



(10) **DE 10 2017 130 947 B4** 2020.06.18

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2017 130 947.0**

(22) Anmeldetag: **21.12.2017**

(43) Offenlegungstag: **27.06.2019**

(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **18.06.2020**

(51) Int Cl.: **B81C 1/00 (2006.01)**

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
**Leibniz-Institut für Oberflächenmodifizierung e.V.,
04318 Leipzig, DE**

(74) Vertreter:
**v. Bezold & Partner Patentanwälte - PartG mbB,
80799 München, DE**

(72) Erfinder:
**Charvat, Ales, 04317 Leipzig, DE; Elsner,
Christian, 04249 Leipzig, DE; Abel, Bernd, 04416
Markkleeberg, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	101 42 201	A1
DE	10 2007 029 445	A1
DE	10 2008 045 540	A1
DE	10 2010 006 769	A1
US	6 253 116	B1

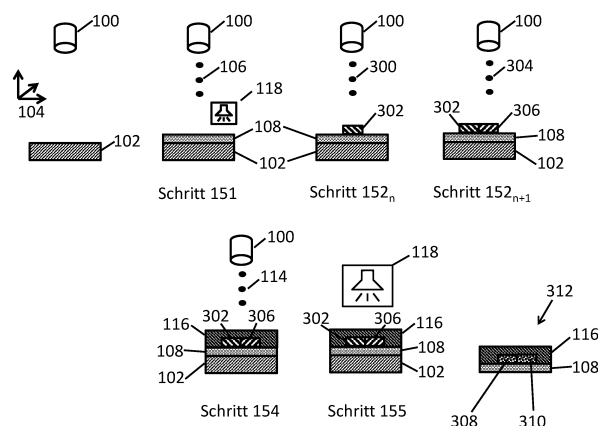
(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Herstellung eines Mikrosystembauteils**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur Herstellung eines Mikrosystembauteils (122; 206; 312; 400-434; 900), umfassend die Schritte:

Erzeugen (152) einer Mikrostruktur (112; 202; 302, 306; 502; 506) auf einem Substrat (102; 108), welche mindestens ein gefrorenes wässriges System (110; 200; 300, 304) umfasst, wobei die Mikrostruktur (112; 202; 302, 306; 502, 506) durch additive Fertigung auf einer Oberfläche des Substrats (102; 108) erzeugt wird;

Überschichten (154) der Mikrostruktur (112; 202; 302, 306) mit mindestens einer flüssigen Materialzusammensetzung (114, 116, 117), die mindestens eine aushärtbare Komponente umfasst; und

Aushärten (155) der mindestens einen Materialzusammensetzung (114, 116, 117).



Beschreibung

Technisches Gebiet

[0001] Die vorliegende Offenbarung betrifft ein Verfahren zur Herstellung eines Mikrosystembauteils. Insbesondere ist, ohne darauf beschränkt zu sein, ein Verfahren zur Herstellung von Mikrosystembauteilen zur physikalischen, chemischen oder biologischen Analyse und/oder Synthese beschrieben.

Technischer Hintergrund

[0002] Zur Herstellung von Mikrosystembauteilen stehen grundsätzlich abtragende Verfahren (Materialentfernung), formgebende Verfahren (Struktur-übertragende Verfahren) und Material-zuführende Verfahren (additive Verfahren, engl.: „Additive Manufacturing“, AM) zur Verfügung. AM wird bislang überwiegend zum Prototypenbau (engl.: „rapid prototyping“) eingesetzt und weist einen Entwicklungsstand auf, der die Erzeugung von Strukturen bis in den nanoskopischen Maßstab, also unter einem Mikrometer, beispielsweise mittels 2-Photonenpolymerisation, ermöglicht. In der Regel werden für die Erzeugung von Bauteilen verschiedenste Verfahrenskombinationen aus den genannten Kategorien eingesetzt. Speziell zur Erzeugung von Mikrostrukturen haben sich direkte lithografische Verfahren wie Fotolithografie, Elektronenstrahl- und Ionenstrahlolithografie in Kombination mit verschiedenen Ätzverfahren aus der Flüssig-, Gas- und Plasmaphase etabliert, wobei primäre Mikrostrukturen erzeugt werden, die bei Bedarf übertragen bzw. transferiert werden. Letzteres wird auch als Replikation oder engl. „pattern transfer“ bezeichnet. Die hierbei am häufigsten eingesetzten Techniken sind u.a. Heißprägen, Spritzguss, UV-Replikation und Mikrokontaktdruck, beispielsweise zur Übertragung einer Mikrostruktur mittels eines Kunststoffstempels auf eine gekrümmte Fläche. Die lithografischen Verfahren können durch eine Maske, z.B. eine Fotomaske, oder maskenlos eingesetzt werden.

[0003] Darüber hinaus können über verschiedenste AM-Verfahren, zu denen 3D-Druckverfahren zählen, Mikrostrukturen erzeugt werden [Au, A. K., Huynh, W., Horowitz, L. F. & Folch, A. „3D-Printed Microfluidics“, Angew. Chemie - Int. Ed. 55, 3862-3881 (2016) ; Macdonald, N. P. et al. „Comparing Microfluidic Performance of Three-Dimensional (3D) Printing Platforms“, Anal. Chem. 89, 3858-3866 (2017)]. Hierbei eingesetzte verdruckbare Materialien sind in der Regel Polymere, die bei hohen Temperaturen verarbeitet werden. 3D-Druckverfahren haben sich auch im Bereich Bioprinting etabliert, in dem es von Interesse ist, unter schonenden Bedingungen empfindliche biologische Materialien zu verarbeiten, wie beispielsweise Zellen, Zellbestandteile, Proteine, Peptide und Nukleinsäuren. Deshalb wurden verschiedene Herstellungstechniken entsprechend dieser Anforderun-

gen entwickelt oder angepasst. Pereira, R. F. & Bartolo, P. J., „3D Photo-Fabrication for Tissue Engineering and Drug Delivery“, Engineering 1, 90-112 (2015) führen hierzu lithografische Verfahren wie Stereolithografie (SLA), selektives Lasersintern (SLS), Schmelzschichtung (engl. „fused deposition modeling“ oder FDM) und das Drucken biologischen Materials mittels Laser (engl. „laser-guided direct writing“ oder LGDW sowie „laser-induced forward transfer“ oder LIFT), das auch als „Biological laser processing“ bezeichnet wird, auf. Ferner sind räumliche Mikrostrukturen aus laminierten Schnittschichten (engl.: „laminated object manufacturing“ oder LOM) herstellbar. Weiterhin lassen sich Mikrostrukturen über mechanisch abtragende Verfahren wie das Mikrofräsen erzeugen.

[0004] Es ist erst kürzlich gelungen, mikrofluidische Vorrichtungen vollständig mittels nichtlithografischer additiver Fertigung herzustellen, nämlich mit einem Inkjet-Druckverfahren [Su, W., Cook, B. S., Fang, Y. & Tentzeris, M. M., „Fully inkjet-printed microfluidics: a solution to low-cost rapid three-dimensional microfluidics fabrication with numerous electrical and sensing applications.“, Sci. Rep. 6, 35111 (2016)]. Hierzu wird auf einem Substrat in einem ersten Schritt eine Basisschicht aus dem Fotolack SU-8 gedruckt als Isolationsschicht für einen darauf gefertigten Mikrofluidikkanal. Im zweiten Schritt wird der Mikrofluidikkanal mit Polymethylmethacrylat (PMMA) als gelöstem Polymer gedruckt. In einem dritten Schritt wird eine Deckschicht ebenfalls aus dem Fotolack SU-8 über dem Mikrofluidikkanal gedruckt. Die Aushärtung der Systeme aus den flüssigen Drucktinten erfolgt bei 95°C bis 150°C. Im vierten Schritt wird das als Platzhalter für den Mikrofluidikkanal eingesetzte Polymer (PMMA) über Wasch- und Lösungsprozesse entfernt. Hierbei macht man sich zu Nutze, dass PMMA und SU-8 unterschiedliche Resistenzen gegenüber Lösungsmitteln aufweisen. Die erzeugten Mikrostrukturen können eine Dimension von 60 µm x 0.8 µm (Kanalbreite x Kanalhöhe) aufweisen.

[0005] Für die Fertigung von Mikrosystemen, insbesondere Mikrofluidiksystemen, werden in der Regel geeignete Kombinationen der vorgenannten Verfahren eingesetzt und zusammengeführt, wobei hochkomplexe Systeme realisiert werden können. Zu den in der Fertigung eingesetzten Materialien zählen Silizium, Glas, Duroplaste, Thermoplaste, Elastomere, Hydrogele, Papier, Metalle und Keramiken.

[0006] Das Dokument DE 10 2010 006 769 A1 beschreibt ein Verfahren, welches eine Maske zur horizontalen Strukturierung einsetzt. In Freiräumen der Maske wird beispielsweise Eis abgeschieden. Die gemeinsame Oberfläche von Eis und Maske wird auf eine einheitliche Ebene abgeschliffen und beschichtet.

[0007] Das Dokument DE 101 42 201 A1 beschreibt ein Verfahren zur Erzeugung einer Halbleiterschicht mit rückstandsfreien Hohlräumen. Eine Mikrostruktur wird nicht durch additive Fertigung auf einer Oberfläche erzeugt, sondern durch eine zuvor strukturierte Prozessschicht, nämlich durch die Form von Stegen und Gräben.

[0008] Das Dokument DE 10 2007 029 445 A1 beschreibt ein Verfahren, bei dem eine gedruckte Flüssigkeitsstruktur mit Flüssigkeit entweder während des gesamten Verfahrens flüssig ist oder durch chemische Reaktion verglast oder kristallisiert.

[0009] Das Dokument DE 10 2008 045 540 A1 beschreibt, wie ein Benetzungsmuster einer Benetzungslösung abgeformt wird.

[0010] Im Dokument US 6 253 116 B1 wird ein Verfahren zur Erzeugung räumlicher Strukturen auf Substraten unter dem Begriff „Rapid Freezing Prototyping“ beschrieben und in mehreren wissenschaftlichen Veröffentlichungen untersucht [Leu, M. C., Zhang, W. & Sui, G. „An Experimental and Analytical Study of Ice Part Fabrication with Rapid Freeze Prototyping“, CIRP Ann. - Manuf. Technol. 49, 147-150 (2000); Zhang, W., Leu, M. C., Ji, Z. & Yan, Y., „Rapid freezing prototyping with water“, Mater. Des. 20, 139-145 (1999); Bryant, F. D. & Leu, M. C., „Study on Incorporating Support Material in Rapid Freeze“, Proc. Solid Freeform Fabrication Symp. (Aug.), 2-4 (2004); Liu, Q., Leu, M. C., Richards, V. L. & Schmitt, S. M., „Dimensional accuracy and surface roughness of rapid freeze prototyping ice patterns and investment casting metal parts“, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 24, 485-495 (2004); W. Zhang et al., „Investment Casting with Ice Patterns Made by Rapid Freeze Prototyping“, Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, University of Texas Press, Aug. 2000, 66-72]. Hierbei werden vorzugsweise durch Einfrieren von Wasser oder wässrigen Salzlösungen Strukturen auf dem Substrat erzeugt, die über ein „drop-on-demand“-Verfahren oder über Extrusion generiert werden. Die eingesetzten „kristalloiden“ Materialien weisen einen Übergang zwischen einer flüssigen und festen Phase bei einer bestimmten Übergangstemperatur auf. Die Materialien werden in einem Gefrierbehälter positioniert. Ferner wird die Möglichkeit beschrieben, durch Spritzgießen von Silikonkautschuk oder durch den Einsatz eines UV-härtenden Silikons die Eisstrukturen zu replizieren (US 6 253 116 B1, Spalte 9, Zeilen 12 bis 35). Hierzu wird eine Schicht der Eisstruktur vom Substrat abgelöst. Die abgelöste Eisstruktur wird nachfolgend als Vorlage genutzt, um daraus eine Form herzustellen mit deren Hilfe letztendlich weitere Bauteile hergestellt werden können.

[0011] Im Dokument WO 2008/069761 A1 wird ein Verfahren zur Erzeugen eines dreidimensionalen Gerüsts beschrieben, welches sogenannte mikro- und

makroporöse Strukturen aufweist. Das Verfahren basiert auf einem sogenannten „Cryogenic Prototyping“-Verfahren. Hierbei wird eine Polymerlösung bestehend aus einem Polymer und einem Lösungsmittel über ein Dosiersystem auf einer Oberfläche in einem Kühlraum örtlich gesteuert appliziert, wobei durch Einfrieren Strukturen erzeugt werden, die letztendlich die makroporösen Strukturen bilden. Während des Einfrierens kommt es darüber hinaus in einem Selbstorganisationsprozess zu einer Phasenseparation von Polymer und Lösungsmittel im wässrigen System, wobei das Polymer nach Entfernung des Lösungsmittels die mikroporöse Struktur ausbildet. Die Porengröße und Porenmorphologie wird hierbei maßgeblich über Temperatur und Temperaturgradienten gesteuert.

