



(10) **DE 10 2020 101 783 A1** 2021.07.29

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2020 101 783.9**

(22) Anmeldetag: **24.01.2020**

(43) Offenlegungstag: **29.07.2021**

(51) Int Cl.: **B29C 64/165 (2017.01)**

**B33Y 10/00 (2015.01)**

(71) Anmelder:

**Additive Elements GmbH, 82152 Planegg, DE**

(74) Vertreter:

**2s-ip Schramm Schneider Bertagnolli Patent- und  
Rechtsanwälte Part mbB, 81679 München, DE**

(72) Erfinder:

**Kramer, Thilo, 80339 München, DE; Günther,  
Johannes, 82152 Planegg, DE; Pietzner, Daniel,  
80997 München, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

|           |                         |           |
|-----------|-------------------------|-----------|
| <b>US</b> | <b>2016 / 0 083 589</b> | <b>A1</b> |
| <b>US</b> | <b>2019 / 0 054 690</b> | <b>A1</b> |
| <b>US</b> | <b>2019 / 0 134 898</b> | <b>A1</b> |
| <b>WO</b> | <b>2019/ 177 612</b>    | <b>A1</b> |

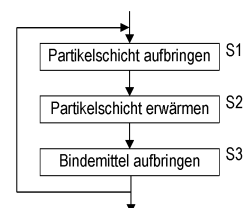
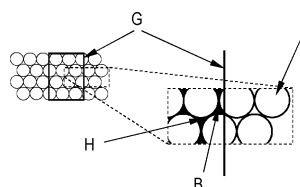
Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Herstellen eines dreidimensionalen Formteils**

(57) Zusammenfassung: Bereit gestellt wird ein Verfahren zum Herstellen eines dreidimensionalen Formteils in einem additiven Fertigungsverfahren, wobei

- in einem ersten Schritt ein pulverförmiges Ausgangsmaterial als Partikelschicht in einen Bauraum eingebracht wird,  
- in einem zweiten Schritt ein flüssiges Bindemittel selektiv auf die Partikelschicht aufgebracht wird, wobei die Schritte solange wiederholt werden, bis das Formteil aufgebaut ist, und wobei als Ausgangsmaterial ein Polymerpulver verwendet wird, und dieses auf eine vorbestimmte erste Temperatur erwärmt wird.



**Beschreibung**

## Gebiet der Erfindung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Herstellen eines dreidimensionalen Formteils in einem additiven Fertigungsverfahren, insbesondere in einem sogenannten Binder Jetting Verfahren.

## Hintergrund der Erfindung

**[0002]** Zur additiven Herstellung von Formteilen sind verschiedene 3D-Druck-Verfahren bekannt. Hierbei wird das herzustellende Formteil mit Hilfe eines 3D-Druckers schichtweise aufgebaut.

**[0003]** Ein aus dem Stand der Technik bekanntes Verfahren zum additiven Herstellen eines Formteils ist das sogenannte Binder-Jetting-Verfahren. Beim Binder-Jetting-Verfahren wird eine Partikelschicht aus einem pulverförmigen Ausgangsmaterial an ausgewählten Stellen mit einer Flüssigkeit (auch Binder genannt) verklebt, um so das gewünschte Formteil zu erzeugen. Das additive Herstellen eines Formteils nach dem Binder-Jetting-Verfahren findet im Allgemeinen bei Raumtemperatur statt. Mit einem Druckkopf, mit dem der Binder an ausgewählten Stellen der Partikelschicht aufgetragen wird, werden die zu verfestigenden Bereiche des herzustellenden Formteils definiert.

**[0004]** Das Binder-Jetting-Verfahren ermöglicht eine hohe Aufbaugeschwindigkeit, die auch bei großen Formteilen bzw. Bauteilen erhalten bleibt. Entsprechend wird der Prozess oft für großvolumige Bauteile verwendet.

**[0005]** **Fig. 1** zeigt schematisch einen aus dem Stand der Technik bekannten 3D-Drucker, mit dem Formteile nach dem Binder-Jetting-Verfahren hergestellt werden können, als einen kartesischen Roboter während des Prozessschrittes „Ausgangsmaterial einbringen“. **Fig. 2** zeigt den in **Fig. 1** gezeigten 3D-Drucker während des Prozessschrittes „Binder aufbringen“.

**[0006]** Der 3D-Drucker umfasst eine verfahrbare Plattform **1**, einen Pulverbeschichter **2**, der mit Hilfe von Maschinenachsen verfahren wird, und einen Druckkopf **3** mit einer Dosiervorrichtung für die Flüssigkeit bzw. Binder. Der Druckkopf **3** kann mit einem Achsensystem über die vom Pulverbeschichter **2** erzeugte Partikelschicht **5** bewegt werden. Um die Partikelschicht zu stützen, können Wände **4** vorgesehen werden, die dicht an der Plattform **1** anliegen.

**[0007]** Die Plattform **1** mit den Wänden **4** wird oft als wechselbarer Bauraum zusammengefasst, der so konzipiert ist, dass er nach einem vollendeten Bauvorgang vom Rest des 3D-Druckers losgelöst und durch einen neuen leeren Bauraum ersetzt werden kann.

**[0008]** Der Pulverbeschichter **2** ist über die Breite des Bauraums verfahrbar und dient sowohl als Dosier- als auch als Nivellier Vorrichtung für das Pulver (Ausgangsmaterial, mit dem das Formteil hergestellt wird) und wird regelmäßig aus einem hier nicht dargestellten Pulvervorratsbehälter nachgefüllt. Die Nivellier Vorrichtung ist meist als rotierende Walze oder vibrierende Klinge ausgeführt. Der Pulverbeschichter **2** weist entweder eine kontinuierlich vibrierende Dosiervorrichtung vor der Nivellier Vorrichtung auf, oder er wirft Pulver ab seiner Anfangsposition aus.

**[0009]** Der Druckkopf **3** besteht aus einem oder mehreren Druckmodulen, der nach dem Dot-On-Demand Prinzip funktioniert. Jedes Modul beinhaltet mehrere hundert bis tausend Düsen, die positionsgesteuert Tropfen des Binders auswerfen. Durch Kombination und Lage der Druckmodule im Druckkopf kann eine entsprechende Druckauflösung und -breite realisiert werden. Versorgungsschläuche leiten die Druckflüssigkeit zum Druckkopf, der auch selbst einen Tank zur Regelung des benötigten Flüssigkeitsdrucks beinhalten kann.

**[0010]** Bevor mit dem eigentlichen Bauprozess begonnen wird, wird die Plattform **1** mit Pulver bedeckt und mit dem Pulverbeschichter **2** nivelliert.

