sind. Eine grobe Skizze ist in **Bild 2.4** dargestellt. So müssen neben den für das Konstruieren keramischer Bauteile üblichen Regeln auch die Besonderheiten des Verfahrens berücksichtigt werden. Werden die Daten über eine Simulation generiert, ist zu prüfen, ob diese Struktur „keramikgerecht“ ist, d. h., ob sie den Sinterprozess unter Berücksichtigung der dabei auftretenden Schwindung und den resultierenden Spannungen schadensfrei überstehen kann. Sofern die Eigenschaften nach dem Sintern anisotrop sind und das Verfahren es zulässt, muss das Volumenmodell vor dem Slicing entsprechend orientiert werden. Der – neben dem Sintern – wichtigste nachgeschaltete Prozess ist das Freilegen des Grünlings.

2.1 Vorgeschnittene Prozesse

Bevor die Realisierung eines Bauteils beginnt, muss das digitale Modell entworfen und aufbereitet werden. Da der Aufbau des Objektes schichtweise erfolgt, muss aus den dreidimensionalen Daten eine Abfolge von gleichdicken Schichten erstellt werden. Der Prozess der Additiven Fertigung kann auch in eine vorgeschaltete virtuelle und eine reale Ebene unterschieden werden (**Bild 2.5**). Die vorgeschalteten Prozesse finden primär auf der virtuellen Ebene statt. Die Aufbereitung der zu verarbeitenden Masse ist zwar auch ein vor der Formgebung durchzuführender Prozessschritt, wird in diesem Zusammenhang aber nicht diskutiert, da die Aufbereitung grundsätzlich in der Keramikfertigung vor einer Formgebung erfolgt.

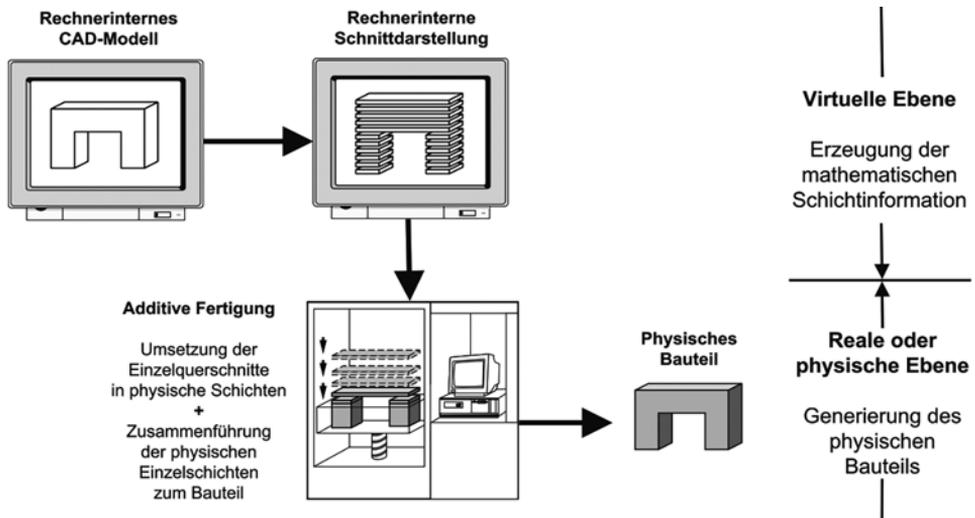


Bild 2.5: Prozesse der Additiven Fertigung auf virtueller und realer Ebene [3]

2.1.1 CAD-Volumenmodelle

Voraussetzung für die Additive Fertigung ist, dass das herzustellende Bauteil in Form eines digitalen dreidimensionalen Modells vorliegt, das i. d. R. als CAD-Volumenmodell bezeichnet wird. Computergestützte Konstruktionstechniken sind heute Stand der Technik; sie werden unter dem Begriff CAD (Computer Aided Design) zusammengefasst. Das CAD-Modell kann auf unterschiedliche Weise erstellt werden:

- Konstruktion
- Simulation
- Mathematisches Modell
- Computertomographie
- 3D-Scannen.