[0012] Jedoch sind die herkömmlichen Techniken zur Herstellung von Mikrosystembauteilen mit Kompartimenten, insbesondere komplex aufgebauter und multifunktionaler mikrofluidischer Systeme, ungeeignet. Bei additiven Herstellungsverfahren sind die eigentlich beabsichtigten Strömungen und Prozesse zwischen den gefertigten Strukturen angeordnet, weshalb die im Vergleich zur Auflösung der gefertigten Strukturen ungenaueren Hohlraummaße die Genauigkeit und Funktion des Mikrosystembauteils limitieren. Bei abformenden und zerspanenden Herstellungsverfahren bestimmt zwar der Ort der Form bzw. der Wirkungsort des Werkzeugs den späteren Ort der Strömung oder des Prozesses, jedoch sind innenliegende Hohlräume und Hinterschneidungen nicht realisierbar.

[0013] Zudem ist es bei den herkömmlichen Herstellungsverfahren nicht möglich, auch nicht in einem späteren Verfahrensschritt, selektiv in innenliegenden (insbesondere geschlossenen) Hohlräumen des Mikrosystembauteils Strukturierungen und Funktionalisierungen vorzusehen.

[0014] Wird beispielsweise in einem bestehenden Mikrosystembauteil eine Substanz zur Bildung poröser Strukturen in einen Hohlraum (beispielsweise einen Mikrofluidikkanal) des Mikrosystembauteils eingebracht, kann deren Wirkung nicht in Strömungsrichtung auf einen bestimmten Abschnitt des Hohlraums begrenzt werden.

Erfindungsabriss

[0015] Somit ist es eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Herstellungsverfahren für Mikrosystembauteile anzugeben, bei dem Kompartimente, insbesondere Hohlräume, frei modellierbar sind. Alternativ oder ergänzend ist Aufgabe der Erfindung, Mikrosystembauteile herzustellen, deren Hohlräume und/oder Innenflächen lokal mikrostrukturiert und funktionalisiert sind.

[0016] Diese Aufgabe oder Aufgaben werden durch eine Technik mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Vorteilhafte Ausführungsformen und Anwendungen der Erfindung sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche und werden in der folgenden Beschreibung unter teilweiser Bezugnahme auf die Figuren näher erläutert.

[0017] Gemäß einem Aspekt ist ein Verfahren zur Herstellung eines Mikrosystembauteils bereitgestellt. Das Verfahren kann einen Schritt des Erzeugens einer Mikrostruktur auf einem Substrat umfassen. Die Mikrostruktur kann mindestens ein gefrorenes wässriges System umfassen. Alternativ oder ergänzend kann das Verfahren einen Schritt des Übersichtens der Mikrostruktur mit mindestens einer flüssigen Materialzusammensetzung umfassen. Die Materialzusammensetzung kann mindestens eine aushärtbare Komponente umfassen. Alternativ oder ergänzend kann das Verfahren einen Schritt des Aushärtens der mindestens einen Materialzusammensetzung umfassen.

[0018] Das Mikrosystembauteil kann zumindest durch die ausgehärtete Materialzusammensetzung gebildet sein. Das Mikrosystembauteil kann durch das Substrat und die ausgehärtete Materialzusammensetzung gebildet sein.

[0019] Die erzeugte Mikrostruktur kann als Platzhalter, Negativform und/oder Füllung das Innere des Mikrosystembauteils bestimmen. Das gefrorene wässrige System kann (zumindest teilweise) aus dem Mikrosystembauteil entfernt werden, beispielsweise durch Auftauen. Das gefrorene wässrige System kann aus dem Mikrosystembauteil (zumindest teilweise) entfernt werden bei der Herstellung im Anschluss an den Schritt des Aushärtens der Materialzusammensetzung oder vor bzw. bei einer Nutzung des Mikrosystembauteils.

[0020] Während bei herkömmlichen Mikrosystembauteilen eine Substanz zur Bildung poröser Strukturen in einen Hohlraum (beispielsweise einen Mikrofluidikkanal) des Mikrosystembauteils von außen eingebracht werden muss, kann durch die Mikrostruktur eine entsprechende Substanz im wässrigen System bereits bei der Herstellung im Mikrosystembauteil deponiert werden. Ferner kann bei herkömmlichen Mikrosystembauteilen eine Wirkung der Substanz nicht in Strömungsrichtung auf einen bestimmten Abschnitt des Hohlraums begrenzt werden oder beim Einsatz zusätzlicher (beispielsweise strahlenchemischer) Verfahren kann die Wirkung in mindestens einer Dimension (beispielsweise der Ausbreitungsrichtung der Strahlung) unkontrolliert und unbegrenzt sein. Dagegen können Ausführungsbeispiele die Substanz in der Mikrostruktur in jeder Raumrichtung positionieren.

[0021] Mehrere Materialzusammensetzungen können beispielsweise schichtweise übereinander und/oder nebeneinander auf unterschiedlichen Oberflächen der Mikrostruktur aufgebracht werden. Wenn im Folgenden Beispiele oder Eigenschaften der Materialzusammensetzung und Möglichkeiten der Aufbringung der Materialzusammensetzung beschrieben werden, können diese für eine oder mehrere Komponenten der Materialzusammensetzung, eine oder mehrere Materialzusammensetzungen oder die gesamte Materialzusammensetzung angewandt werden.

[0022] Der Begriff oder Begriffsbestandteil „Struktur“ kann sich auf Oberfläche, Form und/oder Füllung beziehen. Der Begriffsbestandteil „Mikro“ kann sich auf mindestens eine Auflösung des Schritts des Erzeugens und/oder mindestens eine charakteristische Länge der Struktur beziehen. Die Auflösung und/oder die charakteristische Länge kann weniger als 300 µm, 200 µm oder 100 µm betragen, beispielsweise weniger als 10 µm. Beispielsweise kann der Schritt des Erzeugens Mikrostrukturen mit einer Auflösung und/oder einer charakteristischen Länge zwischen 10 µm und 100 µm realisieren.

[0023] Die Auflösung und/oder die charakteristische Länge können linear oder geradlinig gemessen sein. Die Auflösung und/oder die charakteristische Länge können in einer bestimmten Raumrichtung vorliegen. Die Auflösung und/oder die charakteristische Länge können richtungsabhängig (beispielsweise jeweils für Breite und Höhe) und/oder ortsabhängig sein. Die Auflösung und/oder die charakteristische Länge kann ein Minimum der Abmessungen der Struktur sein, beispielsweise eine kleinste Querabmessung der Struktur. Alternativ oder ergänzend kann die Auflösung und/oder die charakteristische Länge zumindest ein (z.B. lokales, beispielsweise größtes) Maximum im reziproken Raum (d.h. einer Impulsraumdarstellung, beispielsweise einer Fourier-Transformation der Dichte der Struktur) umfassen.

[0024] Der Schritt des Übersichtens kann die Mikrostruktur teilweise oder vollständig überschichten. Beispielsweise können vertikale Anschlüsse ausgebildet werden, indem ein Fortsatz der erzeugten Mikrostruktur aus der Übersichtung vertikal herausragt. Beispielsweise kann der Fortsatz umlaufend und nicht an seine herausragenden stirnseitig beschichtet sein. Nach Entfernung der Mikrostruktur kann eine vertikale Zugangsöffnung in der ausgehärteten Materialzusammensetzung ausgebildet sein.

[0025] Das Substrat kann vor und/oder während des Erzeugens gekühlt sein. Das Erzeugen der Mikrostruktur auf dem Substrat kann ein Aufbringen und/oder Festfrieren (beispielsweise Gefrieren oder Anfrieren) des gefrorenen wässrigen Systems auf einer Oberfläche des Substrats umfassen. Das Sub-

strat kann z.B. Polymer, Metall, Glas, Keramik, Papier oder Holz umfassen.

[0026] Das Mikrosystembauteil kann einen Mikrofluidik-Chip, ein Lab-on-a-Chip, ein Organ-on-a-Chip, ein Lab-on-a-Foil, ein Organ-on-a-Foil oder funktionelle Teilkomponenten hierzu umfassen. Das Mikrosystembauteil kann ein Organ, Gewebe und/oder Zellen mit eingebettetem oder angeschlossenem mikrofluidischen System umfassen. Das Lab-on-a-Chip kann einen Mikrofluidik-Chip mit analytischen Funktionseinheiten auf Grundlage biologischer, chemischer und/oder physikalischer Prozesse umfassen. Das Organ-on-a-Chip kann einen Mikrofluidik-Chip mit Zell- und/oder Gewebekulturen umfassen. Das Lab-on-a-Foil kann analytische Funktionseinheiten auf einem flexiblen Träger umfassen. Das Organ-on-a-Foil kann Zell- und/oder Gewebekulturen mit mikrofluidischen Zugängen auf einem flexiblen Träger umfassen.

[0027] Die Mikrostruktur kann durch additive Fertigung auf einer Oberfläche des Substrats erzeugt werden. Die Mikrostruktur kann, beispielsweise parallel zur Oberfläche des Substrats, schichtweise, d.h., Schicht für Schicht, aufgebaut werden.

[0028] Die Mikrostruktur kann durch Ausstoßen des wässrigen Systems (beispielsweise einer wässrigen Lösung) aus (mindestens) einer Düse erzeugt werden. Ein Abstand zwischen der Düse und der aufgebauten Schicht kann größer (beispielsweise vielfach größer) als ein Extrusionsdurchmesser der Düse oder die Auflösung sein. Das von der Düse ausgestoßene wässrige System kann mit einer Strahlrichtung aufgebracht werden. Alternativ kann der Abstand zwischen der Düse und der aufgebauten Schicht gleich oder kleiner als der Extrusionsdurchmesser der Düse oder die Auflösung sein. Das ausgestoßene wässrige System kann an der Düse von der aufgebauten Schicht abgesichert werden.

[0029] Das wässrige System kann aus einer steuerbar beweglichen Düse ausgestoßen werden. Alternativ oder ergänzend kann das wässrige System mit einer steuerbaren Strahlrichtung ausgestoßen werden. Beispielsweise kann eine anfängliche Strahlrichtung zwischen Düse und Substrat abgelenkt werden. Alternativ oder ergänzend kann das wässrige System über einem steuerbar beweglichen Substrat ausgestoßen werden.

[0030] Das gefrorene wässrige System kann durch Ausstoßen des wässrigen Systems aus der (mindestens) einer Düse auf dem Substrat aufgebracht werden. Das Substrat und/oder die Düse können beim oder zum Aufbringen des wässrigen Systems in einer ersten Richtung (beispielsweise relativ zueinander) bewegt werden. Beispielsweise kann die Düse und/oder andere Anlagenkomponenten, wie beispielsweise die Bestrahlungseinheit, festsitzen und das Sub-

strat (beispielsweise ein Peltier-Tisch, der das Substrat bildet oder trägt) kann bewegt werden, vorzugsweise in alle Raumrichtungen). Alternativ oder ergänzend kann eine Strahlrichtung des wässrigen Systems beim oder zum Aufbringen des wässrigen Systems in der ersten Richtung steuerbar abgelenkt werden. In jeder Variante kann die erste Richtung parallel zur Oberfläche des Substrats sein. Beispielsweise kann eine Richtungskomponente der Ablenkung, insbesondere eine Kraft- oder Feldkomponente zur Ablenkung, parallel zur ersten Richtung oder einer Richtung parallel der Oberfläche des Substrats sein.

[0031] Vorzugsweise können Substrat und/oder Anlagenkomponenten in alle Raumrichtungen relativ zueinander beweglich sein.

[0032] Eine flexible Folie (die beispielsweise aufrollbar ist) kann als das Substrat oder als Träger des Substrats fungieren. Eine Vielzahl der Mikrosystembauteile kann in der ersten Richtung hintereinander auf der flexiblen Folie hergestellt werden, beispielsweise zum Einsatz der Mikrosystembauteile in einem Rolle-zu-Rolle-Verfahren (R2R-Verfahren). Das Verfahren kann zur Herstellung der Mikrosystembauteile oder einer Vielzahl von Mikrosystembauteilen in einem R2R-Verfahren eingesetzt werden.

[0033] Eine Beschichtung kann als Substrat dienen.

[0034] Die mindestens eine Düse kann beim oder zum Aufbringen des wässrigen Systems in einer zweiten Richtung (beispielsweise relativ zueinander) bewegt werden. Alternativ oder ergänzend kann eine Vielzahl der Düsen in der zweiten Richtung angeordnet sein. Alternativ oder ergänzend kann beim oder zum Aufbringen des wässrigen Systems die Strahlrichtung des wässrigen Systems in der zweiten Richtung steuerbar abgelenkt werden. Die zweite Richtung kann quer (beispielsweise senkrecht) zur ersten Richtung sein. Die zweite Richtung kann parallel zur Oberfläche des Substrats sein.

[0035] Das wässrige System (beispielsweise die wässrige Komponente des Systems) kann beim Aufbringen gefrieren. Das Substrat kann unter den Gefrierpunkt des wässrigen Systems gekühlt sein.

[0036] Beispielsweise kann beim oder zum Aufbringen jeder Schicht das Substrat und/oder die Düse in der ersten und/oder zweiten Richtung bewegt werden und/oder die Strahlrichtung kann in der ersten und/oder zweiten Richtung steuerbar abgelenkt werden. Beispielsweise kann das Substrat und/oder die Düse relativ zueinander parallel zur Oberfläche des Substrats oder in alle Raumrichtungen bewegt werden. Beim Übergang von einer Schicht zur nächsten Schicht kann das Substrat und/oder die Düse (beispielsweise relativ zueinander) in einer dritten Richtung bewegt werden, beispielsweise weg von der

Oberfläche des Substrats. Die dritte Richtung kann senkrecht zur Oberfläche des Substrats sein. Die additive Fertigung kann ein Druckverfahren sein. Beispielsweise können mehrere Lagen des gefrorenen wässrigen Systems gedruckt werden.

