

(12)

# Patentschrift

(21) Anmeldenummer: A 50851/2021 (51) Int. Cl.: **B28B 1/00** (2006.01)  
(22) Anmeldetag: 27.10.2021 **B28B 7/34** (2006.01)  
(45) Veröffentlicht am: 15.05.2023

(56) Entgegenhaltungen: EP 3231531 A1 WO 2005097476 A2 CN 113414855 A CN 112405772 A CH 706380 A1 WO 2016091249 A1 WO 2016019937 A1 DE 102013003303 A1	(73) Patentinhaber: Breitenberger Georg 6020 Innsbruck (AT)
	(72) Erfinder: Breitenberger Georg 6020 Innsbruck (AT)
	(74) Vertreter: Schwarz & Partner Patentanwälte GmbH 1010 Wien (AT)

## (54) VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR HERSTELLUNG VON FORMBAUTEILEN

(57) Verfahren zur Herstellung einer additiv gefertigten Gussform für die Herstellung von Bauteilen im Kaltgussverfahren oder Laminierverfahren, umfassend die Schritte

- a) Festlegen einer dreidimensionalen Struktur der Gussform,
- b) Bereitstellen einer Mischung, wobei die Mischung Bindemittel und Zuschlagstoff umfasst,
- c) Bereitstellen einer Druckflüssigkeit, umfassend eine wässrige Lösung von Magnesiumchlorid oder Magnesiumsulfat.
- d) Aufbringen einer Lage der Mischung auf einen Träger,
- e) Auftragen der Druckflüssigkeit nur auf jene Teile der Mischung, die Teil der Gussform bilden sollen,
- f) Auftragen einer weiteren Lage der Mischung auf die vorherige Lage der Mischung,
- g) Auftragen der Druckflüssigkeit nur auf jene Teile der Mischung, die Teil der Gussform bilden sollen,
- h) Wiederholen der Schritte f) und g) bis die gewünschte Form der Gussform erreicht ist,
- i) Abbinden lassen jener Teile der Mischung, die mit der wässrigen Lösung von Magnesiumchlorid versetzt wurden,
- j) Entfernen der nicht mit wässrigen Lösung versetzten Mischung, und

Beschichten zumindest jener Teile der Gussform, welche mit dem Material des Kaltguss-Laminierverfahrens in Kontakt kommen, mit einer Schalhaut.

## Beschreibung

### VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR HERSTELLUNG VON FORMBAUTEILEN

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung einer additiv gefertigten Gussform für die Herstellung von komplexen Bauteilen im Kaltgussverfahren oder Laminierverfahren.

### HINTERGRUND DER ERFINDUNG

**[0002]** Computergestützte Methoden ermöglichen Architekten und Ingenieuren das Entwerfen komplexer Bauteile aus z.B. Beton mit hoher geometrischer Komplexität. Die praktische Umsetzung dieser Entwürfe in die Realität scheitert häufig an den hohen Fertigungskosten oder der Unmöglichkeit der Herstellung mit konventionellen Fertigungsmethoden und Werkzeugen.

**[0003]** Die additive Fertigung erlaubt die Herstellung aufwändiger Bauteile aus Baumaterialien wie z.B. Beton, indem das formgebende Bauteil - nachfolgend die Gussform oder gelegentlich die Schalung - additiv angefertigt wird anstatt spanend mit einer CNC gesteuerten Fräse oder in Handarbeit aus Holz oder aus Kunststoffen.

**[0004]** Der Einsatz der additiven Fertigung im Formenbau ist allgemein bekannt. So werden mit 3D-Druckern im Binder Jetting Verfahren Gussformen aus Sand für Gießereien gefertigt, um komplexe Maschinenbauteile zu fertigen. WO 2011/021080 A2 beschreibt z.B. ein Binder Jetting Verfahren in der Bauindustrie.

**[0005]** Es gibt diverse additive Verfahren, die dabei eingesetzt werden können. Am vorteilhaftesten zur Herstellung solcher Formen, haben sich pulverbettbasierte Verfahren (Binder Jetting) und Verfahren, die auf Extrusion basieren erwiesen. EP 3 174 651 B1 der Voxeljet AG beschreibt die Herstellung einer solchen Gussform anhand eines pulverbettbasierten Verfahrens, welches auch unter dem Begriff Binder Jetting bekannt ist. Dabei wird pulvörörmiges Ausgangsmaterial an ausgewählten Stellen mit einem Bindemittel - dem „Binder“ - verklebt. Bei diesem Verfahren werden die Werkstücke schichtweise aufgebaut, indem aus 3D-Daten (z.B. CAD-Daten) die zu erzeugende Geometrie jeder einzelnen Schicht berechnet wird. Anschließend wird auf einen höhenverstellbaren Tisch eine Pulver- oder Granulat-Schicht aufgebracht und mit dem Binder mittels eines Druckkopfs an den Stellen verklebt, die zum Werkstück zählen. Anschließend wird der Tisch um eine Schichtdicke abgesenkt und eine neue Pulverschicht aufgebracht. Dies wird so lange wiederholt, bis das Werkstück vollständig entstanden ist, das dann komplett vom umgebenden Pulver verborgen ist. Danach wird das überständige Pulver zur Weiterverwendung zurückgeführt, das Werkstück aus dem Drucker geholt und von Pulverresten befreit. Auf diese Weise ist es auch möglich Gussformen für die Bauindustrie herzustellen.

**[0006]** In EP 3 174 651 B1 wird beschrieben, dass diese Gussformen aus Sand, der mit einer Aktivatorkomponente vorbeschichtet wird, und mit Kunstharz, meistens Phenolharz, selektiv gebunden wird, indem die Aktivatorkomponente und das Kunstharz ein Polymer bilden. Die daraus entstehende Gussform weist Poren auf und sie wird daher, um als Schalung im Bauwesen Verwendung zu finden, durch eine Schlichte und dann durch eine Versiegelung auf Kunststoffbasis wie PU, Epoxidharz, Polyester usw. geäglättet. Dieser mehrstufige Prozess, der aus dem Drucken der Schalung, dem Befreien der Schalung von losem Partikelmaterial, dem Aufbringen der Schlichte, um die Poren zu schließen, damit die Versiegelung durch den Betondruck nicht in die Poren gedrückt wird, sowie dem Aufbringen der Versiegelung selbst besteht, ist sehr aufwändig. Zudem müssen gewisse Standzeiten und Ruhezeiten zwischen den Prozessschritten eingehalten werden. Durch die Verwendung von teuren Kunstharzen als Bindemittel und einer Kunststoffbeschichtung als Versiegelung sind die schweren Schalungen aus Sand nach ihrem Gebrauch Sondermüll und müssen aufwändig und kostspielig entsorgt werden. Da Sand der Hauptbestandteil der Gussform ist, hat diese eine sehr hohes Gewicht und ist somit schwer in der Handhabung. Besondere Hebevorrichtungen sind daher für das Anschlagen, Heben, Bewegen und Absetzen erforderlich.

**[0007]** Andere Dokumente im Stand der Technik sind z.B. DE 10 2017 009 742 A1, worin eine durch Wasser lösliche Form, welche durch ein pulverbasiertes Schichtbauverfahren hergestellt wird, beschrieben wird. Das Verfahren ist dabei dem in EP 3 174 651 B1 beschriebenen Verfahren ähnlich, allerdings wird als Bindemittel ein wasserlöslicher Kunststoff eingesetzt. Als wasserunlösliche Komponente wird wiederum z.B. Quarzsand verwendet. Dieses Verfahren wird vorzugsweise bei komplexen Geometrien mit Hinterschneidungen eingesetzt. Der Einsatz dieses Bindemittels macht es möglich, Bauteile mit einer Festigkeit von 0,8-1,5 N/mm<sup>2</sup> herzustellen. Eine nachträgliche Ofenbehandlung kann die Festigkeit auf > 2 N/mm<sup>2</sup> erhöhen. Durch den Einsatz von kostenintensiven Bindern auf Kunststoffbasis und Sand als Partikelmaterial mit hohem Eigengewicht und aufgrund der geringen Festigkeit der Formen ist auch dieses Verfahren nicht wirtschaftlich. Zudem sind noch lange Standzeiten und Ofenbehandlungen erforderlich. Der Sand kann nach dem Auflösen des Binders zwar wiederverwendet werden, muss jedoch zuerst vollkommen vom Binder und Schmutz befreit und dann getrocknet werden. Das im Wasser gelöste Bindemittel muss eigens entsorgt werden.