Das Konstruieren eines Bauteils mit einer CAD-Software kann auf zwei unterschiedlichen Modellen (**Bild 2.6**) basieren [3], [4]:

- Bei Grundkörpermodellen (Constructive Solid Geometry – CSG-Modell) wird das Bauteil im CAD-System durch das Verknüpfen von Grundkörpern, sogenannten geometrischen Primitiven, wie Quadern, Kugeln, Zylindern usw. definiert. Der Speicherbedarf bleibt mit dem Einsatz von CSG relativ gering, die Bearbeitung, insbesondere partielles Ändern der Geometrie, ist jedoch sehr unflexibel.
- Beim Flächenbegrenzungsmodell (Boundary Representation – B-Rep-Modell) werden im Extremfall nur die Einzelflächen und die Lage des Volumens abgespeichert. Dabei entsteht ein regelrechtes Netzwerk aus Flächengeometriedaten und Verknüpfungspunkten. Der Speicherbedarf ist mit B-Rep daher sehr groß. Durch diesen Modelltyp können auch bezüglich der äußeren Begrenzung extrem komplexe Körper dargestellt werden, was sonst nur mithilfe von Flächenmodellen möglich ist.

In den meisten heutigen 3D-CAD Anwendungen werden hybride Modelle verwendet, welche die CSG-Modelle ablösen. Die Hybridmodelle sind keine homogenen Modelle, sondern stellen in diesem Fall eine Mischung aus CSG und B-Rep dar. Aus der CSG wurden die Datenstruktur und die Algorithmen und aus der B-Rep die Strukturen für die einzelnen Knoten der primären CSG-Struktur

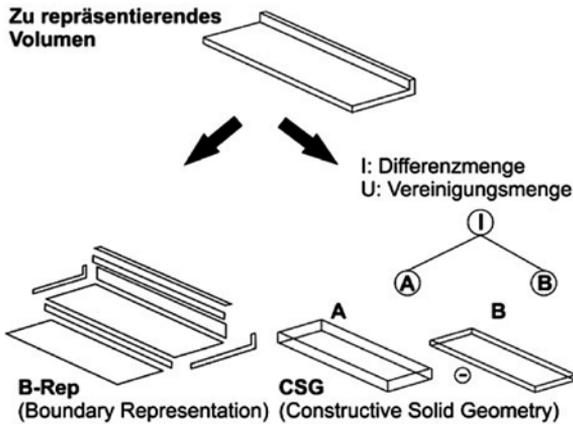


Bild 2.6: CAD-Volumenmodelle: Vergleich von CSG- und B-Rep-Modellen [4]

übernommen. Die B-Rep-Volumina können als „komplexe Primitive“ angesehen werden. Über die Benutzeroberfläche der heutigen Anwendungen ist nicht sichtbar, an welcher Stelle die CSG- und die B-Rep-Strukturen verwendet werden, jedoch kann gesagt werden, dass die Entstehungshistorie auf den CSGs und die Beziehungen auf den B-Reps basieren [4].

Wichtig für die Additive Fertigung ist, dass das Volumenmodell eine geschlossene Oberfläche aufweist, da es sonst zu Fehlern bei der weiteren Verarbeitung der Daten kommt.

Simulationen spielen heute für die Beschreibung von physikalischen Prozessen eine bedeutende Rolle. Laufen Simulationen dreidimensional ab, so ergeben sie i. d. R. Volumendaten. Auf diesem Wege können auch Daten für die Additive Fertigung generiert werden. Ein prominentes Beispiel ist die Topologieoptimierung, bei der die Form eines Bauteils nicht mehr vom Konstrukteur vorgeben wird, sondern über Algorithmen auf Basis des Belastungsfalls errechnet wird. Auch das Strömungsverhalten von Düsen oder die Durchströmbarkeit von Filtern (**Bild 2.7**) kann mittels Simulation optimiert werden. Auf diesem Wege entstehen häufig Bauteile, die nur additiv zu fertigen sind. Während früher die Simulation eher dazu diente, eine Konstruktion, beispielsweise mittels FEM, zu überprüfen, kann Simulation heute, aufgrund gesteigerter Rechnerleistungen, der Konstruktion vorgeschaltet werden oder diese sogar ersetzen.