**[0011]** Während des Druckvorganges werden die Schritte „Plattform senken“, „Pulverschicht einbringen“ und „Bedrucken“ zyklisch wiederholt:

Plattform senken: Die Plattform **1** wird um eine vorbestimmte Schichtstärke bzw. Schichtdicke gesenkt.

**[0012]** Schicht auflegen: Der Pulverbeschichter **2** fährt über das Baufeld und verfüllt dabei die durch das Absenken der Plattform entstandene Senke mit Pulver. Zugleich nivelliert er das Pulver, damit wieder eine ebene Pulverfläche entsteht.

**[0013]** Bedrucken: Der Druckkopf **3** fährt das Baufeld streifenweise ab und bedruckt selektiv die Pulverebene bzw. Partikelschicht **5** dort mit Flüssigkeit (Bindemittel), wo sich das Bauteil mit der aktuellen Bauebene schneidet. Im Stand der Technik wird nur so viel Bindemittel auf die Pulverebene bzw. Partikelschicht **5** aufgebracht, dass dieses maximal 10% des Hohlraumes zwischen den Partikeln des zu bedruckenden Bereichs einnimmt. Ein größerer Anteil an Bindemittel führt im Stand der Technik zu den weiter unten beschriebenen Nachteilen.

**[0014]** Der Bauraum ist nun mit Pulver angefüllt, das teilweise mit Flüssigkeit befeuchtet wurde. Nach einer Verfestigungszeit werden das lose Pulver und das Bauteil aus dem Bauraum entnommen. Das Bauteil wird danach gesäubert. Das restliche Pulver kann je nach Verfahren wiederverwendet werden.

**[0015]** Grundsätzlich erhält man mit dem aus dem Stand der Technik bekannten Binder-Jetting-Verfahren und bei der Verwendung eines Polymerpulvers als Ausgangsmaterial poröse Bauteile, da die Pulverschüttung lediglich mit dem Binder benetzt wird, wodurch die Partikel des Polymerpulvers verklebt werden. Die so hergestellten Bauteile besitzen eine geringe Festigkeit. Die Oberflächenqualität entspricht der Rauigkeit der Pulverkörner. Der Verzug bzw. die Schwindung und damit die Maßhaltigkeit liegen in einem Toleranzbereich, der für den häufigsten Anwendungsbereich, dem anschließenden Metallguss, meist ausreichend ist.

**[0016]** Selten kann ein Bauteil, so wie es im 3D-Drucker nach dem Binder-Jetting-Verfahren und bei der Verwendung eines Polymerpulvers als Ausgangsmaterial entsteht, direkt verwendet werden. Das Bauteil muss üblicherweise noch getrocknet werden. Für die Verwendung als Positiv für den Metallguss wird es anschließend zusätzlich mit Wachs getränkt bzw. überzogen, um eine wasserdichte Oberfläche zu erzeugen. Für die Verwendung ohne Umformungsvorgang wird das poröse Bauteil mit einem selbsthärtenden Material getränkt, um eine höhere Festigkeit zu erhalten.

**[0017]** Die Hauptvorteile des Binder-Jetting-Verfahrens, nämlich Bauteilgröße, Produktivität und Wirtschaftlichkeit, können gegenüber anderen additiven Fertigungsverfahren bei der Herstellung von Kunststoffmodellen weitgehend nicht ausgeschöpft werden, da die Bauteile zur direkten Verwendung zu porös und nicht fest genug sind - jedenfalls bei der Verwendung eines Polymerpulvers als Ausgangsmaterial. Dies deshalb, weil mit der Verfestigung des Bauteils eine Schwindung verbunden ist, die zudem durch den schichtweisen Aufbau im Bauteil nicht gleichzeitig, sondern zeitversetzt stattfindet. Zwar könnte durch einen höheren Flüssigkeitseintrag (mehr als die vorstehend genannten 10% des Hohlraumes zwischen den Partikeln des zu bedruckenden Bereichs) die Festigkeit erhöht werden, jedoch leidet dann durch die noch höhere Schwindung die Maßhaltigkeit der Bauteile, weshalb im Stand der Technik auf einen hohen Flüssigkeitseintrag bewusst verzichtet wird. Denn ein noch höherer Eintrag von Bindemittel führt zu einem deutlich längeren Löseprozess bzw. Anlöseprozess zwischen dem Bindemittel und dem Polymerpulver als Ausgangsmaterial. Zudem führt ein größerer Flüssigkeitseintrag zu einer höheren Migration der Flüssigkeit im Pulverbett, sodass Details an der Oberfläche des herzustellenden Formteils verwaschen oder gar ganz verschwinden können. Ferner kann sich das Bauteil so stark verziehen, dass bereits bei der Herstellung der Prozess gestört wird. Es muss also ein unbefriedigender Kompromiss zwischen der nötigen Maßhaltigkeit und der Festigkeit, die typischerweise eine Zugfestigkeit von 5 MPa nicht überschreiten, des gedruckten Bauteils eingegangen werden.

**[0018]** Nachteilig ist auch, dass die Festigkeit beim Entnehmen der Bauteile noch nicht voll ausgeprägt ist. Um ein Verbiegen oder Brechen des Bauteils zu verhindern, müssen sie daher vorsichtig aus dem 3D-Drucker entnommen werden, was die Möglichkeit einer automatischen Entnahme verhindert oder zumindest erschwert.

**[0019]** Eine nachträgliche Infiltration der Bauteile führt zwar zu besseren Festigkeiten des Endprodukts, sie ist jedoch mit einem hohen Nachbehandlungsaufwand, häufig in Handarbeit, verbunden, was die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens begrenzt.

**[0020]** Auch die hohe Porosität des Bauteils selbst ist nachteilig, da das Bauteil dadurch schmutzanfällig ist und Flüssigkeiten leicht ungewollt eindringen können.

## Aufgabe der Erfindung

**[0021]** Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, das aus dem Stand der Technik bekannte Binder-Jetting-Verfahren so zu verbessern, dass Formteile mit einer deutlich höheren Festigkeit bei gleichzeitig hoher Maßhaltigkeit bzw. reduzierter Schwindung hergestellt werden können.

## Erfindungsgemäße Lösung

**[0022]** Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß mit einem Verfahren nach dem unabhängigen Patentanspruch gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den abhängigen Patentansprüchen angegeben.

**[0023]** Bereit gestellt wird demnach ein Verfahren zum Herstellen eines dreidimensionalen Formteils in einem additiven Fertigungsverfahren, wobei

- in einem ersten Schritt ein pulverförmiges Ausgangsmaterial als Partikelschicht in einen Bauraum eingebracht wird,
- in einem zweiten Schritt ein flüssiges Bindemittel selektiv auf die Partikelschicht aufgebracht wird,

wobei die Schritte solange wiederholt werden, bis das Formteil aufgebaut ist, und wobei als Ausgangsmaterial ein Polymerpulver verwendet wird, und dieses auf eine vorbestimmte erste Temperatur erwärmt wird.