**[0008]** In DE 10 2016 119 365 A1 wird ein aus Kunststoffen gedrucktes, modulares Schalungssystem beschrieben, bei dem zumindest die dem Beton zugewandte Oberfläche aus einem schichtweisen aufgetragenen und ausgehärteten Kunststoff besteht. Die modularen Einzelformen bestehen aus einem wiederverwertbaren Grundträger und einem lösbar, recycelbaren Kunststoff, der auch wasserlöslich sein kann. Die Schalungen werden in einem Extrusionsverfahren aus Kunststofffilament gefertigt, welches aufgrund der beschränkten Anzahl der Druckköpfe ein langwierig ist, um Formkörper mit einem großen Volumen herzustellen. Zudem hinterlässt das Arbeiten im Extrusionsverfahren eine gerillte Oberfläche, die nur mit erheblichem Aufwand zu glätten ist oder man druckt in einer so geringen Schichtdicke, dass die Fertigung noch langsamer von statthen geht. Der Einsatz von Kunststoffen zur Fertigung voluminöser Bauteile ist mit hohen Kosten verbunden, da das Recycling die Entfernung von Verunreinigungen, wie Schalölen, Betonresten, Zementschlamm, Staubpartikeln usw. erfordert. Durch die wiederverwendbaren Grundträger ist man im Formenbau an die Vorgaben aus den Grundträgern gebunden, was als eine Einschränkung in der Fertigung gesehen werden kann und im Widerspruch zu dem Grundprinzip der additiven Fertigung, der totalen Formfreiheit in jedem Bauteil steht.

**[0009]** EP 2 961 581 B1 beschreibt die Herstellung einer additiv gefertigten, porösen, wasserlöslichen Gussform aus verschiedenen Materialien. Die Form wird nach Gebrauch in einem temperierten Wasserbad oder Autoklaven aufgelöst und die wasserundurchlässige Schalhaut wird vom gegossenen Bauteil abgewaschen. Nachteile dieses Verfahren sind seine Unwirtschaftlichkeit. Jede Schalung kann nur einmal verwendet werden. Zudem sind große Wassermengen erforderlich, um die Schalung aufzulösen. Das Wasser muss nach dem Einsatz aufbereitet werden und die darin gelösten Stoffe müssen herausgefiltert werden.

**[0010]** US 2015/315399 A1 beschreibt eine Pulvermischung aus einem löslichen Klebstoff, der aus einem Zement besteht, der Magnesiumoxid und ein Säureadditiv enthält. Zudem enthält die Mischung einen nicht reaktiven keramischen Füller. Das Säureadditiv wird dem Pulver beigegeben, das Pulver ist so jederzeit reaktiv und es kann aufgrund der Luftfeuchtigkeit zur Klumpenbildung und zur Reaktion kommen. Die Druckflüssigkeit besteht aus bis zu 50% aus einem Lösungsmittel und einem sauren Additiv.

**[0011]** US 2011/7177188 A1 beschreibt eine Pulvermischung für das 3D-Druck Binder Jetting erfahren, um damit 3D gedruckte Formen für den Eisenguss herzustellen. Die Pulvermischung besteht aus einem Bindemittel, Sand und einem Beschleuniger. Als Bindemittel wird Zement, vorzugsweise Portlandzement oder Puzzolanzement oder Flugasche verwendet. Der Zement selbst kann Kalk und alkalische Oxide enthalten. Die reaktiven alkalischen Oxide sind: Calciumoxid, Magnesiumoxid oder Zinkoxid. Als Beschleuniger ist ein lösliches Silikat, wie z.B. Wassergläser, vorhanden. Die Mischung von Portlandzement und Magnesiumoxid wird kritisch gesehen. Enthält der Zement zu viel Magnesiumoxid, kommt es zu Magnesiatreiben und zur Zerstörung des erhärtenden Gefüges. Der Einsatz von Natriumwasserglas ist z.B. im Bauwesen verboten.

**[0012]** DE 3 506 555 A1 beschreibt die Herstellung von mörtelähnlichen Massen basierend auf Magnesiumoxid als Bindemittel und Magnesiumsulfat als Anreger. Als Zuschlagstoffe werden biologische Materialien wie Hackschnitzel aus Holz verwendet. Magnesiumoxid wurde bis in die 1950er Jahre zur Herstellung von Fußböden verwendet. Dabei wurden der Mischung Hackschnitzel, Sägemehl usw. beigemischt, sodass der Boden ein Fußwarmes Gefühl bewirkt. Durch die Anregung mit Hilfe von Magnesiumsulfat erhoffte man sich eine bessere Wasserbeständigkeit.

**[0013]** DE 2 922 815 A1 befasst sich mit der Idee, die Wasserbeständigkeit von Magnesiumoxid zu verbessern, indem Ethylsilicat beigegeben wird.

**[0014]** CN 110342898 A beschreibt die Verwendung von Magnesiumoxid und Magnesiumsulfat als Bindemittel für den 3D-Druck. Als Zuschlagstoffe werden Talkumpuder und Dolomitpulver verwendet. Talkum und Dolomit werden in der Literatur als Zuschläge beschrieben, die gut mit MgO kombinierbar sind.

#### KURZBESCHREIBUNG DER ERFINDUNG:

**[0015]** Die aus dem Stand der Technik bekannten Nachteile machen den Einsatz von additiv gefertigten Gussformen in z.B. der Bauindustrie oder Bootsbau nicht praktikabel, da derartige Gussformen entweder aufgrund der komplexen Herstellung unwirtschaftlich sind oder aufgrund des großen Massen Probleme bereiten. Außerdem sind die Gussformen im Stand der Technik meist nur einmal einsetzbar und sie müssen anschließend unter großem Kostenaufwand entsorgt werden.

**[0016]** Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, ein Verfahren zur Herstellung einer Gussform sowie eine Gussform selbst bereitzustellen, wo diese Nachteile vermindert sind.

**[0017]** Gelöst wird diese Aufgabe durch ein Verfahren zur Herstellung einer additiv gefertigten Gussform für die Herstellung von Bauteilen im Kaltgussverfahren oder Laminierverfahren, umfassend die Schritte

- [0018]** a) Festlegen einer dreidimensionalen Struktur der Gussform,
- [0019]** b) Bereitstellen einer Mischung, wobei die Mischung pulverförmiges Bindemittel und pulverförmigen Zuschlagstoff umfasst,
- [0020]** c) Bereitstellen einer Druckflüssigkeit, umfassend eine wässrige Lösung von Magnesiumchlorid oder Magnesiumsulfat
- [0021]** d) Aufbringen einer Lage der Mischung auf einen Träger,
- [0022]** e) Auftragen der Druckflüssigkeit nur auf jene Teile der Mischung, die einen Teil der Gussform bilden sollen,
- [0023]** f) Auftragen einer weiteren Lage der Mischung auf die vorherige Lage der Mischung,
- [0024]** g) Auftragen der Druckflüssigkeit nur auf jene Teile der Mischung, die einen Teil der Gussform bilden sollen,
- [0025]** h) Wiederholen der Schritte f) und g) bis die gewünschte Form der Gussform erreicht ist,
- [0026]** i) Abbinden lassen jener Teile der Mischung, die mit der wässrigen Lösung von Magnesiumchlorid oder Magnesiumsulfat versetzt wurden,
- [0027]** j) Entfernen der nicht mit wässrigen Lösung versetzten Mischung, und
- [0028]** k) Beschichten zumindest jener Teile der Gussform, welche mit Beton in Kontakt kommen, mit einer Schalhaut.

**[0029]** Bevor die Erfindung im Detail beschrieben wird, werden im Folgenden einige Begriffe der Erfindung näher erläutert.

**[0030]** 3D Druckverfahren sind alle aus dem Stand der Technik bekannten anwendbaren Verfahren, die den Aufbau von Freiform Bauteilen ermöglichen. Die da z.B. wären Binder Jetting, Con-

tour Crafting, Stereolithografie.

**[0031]** Selektive Bindung kann nach jedem Partikelmaterialauftrag erfolgen. Sie erfolgt dort wo es vom 3D-CAD-Modell vorgesehen ist.

**[0032]** Partikelmaterial ist jedes Material, das für den pulverbasierten 3D Druck geeignet ist.

**[0033]** Partikelmaterialgemisch ist im Sinne der Erfindung ein Materialgemisch aus mindestens zwei unterschiedlichen Materialien. Im Sinne der Erfindung sind dies ein Zuschlagstoff und einem Bindemittel besteht.

**[0034]** Zuschlagstoff: Alle Schüttgüter der Bauindustrie, vorzugsweise Leichtbaustoffe wie Blähperlit, Blähschiefer, Blähton usw.

**[0035]** Bindemittel: Alle für die Bauindustrie geeigneten Bindemittel wie Gips, Zement, Kalk, Magnesiumoxid, Magnesiumsulfat, Anhydrit, Silikate usw.