Eine spezielle Form der Simulation ist das Erzeugen mathematischer Modelle. Der Schweizer Mathematiker Ludwig Schläfli (1814-1895) befasste sich mit mehrdimensionaler Geometrie. Sein Hauptwerk „Theorie der vielfachen Kontinuität“ verfasste er zwischen 1850 und 1852. Dort beschreibt Schläfli auch Polytope, also Körper in drei oder mehr Dimensionen, die er „Polyschemas“ nennt. Heute ist es möglich, derartige Strukturen mittels Additiver Fertigung zu realisieren und damit die zugrunde liegende Theorie zu veranschaulichen (**Bild 2.8**).

Auch Objekte der fraktalen Geometrie lassen sich mittels Additive Fertigung darstellen. **Bild 2.9** zeigt die Entstehung des Menger Schwamms durch Iteration. Mit fortschreitender Iteration strebt die Oberfläche des Menger Schwamms gegen unendlich und das Volumen gegen Null.

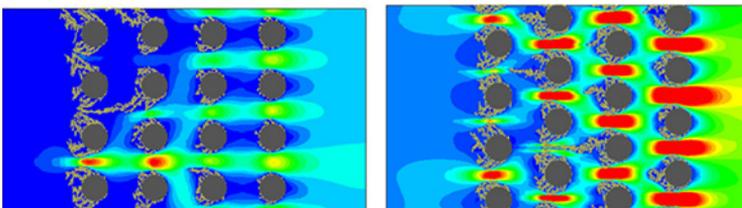
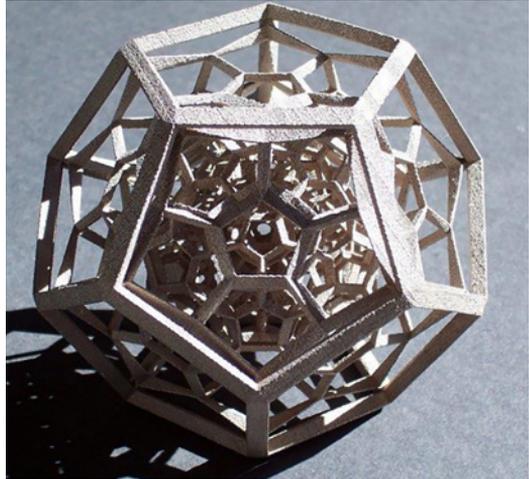


Bild 2.7: Simulation der Gasgeschwindigkeit beim Durchströmen unterschiedlicher Gitter [5]

Bild 2.8: Dreidimensionaler Schatten des vierdimensionalen Hyperdodekaeders [6]



Die Beispiele zeigen, dass Volumenmodelle auch auf Basis mathematischer Modelle entwickelt werden können. Insbesondere die fraktale Geometrie hält für unterschiedliche Anwendungsfälle interessante Geometrien bereit.

Im Gegensatz zu konventionellen Röntgenaufnahmen liefert die Computertomographie (CT) dreidimensionale Informationen über die Dichteverteilung in einem Körper. Dies erfolgt durch computerbasierte Auswertung einer Vielzahl aus verschiedenen Richtungen aufgenommener Röntgenaufnahmen eines Menschen oder Objektes. Aus dem berechneten Volumenmodell werden digital Schnittbilder rekonstruiert. Damit ist eine direkte Analogie zur Additiven Fertigung gegeben. CT-Volumenmodelle können beispielsweise Ausgangsdaten für Knochenimplantate liefern, die additiv gefertigt werden. Häufig werden, basierend auf CT-Daten, präoperative Planungsmodelle und Modelle von Organen hergestellt. Beides hilft Ärzten und Patienten Erkrankung und Behandlung besser miteinander zu besprechen.