**[0024]** Dadurch, dass das Ausgangsmaterial auf die vorbestimmte erste Temperatur erwärmt wird, wird einerseits der Löseprozess (Lösen bzw. Anlösen der Partikel durch das aufgebrachte Bindemittel) deutlich beschleunigt, sodass nach Abschluss des Aufbaus einer Schicht der Lösevorgang bereits weitgehend abgeschlossen ist. Andererseits wird durch den beschleunigten Löseprozess auch die Erhöhung der Viskosität des Bindemittels deutlich beschleunigt, wodurch die Migration des Bindemittels in benachbarte Bereiche derart stark reduziert wird, dass nahezu keine Migration stattfindet, mit der Folge, dass die Oberfläche der herzustellenden Formteile deutlich glatter wird und auch kleinste Strukturen scharf ausgebildet werden. Ferner hat sich gezeigt, dass bei Verwendung eines polymerisierbaren Binders der gelöste Anteil der Partikel eine Polymerisation des Binders in Gang setzt, die die Viskosität noch weiter erhöht, aber noch nicht zwingend die Endfestigkeit der Formteile herstellt. Diese Vorteile, die sich durch das Erwärmen des Ausgangsmaterial ergeben, ermöglichen, dass deutlich mehr Bindemittel aufgebracht werden kann, als die im Stand der Technik möglichen und oben genannten 10%, wodurch die Festigkeit des herzustellenden Formteils deutlich erhöht werden kann. Ferner wird der Verzug des Formteils erheblich reduziert.

**[0025]** Das Erwärmen des Ausgangsmaterials kann mit Heizelementen durchgeführt werden, beispielsweise mit Infrarot-Strahlern, heißer Luft oder Heizmatten am oder im Bauraum.

**[0026]** Vorteilhaft ist es, wenn das Ausgangsmaterial vor dem Aufbringen des Bindemittels auf die Partikelschicht auf die vorbestimmte erste Temperatur erwärmt wird.

**[0027]** Vorteilhaft kann es sein, wenn das Ausgangsmaterial

- beim Einbringen in den Bauraum, oder
- nach dem Einbringen in den Bauraum, oder
- vor dem Einbringen in den Bauraum

auf die vorbestimmte erste Temperatur erwärmt wird.

**[0028]** In einer Ausgestaltung der Erfindung kann es vorteilhaft sein, wenn die Partikelschicht selektiv an jenen Bereichen auf die vorbestimmte erste Temperatur erwärmt wird, an denen im nachfolgenden Schritt das Bindemittel aufgebracht wird.

**[0029]** Durch das selektive Erwärmen der Partikelschicht kann einerseits Energie und Zeit beim Herstellen des Formteils gespart werden. Andererseits kann dadurch besser gewährleistet werden, dass Partikel, die das herzustellende Formteil umgeben, aufgrund ihrer Erwärmung nicht an dem herzustellenden Formteil haften bleiben.

**[0030]** Die vorbestimmte erste Temperatur kann so gewählt werden, dass sie unterhalb der Schmelztemperatur des Ausgangsmaterials liegt.

**[0031]** Geeignete Temperaturbereiche sind 40°C bis 150°C, bevorzugt 60°C bis 120°C, besonders bevorzugt 80°C bis 90°C.

**[0032]** In dem zweiten Schritt kann soviel Bindemittel selektiv auf die Partikelschicht aufgebracht werden, dass in dem selektierten Bereich mindestens 30%, vorzugsweise mindestens 50%, besonders bevorzugt mindestens 70% des Hohlraumes zwischen den Partikeln mit dem Bindemittel ausgefüllt wird.

**[0033]** Vorteilhaft ist es, wenn das Bindemittel

- vor dem Aufbringen,
- beim Aufbringen oder
- nach dem Aufbringen

auf die Partikelschicht auf eine zweite Temperatur erwärmt wird.

**[0034]** Durch das Aufbringen eines erwärmten Bindemittels oder durch das Erwärmen des aufgetragenen Bindemittels kann der Löseprozess zusätzlich unterstützt werden. Die Viskosität des Bindemittel-Polymerpulver-Gemischs kann zudem noch weiter und noch schneller erhöht werden.

**[0035]** Geeignete Temperaturbereiche für die zweite Temperatur sind 40°C bis 150°C, bevorzugt 50°C bis 120°C, besonders bevorzugt 60°C bis 90°C.

**[0036]** Als Bindemittel kann ein das Polymerpulver lösendes Lösungsmittel verwendet werden.

**[0037]** Vorteilhaft ist es, wenn als Bindemittel ein polymerisierbares Lösungsmittel verwendet wird.

**[0038]** Gemäß einer besonders vorteilhaften Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens wird als polymerisierbares Lösungsmittel ein Acrylat oder Methacrylat, insbesondere 2-Hydroxyethylmetacrylat verwendet. Weitere vorteilhafte Bindemittel sind Styrol, Methylstyrol, Butylmethacrylat, Isobornylacrylat oder Isobornylmethacrylat, wobei die Erfindung nicht auf diese Bindemittel beschränkt ist. Viele monomere Flüssigkeiten weisen geeignete Eigenschaften aus, die mit dem Druckkopf des 3D-Druckers verarbeitet werden können. Besonders vorteilhaft ist es dabei, dass die Polymerisation in einer typischen Raum-Atmosphäre stattfinden kann.

**[0039]** Das Polymerpulver kann langkettige Polymere aufweisen.

**[0040]** Um ein Formteil mit möglichst homogenem Material zu erhalten, ist es vorteilhaft als Bindemittel ein dem Ausgangsmaterial ähnliches chemisches Material zu verwenden. Dies hat den Vorteil, dass sich das Bindemittel und die Partikel des Ausgangsmaterials besonders gut ineinander lösen. Bei Verwendung von langkettigen Polymeren, welche ein Molekulargewicht von mindestens 10.000 g/mol, bevorzugt mindestens 100.000 g/mol, besonders bevorzugt mindestens 1.000.000 g/mol aufweisen, als Ausgangsmaterial, kann die Viskosität des Bindemittel-Partikel-Gemisches besonders gut erhöht werden, sodass auch mehr Bindemittel auf die Partikelschicht aufgebracht werden kann, ohne dass das Bindemittel in die Umgebung migriert.