**[0036]** Rekalzinieren: nach seiner Verwendung und Aufbereitung wird das reagierte Bindemittel nochmals gebrannt und wird damit wieder reaktiv.

**[0037]** Druckflüssigkeit: Sie wird vom Druckkopf selektiv auf das Partikelmaterial aufgebracht und löst im Partikelmaterial eine Reaktion aus, bei der sich die Komponenten im Partikelmaterial verbinden und in ihrer Gesamtheit schließlich den Formkörper bilden.

Im vorliegenden Fall kommt vorzugsweise als Druckflüssigkeit eine Lösung aus Magnesiumchlorid  $MgCl_2$  zu Einsatz. Das Chlorid übernimmt die Funktion des Katalysators im Abbinde-Vorgang. Vorzugsweise wird eine konzentrierte Lösung eingesetzt, deren spezifisches Gewicht bei 20°C 1,25 kg/l beträgt. Der Gehalt an  $MgCl_2$  sollte zumindest 25 Gew. % betragen. Um gute Festigkeiten zu erreichen, liegt das optimale Gewichtsverhältnis zwischen  $MgO$  und  $MgCl_2$ -Lösung zwischen 1 und 2, besonders bevorzugt bei 1,5. Das optimale Verhältnis zwischen den Reaktionspartnern wird durch Stöchiometrie  $MgCl_2/Mg = 1.5$  bestimmt, wobei im 3D-Druckprozess das Verhältnis gern ein wenig reduziert wird und zwischen 1 bis 1,5 liegt. Es kann auch Magnesiumsulfat verwendet werden, wobei die Massenverhältnisse entsprechend sind.  $MgCl_2$  weist bessere Eigenschaften auf.

**[0038]** Bauraum: Ist der geometrische Raum, in dem das Partikelmaterialgemisch während des Bauprozesses durch wiederholtes Beschichten mit Partikelmaterial abgelegt wird und wo das Bauteil durch selektives Binden erzeugt wird. Der Bauraum umfasst einen Boden und 4 Wände, nach oben ist er offen.

**[0039]** Porosität: Sie beschreibt das Hohlraumvolumen zum Gesamtvolumen eines Stoffes oder Stoffgemisches. Im Formenbau ist eine zu hohe Porosität für die Festigkeit, und die Beschichtung nachteilig, vor allem bei Haufwerksporigen Gefügen.

**[0040]** Beschichtung: Wasserundurchlässige, hydrophobe Schicht, im Sinn der Erfindung auch beständig gegen hydraulische und nicht hydraulische Bindemittel und widerstandsfähig gegen UV -Strahlung und mechanische Einwirkungen. Sie bildet die Grenze zwischen additiv gefertigter Form und dem Werkstoff, der in die Form gegossen wird.

**[0041]** Kaltgussverfahren sind Gießverfahren, bei denen vor, während und nach dem Guss die Temperatur der Gussform und des Kernes, die Zersetzung- oder Erweichungstemperatur des Formmaterials und der Beschichtung nicht erreicht wird z.B. gießen von Beton.

**[0042]** Form, Schalung, Gussform: Bezeichnet die additiv gefertigte Form, die beschichtet und in die der Werkstoff im Kaltgussverfahren gegossen wird.

**[0043]** Bevorzugt ist vorgesehen, dass weiters ein Stellmittel zur Einstellung der Viskosität der Druckflüssigkeit vorgesehen ist. Als Stellmittel zur Einstellung der Viskosität kommt zum Beispiel Reismehl oder ein flüssiges Stellmittel verwendet. Zudem kann man die Lösung auf einer konstanten Temperatur von 20 bis 25°C halten, da bei sinkenden Temperaturen Salz ausgefällt werden kann. Durch Stellmittel und Temperatur kann die dynamische Viskosität der Druckflüssigkeit je nach Düsendurchmesser und Erfordernissen in den Bereichen von 1 -1000 mPa s angepasst werden.

**[0044]** In einer Ausführungsvariante ist vorgesehen, dass die Mischung zusätzlich einen Füllstoff umfasst.

**[0045]** Bevorzugt ist vorgesehen, dass die Mischung

- 10 bis 70 Gew.% Bindemittel,
- 30 bis 90 Gew.% Zuschlagstoff,
- 0,01 bis 3 Gew.% Füllstoff

aufweist.

**[0046]** Das Bindemittel kann z.B. ausgewählt sein aus der Gruppe bestehend aus Calciumoxid, Zemente, Calciumsulfat, Magnesiumoxid, Magnesiumsulfat, Lehm- Ton, Trass, oder Mischungen daraus.

**[0047]** Besonders bevorzugt ist vorgesehen, dass das Bindemittel Magnesiumoxid umfasst.

**[0048]** Es hat sich als vorteilhaft erwiesen, wenn der Zuschlagstoff eine Dichte von 50 kg/m<sup>3</sup> bis 1 600 kg/m<sup>3</sup> aufweist. Geeignete Zuschlagstoffe, welche eine solche Dichte aufweisen, sind z.B. ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Blähton, Blähperlit, Blähglimmer, Blähglas, Bläh-schiefer, Bims, Holzspäne, Lavastein-Schaumlava, Kesselsand, gesinterte Steinkohleflugasche oder Recycling- oder Abfallbaustoffe aus Gas-Porenbeton, Ziegelbaustoffe oder Mischungen daraus.

**[0049]** Der Zuschlagstoff kann unterschiedliche Korngrößen aufweisen. Vorzugsweise weist die Korngrößenverteilung einer Idealsieblinie  $A(d) = (d/d_{max})^q$  mit einem Korngemenge mit  $0,2 < q < 0,7$  auf.

**[0050]** In der Gleichung für die Idealsieblinie  $A(d) = (d/d_{max})^q$  bedeutet

$A$  = Siebdurchgang in Massen % je Korngröße (Wert auf y-Achse auf Diagramm)

$d$  = Korndurchmesser zwischen 0 und  $D$ , für den der prozentuelle Anteil im Korngemisch berechnet werden soll

$D$  = Durchmesser des Größtkorns der zu berechnenden Sieblinie.

$q$  = Exponent zur Berücksichtigung der Kornform. Bei idealer Kugelform:  $q = 0,5$ ; bei Kiessand:

$q = 0,4$  bei gebrochenen Natursand:  $q = 0,25$ .

**[0051]** Mit dieser Formel lässt sich die dichteste Packung der Körner berechnen und man erhält die Massenanteile je Korngröße die man dem Trockengemisch zumengen sollte. Je mehr die Kornform von der Kugelform abweicht, umso feiner muss die Gesteinskörnung sein und umso größer wird der Anteil von MgO in der Mischung, da nicht kugelförmige Körnungen eine größere Oberfläche haben, die gebunden werden muss.

**[0052]** So kann eine Schlichte bzw. Porenfüllung vermieden werden, wodurch ein Arbeitsschritt und eine Trocknung weniger erforderlich sind, sodass ein Zeitgewinn möglich ist.

**[0053]** Der Füllstoff ist vorzugsweise ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Mehlkorn, Methylcellulose, Bentonit oder Kombinationen daraus. Die Aufgabe des Füllstoffs ist es, die auf die Mischung aufgebrachte Druckflüssigkeit im Partikelbett zu fixieren.

**[0054]** Zusatzstoffe sind pulverförmige Stoffe die die Eigenschaft des Trockengemisches beeinflussen. Vorzugsweise werden folgende Zusatzstoffe verwendet:

(a) Methylcellulose und/oder Bentonit: Verbessern das Flüssigkeitsrückhaltevermögen der Trockenmischung. Wenn auf die Mischung Druckflüssigkeit gespritzt wird, fixieren diese Zusatzstoffe die Flüssigkeit lokal am Punkt der Flüssigkeitsabgabe im Pulverbett. Durch die Zugabe von Methylcellulose oder Bentonit bleibt die Flüssigkeit im Korngerüst an der Stelle, an der sie abgegeben wurde und wandert nicht schwerkraftbedingt durch die Pulverschichten, was zu sogenannten Elefantenfüßen in den Bauteilen führt. Somit wird die Herstellung von formtreuen Bauteilen mit hoher Genauigkeit möglich. Zugabemenge: 0,01-3% Volumenprozent.