[0037] Das wässrige System kann als einzelne Volumina (beispielsweise einzeln ausstoßbare Tropfen oder „drop on demand“) oder als kontinuierlicher Strahl (beispielsweise moduliert zum Tropfenzerfall oder „continuous inkjet“) ausgestoßen werden, beispielsweise senkrecht zur Oberfläche des Substrats. Insbesondere kann das wässrige System durch ein sogenanntes Inkjet-Verfahren oder Polyjet-Verfahren auf die Oberfläche aufgebracht werden. Die einzelnen Volumina können einem Volumenelement oder Voxel der Mikrostruktur entsprechen (beispielsweise mit linearen Abmessungen gemäß der Auflösung). Der kontinuierliche Strahl kann einem Linienelement oder einer Kante der Mikrostruktur entsprechen (beispielsweise mit einer Querabmessung gemäß der Auflösung).

[0038] Die einzelnen Volumina (beispielsweise die Tropfen) der Mikrostruktur können zeitlich nacheinander und/oder Schicht für Schicht aufgebracht werden. Die einzeln aufgetragenen Volumina der Mikrostruktur können vor oder beim Aufbringen fest, flüssig und/oder einphasig oder mehrphasig sein. Beim oder nach dem Aufbringen können die einzeln aufgetragenen Volumina jeweils festfrieren (beispielsweise gefrieren oder anfrieren). Die einzeln aufgetragenen Volumina können eine Mischung fester und flüssiger Komponenten (d.h., eine Dispersion oder ein feuchtes Granulat) oder eine Mischung miteinander nicht mischbarer Flüssigkeiten (d.h., eine Emulsion) umfassen. Beispielsweise kann zumindest eine wässrige Komponente des einzelnen Volumens gefrieren oder ein wässriger Film eines benetzten Granulats anfrieren.

[0039] Das Erzeugen jeder Schicht kann das laterale Platzieren der einzelnen Volumina umfassen. Beispielsweise kann eine Vielzahl der Tropfen lateral positioniert werden und/oder der kontinuierliche Strahl kann lateral extrudiert werden. Die einzelnen Volumina können lateral platziert werden durch das Bewegen des Substrats und/oder der Düse in der ersten und/oder zweiten Richtung. Alternativ oder in Kombination können die einzelnen Volumina lateral platziert werden durch das gesteuerte Ablenken der Strahlrichtung, beispielsweise durch das gesteuerte Ablenken der Flugrichtung der Tropfen oder der Flugbahn des kontinuierlichen Strahls.

[0040] Die Ablenkung der Strahlrichtung kann durch mindestens ein ablenkendes elektrisches Feld (beispielsweise ein elektrostatisches Feld) gesteuert werden. Hierbei kann „elektrostatisch“ sich auf die Wechselwirkung des elektrischen Felds mit den ein-

zelnen Volumina beziehen. Zur Steuerung der lateralen Platzierung in der Schicht kann das elektrostatische Feld zeitabhängig sein. Das ablenkende elektrische Feld kann zwischen der Düse und dem Substrat ausgebildet sein. Das ablenkende elektrische Feld kann parallel zur Oberfläche des Substrates, d.h. in der ersten und/oder zweiten Richtung orientiert sein.

[0041] In einer ersten Variante sind die einzelnen Volumina (beispielsweise die Tropfen oder der kontinuierliche Strahl) elektrisch aufgeladen. Die einzelnen Volumina können durch ein erzeugendes elektrisches Feld in Austrittsrichtung (beispielsweise in der dritten Richtung) an der Düse und/oder durch eine Spannung der Düse gegenüber einem Erdungspotenzial elektrisch aufgeladen werden. Das ablenkende elektrische Feld kann zumindest am Ort der Wechselwirkung mit den einzelnen Volumina ein homogenes elektrostatisches Feld umfassen.

[0042] Alternativ oder ergänzend kann das ablenkende elektrische Feld zumindest am Ort der Wechselwirkung mit den einzelnen Volumina ein inhomogenes elektrostatisches Feld umfassen. In einer zweiten Variante, die mit der ersten Variante kombinierbar ist, kann die Ablenkung der (beispielsweise elektrisch neutralen) Volumina durch das inhomogene elektrostatische Feld gesteuert werden. Die Wechselwirkung mit den einzelnen Volumina kann eine Wechselwirkung zwischen permanenten Dipolen des wässrigen Systems und dem inhomogenen elektrostatischen Feld umfassen.

[0043] Die Mikrostruktur kann durch berührungsloses Aufbringen einzelner Tropfen des wässrigen Systems erzeugt werden. Die Tropfen können beim Aufbringen auf dem Substrat und/oder auf zuvor aufgetragenen Volumina oder Schichten der Mikrostruktur festfrieren (beispielsweise gefrieren oder anfrieren). Die Mikrostruktur kann iterativ aus dem gefrorenen wässrigen System aufgebaut werden. Das Aufbringen jedes Tropfens kann ein lokales Benetzen einer zuvor aufgetragenen Schicht durch den positionierten Tropfen und das Gefrieren des einzelnen Tropfens umfassen.

[0044] Die Düse und/oder das Substrat können beim Erzeugen der Mikrostruktur in einer wasserfreien Atmosphäre und/oder einem Raum mit inertem Gas angeordnet sein. Die wasserfreie Atmosphäre oder das inerte Gas kann beim Erzeugen der das gefrorene wässrige System umfassenden Mikrostruktur eine Temperatur aufweisen, die höher als die Schmelztemperatur des wässrigen Systems ist. Hierbei kann die wasserfreie Atmosphäre ein Gas oder Gasgemisch (beispielsweise Luft) mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von weniger als 5% umfassen. Das inerte Gas kann beispielsweise CO₂, Stickstoff, Argon und/oder Helium umfassen. Eine ungesteuerte Bildung von Eiskristallen (und damit unkontrollierte

Formgebung der Mikrostruktur) durch Resublimation von Wasserdampf an der Mikrostruktur und/oder Anlagenkomponenten kann so verhinderbar sein.

[0045] Der Schritt des Erzeugens der Mikrostruktur kann vor dem Schritt des Überschichtens eine Nachbearbeitung der Mikrostruktur umfassen. Die Nachbearbeitung kann die Oberfläche der Mikrostruktur betreffen. Die Nachbearbeitung kann ein Fräsen, Glätten und/oder Anschmelzen der Oberfläche der Mikrostruktur umfassen. Das Anschmelzen kann beispielsweise durch absorbierendes Bestrahlen (beispielsweise durch thermische Strahlung) oder Umströmen mit Warmluft bewirkt werden. Alternativ oder ergänzend können Unebenheiten oder Kanten in der Oberfläche der Mikrostruktur durch einen Gasstrahl (beispielsweise einen Luftstrahl) entfernt oder geglättet werden.

[0046] Die angeschmolzene Oberfläche kann durch die Oberflächenspannung des wässrigen Systems geglättet werden. Volumina (beispielsweise Tropfen), die zuvor einzeln aufgebracht worden sind, können durch das Anschmelzen koaleszieren.

[0047] Die gesamte Oberfläche der Mikrostruktur kann zeitgleich angeschmolzen werden. Alternativ oder ergänzend kann die Oberfläche ortsaufgelöst (beispielsweise durch einen richtungsgesteuerten Laserstrahl) angeschmolzen und/oder bearbeitet werden.

[0048] Alternativ oder ergänzend kann die Nachbearbeitung das Volumen der Mikrostruktur betreffen. Die Mikrostruktur kann beispielsweise durch Bestrahlen (insbesondere Wärmestrahlung oder Laser-Strahlung), Fräsen, Sublimieren (insbesondere Gefriertrocknen oder Vakuumgefriertrocknen) im Volumen nachbearbeitet werden.

[0049] Das Verfahren kann ferner nach dem Schritt des Aushärtens mindestens einen der folgenden Schritte umfassen: Einen Schritt des Schmelzens und/oder Sublimierens des gefrorenen wässrigen Systems; und einen Schritt des Entferns des geschmolzenen oder sublimierten wässrigen Systems. Das geschmolzene oder sublimierte wässrige System kann aus dem Mikrosystembauteil entfernt werden, beispielsweise durch Schleudern (d.h. Rotieren des Mikrosystembauteils, beispielsweise um eine Achse außerhalb des Mikrosystembauteils), Ausspülen (d.h. Durchströmen mit einer Flüssigkeit, beispielsweise Wasser), Ausblasen (d.h. Durchströmen mit einem Gas, beispielsweise Luft, Kohlendioxid, Stickstoff, Argon, Helium), durch Verdunsten oder Verdampfen des geschmolzenen wässrigen Systems und/oder Gefriertrocknen (insbesondere Vakuumgefriertrocknen) des gefrorenen wässrigen Systems.

[0050] Die Mikrostruktur kann einen von einem Fluid befüllbaren und/oder durchströmbaren Raum des Mikrosystembauteils bestimmen. Der befüllbare Raum kann durchstömbar und/oder durch eine Öffnung (beispielsweise in der ausgehärteten Materialzusammensetzung) von außerhalb des Mikrosystembauteils (beispielsweise einseitig, insbesondere senkrecht zum Substrat) zugänglich sein. Die Öffnung kann durch einen (beispielsweise vertikalen) Fortsatz an die Mikrostruktur bestimmt sein.

[0051] Das Mikrosystembauteil kann (beispielsweise einfach oder mehrfach) ein Mikrofluidikbauteil (beispielsweise ein durchströmbares Mikrofluidikbauteil, insbesondere einen Mikrofluidikkanal), eine Funktionalität (beispielsweise eine fluiddynamische Funktionalität, insbesondere ein Ventil, oder eine analytische Funktionalität, insbesondere die eines Lab-on-a-Chip) und/oder ein Reaktionsgefäß (beispielsweise ein Mikrotiter-Gefäß oder eine Ausnehmung zur Aufnahme eines Mikrotiter-Gefäßes) umfassen.

[0052] Die ausgehärtete Materialzusammensetzung kann die Mikrostruktur zusammenhängend überschichten. Die Überschichtung kann flüssig aufgebracht werden. Die Überschichtung kann integral-einstückig sein. Die ausgehärtete Materialzusammensetzung kann integral-einstückig sein.

[0053] Die ausgehärtete Materialzusammensetzung kann die Mikrostruktur teilweise oder vollständig überschichten. Beispielsweise kann die Überschichtung mehrfach zusammenhängend (d.h., zusammenhängend und nicht einfach zusammenhängend) sein zur Herstellung vorgenannter Anschlüsse. Die Überschichtung kann flüssig aufgebracht werden.

[0054] Alternativ oder ergänzend kann die Überschichtung mehrstückig oder mehrschichtig sein. Die Überschichtung kann unterschiedliche Materialzusammensetzungen umfassen. Die Aushärtung und/oder das Aufbringen einer weiteren Materialzusammensetzung können iterativ erfolgen. Die ausgehärtete Materialzusammensetzung kann mehrstückig und/oder mehrschichtig sein.

[0055] Die Überschichtung kann mehrere Materialzusammensetzungen umfassen. Die Beschichtung kann beispielsweise in eine Ausnehmung (beispielsweise einen Spalt) oder anderen Hohlraum der Mikrostruktur eingebracht und dort ausgehärtet werden. Nach der Aushärtung der ersten Materialzusammensetzung kann mindestens eine weitere Beschichtung mittels Materialzusammensetzung aufgebracht werden, welche beispielsweise die ganze Oberfläche (beispielsweise der Mikrostruktur und der vorherigen Beschichtung) überdeckt. Hierbei können die Materialzusammensetzungen der verschiedenen Beschichtungen unterschiedlich sein.

[0056] Der Schritt des Überschichtens kann ein Überschichten der Mikrostruktur und eines angrenzenden Teils der Oberfläche des Substrats mit der flüssigen Materialzusammensetzung umfassen.

[0057] Im Schritt des Erzeugens kann die Mikrostruktur auf einer Oberfläche des Substrats aufgebracht werden. Im Schritt des Überschichtens kann die Mikrostruktur von der Materialzusammensetzung zusammenhängend bedeckt werden. Die Mikrostruktur kann von der Materialzusammensetzung zumindest an einer Stelle zusammenhängend bedeckt werden bis einschließlich zur Oberfläche des Substrats, beispielsweise einschließlich gegenüberliegender Seiten der Mikrostruktur. Das Überschichten kann auch als „Überdecken“ bezeichnet werden. Insbesondere steht der Realisierung des Merkmals an einer ersten Stelle nicht entgegen, dass an einer weiteren zweiten Stellen der Mikrostruktur, die mit der ersten Stelle (oder für sich) nicht zusammenhängend bedeckt ist, die Mikrostruktur überschichtet ist.