**[0041]** Vorteilhaft ist es, wenn das Polymerpulver kugelförmige Partikel aufweist, wobei der Durchmesser der Partikel vorzugsweise der Druckauflösung der Vorrichtung zum Herstellen des dreidimensionalen Formteils entspricht.

**[0042]** Durch die Verwendung von kugelförmigen Partikeln des Ausgangsmaterials wird eine optimale Packung, welche sich im Bereich zwischen 50% und 70% befindet, gewährleistet, wodurch eine Schwindung des herzustellenden Formteils reduziert oder gar vermieden werden kann. Mit „Packung“ ist in diesem Zusammenhang die Belegung der Partikel im Volumen gemeint, sodass eine Erhöhung der Packung zu einer Verringerung der Porosität führt. Versuche haben zudem gezeigt, dass mit einem mittleren Partikeldurchmesser, der etwa einem halben Auflösungsschritt des 3D-Druckers entspricht, bzw. bevorzugt mit einem maximalen Partikeldurchmesser, der etwa der Druckauflösung des 3D-Druckers entspricht, ein optimales Verhältnis zwischen Partikeldurchmesser und gelöster bzw. angelöster Schale der Partikel erzielt wird. Die Druckauflösung wird typischerweise von der eingestellten Schichtstärke bestimmt, die typischerweise im Bereich zwischen 50µm und 200µm liegt. Das so erreichte Verhältnis zwischen Partikeldurchmesser und gelöster bzw. angelöster Schale der Partikel hat einerseits den Vorteil, dass Auswirkungen auf die Schwindung des herzustellenden Formteils nicht messbar sind bzw. auf ein verträgliches Maß reduziert werden. Andererseits wird die effektive Auflösung

des 3D-Druckers dadurch nicht negativ beeinflusst. Beispielsweise ist für eine eingestellte Schichtstärke von 150µm ein mittlerer Partikeldurchmesser von 75µm ideal, bzw. bevorzugt ein maximaler Partikeldurchmesser von 150µm.

**[0043]** In einer Ausgestaltung der Erfindung kann der Bauraum während des Herstellens des dreidimensionalen Formteils von unten und/oder von den Seiten her gekühlt oder erwärmt werden.

**[0044]** Es hat sich gezeigt, dass durch ein Kühlen des Bauraumes von unten (während die im Bauraum oben aufgebraute Partikelschicht erwärmt wird), der Lösevorgang der bereits fertig aufgebauten Schichten des herzustellenden Formteils zusätzlich verzögert werden kann und sich dadurch Abweichungen von der Sollgeometrie in z-Richtung (Aufbauichtung) weiter reduzieren lassen. Optional oder zusätzlich ist auch ein seitliches Kühlen von den Bauraumwänden her möglich.

**[0045]** Das Bindemittel kann einen Katalysator aufweisen, mit dem eine Polymerisation des Bindemittels, insbesondere nach dem Aufbringen auf die Partikelschicht, in Gang gesetzt wird.

#### Figurenliste

**[0046]** Weitere Einzelheiten und Merkmale der Erfindung ergeben sich aus den Ansprüchen und der nachfolgenden Beschreibung in Verbindung mit der Zeichnung. Es zeigt:

**Fig. 1** einen aus dem Stand der Technik bekannten 3D-Drucker für das Binder-Jetting-Verfahren während des Prozessschrittes „Ausgangsmaterial auflegen“;

**Fig. 2** den in **Fig. 1** gezeigten 3D-Drucker während des Prozessschrittes „Binder drucken“;

**Fig. 3** einen Ausschnitt mehrerer Partikelschichten, die mit einem aus dem Stand der Technik bekannten Binder-Jetting-Verfahren aufgebaut wurden;

**Fig. 4** einen Ausschnitt mehrerer Partikelschichten, die mit einem aus dem Stand der Technik bekannten Binder-Jetting-Verfahren aufgebaut wurden, wobei zu viel Bindemittel verwendet wurde;

**Fig. 5** einen Ausschnitt mehrerer Partikelschichten, die mit einem erfindungsgemäßen Binder-Jetting-Verfahren aufgebaut wurden; und

**Fig. 6** die Änderung der Viskosität des Bindemittels bei einem erfindungsgemäßen Verfahren und bei einem aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren.

#### Detaillierte Beschreibung der Erfindung

**[0047]** **Fig. 3** zeigt eine Schicht bestehend aus mehreren Kunststoffpartikeln **P** (Kunststoffkugeln), die gemäß einem aus dem Stand der Technik bekannten Binder-Jetting-Verfahren aufgebaut wurde. Ein Ausschnitt der Schicht ist vergrößert dargestellt. Wie oben bereits erwähnt, wird im Stand der Technik auf einen hohen Eintrag an Bindemittel bewusst verzichtet, da es ansonsten zu einer nicht gewollten Migration von Bindemittel in benachbarte Bereiche kommt. Es wird gerade so viel Bindemittel **B** eingetragen, dass die Kunststoffpartikel **P** an den Kontaktstellen **K** mit dem Bindemittel benetzt sind, sodass die Kunststoffpartikel **P** an den Kontaktstellen **K** aneinanderhaften. Die Hohlräume **H** zwischen den Kunststoffpartikeln **P** bleiben leer bzw. sind nach dem Aufbau des Objektes mit Luft gefüllt. Das so hergestellte Formteil weist daher eine hohe Porosität und eine geringe Festigkeit auf.

**[0048]** **Fig. 4** zeigt demgegenüber eine Schicht bestehend aus mehreren Kunststoffpartikeln **P** (Kunststoffkugeln), die ebenfalls gemäß einem aus dem Stand der Technik bekannten Binder-Jetting-Verfahren aufgebaut wurde, bei der aber eine größere Menge an Bindemittel eingebracht wurde. Im Unterschied zu dem in **Fig. 3** gezeigten Szenario sind die Hohlräume **H** zwischen den Partikeln **P** des herzustellenden Formteils weitgehend mit dem Bindemittel ausgefüllt. Mit dem erhöhten Bindemittelintrag geht bei dem aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren allerdings der Nachteil einher, dass das Bindemittel auch in Bereiche bzw. Hohlräume migriert, die zum Teil deutlich außerhalb der Grenzfläche **G** des herzustellenden Formteils liegen. Dies führt zu rauen Oberflächen an dem hergestellten Formteil. Kleine Strukturen des Formteils verschwimmen oder sind gar nicht mehr als solche sichtbar.

**[0049]** **Fig. 5** zeigt nun eine Schicht, bestehend aus mehreren Kunststoffpartikeln **P** (Kunststoffkugeln), die gemäß dem erfindungsgemäß weiterentwickelten Binder-Jetting-Verfahren aufgebaut wurde, und bei der eine große Menge an Bindemittel eingebracht wurde. Der Aufbau bzw. das Drucken des Formteils erfolgt wie in

dem ebenfalls in **Fig. 5** gezeigten Ablaufdiagramm (nach der unten beschriebenen Variante) des erfindungsgemäßen Verfahrens.