(b) Als Mehlkorn werden Körnungen bis 0,125 mm bezeichnet. Das Mehlkorn ist vorteilhaft, um kleine Hohlräume zu schließen und so die Festigkeit der Gussform zu erhöhen. Zudem begünstigt es die Förderung des Trockenmörtels durch die Schläuche der pneumatischen Förderung und fördert das Rieseln des Trockenmörtels. Als Mehlkörner können feinste Gesteinskörnungen ein-

gesetzt werden. Die Mehlkörner schließen die Poren und somit muss keine Schlichte oder Spachtelung wie beim Stand der Technik verwendet werden. Zugabemenge bis zu 3 % Volumenprozent. Vorzugsweise wird hierbei Quarzmehl verwendet, da es sich sehr gut als Füller eignet und der 3D gedruckten Form eine geschlossen, harte Oberfläche verleiht, die aufgrund der Feinheit des Quarzmehles sich dennoch bearbeiten lässt. Die Schalhaut haftet auf Formbauteilen die mit einem kleinen Zusatz von Quarzmehl hergestellt wurden besser und ist widerstandsfähiger aufgrund des härteren Untergrundes.

(c) Reaktive Füllstoffe, z.B. Puzzolane. Puzzolane sind Kieselsäure- oder Tonerdehaltige Stoffe, die alkalisch reagieren können, z.B. durch die Zugabe von Wasser, Magnesiumchlorid, Lauge, Wasserglas usw. Solche reaktiven Füllstoffe oder Zusatzstoffe sind:

(i) Flugasche: Unter Flugasche versteht man kieselsäure- oder kalkreiche, staubartige Verbrennungsrückstände von Kohlenstaub, die bei der Reinigung der Rauchgase von Dampferzeugern in Kohlekraftwerken anfallen. Flugasche besteht aus kugeligen Partikeln mit puzzolanischen Eigenschaften, welche einige Vorteile haben. Die Vorteile sind verbesserte Verdichtungsfähigkeit des Partikelmaterials beim Auftragen und Festwalzen. Bessere Nachhärtung, höhere Endfestigkeit, dichteres Gefüge und verminderte Rissneigung. Flugasche verbessert die Kornverteilung der Partikelmaterialmischung im Feinstkornbereich und im Zusammenhang mit der überwiegend kugeligen Kornform (Kugellager-Effekt) die Verarbeitbarkeit und Rieselfähigkeit des Partikelmaterials. Mit Hilfe der Flugasche können somit kleinste Poren in der Partikelmaterialmischung besser gefüllt werden, was zu einem dichteren Gefüge des Endbauteils und somit größeren Festigkeitskennwerten führt. Flugasche besteht überwiegend aus reaktionsfähigem  $\text{SiO}_2$  und Aluminiumoxid  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und geringen Anteilen anderer Oxide, die alkalisch angeregt werden können. Die in der Flugasche enthaltene Kieselsäure ist amorph und dem Glaszustand ähnlich. Die einzelnen  $\text{SiO}_2$ -Moleküle sind dadurch in der Lage, mit Säuren und Laugen zu reagieren. Das bei der Reaktion entstehende Magnesiumhydroxid  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  regt die Flugasche zu einer Reaktion an wodurch eine zweite geopolymere Struktur entsteht. Dadurch kann der hohe Porenanteil im 3D Gedruckten Gefüge weiter reduziert werden.

**[0055]** Als Nebenprodukt der Energieerzeugung hat die Flugasche eine hervorragende  $\text{CO}_2$ -Bilanz und hilft natürliche Ressourcen zu schonen, da energieaufwändige Bindemittel ersetzt werden können. Dabei bleibt die Recyclingfähigkeit und Rekalzinierbarkeit des  $\text{MgO}$  erhalten. Als Komponente in der Partikelmaterialmischung kann Flugasche zwischen 3-45% des preislich teureren  $\text{MgO}$  ersetzen und die Partikelmaterialmischung günstiger machen.

(ii) Microsilica, Silicastaub: Ist ein künstliches Puzzolan mit hohem Anteil an Kieselsäure (Siliciumdioxid  $\text{SiO}_2$ ). Es ist ein glasartiges amorphes Siliciumdioxid. Silicastaub fällt als Nebenprodukt in der Herstellung von Silicium- und Ferrosilicium-Legierungen an. Die im Silicastaub enthaltenen Partikel sind kugelförmig und mit ihrer Teilchengröße von 0,1 bis 0,2  $\mu\text{m}$  um 50- bis 100-mal feiner als Zementpartikel. Ihre spezifische Oberfläche soll nach Norm einen Wert von 15 bis 35  $\text{m}^2/\text{g}$  annehmen. Somit ist Microsilica extrem feinkörniger mineralischer Stoff. Die chemische Zusammensetzung des Silicastaubs kann weit variieren. Im Allgemeinen liegt der Siliciumdioxidgehalt zwischen 80 Gew.-% und 98 Gew.-%. Die hohe Feinheit bedingt die stark ausgeprägte Hohlraumfüllende Wirkung und puzzolanische Wirkung von Silicastaub. Zudem verbessert Silicastaub den Verbund in der Kontaktzone zwischen Magnesiumoxid und Gesteinskörnung bzw. Fasern. Zudem wird die Packungsdichte erhöht. Dadurch können die durch Zugabe von Microsilica die Festigkeitseigenschaften verbessert werden. Die Zugabemenge zur Mischung liegt dabei zwischen 1 und 20% vom  $\text{MgO}$  Anteil. Durch die Mahlfeinheit ist das Microsilica sehr reaktiv und reagiert mit dem Magnesiumhydroxid  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ . Durch die hohe spezifische Oberfläche kommt es zu einer Kontaktflächenreaktion, daraus ergibt sich eine Reduzierung der Kapillarporen.

(iii) Weitere Zusatzstoffe können fein gemahlenes Ziegelmehl, Metakaolin oder Kalzinerter Ton sein. Vorzugsweise wird ein Gemisch aus Flugasche und Microsilica verwendet. Dadurch können die Materialeigenschaften einer 3D-gedruckten Form verbessert werden. Die Form wird dadurch sehr widerstandsfähig und konnte in Versuchen bis zu 40-mal wiederverwendet werden.

**[0056]** Die Druckflüssigkeit weist bevorzugt eine Magnesiumchloridkonzentration von zumindest 30 Gew.-%, vorzugsweise von 45 bis 55 Gew.% auf.

**[0057]** Die Schalhaut kann z.B. Duroplasten, vorzugsweise Polyurethan oder Epoxidharz, ungesättigte Polyesterharz oder Phenoplasten umfassen.

**[0058]** Es hat sich gezeigt, dass Mischung aus Bindemittel und Zuschlagstoff aus einer benutzen Gussform gewonnen werden kann, womit eine vollständige Wiedergewinnung möglich ist. Insbesondere kann die Gussform zuvor nach dem erfindungsgemäßen Verfahren hergestellt sein. Von der benutzten Gussform wird zuerst die Schalhaut entfernt und anschließend wird die Gussform ohne Schalhaut zerkleinert, das Partikelmaterial getrennt und das Bindemittel rekalziniert.

**[0059]** Das gesamte Verfahren wird bevorzugt in einem 3D-Drucker durchgeführt.

#### AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

**[0060]** Um ein wirtschaftliches Produzieren einer additiv gefertigten Gussform zu ermöglichen, ist ein günstiges, wiederverwendbares Partikelmaterial erforderlich, welches sich gut fördern und in Schichten hoher Dichte auf das Druckbett aufbringen lässt, ohne im Bauteil große Porenräume zu verursachen. Zudem sollte das Partikelmaterial ein Leichtbaumaterial sein, um die fertigen Formen leichter heben, absetzen und transportieren zu können. Sind die Formen sehr schwer verursacht das oft Probleme mit dem Handling der Formen. Zudem erfordert das hohe Eigengewicht der Formen eine höhere Festigkeit des Materials. Es ist für den weiteren Einsatz der Gussform von Vorteil und kostenreduzierend, wenn die additiv gefertigte Gussform ein geringes Eigengewicht hat.

**[0061]** Weiters ist eine Partikelmaterialmischung vorteilhaft, die bei größeren Schichtdicken von der Druckflüssigkeit des Druckkopfes penetriert werden kann. Dies hat den Vorteil, dass die Gussform in Lagendicken zwischen 0,5 mm und 5 mm gefertigt werden kann und die Fertigungszeit sich somit erheblich reduziert. Jedoch muss die Flüssigkeit, welche durch den Druckkopf an jenen Orten, an denen die Mischung selektiv gebunden werden soll, durch die gesamte Schichtdicke hindurch penetrieren und sich, mit der in einem vorhergegangenen Prozessschritt gebundenen Schicht, verbinden. Dies lässt sich leicht bewerkstelligen, indem man ein Partikelmaterial bestehend aus nur einer Korngröße wählt und somit ein Haufwerksporiges- Gefüge erzeugt.