[0058] Die ausgehärtete Materialzusammensetzung und das Substrat können (beispielsweise senkrecht zur Oberfläche des Substrats) einen geschlossenen Querschnitt des Mikrosystembauteils bilden. Die Mikrostruktur kann einen oder mehrere Hohlräume des Mikrosystembauteils definieren. Die Hohlräume können nach dem Schritt des Aushärtens im Mikrosystembauteil vorliegen. Die ausgehärtete Materialzusammensetzung, beispielsweise ein ortsabhängiges fotochemisches Aushärten, kann Innenseiten der Hohlräume unterschiedlich funktionalisieren.

[0059] Die Hohlräume können von einem Fluid befüllbar sein. Die Hohlräume können (z. B. abschnittsweise) leer sein. Alternativ oder in Kombination können die Hohlräume (z. B. abschnittsweise) gefüllt sein, beispielsweise von der Mikrostruktur mit dem wässrigen System oder (beispielsweise nach dem Entfernen) mit einer festen Reststruktur der Mikrostruktur ohne das wässrige System.

[0060] Die Mikrostruktur kann eine Füllung des Mikrosystembauteils bilden oder beinhalten.

[0061] Das gefrorene wässrige System kann Eis oder eine im Eis enthaltene Funktionalisierung oder Präparation umfassen, die das Mikrosystembauteil zumindest abschnittsweise füllt. Das Verfahren kann zur Herstellung funktionalisierter und/oder gefüllter Mikrofluidikbauteile eingesetzt werden. Insbesondere können Innenflächen und/oder das Volumen des Mikrofluidikbauteils lokal und/oder ortsabhängig funktionalisiert sein.

[0062] Das wässrige System kann mindestens eine weitere Substanz beinhalten. Das zur Bildung des gefrorenen wässrigen Systems aufgebrauchte wässrige System kann mindestens eine weitere Substanz be-

inhalten. Ein Anteil der weiteren Substanz am wässrigen System kann höher als 100 ppm, beispielsweise höher als 1000 ppm, sein. Die Substanz kann ein Additiv in der wässrigen Lösung sein.

[0063] Beispielsweise kann das gefrorene wässrige System, aus dem die Mikrostruktur gebildet wird, weitere Substanzen enthalten, insbesondere als Zuschlag zum wässrigen System. Die Substanz, beispielsweise der Zuschlag, kann ein Cryogel ausbilden und/oder in einem sich ausbildenden Cryogel eingelagert sein.

[0064] Die mindestens eine Substanz kann funktionelle Acrylate, Polymere, Zellen und/oder Graphen umfassen oder bilden. Die mindestens eine Substanz kann niedermolekulare Verbindungen (beispielsweise mit einer Molekülmasse bis maximal 800 g/mol, beispielsweise Acrylate), hochmolekulare Verbindungen (beispielsweise Verbindungen oder Komplexe mit einer Molekülmasse von mindestens 800 g/mol, beispielsweise Polymere), supramolekulare Verbindungen, Komplexe und Nanosysteme (beispielsweise Nanopartikel, Nanostäbchen, Fibrillen, Graphen oder Graphenmodifikationen), Mikroartikel oder komplexe molekulare Systeme umfassen oder bilden. Die komplexen molekularen Systeme können beispielsweise assoziierte Biomoleküle, Rezeptoren oder Liposomen, Zellen oder Zellbestandteile und/oder Viren umfassen. Insbesondere kann die mindestens eine Substanz Zellen, Zellbestandteile (beispielsweise Zellorganellen und/oder Vesikel) und/oder Biomoleküle (beispielsweise Peptide), insbesondere Makromoleküle (beispielsweise Proteine, Nukleinsäuren, insbesondere Enzyme oder Aptamere) beispielsweise als Zuschlag umfassen.

[0065] Die Mikrostruktur kann elektrische Leiter umfassen. Supramolekulare Verbindungen, Komplexe oder Nanosysteme (z.B. Graphen, Graphenmodifikationen oder Fibrillen) können elektrische Leiter in der Mikrostruktur bilden. Das Graphen kann als Graphenoxid (GO) oder reduziertes GO vorliegen.

[0066] Alternativ oder ergänzend kann die mindestens eine Substanz Polymere umfassen oder bilden. Soweit bei der Polymerisation im gefrorenen wässrigen System Wärme entsteht, kann die Wärme geringer sein als eine latente Wärme des gefrorenen wässrigen Systems und/oder die entstandene Wärme kann zumindest soweit abgeführt werden (beispielsweise durch Kühlung des Substrats), dass Eisstrukturen der Mikrostruktur nicht oder nicht signifikant angegriffen werden.

[0067] Die mindestens eine weitere Substanz kann dazu ausgebildet sein, die Innenflächen und/oder das Volumen des Mikrofluidikbauteils zu funktionalisieren und/oder das Volumen des Mikrofluidikbauteils zur Präparation des Mikrofluidikbauteils zu füllen.

[0068] Verschiedene Schichten können verschiedene (beispielsweise im wässrigen System lösliche) Substanzen und/oder Konzentrationen der mindestens einen weiteren Substanz umfassen. Mehrere Lagen des gefrorenen wässrigen Systems können über und/oder nebeneinander angeordnet werden. Die hierzu genutzten wässrigen Lösungen können unterschiedliche (z.B. darin gelöste und/oder dispergierte) Substanzen enthalten.

[0069] Das gefrorene wässrige System kann mindestens eine strahlenchemische Substanz umfassen. In der mindestens einen Substanz kann Strahlung eine chemische Reaktion auslösen. Das Verfahren kann ferner einen Schritt des Bestrahleins der Mikrostruktur (d.h. ein Erzeugen der Strahlung am Ort der Mikrostruktur) zur Initiierung der Reaktion der strahlenchemischen Substanz umfassen.

[0070] Das Verfahren kann ferner einen Schritt des Bestrahleins der Mikrostruktur vor der Übersichtung mit einer Materialzusammensetzung (beispielsweise einen Lack) umfassen.

[0071] Das Bestrahlen kann elektromagnetische Strahlung (insbesondere ein Belichten mit sichtbarem Licht, ultraviolettem Licht, kurz: UV-Licht, oder Gamma-Strahlen), Neutronenstrahlung, Ionenstrahlung, Plasmabehandlung oder Elektronenstrahlen (kurz: EB für „electron beam“) einsetzen. Die initiierte Reaktion kann eine (beispielsweise fotoinitierte) Polymerisation oder Vernetzungsreaktion, insbesondere eine radikalische Polymerisation durch UV-Licht, umfassen. Die strahlenchemische Substanz kann eine fotochemische Substanz sein. Die fotochemische Substanz kann eine Vorläufersubstanz eines Cryogels und/oder eines Hydrogels umfassen.

[0072] Das wässrige System kann beim Bestrahlen gefroren bleiben oder (beispielsweise durch Kühlung des Substrats) unter dem Schmelzpunkt des wässrigen Systems gehalten werden. Das Bestrahlen kann erwärmungsfrei und/oder bei einer Temperatur unter dem Schmelzpunkt des wässrigen Systems die Reaktion initiieren. Die Reaktion der strahlenchemischen Substanz kann ohne Wärmezufuhr oder ohne äußeren Wärmeeintrag erfolgen.

[0073] Eine die Reaktion der strahlenchemischen Substanz bewirkende Strahlung kann nicht-thermisch sein. Hierin kann der Begriff „nicht-thermische Strahlung“ insbesondere Strahlung mit einer Wellenlänge kürzer als Infrarot (IR), Excimer-Strahlung und/oder kohärente Strahlung umfassen. Alternativ oder ergänzend kann die Strahlung Bindungsbrüche anregende Strahlung umfassen.

[0074] Die strahlenchemische Substanz kann nach dem Erzeugen der Mikrostruktur polymerisiert und/oder vernetzt werden. Alternativ oder ergänzend

kann die strahlenchemische Substanz vor, während oder nach dem Übersichten mit der aushärtbaren Materialzusammensetzung polymerisiert und/oder vernetzt werden. Hierzu kann die Mikrostruktur vor, während oder nach dem Aushärten der Materialzusammensetzung bestrahlt werden. Beispielsweise kann die erzeugte Mikrostruktur hindurch die ausgehärtete Materialzusammensetzung und/oder hindurch das Substrat bestrahlt werden. Die ausgehärtete Materialzusammensetzung (beispielsweise ein Kunststoff) kann für eine Wellenlänge der Bestrahlung (beispielsweise einer Belichtung) transparent sein. Alternativ oder ergänzend können die Wellenlänge der Bestrahlung der Substanz im gefrorenen wässrigen System und ein Wellenlängenbereich eines fotoinitierten Aushärtens der Materialzusammensetzung disjunkt sein. Ferner können das fotoinitierte Aushärten der Materialzusammensetzung und die Bestrahlung der Substanz im gefrorenen wässrigen System zeitgleich erfolgen.

[0075] Die mindestens eine Substanz kann wasserunlösliche Polymerstrukturen bilden, die in einem Teilvolumen des Mikrosystembauteils verankert sind. Die Polymerstrukturen können eine lokale Funktionalität innerhalb des Mikrosystembauteils bereitstellen. Beispielsweise ist die Substanz dazu ausgebildet, eine Polymerstruktur zu bilden, insbesondere ein Cryogel. Die Polymerstruktur kann den befüllbaren und/oder durchströmbaren Raum des Mikrosystembauteils (beispielsweise einen Mikrokanal) füllen oder partiell füllen.

[0076] Die Polymerstrukturen, beispielsweise das Cryogel, können porös sein. Die Polymerstrukturen können die innere Oberfläche des Mikrosystembauteils vergrößern. Die porösen Polymerstrukturen können eine Oberfläche für die Immobilisierung weiterer Verbindungen zur Verfügung stellen (optional bei entsprechend geeigneter Funktionalisierung), als Filter oder Mischer dienen, oder als Kompartimente für die Einlagerung fungieren, beispielsweise von Zellen oder Zellbestandteilen. Der von der Polymerstruktur gefüllte Raum kann beispielsweise eine Flüssigkeitschromatographie-Säule bilden, insbesondere eine Hochdruckflüssigkeitschromatographie-Säule oder Hochleistungsflüssigkeitschromatographie-Säule (HPLC-Säule).

[0077] Die Polymerstrukturen können an der ausgehärteten Materialzusammensetzung und/oder dem Substrat stoffschlüssig, formschlüssig und/oder kraftschlüssig verankert sein. Die wasserunlöslichen Polymerstrukturen können nach dem Entfernen des geschmolzenen oder sublimierten wässrigen Systems verankert bleiben.

[0078] Mindestens eine der mindestens einen Substanz kann ein Cryogel oder Hydrogel bilden. Die Substanz oder Substanzen können beim Bestrah-

len (beispielsweise mit UV-Licht oder EB) feste und wasserunlösliche Polymerstrukturen, beispielsweise Cryogelee oder Hydrogele, bilden. Cryogelee können Hydrogele in gefrorenem Zustand umfassen. Die Bildung des Cryogels kann Schritte gemäß der Offenlegungsschrift DE 10 2012 019 984 A1 umfassen.

[0079] Die Substanz kann in der wässrigen Lösung gelöste Monomere beinhalten. Die Monomere können beim Bestrahlen im gefrorenen wässrigen System der Mikrostruktur polymerisieren. Nach Entfernen des geschmolzenen oder sublimierten wässrigen Systems können die bestehenden bleibenden Polymerstrukturen ein schwammartiges, räumliches Netzwerk bilden, beispielsweise im befüllbaren und/oder durchströmbaren Raum des Mikrosystembauteils. In oder an dieser festen Komponente kann eine andere Komponente der wässrigen Lösung immobilisiert sein.

[0080] Durch Bestrahlen der Substanz im gefrorenen wässrigen System kann das Cryogel in der Mikrostruktur erzeugt werden. Beispielsweise kann das gefrorene wässrige System der Mikrostruktur polymerisierbare Substanzen enthalten. Nach dem Auftauen oder Sublimieren des gefrorenen wässrigen Systems kann an der Stelle der Mikrostruktur und unter Erhaltung der Form der Mikrostruktur das Cryogel entstehen. Ein in ein Polyacrylat eingehautes Cryogel kann entstehen, beispielsweise indem vor der Bestrahlung auf die Mikrostruktur die ein Acrylat umfassende Materialzusammensetzung aufgebracht und bestrahlt (beispielsweise mit UV-Licht oder EB) wird.

[0081] Das Cryogel kann als eine Stützsubstanz (beispielsweise mit einer mechanischen Stützfunktion) und/oder als Trägersubstanz (beispielsweise mit vergrößerter Oberfläche und/oder zur chemischen Immobilisierung) fungieren. Alternativ oder ergänzend kann die große Oberfläche des Cryogels Verbindungen (z.B. niedermolekulare Verbindungen, hochmolekulare Verbindungen, supramolekulare Verbindungen, Nanosysteme) oder die komplexen molekularen Systeme immobilisieren. Die Verbindungen oder komplexen molekularen Systeme können dem wässrigen System, welches im gefrorenen Zustand die Mikrostruktur bildet, zugegeben werden, beispielsweise als eine der mindestens einen Substanz, insbesondere in einer Eintopfreaktion.