**[0050]** In dem Schritt **S1** wird ein Ausgangsmaterial, vorzugsweise kugelförmige Partikel aus einem Polymer, als Partikelschicht in den Bauraum eingebracht. Zu Beginn des Druckvorganges wird eine erste Partikelschicht direkt auf die Plattform des Druckers aufgebracht. Im weiteren Verlauf des Druckprozesses wird dann eine Partikelschicht auf die bereits vorhandene und verarbeitete Partikelschicht aufgebracht.

**[0051]** Erfindungsgemäß kann das Ausgangsmaterial vor, nach oder beim Einbringen in den Bauraum erwärmt werden. Nachfolgend wird eine Variante beschrieben, bei der das Ausgangsmaterial nach dem Einbringen in den Bauraum als Partikelschicht erwärmt wird.

**[0052]** Nach dem Einbringen des Ausgangsmaterials als Partikelschicht ist es erfindungsgemäß vorgesehen, diese zu erwärmen (Schritt **S2**), bevor in dem Schritt **S3** das Bindemittel an vorbestimmten Bereichen der Partikelschicht auf die Partikelschicht aufgebracht wird. Das Erwärmen kann beispielsweise mittels einer Infrarot-Lampe oder mittels heißer Luft / Gas erfolgen.

**[0053]** In einer Ausgestaltung der Erfindung kann es vorgesehen sein, in dem Schritt **S2** nur jene Bereiche der Partikelschicht zu erwärmen, in denen im anschließenden Schritt **S3** das Bindemittel aufgebracht wird (selektives Erwärmen).

**[0054]** Die Temperatur zum Erwärmen der Partikelschicht ist in jedem Fall so zu wählen, dass die Partikel nicht schmelzen.

**[0055]** In einer Ausgestaltung der Erfindung kann es aber vorteilhaft sein, die Temperatur zum Erwärmen der Partikelschicht so zu wählen, dass die Partikel leicht angesintert werden, wodurch sich die Partikel miteinander verbinden und sich die bereits verarbeiteten Partikelschichten in sich stabilisieren. Ein In-Sich-Zusammenfallen während des Druckvorgangs kann so vermieden werden.

**[0056]** Nach dem Erwärmen der Partikelschicht wird in dem Schritt **S3** das Bindemittel an jenen Bereichen der Partikelschicht aufgebracht, an denen der herzustellende Formkörper ausgebildet werden soll. Erfindungsgemäß ist es vorgesehen, dass soviel Bindemittel aufgebracht wird, dass mindestens 30%, vorzugsweise mindestens 50%, besonders bevorzugt mindestens 70% der Hohlräume zwischen den Partikeln, die den Formkörper bilden sollen, mit Bindemittel ausgefüllt wird. Besonders vorteilhaft ist es hierbei, wenn das Bindemittel, vorzugsweise vor dem Auftragen, erwärmt wird. Beispielsweise wird für ein Bauteil mit einem Volumen von  $1\text{cm}^3$  bereits  $0,6\text{cm}^3$  durch die Partikel des Ausgangsmaterials belegt. Der verbleibende Hohlraum von  $0,4\text{cm}^3$  wird durch den Binder beispielsweise zu 70% belegt, was  $0,28\text{cm}^3$  entspricht. Die verbleibenden  $0,12\text{cm}^3$  bleiben ungefüllt. In diesem Beispiel werden bei einer Schichtdicke von  $150\mu\text{m}$  und einer zu bedruckenden Fläche von  $1\text{cm}^2$  die Bindermenge von  $42\mu\text{l}$  aufgebracht.

**[0057]** Die genannten Schritte werden solange wiederholt, bis das Formteil vollständig aufgebaut wurde.

**[0058]** Die vollständige Aushärtung der Bauteile wird vor der Entnahme dieser im Bauraum typischerweise thermisch erreicht. Entweder wird nach Abschluss des Druckvorgangs der gesamte Bauraum in einer Wärmekammer bis zur abgeschlossenen Härtung erhitzt, oder der Bauraum wird nach Abschluss des Druckvorgangs schon im Drucker durch z.B. am Bauraum angebrachte Wärmematten erhitzt, oder der Bauraum wird bereits während des Druckvorgangs auf Aushärtungstemperatur gehalten. Auch ein sukzessives Zuschalten von Heizelementen an den Bauraumwänden unterhalb der aktuellen Bauebene ist denkbar.

**[0059]** Die Verwendung derart großer Mengen an Bindemittel und das vorherige Erwärmen der Partikelschicht lässt zunächst vermuten, dass

- das Bindemittel aufgrund der Temperatur der Partikelschicht an Viskosität verliert und daher noch stärker in benachbarte Bereiche migriert, wie es ohnehin bereits bei niedrigen Temperaturen der Partikelschicht der Fall ist,
- die Partikel in so einem Maße gelöst werden, dass sich ein Verzug und eine hohe Schwindung des herzustellenden Formteils einstellt,
- bei Verwendung von Monomer-Flüssigkeiten als Bindemittel eine übermäßige Polymerisation ausgelöst wird, durch die die Temperatur noch weiter erhöht wird, die zu einer noch größeren Schwindung führt.

**[0060]** Versuche haben aber überraschender Weise gezeigt, dass dies nicht der Fall ist.

**[0061]** Denn es wurde gefunden, dass durch die hohe Temperatur der Partikelschicht der Löseprozess zwischen Partikel und Bindemittel beschleunigt wird, was dazu führt, dass entgegen der vorstehend genannten Vermutung einerseits die Viskosität des Bindemittels zeitlich steil ansteigt und andererseits der gesamte Löseprozess verkürzt wird. Durch die schnelle Erhöhung der Viskosität des Bindemittels wird die Migration in benachbarte Bereiche nahezu vollständig verhindert. Zudem wurde festgestellt, dass der Lösevorgang in der Aufbauzeit einer Schicht nahezu abgeschlossen ist, d.h. er setzt sich in einer Schicht nicht mehr fort - jedenfalls nicht mehr so fort, dass die Maßhaltigkeit des Formteils beeinträchtigt wird, wenn bereits weitere Schichten aufgebaut werden - ein Verzug, insbesondere in Baurichtung (z-Achse) wird so deutlich reduziert.

**[0062]** Aufgrund der zeitlich schnell ansteigenden Viskosität des Bindemittels wird verhindert, dass das Bindemittel auch in Bereiche bzw. Hohlräume migriert, die außerhalb der Grenzfläche **G** des herzustellenden Formteils liegen, wie in **Fig. 5** ersichtlich ist.