**[0062]** Jedoch wirken sich diese Poren negativ auf die Festigkeitseigenschaften und auf die Weiterverarbeitung in den weiteren Prozessschritten aus, da weitere Prozessschritte nötig werden, um die großen Porenräume zu schließen (Schlichten im Stand der Technik). Zudem sollte die Oberfläche der Form und die Form selbst einfach, z.B. durch Schleif-Trennmaschinen bearbeitbar sein. Da der Stand der Technik offenbart, dass das Partikelmaterial einer solchen Form aus Sand, im allgemeinen Quarzsand einer bestimmten Korngröße besteht, dürfte es aufgrund der großen Härte die Quarzsand hat, schwer fallen eine solche Form aus Sand nachzubearbeiten. Der Stand der Technik zeigt Gussformen für Kaltgussverfahren, die entweder selbst aus Kunststoff bestehen oder Gussformen bei welchen das Bindemittel vorzugsweise aus organischen Materialien, wie z.B. Furanhärz besteht. Die Kosten für den Einsatz von organischen Bindemitteln sind wesentlich höher als der Einsatz anorganischer Bindemittel.

**[0063]** Schließlich wurden als wichtigste Eigenschaft der Materialmischung ihre Wiederverwendbarkeit und Recyclingfähigkeit identifiziert. Ziel des erfinderischen Prozesses war es eine Materialmischung zu finden die in ihrer Anwendung wenig sensibel und durch einen einfachen, kurzen Prozessschritt aufbereitet werden kann. Nach der Aufbereitung kann das gesamte Material, aus dem die additiv gefertigte Form besteht, dem Produktionsprozess wieder vollständig rückgeführt werden, ohne das Restmassen entstehen, die wie beim Stand der Technik teuer entsorgt werden müssen. Dies trifft auch den Zeitgeist der Nachhaltigkeit und der CO<sub>2</sub>-Reduzierung. Als anorganisches Bindemittel wird vorzugsweise Magnesiumoxid verwendet, das rekalziniert also zurückgewonnen werden kann und somit eine Zero-Waste-Produktion vorliegt. Der Stand der Technik im Formenbau für Kaltgussverfahren produziert weitestgehend Sondermüll.

**[0064]** Somit galt es erfindungsgemäß eine Materialmischung zu finden, welche leicht im Gewicht ist und dennoch gute Festigkeitswerte erzielt, deren Komponenten für die Massenproduktion sehr günstig sind und vollständig recycelbar sind und sich, nach Verwendung, wieder in den Produk-

tionsprozess rückführen lassen. Zudem sollte die Oberfläche der 3D gedruckten Form leicht bearbeitbar sein. Um diese Vorgaben zu erfüllen, sind Leichtbaumaterialien der Bauindustrie vorteilhaft, welche man in der Partikelmaterialelmischung als Zuschlagsstoff verwendet. Diese Leichtbaumaterialien mit einer Dichte von 50 kg/m<sup>3</sup> bis 1400 kg/m<sup>3</sup> können sein: Blähton, Blähperlit, Blähglimmer, Blähglas, Blähsschiefer, Bims, Holzspäne, Lavastein-Schaumlava, Kesselsand, gesinterte Steinkohleflugasche oder Recycling- oder Abfallbaustoffe aus Gas-Porenbeton, Ziegelbaustoffe, vorzugsweise aber Blähton, Blähperlit oder Blähglas. Diese Zuschlagstoffe haben einen natürlichen Ursprung oder sind durch einen Blähprozess vom Menschen aus natürlichen Rohstoffen wie Ton geschaffen. Gemeinsam haben diese Leichtzuschlagstoffe, dass sie in großen Mengen global verfügbar sind und, dass sie wesentlich preisgünstiger als organische Kunststoffverbindungen sind.

**[0065]** Um Haufwerksporige Strukturen zu vermeiden, werden diese Zuschlagstoffe in unterschiedlichen Korngrößen gemischt. Die optimale Korngrößenverteilung entspricht dabei der Idealsieblinie  $A(d) = (d/d_{max})^q$  mit  $q=0,5$  welche nach Fuller und Thompson als günstige Korngrößenverteilung angesehen wird. Bei dieser Korngrößenverteilung ist der Hohlraumgehalt relativ gering, hohlraumärmste Kornmenge ergeben sich bei  $q=0,4$ , vorzugsweise werden Kornmenge mit  $0,2 < q < 0,7$  verwendet.

**[0066]** Die hohlraumärmste Korngrößenverteilung der Leichtzuschlagstoffe hat gegenüber dem Sand aus einer einzigen Korngröße (wie im Stand der Technik), den Vorteil so gut wie keine großen offen Poren zu haben, welche nachträglich, in einem weiteren Prozessschritt mit einer Schlichte usw. geschlossen werden müssen. Zudem erhöht die hohlraumarme Korngrößenverteilung die Festigkeit der Gussform gegenüber einer Haufwerksporigen Gussform aus Sand nur einer Korngröße. Der Mengenanteil der Zuschlagstoffe an der Gesamtmasse kann 30 - 90 Gew.% betragen. Als Bindemittel, um die Zuschlagstoffe zu binden, haben sich herkömmliche anorganische Bindemittel bewährt. Diese Bindemittel können sein Calciumoxid, Zemente, Calciumsulfat (Anhydrit), Calciumsulfat-Dihydrat (Gips), Magnesiumoxid, Magnesiumsulfat, Lehm-Ton, Trass, vorzugsweise aber Zement, Calciumsulfat- Dihydrat oder vorzugsweise Magnesiumoxid. Diese Bindemittel können einzeln oder kombiniert in der Mischung vorkommen. Ihr Anteil an der Gesamtmasse beträgt 10 - 70 Gew.%. Zuschlagstoff und Bindemittel werden vor dem Aufbringen des Druckbettes gemischt. Um eine möglichst geringen Hohlraumgehalt im Partikelmaterialelgemisch zu haben wird dieses durch eine pneumatische Saugförderung in den Aufgabetrog gefördert und mit Hilfe von einer Rakel auf die Arbeitsebene-Druckebene vollflächig aufgezogen und dann mit einer nachlaufenden Walze verdichtet. Um das Wasserrückhaltevermögen des Partikelmaterialels zu erhöhen und damit eine größere Formtreue des 3D-gedruckten Bauteils zu erreichen, kann dem Partikelmaterialel ein Füllstoff wie Methylcellulose oder Bentonit zugegeben werden. Die Menge, die zugegeben wird, liegt dabei bei 0,01% - 3 Gew. % der Gesamtmenge des Partikelmaterialels. Das Partikelmaterialel bindet dadurch ab, dass an jenen Orten, wo das Bauteil aushärtet soll, selektiv Wasser mit Magnesiumchlorid vom Druckkopf aufgetragen wird. Die Viskosität der Druckflüssigkeit kann mit einem Stellmittel (auch Verdickungsmittel) eingestellt werden. Nach einer Erhärtungszeit von wenigen Stunden kann das erhärtete Bauteil vom losen, nicht abgebundenen Partikelmaterialel befreit und gereinigt werden. Das Bauteil hat eine hohe Frühfestigkeit und kann somit unmittelbar dem nächsten Schritt in der Prozesskette, der Beschichtung, zugeführt werden. In der Beschichtung wird die Schalhaut auf die additiv gefertigte Form aufgebracht.

**[0067]** Die Mischung aus Bindemittel und Zuschlagstoff in Verbindung mit der Druckflüssigkeit basiert auf dem Sorelzement, der ein Säure-Base-Zement ist. Als Säure dient dabei meistens Magnesiumchlorid und als Base in der Regel Magnesiumoxid (MgO, kaustisch gebrannter Magnesit), weshalb das Vorhandensein von MgO im Bindemittel vorteilhaft ist. Zwischen Magnesiumchlorid und Magnesiumoxid findet eine Reaktion statt, die je nach Mahlfeinheit und Brenndauer des Magnesiumoxids, zu einem Erhärten des Gemisches innerhalb weniger Minuten führen kann. Zur Formstabilität und der Verbesserung des Wasserrückhaltevermögens wird dem Trockenemisch Bentonit oder Methylcellulose beigegeben. Der dadurch entstandene natürliche Kleber bindet sich mit allen Materialien wie sämtlichen mineralischen Baumaterialien und Gesteinsmehle

sehr gut, auch bindet er Holzmehl, Holzschnipsel, Stroh usw. besser als Zement oder Gips. Ein Vorteil des Magnesiumoxids ist, dass es rekalziniert, also erneut gebrannt und zur erneuten Produktion von 3D-Gedruckten Formen verwendet werden kann.