In der konventionellen Radiographie ist ein Dichteunterschied von ca. 10 % nötig, um einen hinreichenden Kontrast zu erhalten. In der Computertomographie reicht dagegen ein Dichteunterschied von ca. 0,5 %. Die Ortsauflösung hängt von der Art des CT und der Objektgröße ab. Bei CT-Aufnahmen von Menschen kann eine Auflösung von $< 0,4$ mm erreicht werden. Bei industriellen CT-Verfahren kann die Auflösung mit 0,1 % der Objektgröße beschrieben werden, d. h. mit der Größe des Objek-

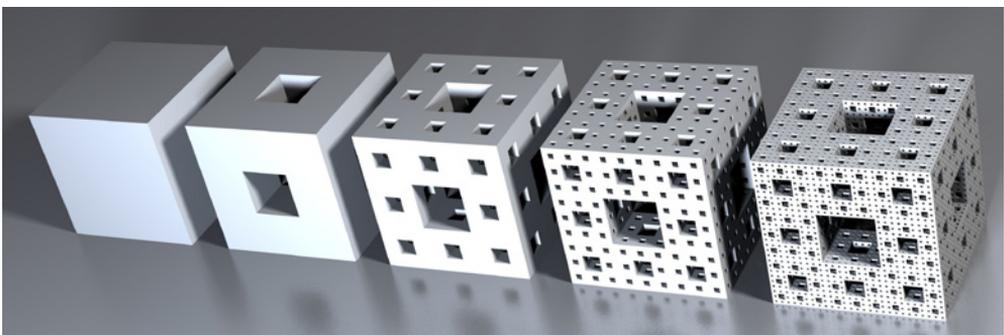


Bild 2.9: Entstehungsreihe des Menger-Schwamms vom Würfel bis zur vierten Iteration [7]



Bild 2.10: Scan-Raum mit 80 Spiegelreflexkameras, die gleichzeitig auslösen (Quelle: breeze media GmbH, Schorndorf, Deutschland)

tes nimmt die Auflösung ab. Bei einem Objekt von 200 mm kann also eine Auflösung von 200 μm erreicht werden.

Eine weitere Möglichkeit, Volumendaten zu erzeugen, ist das 3D-Scannen. Unter 3D-Scannen versteht man das berührungslose Vermessen von Objekten mittels Laserstrahlen oder Licht. Das 3D-Scannen eignet sich für die Digitalisierung von Objekten beliebiger Größe, empfindlichen Kunstgegenständen und auch Menschen.

Das einfachste Verfahren ist die Photogrammetrie. Hierfür benötigt man eine Digitalkamera, mit der man das Objekt aus allen möglichen Richtungen fotografiert. Diese Aufnahmen werden mithilfe spezieller Triangulationsalgorithmen zusammengefügt und es entsteht eine dreidimensionale Abbildung des Objektes. Damit dieser Vorgang funktioniert, müssen die Fotos markante Punkte enthalten, beispielsweise sich auf allen Fotos wiederholende, scharfe Linien oder Hell-Dunkel-Muster. Bei Verwendung der geeigneten Software wird jeder einzelne Punkt durch seine Lage entlang der x-, y- und z-Achse definiert und stellt damit einen mathematischen Ausdruck des Objektes dar. Gleichzeitig kann die Farbe der Oberfläche erfasst und über das errechnete dreidimensionale Modell gelegt werden. Die Berechnung und die anschließende Bearbeitung der Daten können einige Stunden in Anspruch nehmen. Das Verfahren kann deutlich vereinfacht werden, wenn statt einer Kamera viele Kameras synchron eingesetzt werden (**Bild 2.10**). Diese Methode wird bevorzugt beim Scannen von Personen eingesetzt.

Bei der Verwendung von strukturiertem Licht werden Photogrammetrische Verfahren mit einem Lichtmuster, im einfachsten Fall Streifen, kombiniert, welches auf das zu untersuchende Objekt projiziert wird (**Bild 2.11**). Aus den unterschiedlichen Kamerapositionen betrachtet, erscheint das Streifenmuster verzerrt und kann zur exakten geometrischen Rekonstruktion des Objektes verwendet werden. Solche Systeme haben eine sehr kurze Aufnahmezeit.