**[0063]** Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren ist es vorteilhaft das Ausgangsmaterial so zu wählen, dass deren Polymer aus langen Ketten besteht, sodass sich die Viskosität des Bindemittels auch bei geringem Anlösen der Partikel möglichst stark erhöht. Des Weiteren ist ein Ausgangsmaterial von Vorteil, das eine gute Packung ausbildet - kugelförmige Partikel haben sich hierzu als besonders gut geeignet herausgestellt, sie erreichen eine Raumfüllung von 50% bis 70%. Denn kugelförmige Partikel sorgen für eine minimale Schwindung. Die Partikelgröße darf nicht zu klein sein, da sonst das Verhältnis von gelöster Schale (der Partikel) zum Kugeldurchmesser zu groß ist und sich damit negativ auf die Schwindung auswirkt.

**[0064]** Die erhöhte Temperatur kann bei Monomer-Flüssigkeiten als Bindemittel eine Polymerisation anstoßen, wodurch die Viskosität des Bindemittels zusätzlich erhöht werden kann.

**[0065]** Während des Druckvorganges kann der Bauraum von unten und/oder von den Seiten her gekühlt werden (während die im Bauraum oben aufgebrachte Partikelschicht erwärmt wird). Durch die so erzielte Verzögerung des Lösevorganges werden fertig aufgebaute Schichten quasi „eingefroren“.

**[0066]** Durch das Erwärmen der aufgebrachten Partikelschicht vor dem Aufbringen des Bindemittels wird also erfindungsgemäß Folgendes erreicht:

- Der Lösevorgang zwischen Bindemittel und Partikel wird beschleunigt,
- wodurch ein zeitlich steilerer Viskositätsanstieg erreicht wird,
- und sich dadurch die Migration deutlich verringert.
- Eine Polymerisation bei Monomer-Flüssigkeiten als Bindemittel wird ausgelöst, was die Viskosität zusätzlich erhöht.
- Der Lösevorgang zwischen Bindemittel und Partikel wird schneller abgeschlossen, d.h. der Lösevorgang wird schneller derart verlangsamt, dass er keine Auswirkung mehr auf die Maßhaltigkeit des herzustellenden Formteils hat.
- Die Sollgeometrie des herzustellenden Bauteils wird besser eingehalten.
- Das Formteil weist eine deutlich höhere Stabilität auf, auch weil deutlich mehr Bindemittel eingetragen wird.

**[0067]** Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren ergeben sich zudem insbesondere folgende Vorteile:

- Die Bauteil-Oberfläche wird deutlich glatter - sie wird nur noch durch die Pulverkörnung und die Auflösung des 3D-Druckers bestimmt.
- Details des Formteils werden deutlich schärfer gedruckt. Kleinste Strukturen an der Oberfläche des Formteils werden scharf abgebildet.
- Die Selektivität steigt deutlich und dünne Wände werden fester.
- Das Reinigen der Formteile wird einfacher, da das Ausdampfen der Binder-Flüssigkeit in der Pulver-Umgebung verringert wird. Lange und dünne Kanäle können von unbedrucktem Pulver befreit werden.
- Es kann deutlich mehr Bindemittel verwendet werden als im Stand der Technik.

**[0068]** Dadurch wird die Festigkeit des Formteils deutlich erhöht.

- Die Migration des Bindemittels in das benachbarte Pulver wird vermieden.
- Der Formverlust des Formteils aufgrund eines zu weichen Bindemittel-PulverGemisches wird vermieden.
- Ein Stauchen des Formteils in Baurichtung (z-Achse) während des Aufbaus durch einen langen Löseprozess wird vermieden, wodurch eine sehr gute Maßgenauigkeit in Baurichtung erreicht wird.
- Dem Curling-Effekt, der beim Herstellen von Kunststoffformteilen im Binder-Jetting-Verfahren häufig vorkommt, kann effektiv entgegengewirkt werden.

**[0069]** Das Erwärmen der aufgetragenen Partikelschicht kann beispielsweise mittels Infrarot-Strahlung, zugeführter warmen/heißer Luft/Gas oder aber auch mittels eines erwärmten Beschichters, der das Material aufträgt, erfolgen.

**[0070]** Ein selektives Erwärmen der Partikelschicht kann etwa mit Hilfe des Druckkopfes **3** erfolgen, der so ausgestaltet ist, dass er vor Auftragen des Bindemittels die entsprechenden Bereiche erwärmt, etwa mittels IR-Strahlen. Alternativ kann auch eine Art Heizkopf vorgesehen werden, der die Partikelschicht abfährt und diese selektiv erwärmt.

**[0071]** In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung kann ein selektives Erwärmen der Partikelschicht auch mit einer Wärmeeinrichtung, etwa ein IR-Strahler, erfolgen, die am Pulverbeschichter **2** angeordnet ist, sodass die von dem Pulverbeschichter aufgetragene Partikelschicht unmittelbar nach dem Aufbringen selektiv erwärmt wird. Um ein Abkühlen direkt nach dem Erwärmen weitgehend zu verhindern, kann es vorteilhaft sein, eine weitere Wärmeeinrichtung, etwa ein weiterer IR-Strahler, vorzusehen, die oberhalb des Baufeldes angeordnet ist. Bei der weiteren Wärmeeinrichtung kann es sich auch um eine Einrichtung handeln, mit der warme/heiße Luft/Gas dem Bauraum zugeführt wird.

**[0072]** Vorteilhaft kann es zudem sein, wenn das Bindemittel vor oder während des Aufbringens auf die Partikelschicht erwärmt wird. Dies kann etwa mittels eines beheizbaren Druckkopfes erfolgen, oder ein erwärmtes Bindemittel kann dem Druckkopf zugeführt werden.

**[0073]** Werden beispielsweise Methacrylate als Bindemittel verwendet, eignet sich Polymethylmethacrylat-Pulver als Ausgangsmaterial besonders gut, das zudem aufgrund seiner Herstellungsform besonders fließfähig ist, eine hohe Schüttdichte ausbildet und so für den 3D-Druck gut geeignet ist.