**[0068]** In Pulverform erhärtet MgO in Gegenwart von konzentrierten Magnesiumchlorid- Lösung ( $MgCl_2$ ). Dabei bildet sich im  $MgO \cdot MgCl_2 \cdot H_2O$  ein Gel, das an der Luft dann steinartig erhärtet. Bei Raumtemperatur laufen dabei folgende Reaktionen ab:

- $5 MgO + MgCl_2 + 13 H_2O \rightarrow 5Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 8H_2O$  (5-1-8 Phase)
- $3 MgO + MgCl_2 + 11 H_2O \rightarrow 3Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 8H_2O$  (3-1-8 Phase)
- $MgO + H_2O \rightarrow Mg(OH)_2$

**[0069]** Die Erhärtung erfolgt durch die sich gegenseitig durchdringenden und verfilzenden feinen Kristallnadeln des entstehenden Magnesiumhydroxids. Die Erhärtung ist in wenigen Stunden abgeschlossen, was ein wesentlicher Vorteil für den Pulver-3D Druck ist. Maßgebend sind die 5-1-8 Phase und die 3-1-8 Phase. Es gibt noch weitere Phasen, diese spielen jedoch für die Praxis bei Raumtemperatur keine Rolle. Im Verlauf der Erhärtung des Abbindens scheiden sich aus der zunächst entstehenden, gallertartigen Masse nadelförmige Kristalle aus. Die Struktur der stabilen Hydratphase leitet sich von der des Magnesiumhydroxyds ab, welche aus Doppelketten besteht. Die Kettenverknüpfung ist der Grund für die hohe Festigkeit der Hydratphase. Das Magnesiumcarbonat entsteht durch Reaktion des gebildeten Magnesiumhydroxyds mit dem  $CO_2$  in der Luft.

**[0070]** Beispielrezepturen für das Partikelmaterial (Verhältnis MgO und MgCl bleiben konstant):

**[0071]** Blähglas als Zuschlagstoff: (Blähglas ist aufgeblähtes Altglas)

Stoff	Gewichtsteile
Blähglas 0,25-0,5mm	9
Blähglas 0,1-0,3mm	2
Feinsand 0-0,125 mm	1
MgO	6
Methylcellulose	0,25
Flugasche und Microsilica	1

**[0072]** Blähton als Zuschlagstoff: (Blähton ist geblähter Ton)

Stoff	Gewichtsteile
Blähton 0,2-0,4mm	8
Blähton 0,1-0,2mm	3
Feinsand 0-0,125 mm	1
MgO	6
Methylcellulose	0,25
Flugasche und Microsilica	1,25

**[0073]** In Versuchsreihen wurden Vorteile des Magnesiabinders-Sorelzement gegenüber Portlandzement und anderen mineralischen Bindemitteln im 3D-Druck erkannt:

**[0074]** Es sind bei Leichtbauzuschlägen beachtliche Festigkeiten zu erzielen, die so mit Portlandzement nicht erzielbar sind.

Brandbeständigkeit.

Magnesiazemente leiten weder Hitze noch Kälte, noch Elektrizität.

Es können mit dem Bindemittel MgO alle organischen und anorganischen Zuschlagstoffe sowie feinste Stäube zu Endprodukten mit tauglichen Festigkeiten gebunden werden. Mit Portlandzement ist das nicht möglich.

Rasche Erhärtung, was schnellere Durchlaufzeiten ermöglicht.

Formtreue und keine Rissentwicklung.

Geringe Anhaftungen des Trockenmörtels an das Bauteil beim Entpacken, was gegenüber Zement oder Gips die Nachbearbeitung des Bauteils wesentlich reduziert.

Die hohen Temperaturen die bei der Abbinde- Reaktion durch die große Masse einer Gussform mit 10m<sup>3</sup> entstehen, machen den Magnesiabinder weniger zu schaffen als den Portlandzement.

Niedrigere Brenntemperatur von Magnesiabinder, was zur Energieeinsparung und CO<sub>2</sub> Reduktion beiträgt. Brenntemperatur MgO ca. 800°C und jene des Portlandzement 1300°C.

Rekalzinierbarkeit des MgO, was das Bindemittel somit als derzeit einziges bekanntes Bindemittel wiederverwendbar macht und somit Bauteile- Gussformen aus der obengenannten Trockenmörtelmischung 100% recycelbar macht.

Das durch das selektive Binden im 3D-Druckprozess nicht gehärtete Material kann öfter wiederverwendet werden. Versuche ergaben selbst nach 7-maliger Wiederverwendung nur geringe Festigkeitsverluste. Um das Material im 3D Druckprozess wiederverwerten zu können muss es nur gesiebt und erneut gemischt werden, wobei eine geringe Menge von ungebrauchten MgO (10%) zugegeben wird. Dabei werden geringfügige Ausstoßmengen durch die Siebung erzeugt. Dies ist in dieser Form auch nur mit MgO möglich. Portlandzemente und CSA Zemente verursachen durch größere Anhaftungen wesentlich höhere Ausstoßmengen und verlieren bei Wiederverwendung wesentlich an Festigkeit. Dies liegt wohl daran das Portlandzemente sehr hygroskopisch sind und im 3D-Druckprozess die Flüssigkeit die durch das Drucken sowie der Wasserdampf der durch das Aushärten entsteht angezogen wird.

**[0075]** Da der Bindemittelanteil in der Pulvermischung sehr hoch ist, bedeutet dies einen erheblichen Kostenvorteil auf einen Drucker mit 10m<sup>3</sup> Druckvolumen pro Druck. Dies macht das Verfahren somit für die Bauindustrie nachhaltig und wirtschaftlich. Zudem kann das gesamte Material wiederverwertet im Kreislauf gehalten werden.

**[0076]** Die Wiederverwertung des Materials gelang ohne Verschlechterungen der Qualität der Gussformen. Durch die Verwendung von Leichtzuschlagstoffen ist die Form vom Gewicht wesentlich leichter als Formen aus Sand und dabei wenigstens gleich fest, wenn nicht fester. Da Leichtzuschlagstoffe eine weichere Korneigenfestigkeit haben lässt sich die Form, ähnlich wie Holz, einfach nachbearbeiten.

**[0077]** Im Folgenden wird erfindungsgemäß beschrieben, wie eine solche Form wirtschaftlich hergestellt werden kann, recycelt wird und das Ausgangsmaterial der Form, zur Produktion neuer Formen wiederverwendet werden kann.

**[0078]** Als Beschichtung- Schalhaut wird die bauteilberührende Oberfläche einer Form-Schalung für z.B. Betonbauteile bezeichnet. Im Folgenden werden die Anforderungen an die Beschichtung bzw. Schalhaut im Kaltgussverfahren exemplarisch am Werkstoff Beton erklärt. Da der Zur Einhaltung der Anforderungen an die geschalteten Betonoberflächen werden verschiedene Elemente der Schalung, in diesem Fall der additiv gefertigten Gussform mit Schalhaut, in den sogenannten Schalungshautklassen SHK 01 bis SHK 03 klassifiziert. Die Schalungsklassen beschreiben dabei die Schalhaut, den Einsatzzustand, die Oberflächenstruktur, die Flächengliederung, Kantenausbildung usw.

**[0079]** Maßgeblichen Einfluss auf das gewünschte Sichtbetonergebnis der Ansichtsfläche hat dabei die Saugfähigkeit der Schalhaut. Je nachdem ob die Schalhaut saugend oder nichtsaugend ist, kann das gewünschte Resultat unterschiedlich sein. Eine saugende Schalhaut entzieht Luft und Überschusswasser aus den Betonrandzonen, wodurch sich Oberflächen mit wenig Poren und einem relativ gleichmäßigen Farbton bilden.

**[0080]** Demgegenüber ermöglicht eine nichtsaugende Schalhaut die Herstellung nahezu glatter

Oberflächen. Sie begünstigt allerdings die Entstehung von Poren, Marmorierungen, Wolkenbildung und Farbtonunterschieden. Tendenziell erscheinen diese Flächen eher hell.

**[0081]** Somit ist es möglich je nach Art der Schalhaut und der vom 3D-Drucker auf die Oberfläche der Gussform aufgebrachte Textur eine Vielzahl an Sichtbetonoberflächen, je nach Kundenwunsch zu gestalten. Eine gedruckte Textur der Gussformoberfläche kombiniert mit den speziellen Eigenschaften der Schalhaut erhöhen die Designmöglichkeiten der Sichtbetonoberfläche erheblich.

**[0082]** Als Schalhaut hat sich aufgrund der besonderen Anforderungen eine Beschichtung aus Duroplasten wie Polyurethan oder Epoxidharz, ungesättigte Polyesterharz oder Phenoplasten bewährt. Dabei werden vorzugsweise Polyurethane gewählt, die hochelastisch sind, gute mechanische Eigenschaften aufweisen wie Abriebfestigkeit, thermische Beständigkeit, monolithische Bauweise, vollflächige Haftung und eine gute Wasserdampfdiffusion, was der Blasenbildung vorbeugt. Die Beschichtung wird im flüssigen Zustand durch einen Roller oder Pinsel aufgetragen oder durch eine Spritzanlage aufgesprüht. Das Aufsprühen-Spritzen eignet sich vor allem bei komplizierten Flächen und ist sehr wirtschaftlich. Die Beschichtung hat eine Dicke von 0,1 mm - 1,5 mm und kann, gut die auf die Form aufgedruckten Texturen, auf den Beton übertragen. Sind keine Texturen gewünscht, kann durch Glattschleifen der Oberfläche der Gussform eine absolut glatte beschichtete Oberfläche hergestellt werden.