[0082] Das wässrige System kann mindestens eine Substanz beinhalten, welche sich bei Sublimation, Verdunsten oder Verdampfen des wässrigen Systems auf einer Innenfläche des Mikrosystembauteils niederschlägt. Alternativ oder zusätzlich können die Polymerstrukturen oder die die Polymerstrukturen bildende (beispielsweise strahlenchemische) Substanz in einem zweiten Teilschritt des Erzeugens (beispielsweise einem zweiten Druckprozess) vor dem

Überschichten auf eine in einem ersten Teilschritt des Erzeugens erzeugte Mikrostruktur aufgebracht werden. Der Niederschlag (beispielsweise nach der Sublimation, der Verdunstung oder dem Verdampfen), und/oder die auf der Mikrostruktur aufgebrachte Substanz, kann strahlenchemisch an der inneren Oberfläche des Mikrosystembauteils (beispielsweise an der inneren Oberfläche der ausgehärteten Materialzusammensetzung) fixiert werden.

[0083] Das gefrorene wässrige System kann eine kontinuierliche Phase der Mikrostruktur umfassen. Die kontinuierliche (d.h. zusammenhängende) Phase der Mikrostruktur kann Eis umfassen. Das wässrige System und/oder die daraus erzeugte Mikrostruktur kann eine disperse Phase der Mikrostruktur umfassen. Die disperse Phase der Mikrostruktur kann die Substanz, insbesondere Öltröpfen, Zellen oder Granulate, oder ein Reaktionsprodukt der Substanz, insbesondere Polymere oder ein Cryogel, umfassen. Das gefrorene wässrige System kann eine Emulsion und/oder Dispersion sein, deren kontinuierliche Phase gefroren ist.

[0084] Die mindestens eine Materialzusammensetzung kann ohne Wärmezufuhr und/oder bei einer Temperatur unter dem Schmelzpunkt des wässrigen Systems aushärten. Das Aushärten kann ohne Wärmezufuhr oder ohne äußeren Wärmeeintrag erfolgen. Beispielsweise kann eine das Aushärten bewirkende Strahlung nicht-thermisch sein. Alternativ oder ergänzend kann ein Lösungsmittel der flüssigen Materialzusammensetzung verdunsten (beispielsweise in einer isothermen Umgebung).

[0085] Die das Aushärten der Materialzusammensetzung bewirkende Strahlung kann nicht-thermisch sein. Hierin kann der Begriff „nicht-thermische Strahlung“ insbesondere Strahlung mit einer Wellenlänge kürzer als Infrarot (IR), Excimer-Strahlung und/oder kohärente Strahlung umfassen. Alternativ oder ergänzend kann die Strahlung in der Materialzusammensetzung Bindungsbrüche anregende Strahlung umfassen.

[0086] Die auf die flüssige Materialzusammensetzung zum Aushärten einwirkende Strahlung kann elektromagnetische Strahlung und/oder Materiestrahlung (insbesondere Elektronenstrahlung, Ionenstrahlung und/oder Neutronenstrahlung) umfassen.

[0087] Das Aushärten „ohne Wärmezufuhr“ oder „ohne äußeren Wärmeeintrag“ kann vorliegen, wenn keine aktive Wärmezufuhr erfolgt. Beispielsweise kann eine isotherme Umgebung eine Verdampfungswärme (zumindest teilweise) ausgleichen. Ferner kann eine nicht-thermische Bestrahlung der Materialzusammensetzung zu einer lokalen Erwärmung führen. Ferner kann eine Polymerisation der aushärtbaren Komponente der Materialzusammensetzung un-

ter Freisetzung eines inneren Wärmeeintrags ablaufen, die eine lokale Erwärmung bewirkt.

[0088] Das Übersichten der Mikrostruktur mit der flüssigen Materialzusammensetzung kann ein Sprühbeschichten, ein Tauchbeschichten, ein Auftropfen oder Rotationsbeschichten (beispielsweise Aufschleudern oder englisch: „spin coating“) oder jedes andere Beschichtungsverfahren für pulverförmige, flüssige oder gelöste Komponenten umfassen. Die flüssige Materialzusammensetzung kann mittels einer Spritzenpumpe dosiert ausgegeben werden.

[0089] Die flüssige Materialzusammensetzung kann einen Lack umfassen. Beispielsweise kann die flüssige Materialzusammensetzung einen Decklack oder einen Einbettlack umfassen.

[0090] Der Lack kann polymerisierbar sein. Das Aushärten kann eine Polymerisation des Lackes umfassen. Der Lack kann bei einer Temperatur unter dem Schmelzpunkt des wässrigen Systems aushärtbar sein. Beispielsweise kann der Lack bei einer Temperatur von unter -10°C , beispielsweise zwischen -10°C und -20°C , aushärtbar sein.

[0091] Die flüssige Materialzusammensetzung (insbesondere die aushärtbare Komponente) kann ein Bindemittel, ein Lösungsmittel, einen 2-Komponenten-Kleber oder einen UV-Kleber umfassen. Die ausgehärtete Materialzusammensetzung kann Polymere, umfassen.

[0092] Die mindestens eine aushärtbare Komponente kann mindestens eine polymerisierbare und/oder vernetzbare Komponente umfassen. Das Aushärten der Materialzusammensetzung kann ein Polymerisieren und/oder ein Vernetzen der mindestens einen Komponente umfassen. Die Polymerisation der aushärtbaren Komponente kann ein strahlenchemisches Verfahren oder andere Verfahren zur Polymerisation umfassen.

[0093] Die aushärtbare Materialzusammensetzung und/oder die ausgehärtete Materialzusammensetzung können einen Kunststoff umfassen.

[0094] Der Schritt des Erzeugens der Mikrostruktur kann ferner den Schritt des Integrierens mindestens eines Bauteils an oder in der Mikrostruktur umfassen. Hierzu kann beispielsweise bei der additiven Fertigung der Mikrostruktur eine Komponente des mindestens einen zu integrierenden Bauteils eingesetzt werden. Das mindestens eine Bauteil kann ein oder mehrere optische, elektrische und/oder mechanische Bauteile umfassen. Das mindestens eine Bauteil kann Linsen, elektrische Leiter, Aktuatoren und/oder Sensoren umfassen. Die Sensoren können elektrische Sensoren umfassen. Die Aktuatoren kön-

nen Ventile umfassen. Die Ventile können beispielsweise mechanisch oder elektrisch steuerbar sein.

[0095] Die Mikrostruktur kann dazu dienen, das mindestens eine Bauteil in die korrekte Position zu bringen.

[0096] Das mindestens eine Bauteil kann ein Speicher für elektrische Energie umfassen, beispielsweise eine miniaturisierte Batterie. Alternativ oder zudem kann das mindestens eine Bauteil ein optisches Fenster mit einer geringen Eigenfluoreszenz sein, das in Kontakt mit der gefrorenen Mikrostruktur steht. Nach der Fertigung des Fluidikchips ermöglicht das integrierte optische Fenster beispielsweise Fluoreszenzanalysen.

[0097] Das Bauteil kann oder die Bauteile können im Schritt des Erzeugens auf der Oberfläche des Substrats und/oder auf einer Oberfläche der erzeugten Mikrostruktur aufgebracht werden. Beispielsweise bereits vor dem Aufbringen des wässrigen Systems zum Erzeugen der Mikrostruktur kann das Substrat das Bauteil oder die Bauteile umfassen. Leiterbahnen oder andere Funktionalitäten können auf der Oberfläche des Substrats aufgedruckt sein, die beim Erzeugen von der Mikrostruktur zumindest teilweise von dieser bedeckt wird.

[0098] Alternativ oder ergänzend können das Bauteil oder können die Bauteile im Schritt des Übersichtens auf einer Oberfläche der erzeugten Mikrostruktur aufgebracht werden. Ferner können das Bauteil oder die Bauteile in die Materialzusammensetzung (beispielsweise in den Lack) integriert werden.

[0099] Das Substrat oder die Materialzusammensetzung kann eine Folie umfassen, die beispielsweise aufrollbar ist. Die Folie kann kontinuierlich sein. Beispielsweise kann die Folie das Substrat, Teil des Substrats, die Materialzusammensetzung oder Teil der Materialzusammensetzung sein bei einer fortlaufenden Herstellung einer Vielzahl von Mikrostrukturbauteilen und/oder in einem Rolle-zu-Rolle-Verfahren.

[0100] Das Substrat und/oder die Folie kann in der ersten Richtung über eine Auflagefläche (beispielsweise einen Tisch) bewegt werden. Das Substrat und/oder die Folie können an der Auflagefläche anliegen, insbesondere zur Kühlung. Das Substrat und/oder die Folie kann an die Auflagefläche mittels mindestens eines Gummizylinders, oberseitig mittels Druckluft und/oder unterseitig mittels Unterdruck angedrückt werden.

[0101] Die Auflagefläche kann gekühlt sein. Durch die Anlage an der Auflagefläche kann ein wärmeleitender Kontakt bewirkt sein, der das Substrat und/oder die Folie kühlt.

[0102] Das Substrat und/oder die Folie kann (zumindest beim Schritt des Erzeugens der Mikrostruktur) auf einem rotierenden (vorzugsweise gekühlten) Zylinder angeordnet sein oder eine Oberfläche des Zylinders umfassen. Das Substrat kann eine Oberfläche des Zylinders oder eine durch den Zylinder transportierte Folie umfassen. Bei oder nach der Herstellung des Mikrosystembauteils kann das Substrat und/oder die Folie in einem Roll-zu-Rolle-Verfahren vom Zylinder übertragen werden.

[0103] Die einzelnen Verfahrensschritte können an verschiedenen Positionen (beispielsweise verschiedenen Winkelstellungen) um den Zylinder ausgeführt werden und/oder Mittel zur Ausführung der einzelnen Verfahrensschritte können an den verschiedenen Positionen angeordnet sein. Die Mittel können eine Düse zum Erzeugen der Mikrostruktur, eine Düse zum Übersichten der Mikrostruktur und/oder eine Strahlungsquelle zum Aushärten der Materialzusammensetzung umfassen. Alternativ oder ergänzend kann eine Drehbewegung des Zylinders angehalten werden und die Mittel zur Ausführung des jeweiligen Schritts in der ersten und/oder zweiten Richtung verfahren werden. Beispielsweise sind die Mittel zur Ausführung der Schritte auf einem Schlitten beweglich angeordnet.

[0104] Die flüssige Materialzusammensetzung kann eine Fläche einer Folie beschichten. Beim Übersichten kann die Beschichtung auf der erzeugten Mikrostruktur in Anlage gebracht oder mit der erzeugten Mikrostruktur in Kontakt gebracht werden.

[0105] Zum Übersichten kann die flüssige Beschichtung mit der erzeugten Mikrostruktur in Anlage oder in Kontakt gebracht werden. Dabei kann Fläche einer Folie ohne direkten Kontakt zur Mikrostruktur bleiben. Die flüssige Beschichtung kann die Fläche der Folie benetzen, beispielsweise zusammenhängend benetzen. Die Folie kann auf der von der erzeugten Mikrostruktur abgewandten Seite angeordnet sein. Optional kann die Folie beim Beschichten (zumindest stellenweise) die Mikrostruktur berühren. Die flüssige Materialzusammensetzung kann Acrylate als Beschichtung der Folie umfassen.

[0106] Gemäß einem weiteren Aspekt ist ein Verfahren zur Herstellung einer ein gefrorenes wässriges System umfassenden Struktur, insbesondere einer Eisstruktur, bereitgestellt. Das Verfahren umfasst einen Schritt des Kühlens eines Substrats unter die Schmelztemperatur des wässrigen Systems; und einen Schritt des lateralen Ablenkens einer Strahlrichtung des wässrigen Systems zur additiven Fertigung des gefrorenen wässrigen Systems auf dem Substrat. Die Strahlrichtung wird mittels eines elektrostatischen Felds gesteuert. Die Steuerung kann nach Maßgabe von Steuerdaten erfolgen, die aus einem

Schichtmodell der herzustellenden Struktur abgeleitet werden.

[0107] Ein erstes Ausführungsbeispiel des Verfahrens bezieht sich auf die Herstellung des Mikrosystembauteils. Die Mikrostruktur, insbesondere das gefrorene wässrige System, kann dabei der Mikrofabrikation einer Hohlraumformgebung und/oder der Füllpräparation des Mikrosystembauteils dienen. Durch das gefrorene wässrige System können chemisch und/oder topologisch differenzierte Bereiche, beispielsweise multifunktionale Bereiche, erzeugt werden.

[0108] Der gefrorene Zustand des wässrigen Systems in der Mikrostruktur definiert eine wässrige Füllung des Mikrosystembauteils. Zumindest abschnittsweise kann die Mikrostruktur dazu ausgebildet sein, durch Volumenänderung beim Einfrieren und Auftauen einen Querschnitt eines Hohlraums des Mikrosystembauteils wahlweise zu öffnen und zu schließen, d.h. als Ventil zu fungieren, beispielsweise gemäß dem Dokument WO 2003/044410 A1.

[0109] Die Mikrostruktur kann (beispielsweise gänzlich oder in einem Abschnitt) während oder nach der Herstellung (beispielsweise vor oder im Betrieb des Mikrosystembauteils) entfernt werden. Hierzu kann die Temperatur erhöht und/oder der Druck reduziert werden, beispielsweise während eines Vakuumgefrieretrocknungsprozesses. Alternativ oder ergänzend kann die Mikrostruktur während oder nach der Herstellung (beispielsweise vor oder im Betrieb des Mikrosystembauteils) in ihrer Funktion weitergebildet werden, beispielsweise durch Bestrahlung.