Beispiele:

|                                  | Beispiel 1    | Beispiel 2            | Beispiel 3   |
|----------------------------------|---------------|-----------------------|--------------|
| Ausgangsmaterial                 | Polystyrol    | Polymethylmethacrylat | Polystyrol   |
| Pulvergröße                      | 40 bis 100 µm | 60 bis 100 µm         | 40 bis 80 µm |
| Bindemittel                      | Styrol        | Methylstyrol          | Methylstyrol |
| Temperatur des Ausgangsmaterials | ca. 90°C      | ca. 80°C              | ca. 100°C    |
| Temperatur des Bindemittels      | ca. 50°C      | ca. 70°C              | ca. 80°C     |

**[0074]** In allen drei Beispielen konnten Formteile gemäß der vorliegenden Erfindung hergestellt werden, die gegenüber Formteilen, die nach dem aus dem Stand der Technik bekannten Binder-Jetting-Verfahren hergestellt wurden, eine deutlich höhere Festigkeit und eine deutlich geringere Schwindung aufwiesen. Zudem blieben filigrane Oberflächenstrukturen deutlich sichtbar erhalten.

**[0075]** Fig. 6 zeigt die Änderung der Viskosität des Bindemittels bei einem erfindungsgemäßen Verfahren und bei einem aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren. Deutlich erkennbar ist hierbei, dass die Viskosität des Bindemittels bei dem erfindungsgemäßen Verfahren deutlich schneller zunimmt als bei einem Binder-Jetting-Verfahren nach dem Stand der Technik. Dies führt dazu, dass auch bei großen Mengen an eingebrachten Bindemittel eine Migration des Bindemittels in benachbarte Bereiche des Pulverbetts nahezu vollständig verhindert wird.

**[0076]** Die Erfindung wurde zuvor anhand von bevorzugten Ausführungsbeispielen beschrieben. Es sind jedoch weitere Ausführungsformen und Abwandlungen möglich, ohne dass dadurch der Erfindungsgedanke verlassen wird.

#### Bezugszeichenliste

- 1 Plattform des 3D-Druckers
- 2 Pulverbeschichter des 3D-Druckers
- 3 Druckkopf des 3D-Druckers
- 4 Wände des 3D-Druckers bzw. des Bauraums des 3D-Druckers
- 5 Partikelschicht
- B Bindemittel
- G Grenzfläche des herzustellenden Formteils
- H Hohlräume zwischen den Kunststoffpartikeln P
- K Kontaktstellen der Kunststoffpartikel P
- P Kunststoffpartikel
- S1 Verfahrensschritt „Partikelschicht aufbringen“
- S2 Verfahrensschritt „Partikelschicht erwärmen“
- S3 Verfahrensschritt „Bindemittel aufbringen“

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Herstellen eines dreidimensionalen Formteils in einem additiven Fertigungsverfahren, wobei
  - in einem ersten Schritt (S1) ein pulverförmiges Ausgangsmaterial (P) als Partikelschicht in einen Bauraum eingebracht wird,
  - in einem zweiten Schritt (S3) ein flüssiges Bindemittel selektiv auf die Partikel schicht aufgebracht wird, wobei die Schritte (S1 bis S3) solange wiederholt werden, bis das Formteil aufgebaut ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass als Ausgangsmaterial (P) ein Polymerpulver verwendet wird, und dieses auf eine vorbestimmte erste Temperatur erwärmt wird (S2).
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Ausgangsmaterial vor dem Aufbringen des Bindemittels auf die Partikelschicht auf die vorbestimmte erste Temperatur erwärmt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Ausgangsmaterial
  - beim Einbringen in den Bauraum, oder
  - nach dem Einbringen in den Bauraum, oder
  - vor dem Einbringen in den Bauraum auf die vorbestimmte erste Temperatur erwärmt wird.
4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei die Partikelschicht selektiv an jenen Bereichen auf die vorbestimmte erste Temperatur erwärmt wird, an denen im nachfolgenden Schritt das Bindemittel aufgebracht wird.
5. Verfahren nach Anspruch 3 oder 4, wobei die vorbestimmte erste Temperatur so gewählt wird, dass sie unterhalb der Schmelztemperatur des Ausgangsmaterials liegt.
6. Verfahren nach Anspruch 1, wobei in dem zweiten Schritt (S3) soviel Bindemittel selektiv auf die Partikelschicht aufgebracht wird, dass in dem selektierten Bereich mindestens 30%, vorzugsweise mindestens 50%, besonders bevorzugt mindestens 70% des Hohlräum zwischen den Partikeln mit dem Bindemittel ausgefüllt wird.
7. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Bindemittel
  - vor dem Aufbringen,
  - beim Aufbringen oder

- nach dem Aufbringen auf die Partikelschicht auf eine zweite Temperatur erwärmt wird.

8. Verfahren nach Anspruch 1, wobei als Bindemittel ein das Polymerpulver lösendes Lösungsmittel verwendet wird.

9. Verfahren nach Anspruch 1, wobei als Bindemittel ein polymerisierbares Lösungsmittel verwendet wird.

10. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Polymerpulver langkettige Polymere aufweist.

11. Verfahren nach Anspruch 1, wobei Polymerpulver kugelförmige Partikel aufweist, wobei der Durchmesser der Partikel vorzugsweise der Druckauflösung der Vorrichtung zum Herstellen des dreidimensionalen Formteils entspricht.

12. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der Bauraum während des Herstellens des dreidimensionalen Formteils von unten und/oder von den Seiten her gekühlt oder erwärmt wird.

13. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Bindemittel einen Katalysator aufweist, mit dem eine Polymerisation des Bindemittels, insbesondere nach dem Aufbringen auf die Partikelschicht, in Gang gesetzt wird.

Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

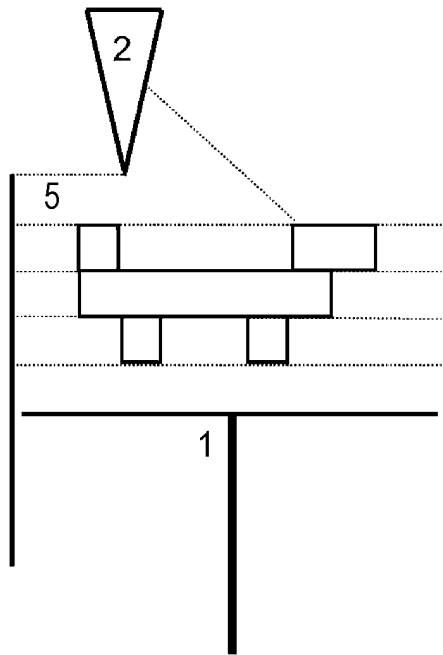


Fig. 1

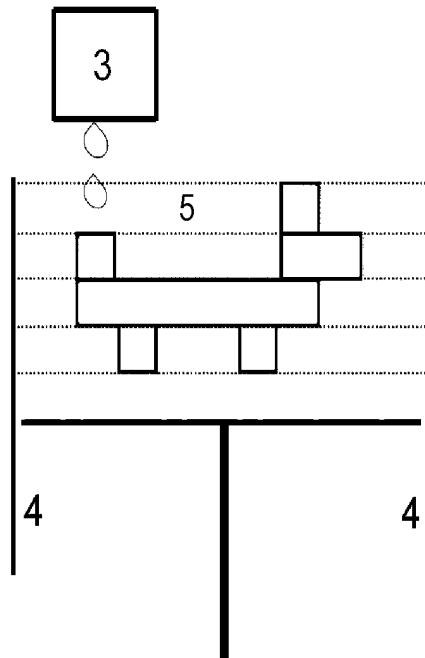


Fig. 2

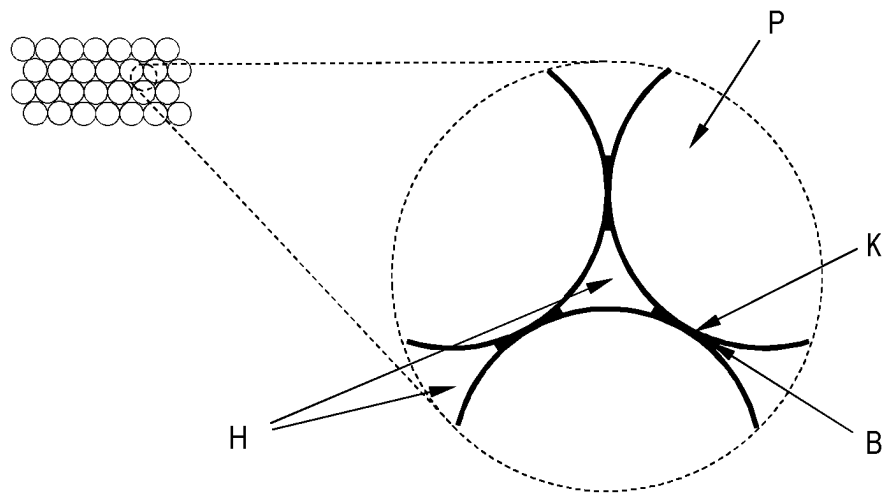


Fig. 3

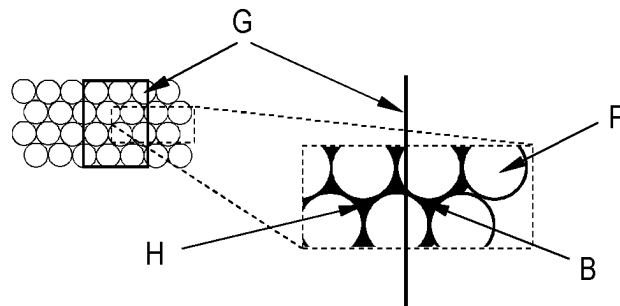


Fig. 4

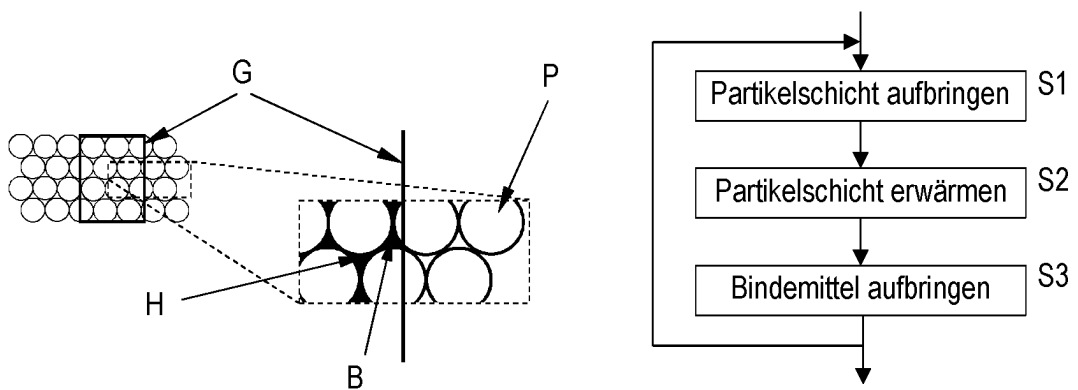
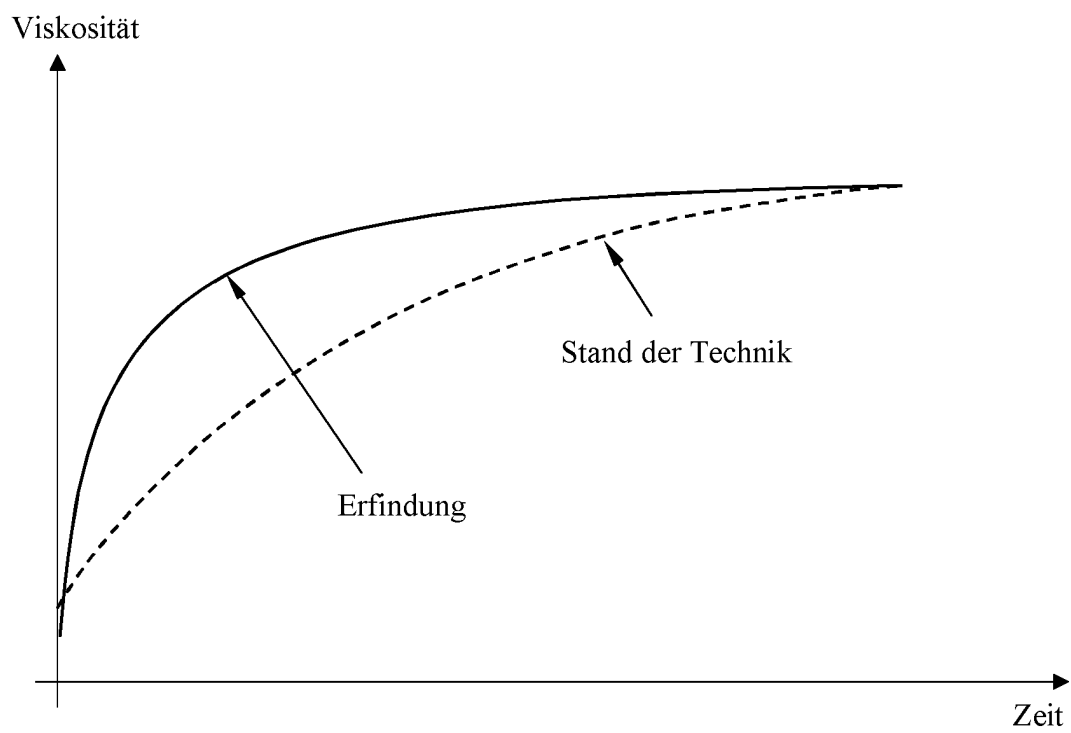


Fig. 5



**Fig. 6**