**[0083]** Daher ist es wichtig, dass sich der 3D gedruckte Formkörper durch Schleif-Poliermaschinen gut bearbeiten lässt, was bei Leichtbaustoffen der Fall ist. Nach dem Trocknen der Beschichtung kann die Schalung mit einem angepassten Trennmittel versehen werden und ist sofort einsatzbereit und kann bei vorsichtiger Verwendung sehr oft wiederverwendet werden. Ist die Schalhaut abgenutzt, kann sie gereinigt werden und erneut mit PU beschichtet und repariert werden. Unebenheiten, Kratzer oder Beschädigungen können mit z.B. Gips gefüllt und abgeschliffen werden. Somit ist das System auch einfach zu reparieren, sollten Beschädigungen in der Form und Beschichtung auftreten. Sollten spezielle Sichtbetonflächen mit tiefen Strukturen oder sehr filigranen Strukturen gewünscht sein, so kann man auf die Beschichtung vorgefertigte Schalungsmatrizen aus z.B. PU oder Silikon aufgeklebt werden. Zudem ist es möglich Textile Schalungsbahnen, Fliese oder Folien, die über Siebdruckverfahren mit Abbinde-Verzögerer beschichtet werden, auf die Beschichtung zu kleben, was weitere Möglichkeiten der architektonischen Oberflächengestaltung ermöglicht.

**[0084]** Die beschichtete Form kann auch selbst als Grundform für das Abformen mit Abformmassen wie weichen PU oder Silikonen dienen, um Bauteile mit besonders filigranen Anforderungen herzustellen. Die weichen Abformmassen haben den Vorteil, dass sie sich leichter entformen lassen.

**[0085]** Die Schalung ist aufgrund ihrer Robustheit und ihrer einfachen Reparaturmöglichkeiten über viele Kaltgussvorgänge hinweg einsetzbar. Sollte ihr Lebenszyklus zu Ende sein, ist es das Ziel die gesamte Gussform zu recyceln und das Grundmaterial des Formkörpers, am besten wieder zur Produktion neuer Schalungen zu verwenden. Der Recyclingvorgang beginnt damit, dass die Schalhaut entfernt wird. Dies kann mechanisch durch abfräsen, abschaben, abkratzen erfolgen, chemisch durch Aufsprühen eines Lösungsmittels oder thermisch durch Erhitzen und Abschaben. Da die Schalhaut sehr dünn ist (0,1 - 1,5 mm) fallen nur geringe Mengen an Kunststoffmüll an.

**[0086]** Die additiv gefertigte Gussform wird in einem 3D Drucker nach dem in der Fachwelt bekannten Verfahren Binder Jetting hergestellt. Nach dem Anfertigen der Gussform im 3D Drucker muss die Gussform beim Binder Jetting vom ungebundenen Partikelmaterial freigelegt und gesäubert werden. Nach der Reinigung wird die Gussform für die Beschichtung vorbereitet. Dabei werden gegebenenfalls Ausschalhilfen eingebaut und die Form, wenn notwendig, nachbearbeitet. Nach der Reinigung vom losen Partikelmaterial kann die Form nach einer Trockenzeit von ein paar Stunden der Beschichtung zugeführt werden. Nachdem die Beschichtung getrocknet und ausgehärtet ist, kann sie unmittelbar der Herstellung des Bauteils im Kaltgussverfahren zugeführt werden. Auf die Gussform wird das Trennmittel gesprüht. Wenn aus statischen Erfordernissen

notwendig kann die Bewehrung aus Eisen oder Textilen eingebaut werden. Schließlich kann im Kaltgussverfahren das Bauteil hergestellt werden. Dazu kann z.B. ein Gemisch aus Beton verwendet werden, oder es werden andere für das Bauwesen geeignete Materialien, wie z.B. Gips, Kalk oder Ton-Lehm samt Zuschlag verwendet. Nachdem die Bauteile ausgehärtet sind, können sie ausgeschalt werden.

**[0087]** Dabei kommen die Ausschalhilfen zum Einsatz welche das Bauteil vorsichtig von der Form-Schalung lösen. Mit Hilfe eines Hebemittels wie einen Kran können die Bauteile von der Form abgehoben werden und der Weiterverarbeitung zugeführt werden. Die Form wird gereinigt und erneut mit Trennmittel versehen und für den nächsten Gussvorgang vorbereitet. Sie kann auch nur als sogenannte Einmalform mit der Losgröße 1 verwendet werden. Bei einer einmaligen Verwendung wird die Form nach ihrem Gebrauch recycelt. Dabei wird die Schalungshaut durch ein mechanisches-, thermisches- oder chemischen Verfahren entfernt. Vorzugsweise mechanisch und/oder chemisch. Nach der Entfernung der Schalhaut wird die Form in für den Brecher geeignete Stücke zerlegt und in einem geeigneten Brecher gebrochen. Der Brecher kann ein Backenbrecher, Kegelbrecher oder Prallbrecher sein. Vorzugsweise wird ein Prallbrecher eingesetzt. Als Aufbereitungsverfahren können Trockenaufbereitungsverfahren oder Nassaufbereitungsverfahren eingesetzt werden, vorzugsweise wird Trockenaufbereitung verwendet. Nach dem Zerkleinern des Materials mit einem Brecher, gibt es je nach Größe des Materialanfalls zwei Möglichkeiten das gebrochene Partikelmaterial zu recyceln:

**[0088]** a) Recycling und Rückführen des Materials in den Materialkreislauf ohne Rekalzinierung (ohne erneutes Brennen von MgO): Dieses Aufbereitungsverfahren wird bevorzugt bei geringeren Material- und Durchsatzmengen eingesetzt und stellt einen kostengünstigen Weg des Partikelmaterialrecyclings dar, da man sich den Brennvorgang samt den dafür notwendigen Vorrichtungen sparen kann. Nach dem Brechen kann das zerkleinerte Partikelmaterial in einer Attritionstrommel oder durch ein Hochspannungs-Aufschlussverfahren auf die gewünschten Korngrößen weiter zerkleinert werden oder es wird gleich der Klassierung durch Windsichten oder Sieben zugeführt. Nach dem Klassieren, vorzugsweise durch Sieben, werden die unterschiedlichen Korngrößen des Partikelmaterials in Vorratsbehältern gesammelt. Bei der Herstellung einer neuen Partikelmaterialmischung für den 3D-Druckprozess wird das recycelte Partikelmaterial dieser als Zuschlag zugegeben. Die neue Partikelmaterialmischung kann aus bis zu 5-70% recycelter Partikelmaterialmischung bestehen, vorzugsweise werden 40% recycelte Partikelmaterialmischung als Zuschlagstoff zugegeben.

**[0089]** b) Recycling und Rückführen des Materials in den Materialkreislauf ohne Rekalzinierung (mit erneutem Brennen des MgO): Dieses Aufbereitungsverfahren wird bevorzugt bei großen Materialmengen und hohen Durchsatzmengen angewendet. Durch die Rekalzinierung können die Kosten für das Bindemittel MgO zusätzlich gesenkt werden, da keine Abbaukosten und Transportkosten anfallen. Das vom Brecher, vorzugsweise einem Prallbrecher, zerkleinerte Material kann durch die Attritionsmethode in der Attritionstrommel oder durch Hochspannungs-Aufschlussverfahren weiter aufbereitet werden und in seinen Grundbestandteilen Zuschlagstoff und Bindemittel getrennt werden. Die Attritionstrommel wälzt das Material bei geringer Geschwindigkeit um, wobei die Oberfläche der Partikel einer Reibungskraft zwischen den Partikeln sowie der Trommelwand und den Partikeln ausgesetzt wird. Durch diese Reibung können sich die Zuschlagstoffe und Bindemittelpartikel aufgrund ihrer unterschiedlichen Härte weiter trennen. Durch die Klassierung mit Hilfe von Windsichtung oder Siebung werden die Bestandteile nach Partikelgröße oder Partikeldichte klassiert. Der auf diese weiße gewonnene Zuschlagstoff (z.B. Blähton, Blähglas) kann direkt für eine neue Partikelmaterialmischung zur Herstellung einer neuen Form verwendet werden. Das Bindemittel wird in einem Ofen, vorzugsweise einem Drehrohrofen oder Wirbelschichtofen nochmals kalziniert. Diesen Prozess des erneuten Brennens bezeichnet man als Rekalzinierung. Beim Rekalzinieren gewinnt das bereits einmal erhärtete Magnesiumoxid wieder an Reaktivität. Dabei laufen folgende Vorgänge ab:

- a)  $Mg(OH)_2 + \text{Wärme} \rightarrow MgO + H_2O$
- b)  $MgCO_3 + \text{Wärme} \rightarrow MgO + CO_2$

Das im Partikelmaterial vorhandene Magnesiumchlorid oder Magnesiumsulfat spaltet sich bei der

Erhitzung ebenfalls auf. Bei der Thermischen Behandlung spaltet sich das Magnesiumchlorid in Magnesiumoxid und Magnesiumoxichlorid und Chlorwasserstoff auf. Das Magnesiumsulfat spaltet sich in Magnesiumoxid und in Schwefeldioxid auf. Da die Abgase Magnesiumoxid enthalten, kann durch das Einbringen von Wassernebel mittels Quenche das Schwefeldioxid wieder in Magnesiumsulfat bzw. der Chlorwasserstoff in Magnesiumchlorid umgewandelt werden. Diese können jeweils wiederum gefiltert und in die Produktion rückgeführt werden.