[0110] Alternativ oder ergänzend kann die Mikrostruktur zumindest abschnittsweise dazu ausgebildet sein, die Flüssigkeitsmenge in einem mikrofluidischen System zu portionieren oder Kompartimente herzustellen (beispielsweise gemäß einem der Dokumente WO 2008/115916 A1, US 2009/0056425 A1 und US 2010/0044918 A1) oder zu reduzieren (beispielsweise gemäß dem Dokument US 2007/0037295 A1). Alternativ oder ergänzend kann die Mikrostruktur zumindest abschnittsweise dazu ausgebildet sein, gefrorene Granulate im Mikrosystembauteil zu erzeugen, beispielsweise gemäß dem Dokument WO 2010/004253 A2.

[0111] Das Erzeugen der Mikrostruktur, insbesondere das Ausstoßen des wässrigen Systems, wird auch als Drucken bezeichnet. Das Erzeugen der Mikrostruktur kann mittels eines „drop-on-demand“-Verfahrens oder eines kontinuierlichen Inkjet-Verfahrens implementiert werden. Das Drucken des wässrigen Systems bildet in Kontakt mit einer gekühlten Oberfläche, d.h. der Oberfläche des Substrats, die gefrorene (beispielsweise temporäre) Mikrostruktur aus. Das

Substrat kann stationär oder beweglich (beispielsweise eine rotierende Walze) sein.

[0112] Das wässrige System kann von einer Flüssigkeitsdosiereinheit (kurz: Dosiereinheit), insbesondere durch eine Düse und/oder Spritze, ausgestoßen werden. Das Substrat kann durch ein Peltier-Element gekühlt werden. Die gekühlte Oberfläche des Substrats kann von der Flüssigkeitsdosiereinheit, insbesondere von deren Düse, thermisch entkoppelt sein.

[0113] Vorzugsweise befinden sich zumindest die ausstoßende Öffnung der Flüssigkeitsdosiereinheit und die Oberfläche des Substrats in einem mit einem Inertgas (beispielsweise Stickstoff, Argon oder Helium) gefluteten Raum. Dadurch, oder durch eine andere Maßnahme zur Lufttrocknung, kann die Luftfeuchtigkeit in diesem Raum unter der Sättigungskonzentration bei der Temperatur der Oberfläche des Substrats gehalten werden. Insbesondere kann die Bildung von Eiskristallen durch Kondensation oder Resublimation unterdrückt werden. Solche Eiskristalle können die Ausbildung einer homogenen Mikrostruktur (beispielsweise einer glatten Oberfläche der Mikrostruktur) und/oder die Flüssigkeitsdosierung (beispielsweise hinsichtlich ausgestoßener Menge der Flüssigkeit und/oder Strahlrichtung) erheblich stören.

[0114] Das im flüssigen Zustand ausgestoßene wässrige System kann eine kontinuierliche Phase umfassen oder ausschließlich sein, beispielsweise mit einer zugemischten oder darin gelösten Substanz. In einer ersten Variante, die mit jedem Ausführungsbeispiel umsetzbar ist, kann das gefrorene wässrige System der (beispielsweise temporären) Mikrostruktur die kontinuierliche Phase beibehalten, beispielsweise mit der zugemischten oder darin gelösten Substanz. In einer zweiten Variante, die mit der ersten Variante kombinierbar ist und mit jedem Ausführungsbeispiel umsetzbar ist, kann das flüssige wässrige System eine kontinuierliche Phase sein, wobei eine Mischung oder Lösung der enthaltenen Substanz beim Einfrieren durch Phasenseparation eine kontinuierliche und eine diskrete Phase ausbildet, beispielsweise bei der Cryogelbildung. Alternativ oder ergänzend kann (beispielsweise in der ersten oder zweiten Variante) eine unlösliche Substanz im flüssigen wässrigen System enthalten sein. Sowohl das ausgestoßene flüssige wässrige System als auch das gefrorene wässrige System der Mikrostruktur kann die unlösliche Substanz als diskrete Phase umfassen.

[0115] In einem zweiten Ausführungsbeispiel, das mit dem ersten kombinierbar ist, kann das gefrorene wässrige System der Mikrostruktur durch ein Bearbeitungsverfahren nachfolgend (beispielsweise zwischen dem Schritt des Erzeugens und dem Schritt des Übersichtens) modifiziert oder topologisch

verändert werden. Beispielsweise kann durch ein subtraktives Bearbeitungsverfahren die Mikrostruktur (d.h. deren Eisstruktur und eine ggf. darin eingeschlossene diskrete Phase) partiell entfernt werden. Ferner kann durch ein geeignetes Bearbeitungsverfahren die Mikrostruktur (d.h. deren Eisstruktur und eine ggf. darin eingeschlossene diskrete Phase) partiell umgeordnet werden. Die nachträgliche Behandlung der Mikrostruktur mit einem Wärmestrahler zur Oberflächenglättung der Mikrostruktur ist ein Beispiel hierfür. Beispielsweise können Bereiche der Mikrostruktur partiell angeschmolzen und wieder eingefroren werden, um eine homogenere Oberflächenbeschaffenheit (d.h. geringere Rauheit) zu erzielen.

[0116] In jedem Ausführungsbeispiel kann die gefrorene Mikrostruktur (beispielsweise unter anderem) die Aufgabe eines Platzhalters übernehmen. Die Mikrostruktur wird durch das nachfolgende Übersichten (beispielsweise auch durch Drucken) mit der Materialzusammensetzung als einer Deckschicht (beispielsweise einem Decklack) ummantelt. Die Materialzusammensetzung kann strahlenchemisch polymerisationsfähige und/oder vernetzbare Monomere, Oligomere oder Polymere als die aushärtbare Komponente enthalten. Durch die strahlenchemische Polymerisation wird die Komponente ausgehärtet, d.h., die Materialzusammensetzung als die Deckschicht (beispielsweise als Decklack) fixiert das System aus Mikrosystembauteil und Mikrostruktur. Das Aushärten kann durch Bestrahlung mit ultravioletem Licht (UV), Bestrahlung mit Vakuum-UV Licht (VUV-Photonen, beispielsweise im Wellenlängenbereich von 10 nm bis 200 nm, 100 nm bis 200 nm oder extremes Ultraviolett), Elektronenbestrahlung, Plasmabehandlung oder gamma-Bestrahlung bewirkt werden.

[0117] Die Flutung des Reaktionsraumes mit einem Inertgas ist für den Schritt des Aushärtens (beispielsweise die Polymerisation) der Materialzusammensetzung vorteilhaft. Insbesondere kann das Inertgas bei radikalisch ablaufenden Polymerisationen die Inhibierung durch Luftsauerstoff verhindern und ermöglicht bei Einsatz von Fotoinitiatoren deren Reduktion, was einen erheblicher Vorteil bei einem Einsatz von biologischen Substanzen im wässrigen System darstellt. Beim Einsatz von VUV-Bestrahlungsquelle kann eine Flutung des Reaktionsraumes mit einem Inertgas essentiell sein, da Sauerstoff schon in geringen Konzentrationen die VUV-Photonen absorbiert.

[0118] Eine wesentliche Anforderung des Verfahrens (zumindest eines dritten Ausführungsbeispiels des Verfahrens, das mit dem ersten und/oder zweiten Ausführungsbeispiel optional kombinierbar ist), ist der Erhalt (beispielsweise hinsichtlich Form und Oberfläche) der gefrorenen Mikrostruktur während des Aushärtens (d.h., der Fixierung). Im Gegensatz zu den eingangs genannten Inkjet-Verfahren [Su, W., Cook, B. S., Fang, Y. & Tentzeris, M. M., „Ful-

ly inkjet-printed microfluidics: a solution to low-cost rapid three-dimensional microfluidics fabrication with numerous electrical and sensing applications.“, Sci. Rep. 6, 35111 (2016)] wird der Einsatz und die Entstehung hoher Temperaturen zur Polymerisation vermieden bzw. verhindert. Durch den Einsatz beispielsweise von UV-LED-Lampen, VUV oder Plasmaquellen, die bei Atmosphärendruck arbeiten, wird der externe Wärmeeintrag gering gehalten.

[0119] Vorteilhafterweise sind aufwendige Wasch- und Lösungsschritte zur Entfernung der als Platzhalter fungierenden (beispielsweise insofern temporären) Mikrostruktur nicht notwendig. Einfaches Auftauen und Trocknen oder Gefriertrocknen kann für das Entfernen genügen. Die Prozessführung (d.h. niedrige Temperaturen und der Einsatz des wässrigen Systems zur Strukturierung) ist daher deutlich kompatibler mit biologischen Systemen, insbesondere im Hinblick zu den im Stand der Technik beschriebenen Verfahren. Im Vergleich zu abformenden Herstellungsverfahren (insbesondere Replikationsverfahren, wie beispielsweise UV-gehärtetes Gießen oder Heißprägen), ist eine Trennung des hergestellten Mikrosystembauteils von dem formgebenden Werkzeug (beispielsweise einer Patrizie oder Matrize gemäß dem Dokument DE 10 2013 203829 A1) nicht erforderlich. Der entsprechende, bei bestehenden Herstellungsverfahren kritische Entformungsschritt kann entfallen und durch den Auftau- und Trocknungsprozess ersetzt werden. Dies hat zur Folge, dass mittels des Herstellungsverfahrens auch Geometrien erzeugt werden können, welche komplexe Hinterschneidungen aufweisen, die mit den herkömmlichen Herstellungsverfahren (insbesondere Replikationsverfahren) nicht zugänglich sind.

[0120] Die gefrorene Mikrostruktur kann, alternativ zur Platzhalterfunktion oder über diese hinaus, eine oder mehrere Aufgaben und Funktionen übernehmen, die im Folgenden erläutert sind.

[0121] Als erstes Beispiel der Substanz, die bei jedem Ausführungsbeispiel dem wässrigen System zugegeben sein kann, lassen sich durch Zusatz einer oder mehrerer Substanzen (zu dem die Mikrostruktur ausbildenden wässrigen System) multifunktionale Mikrosystembauteil herstellen. Hierbei kann die Substanz oder können die Substanzen weiterer Bestandteile des wässrigen Systems oder Funktionselemente umfassen, beispielsweise reine Substanzen, Substanzmischungen, Monomere, Oligomere, Polymere, Partikel, Zellen, Biomoleküle, Biomakromoleküle, etc.

[0122] Als zweites Beispiel der Substanz, das mit dem ersten Beispiel der Substanz und jedem Ausführungsbeispiel der Erfindung kombinierbar ist, lassen sich Komponenten bereits während des Herstellungsprozesses im Mikrosystembauteil deponieren bzw. in die Mikrostruktur integrieren. So kann ge-

mäß dem Dokument DE 10 2012 019984 A1 (auch veröffentlicht als Dokument EP 2 720 042 A1) das gefrorene wässrige System strahlenpolymerisierbare Verbindungen (beispielsweise Monomere, Oligomere oder Polymere) enthalten. Insbesondere können Acrylate oder acrylierte Verbindungen in der Mikrostruktur unter Elektronenbestrahlung makroporöse Cryogele ausbilden. Dies ist bei Zusatz eines geeigneten Fotoinitiators auch über UV-Bestrahlung möglich [Zinggeler, M., Fosso, P. L., Hao, Y., Brandstetter, T. & Rühle, J. „Preparation of Linear Cryogel Arrays as a Microfluidic Platform for Immunochromatographic Assays“, Anal. Chem. 89, 5697-5701 (2017)].

[0123] Die Substanz oder Substanzen (beispielsweise vorgenannte Bestandteile oder Komponenten) können im flüssigen Zustand ausgestoßenen wässrigen System (beispielsweise druckbare wässrige Lösungen) wasserlöslich sein oder dispergiert vorliegen.

[0124] Eine übergeordnete Mikrostrukturierung solcher Cryogele ist durch das Erzeugen der Mikrostruktur (beispielsweise die hierin beschriebenen Druckverfahren) möglich. Während des Einfrierens (beispielsweise im Zuge des schichtweisen Aufbaus der Mikrostruktur in wärmeleitendem Kontakt mit dem gekühlten Substrat) wird einerseits die Mikrostruktur (als die übergeordnete Struktur) erzeugt. Weiterhin kommt es innerhalb der gefrorenen Mikrostruktur zu einer Phasenseparation zwischen dem wässrigen Lösungsmittel im wässrigen System, welches formgebende Eiskristalle bildet (gemäß der übergeordneten Struktur), und den darin befindlichen Verbindungen. Durch eine Bestrahlung, die mit oder ohne sowie vor oder nach dem Übersichten (beispielsweise der Applikation einer Deckschicht oder Decklackes) erfolgen kann, wird ein Polymerisationsprozess ausgelöst, d.h. Verbindungen (beispielsweise strahlenhärtende oder strahlenvernetzende Monomere, Oligomere und/oder Polymere) innerhalb der formgebenden Mikrostruktur der Eiskristalle werden polymerisiert. Bei Einsatz von UV-Strahlung kann weiterhin der Zusatz eines Fotoinitiators zum wässrigen System notwendig sein.