Laserscanner erzeugen das dreidimensionale Bild, indem die Koordinaten für jeden einzelnen der erzeugten Bildpunkte mithilfe einfacher geometrischer Prinzipien errechnet werden. Die Abstandsmessung mittels Laser kann nach zwei Prinzipien erfolgen:

- Nach dem Prinzip des Phasenvergleichsverfahrens wird die Verschiebung der Messwelle ermittelt. Das heißt, die vom Laserscanner ausgesandten Wellen und mit unterschiedlicher Wellenlänge reflektierten Wellen werden miteinander verglichen, wodurch die Wegstrecke berechnet wird.
- Bei pulsbasierten Laserscannern werden einzelne Messimpulse ausgesandt und deren Laufzeit zwischen Austritt und Eintritt gemessen. Bei diesem Prinzip ist die Messgeschwindigkeit deutlich geringer; es lassen sich jedoch sehr große Reichweiten ($> 2 \text{ km}$) erzielen.

Laserscanner bestehen aus dem Laserprojektor (Punkt- oder Linienprojektor), einer abzubildenden Oberfläche und einem Empfänger, die im Dreieck zueinander ausgerichtet sind. Der Laserstrahl tastet die Oberfläche ab und wird in Richtung Empfänger abgelenkt, der dann für jeden einzelnen



Bild 2.11: Projektion eines Linienmusters auf eine Kugeloberfläche (links) (Quelle: Fachhochschule Dortmund) und Anwendungsbeispiel (rechts) (Quelle: 3D Activation GmbH, Wiesbaden, Deutschland)

Punkt seine Position im Raum berechnet (**Bild 2.12**). I. d. R. werden zwei hochauflösende Kameras verwendet. Werden gleichzeitig Farbinformationen gesammelt, kann die errechnete Oberfläche farbig dargestellt werden. Mit Laserscannern lassen sich sehr präzise dreidimensionale Rekonstruktionen erzeugen [8].

3D-Scanner können stationär in Form eines Messplatzes betrieben werden oder handgeführt. Handgeführte Geräte bieten den Vorteil, dass sie auch für größere Objekte eingesetzt werden können. Das Oberflächenbild wird während der Bewegung des Scanners erzeugt und kann auf einem Monitor beobachtet werden (**Bild 2.13**). Dadurch können Lücken im Scan sofort erkannt und beseitigt werden.

Die Auflösung von 3D-Scannern ist unterschiedlich. Je nach System kann die Auflösung zwischen 1 und 0,1 % bezogen auf die Entfernung zwischen Scanner und Objekt betragen. Grundsätzlich kann man bei Laserscannern eine höhere Auflösung erwarten. Allerdings können auch auf dem Wege der Photogrammetrie sehr hohe Auflösungen für sehr kleine Strukturen erreicht werden [10], [11].

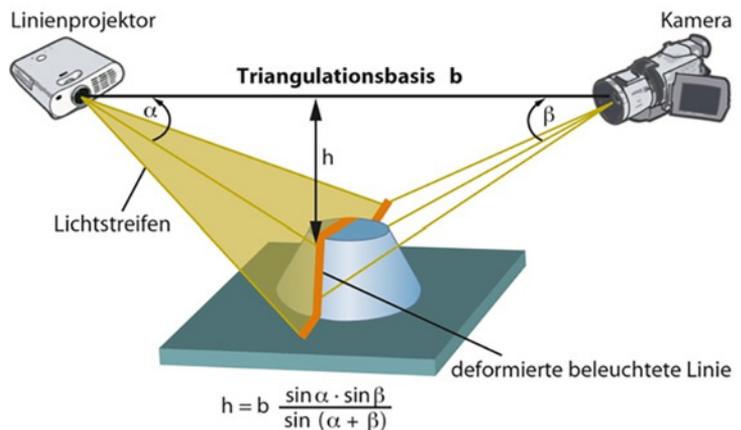


Bild 2.12: Beim Lichtschnittverfahren kann man aus der Verzerrung einer Linie auf einer Oberfläche die Tiefe ableiten [9]