**[0090]** Somit können alle Stoffe erneut zur Herstellung einer neuen Partikelmaterialmischung und zur Herstellung einer neuen Form in einem 3D-Drucker eingesetzt werden. Dabei kann die Bindemittelmenge aus einer Mischung von recycelten und ungebrauchten Bindemittel bestehen. Das Verhältnis liegt dabei vorzugsweise zwischen 40% recycelten und 60% neuen Bindemittel oder zwischen 50% und 50%.

**[0091]** Das Material MgO und das erfindungsgemäße Verfahren zum Herstellen von Gussformen sowie Bauteilen ermöglicht praktisch 100% Recycling und ist nachhaltig. Im Unterschied dazu stehen Formen die derzeit aus Holz, Styropor, Gips usw. konventionell in Handarbeit oder mit Hilfe von Fräsen erzeugt und anschließend entsorgt werden müssen.

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung einer additiv gefertigten Gussform für die Herstellung von Bauteilen im Kaltgussverfahren oder Laminierverfahren, umfassend die Schritte
  - a) Festlegen einer dreidimensionalen Struktur der Gussform,
  - b) Bereitstellen einer Mischung, wobei die Mischung Bindemittel und Zuschlagstoff umfasst,
  - c) Bereitstellen einer Druckflüssigkeit, umfassend eine wässrige Lösung von Magnesiumchlorid oder Magnesiumsulfat.
  - d) Aufbringen einer Lage der Mischung auf einen Träger,
  - e) Auftragen der Druckflüssigkeit nur auf jene Teile der Mischung, die Teil der Gussform bilden sollen,
  - f) Auftragen einer weiteren Lage der Mischung auf die vorherige Lage der Mischung,
  - g) Auftragen der Druckflüssigkeit nur auf jene Teile der Mischung, die Teil der Gussform bilden sollen,
  - h) Wiederholen der Schritte f) und g) bis die gewünschte Form der Gussform erreicht ist,
  - i) Abbinden lassen jener Teile der Mischung, die mit der wässrigen Lösung von Magnesiumchlorid versetzt wurden,
  - j) Entfernen der nicht mit wässrigen Lösung versetzten Mischung, und
  - k) Beschichten zumindest jener Teile der Gussform, welche mit dem Material des Kaltguss-Laminierverfahrens in Kontakt kommen, mit einer Schalhaut.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Mischung zusätzlich einen Füllstoff umfasst.
3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Mischung
  - 10 bis 70 Gew.% Bindemittel
  - 30 bis 90 Gew.% Zuschlagstoff
  - 0,01 bis 3 Gew.% Füllstoffaufweist.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Bindemittel Calciumoxid, Zemente, Calciumsulfat, Magnesiumoxid, Lehm- Ton, Trass, oder Mischungen daraus umfasst.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Bindemittel Magnesiumoxid umfasst.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Zuschlagstoff eine Dichte von 50 kg/m<sup>3</sup> bis 1 400 kg/m<sup>3</sup> aufweist.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Zuschlagstoff Blähton, Blähperlit, Blähglimmer, Blähglas, Blähhschiefer, Bims, Holzspäne, Lavastein-Schaumlava, Kesselsand, gesinterte Steinkohleflugasche oder Recycling- oder Abfallbaustoffe aus Gas-Porenbeton, Aerogele, Ziegelbaustoffe oder Mischungen daraus umfasst.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Zuschlagstoff unterschiedliche Korngrößen aufweist, wobei vorzugsweise die Korngrößenverteilung einer Idealsieblinie  $A(d) = (d/d_{max})^q$  mit einem Korngemenge mit  $0,2 < q < 0,7$ .
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Füllstoff Mehlkorn, Methylcellulose, Bentonit oder Kombinationen daraus umfasst.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Druckflüssigkeit eine Magnesiumchloridkonzentration oder Magnesiumsulfatkonzentration von zumindest 30 Gew.%, vorzugsweise von 45 bis 55 Gew.% aufweist.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Schalhaut Duroplasten, vorzugsweise Polyurethan oder Epoxidharz, ungesättigte Polyesterharz oder Phenoplasten umfasst.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Mischung aus Bindemittel und Zuschlagstoff aus einer benutzten Gussform gewonnen wird, insbesondere zuvor hergestellt nach einem der Ansprüche 1 bis 11, wobei von der benutzten Gussform zuerst die Schalhaut entfernt wird und anschließend die Gussform ohne Schalhaut rekälziniert und zerkleinert wird.
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass es mit einem 3D-Drucker durchgeführt wird.
14. Verfahren nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass der 3D-Drucker eine Steuerung aufweist, wobei in die Steuerung die dreidimensionale Struktur der Gussform eingegeben wird, wobei der 3D-Drucker
  - (i) eine Aufnahme- und Dosiereinheit für die Mischung,
  - (ii) eine Aufnahme- und Dosiereinheit für die Druckflüssigkeit;
  - (iii) gegebenenfalls eine Aufnahme- und Dosiereinheit für ein Stellmittel zum Einstellen der Viskosität der Druckflüssigkeit und
  - (iv) einen Träger aufweist,  
wobei die Steuerung die Schritte (a) bis (k) durchführt, indem sie die eine Aufnahme- und Dosiereinheit für die Mischung, die Aufnahme- und Dosiereinheit für die Druckflüssigkeit und gegebenenfalls eine Aufnahme- und Dosiereinheit für ein Stellmittel zum Einstellen der Viskosität der Druckflüssigkeit steuert.
15. Verfahren zur Herstellung eines Bauteils, wobei zuerst in einem Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14 eine Gussform bereitgestellt wird und anschließend in die bereitgestellte Gussform ein Material eingegossen oder laminiert und gehärtet wird.
16. Verfahren nach Anspruch 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Material Beton ist.
17. Verfahren nach Anspruch 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Material ausgewählt ist aus der Gruppe bestehend aus anorganischen gieß- und laminierfähigen Materialien wie z.B. Gips, Keramische Materialien, Lehm, Ton, Faserzement und organischen gieß und laminierfähigen Materialien wie z.B. Gießharzen aus Polyurethan und Epoxid, Silikone, Glasfaser-verstärkte Kunststoffe sowie Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff.
18. 3D-Drucker zum Drucken einer dreidimensionalen Gussform, wobei der 3D-Drucker
  - (i) eine Aufnahme- und Dosiereinheit für die Mischung;
  - (ii) eine Aufnahme- und Dosiereinheit für die Druckflüssigkeit;
  - (iii) gegebenenfalls eine Aufnahme- und Dosiereinheit für ein Stellmittel zum Einstellen der Viskosität der Druckflüssigkeit und
  - (iv) einen Träger aufweist,  
wobei der 3D-Drucker eine Steuerung aufweist,  
wobei in der Steuerung eine dreidimensionale Struktur der Gussform hinterlegbar ist,  
wobei in der Aufnahme- und Dosiereinheit für die Mischung die Mischung bereitstellbar ist, wobei die Mischung Bindemittel und Zuschlagstoff umfasst,  
wobei in der Aufnahme- und Dosiereinheit für die Mischung die Druckflüssigkeit, umfassend eine wässrige Lösung von Magnesiumchlorid bereitstellbar ist,  
wobei die Steuerung derart ausgebildet ist, dass sie Aufnahme- und Dosiereinheit für die Mischung und die Aufnahme- und Dosiereinheit für die Mischung derart ansteuert, dass die Schritte e) bis h) des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 16 durchgeführt werden.

**Hierzu keine Zeichnungen**