[0125] Nach Entfernung des Lösungsmittels des wässrigen Systems aus der Mikrostruktur werden poröse Gelstrukturen durch den Selbstorganisationsprozess mit einer übergeordneten Mikrostruktur durch den Druckprozess erhalten. In einer vorteilhaften Ausführung des Verfahrens werden unterschiedlich funktionalisierte Gelabschnitte innerhalb der Mikrostruktur (beispielsweise als Hohlraum eines Mikrosystems oder einer Mikrofluidik) hergestellt. So kann ein multifunktionales Mikrosystembauteil hergestellt werden.

[0126] Alternativ oder zusätzlich werden unterschiedliche chemische Funktionalisierungen aufgrund unterschiedlicher chemischer Strukturen der eingesetzten Substanzen (beispielsweise Verbindungen wie Monomere, Oligomere und/oder Polymere) erzeugt (untergeordnete Mikrostruktur oder kurz: untergeordnete Struktur). Eine Porengröße und/oder eine Morphologie der untergeordneten Mikrostruktur können durch Variation der Konzentration der eingesetzten Substanz oder Substanzen und/oder der Einfrierbedingungen gesteuert werden.

[0127] Ein drittes Beispiel der Substanz, das mit dem ersten oder zweiten Beispiel und jedem Ausführungsbeispiel der Erfindung kombinierbar ist, betrifft die Synthese unterschiedlicher funktionalisierter Cryogel-Abschnitte innerhalb des Mikrosystembauteils (insbesondere innerhalb eines Mikrofluidikkanals), welche durch die Mikrostruktur im Mikrosystembauteil definiert sind. Das Mikrosystembauteil kann beispielsweise miniaturisierte Reaktionskaskaden in einem Mikrofluidikchip aufweisen. Reaktionskaskaden sind dadurch gekennzeichnet, dass die unterschiedlich funktionalisierten Abschnitte in einem Mikrofluidikkanal einzelne sequentielle Reaktionsstufen einer Gesamtreaktion übernehmen. Entsprechende Systeme sind in der Literatur (beispielsweise im vorgenannten Dokument [Zinggeler et al., 2017]) beschrieben, können aber bei bestehenden Herstellungsverfahren nur über eine Nachfunktionalisierung des Mikrosystembauteils (beispielsweise der Mikrofluidik, d.h., in einer Kapillare) erzeugt werden. Hierbei ist der Herstellungsschritt der Mikrofluidik vom Funktionalisierungsschritt (beispielsweise der Cryogelsynthese) entkoppelt mit den entsprechenden Nachteilen für die Genauigkeit der Lokalisierung der Funktionalisierung.

[0128] Im Gegensatz zu mechanischen und lithografischen Herstellungsverfahren sind durch das Drucken des gefrorenen wässrigen Systems Teilvolumina der Mikrostruktur innerhalb des Mikrosystembauteils für die untergeordnete Strukturierung scharf begrenzt und frei definierbar. In den Teilvolumina kann die untergeordnete Strukturierung durch die Selbstorganisation geeigneter Materialien erzeugt werden. Einsetzbare Mechanismen der Selbstorganisation sind Phasensegregation (beispielsweise Gele, Cryogele, monolithische Systeme), Assoziationsprozesse (beispielsweise ein sogenanntes DNA-Origami, bei dem sich die DNA im sub-Mikrometer-Bereich faltet, und amyloide Fibrillen) sowie Mikrofaltung. Im biomedizinischen Bereich können durch diese Verfahren Strukturen mit einem hohen und/oder genau angepassten Verhältnis von Oberfläche zu Volumen erzeugt werden, um beispielsweise Zellen und Gewebe optimale Wachstumsbedingungen bereitzustellen oder einen hohen Funktionalisierungsgrad bei geringem Volumen zu erzielen, beispielsweise für die Affinitätsaufreinigung komplexer Flüssigkeitsmischungen.

Ein Beispiel für ein strahlenchemisches Verfahren ist hierbei die Erzeugung monolithischer poröser Mikrostrukturen, die beispielsweise auch in Cryogelen vorzufinden und im Dokument DE 10 2012 019 984 A1 beschrieben sind. Ferner können durch die Substanzen im wässrigen System Verfahren zur Erzeugung poröser Strukturen innerhalb der Mikrostrukturen eingesetzt werden. Hierzu gehören Lösungsgießen (engl.: „solvent casting“), Gefriertrocknung und Gasschäumen.

[0129] In Abgrenzung zu bestehenden Herstellungsverfahren, insbesondere gemäß dem Dokument US 6 253 116 B1, können in jedem Ausführungsbeispiel die auf dem Substrat erzeugten Eisstrukturen (d.h., das gefrorene wässrige System der Mikrostruktur) mit der Materialzusammensetzung (beispielsweise einem UV-Lack) überschichtet und zum Mikrosystembauteil als einem Gesamtbauteil aushärten. Vorzugsweise erfolgt vor dem Schritt des Überschichtens und des Aushärtens keine Ablösung der Mikrostruktur (oder Teile der Mikrostruktur) vom Substrat.

[0130] In jedem Ausführungsbeispiel kann die Dosiereinheit oder zumindest deren Auslass (beispielsweise deren Düse) in einem mit einem trockenen (wasserfreien oder wasserarmen) Gas, beispielsweise trockenem Stickstoff, gefluteten Behälter angeordnet sein. Im Behälter kann das Substrat angeordnet sein. Im Behälter kann eine Luftfeuchtigkeit von unter 30 %, vorzugsweise unter 5 %, herrschen. Dadurch kann die Bildung von Eiskristallniederschlägen aus feuchter Umgebungsluft verhindert werden. Unter normalen Umgebungsbedingungen bilden sich sehr rasch Eiskristalle auf gekühlten Oberflächen, welche die Topologie der gedruckten Mikrostrukturen als auch die Funktionen des Mikrosystembauteils (beispielsweise eines Fluidikchips) negativ beeinflussen. Die Unterdrückung der Bildung von Eiskristallen kann daher für die Erzeugung von homogenen Mikrostrukturen essentiell sein. Weiterhin kann sie notwendig sein, um die Flüssigkeitsdosiereinheit, insbesondere wenn die zu dosierenden Flüssigkeitsvolumina im Nanoliterbereich liegen, nicht durch zu geringe Temperaturen oder niedergeschlagenes Eis unbrauchbar zu machen. Ferner ermöglicht das Fluten mit Stickstoff eine effektivere UV-Polymerisation nach der UV-Lack-Überschichtung.

[0131] Die Flüssigkeitsdosiereinheit ist von den Anlagenbereichen, welche das Einfrieren des wässrigen Systems bewirken, thermisch entkoppelt. Vorzugsweise wird nicht innerhalb eines Gefrierbehälters oder einer gekühlten organischen Flüssigkeit gedruckt. Dies erlaubt einen höheren Spielraum bei der Temperaturwahl der zu dosierenden wässrigen Lösungen, d.h., des im flüssigen Zustand ausgestoßenen wässrigen Systems, beispielsweise durch Heizelemente an der Flüssigkeitsdosiereinheit. Ferner bietet die thermische Entkopplung einen weite-

ren Parameterfreiraum bei der Prozessführung, wie beispielsweise den Einsatz von wässrigen Lösungen, Emulsionen oder Dispersionen (als das wässrige System im flüssigen Aggregatzustand) mit erhöhter Viskosität durch entsprechende Zusätze (d.h., die Substanzen im wässrigen System). Die Temperatur des im flüssigen Aggregatzustand ausgestoßenen wässrigen Systems muss nicht notwendigerweise in der Nähe der Phasenübergangstemperatur (für den Übergang zwischen flüssig und fest) gehalten werden. Die Kühlung des Substrats erfolgt über ein Peltier-Element (beispielsweise einen Peltier-Tisch) und ist von der Flüssigkeitsdosiereinheit und einer Positioniereinheit zur Steuerung der Position der Düse und/oder der Strahlrichtung thermisch entkoppelt. Dies verbessert die Prozessführung insbesondere bei der Erzeugung der Eismikrostrukturen.

[0132] Beim Überschichten der Mikrostruktur mit der die aushärtbare Komponente umfassenden Materialzusammensetzung kann jedes Ausführungsbeispiel dahingehend variiert sein, dass zur Herstellung des Mikrosystembauteils die Materialzusammensetzung nicht oder nicht nur UV-polymerisiert wird. Die Polymerisation zum Aushärten kann auch durch andere strahlenchemische Verfahren ausgelöst werden, beispielsweise Elektronenbestrahlung, gamma-Bestrahlung, Plasmabehandlung oder Bestrahlung mit VUV-Photonen. Dies hat den Vorteil, dass auf toxische Fotoinitiatoren verzichtet werden kann, was für den Einsatz in Kombination mit biologischen Systemen oder Materialien vorteilhaft ist, wie beispielsweise der Zusatz von Zellen, Zellbestandteilen, Viren, Proteinen, Peptiden, Nukleinsäuren, Naturstoffen zu den wässrigen Systemen.

[0133] In einer Implementierung des Verfahrens werden Mikrosystembauteile hergestellt, wobei die Abmessungen der erzeugten Strukturen (d.h. die Auflösung oder die charakteristische Länge) weniger als 0,3 mm oder 0,2 mm, beispielsweise zwischen 10 µm und 100 µm, ist.

[0134] In Abgrenzung zu bestehenden Herstellungsverfahren, insbesondere gemäß dem Dokument WO 2008/069761 A1, können in jedem Ausführungsbeispiel poröse Strukturen (d.h. die untergeordnete Struktur oder Funktionalisierung) innerhalb der über ein additives Herstellungsverfahren erzeugten Mikrostrukturen (d.h. der übergeordneten Struktur) basieren auf einem Phasenseparationsprozess der im wässrigen System gelösten oder dispergierten Monomere, Oligomere und/oder Polymere. Die untergeordnete Struktur oder Funktionalisierung (beispielsweise die poröse Struktur) kann in einem der Erzeugung der Mikrostruktur (d.h. der übergeordneten Struktur) nachfolgenden strahlenchemischen Polymerisations- oder Vernetzungsschritt fixiert werden. Ohne letztes würde es bei der Entfernung des wässrigen Systems (als Lösungsmittels der Substanz) nicht

zur Ausbildung einer festen porösen Struktur kommen, da die Substanz (beispielsweise die Monomere, die Oligomere oder die Polymere) in einem unvernetzten Zustand vorliegen würde.

[0135] Vorteilhafterweise kann jedes Ausführungsbeispiel gegenüber bestehenden Herstellungsverfahren in einem mit einem mit getrocknetem Gas (d.h. mit keinem oder einem geringen Wasseranteil) gefüllten Reaktionsraum durchgeführt werden zur Unterdrückung der Bildung von Eiskristallen (beispielsweise Eismikrokristallen) oder Niederschlägen an Oberflächen des Substrates, der Mikrostruktur und/oder der Flüssigkeitsdosiereinheit.

[0136] Ferner kann jedes Ausführungsbeispiel gegenüber bestehenden Herstellungsverfahren eine Nachbearbeitung der durch ein additives Verfahren erzeugten Mikrostruktur vor dem Überschichten umfassen. Die Nachbearbeitung kann ein abtragendes Verfahren umfassen. Die Nachbearbeitung kann die Präzision von Überhängen oder Auskragungen an der Mikrostruktur verbessern. Alternativ oder ergänzend kann die Oberflächengüte (beispielsweise die Rauheit) durch Nachbearbeitung verbessert werden. Alternativ oder ergänzend kann die Nachbearbeitung die Auflösung und/oder die charakteristische Länge oder andere Abmessungen der Mikrostruktur verringern. Ferner kann die Nachbearbeitung dazu genutzt werden, zusätzliche Muster (z.B. Topologien) in der Mikrostruktur zu erzeugen.

[0137] Die in jedem Ausführungsbeispiel umsetzbare Erzeugung integrierter poröser Strukturen (d.h. die untergeordnete Struktur) in der gefrorenen Mikrostruktur durch (ggf. ortsabhängiges) Deponieren der Substanz oder Substanzen ermöglicht die Erzeugung (beispielsweise in chemischer und/oder topologischer Hinsicht) multifunktionaler Mikrosystembauteile.

[0138] Jedes Ausführungsbeispiel des Verfahrens kann in ein Rolle-zu-Rolle-Verfahren integriert werden. Vorzugsweise wird hierbei eine Bahn aus flexiblen Material, beispielsweise Kunststoff, Metall oder Papier, welches sich auf einer Rolle befindet, abgerollt, bearbeitet und schließlich wieder aufgerollt und/oder konfektioniert (beispielsweise zugeschnitten oder gestanzt). Beispielsweise kann das Verfahren in einen Foliendruckprozess integriert sein, bei dem eine eingelegte Folie nach dem Druckprozess nicht aus der Druckanlage entfernt werden muss.

[0139] Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung werden im Folgenden unter Bezugnahme auf die beigefügten Zeichnungen beschrieben. Es zeigen:

Fig. 1 eine Abfolge schematischer Schnittansichten zu Verfahrensschritten eines ersten Ausführungsbeispiels des Verfahrens zur Herstellung eines Mikrosystembauteils;

Fig. 2 eine Abfolge schematischer Schnittansichten zu Verfahrensschritten eines zweiten Ausführungsbeispiels des Verfahrens zur Herstellung eines Mikrosystembauteils;

Fig. 3 eine Abfolge schematischer Schnittansichten zu Verfahrensschritten eines dritten Ausführungsbeispiels des Verfahrens zur Herstellung eines Mikrosystembauteils;

Fig. 4 schematische Schnittansichten beispielhafter Mikrosystembauteile, die durch Ausführungsbeispiele des Verfahrens herstellbar sind;

Fig. 5 schematische Schnittansichten zu einem Ausführungsbeispiel des Verfahrens mit einer Nachbearbeitung der Mikrostruktur;

Fig. 6 eine Abfolge schematischer Schnittansichten zu Verfahrensschritten eines vierten Ausführungsbeispiels des Verfahrens zur Herstellung eines Mikrosystembauteils;

Fig. 7 eine schematische Schnittansicht zu einem ersten Beispiel der Integration des zweiten Ausführungsbeispiels in ein Rolle-zu-Rolle-Verfahren;

Fig. 8 eine schematische Schnittansicht zu einem zweiten Beispiel der Integration des zweiten Ausführungsbeispiels in ein Rolle-zu-Rolle-Verfahren; und

Fig. 9A und **Fig. 9B** schematische Schnittansichten zu einem dritten Beispiel der Integration des ersten bzw. zweiten Ausführungsbeispiels in ein Rolle-zu-Rolle-Verfahren.

[0140] **Fig. 1** zeigt ein erstes Ausführungsbeispiel eines Verfahrens zur Herstellung eines Mikrosystembauteils. Das Verfahren kann in einer Anlage implementiert sein, deren Anlagenkomponenten in **Fig. 1** schematisch gezeigt sind. Die Anlagenkomponenten können jeweils durch äquivalente Mittel zur Ausführung der Verfahrensschritte, beispielsweise Anlagenkomponenten anderer Ausführungsbeispiele, ersetzt werden.

[0141] Die Anlagenkomponenten umfassen eine oder mehrere Dosiereinheiten **100**. Die Dosiereinheit **100** kann mindestens eine Düse (auch: Druckdüse) zur additiven Fertigung (auch: Drucken) umfassen. Ferner umfassen die Anlagenkomponenten eine gekühlte Auflagefläche **102**, beispielsweise eines Tisches. Die Auflagefläche **102** kann mittels Peltier-Elemente gekühlt sein. Die mindestens eine Dosiereinheit **100** und die Auflagefläche **102** sind relativ zueinander in den drei Raumrichtungen **104** positionierbar. Die relative Positionierung **104** wird dazu genutzt, orts aufgelöst mindestens eine Mikrostruktur zu erzeugen. Hierzu kann das wässrige System durch die mindestens eine Dosiereinheit **100** im flüssigen Aggregatzustand ausgestoßen werden, beispielsweise als wässrige Lösung.

[0142] Vorzugsweise befinden sich die Anlagenkomponenten der Anlage in einem mit einem getrockneten Gas (insbesondere einem getrockneten Inertgas, beispielsweise Stickstoff, Argon oder Helium) gefüllten Behälter. Die relative Luftfeuchtigkeit im Behälter ist durch den Einsatz des getrockneten Gases soweit reduziert, dass sich an der gekühlten Auflagefläche **102** und/oder der Dosiereinheit **100** keine Eiskristalle während des Herstellungsverfahrens (insbesondere während des Druckprozesses) bilden können. Eiskristalle im Herstellungsverfahren können die Funktion des resultierenden Mikrosystembauteils beeinflussen. Zur Reduzierung der Luftfeuchtigkeit und/oder zusätzlich (beispielsweise während des Verfahrens) kann Kieselgel, ein Molekularsieb, Schwefelsäure und/oder flüssiger Stickstoff und/oder andere Trocknungsmittel eingesetzt werden. Typischerweise liegt die Luftfeuchtigkeit bei unter 10 %, vorzugsweise unter 5 %.

[0143] Es können mehrere Druckdüsen **100** (beispielsweise Polyjets) zur Multi-Jet-Modellierung der Mikrostruktur eingesetzt werden. Ferner kann die Druckdüse **100** oder jede Druckdüse **100** hinsichtlich ihrer Form (insbesondere im Längsschnitt) und/oder Größe (insbesondere Öffnungsdurchmesser) der damit ausstoßenden (d.h. zu druckenden) Flüssigkeit (beispielsweise dem wässrigen System im flüssigen Aggregatzustand oder der flüssigen Materialzusammensetzung) angepasst sein. Beispielsweise können in den einzelnen Schritten des Verfahrens unterschiedliche Flüssigkeiten von den jeweils angepassten Druckdüsen **100** ausgestoßen werden. Insbesondere kann die jeweilige Druckdüse **100** hinsichtlich Viskosität, Oberflächenspannung und Flüssigkeitsvolumen an die damit ausstoßende Flüssigkeit angepasst sein. Es können mehrere unterschiedlich dimensionierte Druckdüsen **100** oder Spritzen (für die Dosierung großer Volumina im Mikroliterbereich bzw. unterschiedliche wässrige Lösungen unterschiedlicher Verbindungen) in unterschiedlichen Kombinationen eingesetzt werden.

[0144] Jede der genannten Druckdüsen kann zum „drop-on-demand“ ausgebildet sein. Beispielsweise kann die Druckdüse dazu ausgebildet sein, einzelne Tropfen (vorzugsweise weniger als 1 Mikroliter) ausstoßen. Der Durchmesser eines Tropfens kann etwa 30 Mikrometer betragen. Alternativ oder ergänzend kann jede der genannten Druckdüsen, beispielsweise eine weitere Druckdüse, zur Überschichtung einer größeren zusammenhängenden Fläche, z.B. mit der mindestens einen Materialzusammensetzung, ausgebildet sein. Beispielsweise kann die Druckdüse eine Mikroliterspritze umfassen. Die Mikroliterspritze als Druckdüse kann die Überschichtung schneller ausführen als die „drop-on-demand“-Druckdüse.

[0145] Gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel wird in einem Schritt **151** des Verfahrens ein Substrat **108** bereitgestellt, beispielsweise auf dem gekühlten Tisch **102** positioniert. Das Substrat **108** kann eine Folie sein. Alternativ kann das Substrat **108** eine Basisschicht sein, die durch Drucken, Rakeln und/oder Versprühen einer flüssigen Formulierung **106** appliziert und gehärtet (beispielsweise polymerisiert) wurde. Das Härten des Substrats **108** kann mittels einer Strahlungsquelle **118** bewirkt werden, beispielsweise einer UV-Lampe (insbesondere einer UV-LED Lampe), einer VUV-Lampe, einem Elektronenbeschleuniger, einem Wärmestrahler, einem gamma-Strahler, einer Plasmaquelle, etc.

[0146] Jedes Ausführungsbeispiel des Verfahrens kann dahingehend variiert sein, dass die Basisschicht weggelassen wird, so dass das Erzeugen der Mikrostruktur (beispielsweise deren Druck) direkt auf der Auflagefläche **102** als Substrat im Sinne des Verfahrens erfolgt. Zur Vermeidung von Wiederholungen wird im Folgenden auf „Substrat“ oder „Auflagefläche“ bezuggenommen ohne stets die Varianten mit und ohne Basisschicht zu diskutieren.

[0147] In einem Schritt **152** des Verfahrens wird eine Mikrostruktur **112** erzeugt. Hierzu wird von der mindestens einen Dosiereinheit **100** (beispielsweise einer Druckdüse) ein wässriges System **110** im flüssigen Aggregatzustand (beispielsweise eine wässrige Lösung, Emulsion und/oder Dispersion in einer wässrigen Phase) an unterschiedlichen Relativpositionen **104** (beispielsweise unter Relativbewegung) auf das gekühlte Substrat **108** appliziert (beispielsweise ausgestoßen). Das wässrige System **110** friert ein und bildet eine Mikrostruktur **112** (auch: Eismikrostruktur) aus.

[0148] In einem Schritt **154** des Verfahrens wird mittels der Dosiereinheit **100** (beispielsweise eine weitere Druckdüse oder Spritze) eine (vorzugsweise gekühlte) aushärtbare (beispielsweise strahlenhärtende) Komponente einer flüssigen Materialzusammensetzung **114** appliziert, beispielsweise ausgestoßen. Die flüssige Materialzusammensetzung **114** kann jede zum Aushärten ausgebildete flüssige Formulierung sein, beispielsweise ein Lack mit einem flüchtigen Lösungsmittel oder eine polymerisierbare Materialzusammensetzung. Position **104** und Menge der applizierten flüssigen Materialzusammensetzung **114** sind so bestimmt, dass eine Überschichtung **116** der zuvor erzeugten Mikrostruktur **112** ausgebildet wird. D. h. die Überschichtung bettet die Eismikrostruktur **112** (beispielsweise vollständig oder teilweise) ein.

[0149] Beispielsweise ist die Druckdüse **100** zum Ausstoßen der flüssigen Materialzusammensetzung **114** im Schritt **154** eine andere Druckdüse **100** als jene Druckdüse **100**, welche das wässrige System **110** im Schritt **152** ausstößt. Alternativ ist es technisch

möglich, mit einer Druckdüse **100** das Herstellungsverfahren zu implementieren, beispielsweise wenn die unterschiedlichen auszustoßenden Flüssigkeiten aus unterschiedlichen Reservoirs der Druckdüse **100** zur Verfügung gestellt werden.

[0150] In einem Schritt **155** des Verfahrens wird die Überschichtung **116** gehärtet und fixiert, beispielsweise durch eine strahlenchemische Polymerisation. Hierzu werden eine oder mehrere geeignete Strahlungsquellen **118** auf die Überschichtung **116** gerichtet. Die Strahlungsquellen **118** können eine UV-Lampe (insbesondere eine UV-LED), eine VUV-Lampe, Elektronenbeschleuniger, Wärmestrahler, gamma-Strahler, Plasmaquelle etc. umfassen. Die im Schritt **155** eingesetzte mindestens eine Strahlungsquelle **118** kann mit der mindestens einen Strahlungsquelle **118** des Schritts **151** identisch oder von dieser verschieden sein.

[0151] Die Temperatur der flüssigen Materialzusammensetzung **114** beim Ausstoßen durch die Druckdüse **100** ist so gewählt, dass die durch die Eismikrostruktur **112** eingebrachte Form oder Dimension während des Schritts **154** des Überschichtens, teilweisen Überschichtens und/oder des Schritts **155** des Aushärtens erhalten bleibt. So kann die komplementäre Form der Überschichtung **116** die durch die Mikrostruktur **112** vorgegebene Form erhalten.

[0152] Beispielsweise ist die Temperatur der flüssigen Materialzusammensetzung **114** im Schritt **154** und/oder **155** geringer als die Schmelztemperatur des wässrigen Systems **110**. Alternativ oder zusätzlich kann während des Schritts **155** des Aushärtens das Eis des gefrorenen wässrigen Systems (zumindest oberflächlich) auftauen, wobei die Viskosität der flüssigen Materialzusammensetzung **114** als Überschichtung **116** beim Schritt **155** des Aushärtens (beispielsweise bei dessen Polymerisation) zunimmt und die Überschichtung **116** letztendlich fest wird. Die Mikrostruktur **112** kann auftauen durch in Wärme umgesetzte Energie der Bestrahlung und/oder freigesetzte Reaktionsenthalpie des exothermen Aushärtens, insbesondere durch Polymerisationswärme. Indem das Auftauen der Mikrostruktur **112** und das Aushärten **155** der Überschichtung **116** zeitgleich ablaufen, kann die Form der Mikrostruktur in der komplementären Form der Überschichtung **116** erhalten bleiben.

[0153] Nach einem Entfernen des Mikrosystembauteils **122** von der Auflagefläche **102** oder bei Erwärmung der Auflagefläche **102** (beispielsweise durch Ausschalten dessen Kühlung), taut die Eismikrostruktur **112** auf und hinterlässt an entsprechender Stelle einen Innenraum **120**. Der Innenraum **120** kann einen Hohlraum, eine wässrige Füllung und/oder eine funktionale Stelle umfassen. Die Mikrostruktur **112** kann aus dem Raum **120** entfernt werden. Das Entfernen kann ein Auftauen oder Sublimieren der Mi-

struktur **112** und/oder ein Trocknen des die Mikrostruktur **112** bildenden wässrigen Systems **110** umfassen. Die Eismikrostruktur **112** (oder zumindest deren wässriger Anteil) im Mikrosystembauteil **122** kann auch durch Gefriertrocknung entfernt werden.

[0154] Bei Einsatz reinen Wassers als wässriges System **110** kann der Raum **120** nach dem Entfernen ungefüllt oder hohl sein. Das Entfernen der Mikrostruktur **112** kann auch schon während des Aushärtens **155** (beispielsweise der Polymerisation) der Überschichtung **116** erfolgen, sofern die Form der Eismikrostruktur **112** nach dem Aushärten **155** der Materialzusammensetzung **114** der Überschichtung **116** in der Überschichtung **116** abgebildet ist.

[0155] Optional werden (beispielsweise vor dem Schritt **152**) dem wässrigen System **110** Substanzen (beispielsweise Verbindungen) zugegeben, welche sich beim Entfernen der Mikrostruktur **112** (beispielsweise während des an den Schritt **155** anschließenden Trocknens, insbesondere während der Gefriertrocknung) im Raum **120** niederschlagen oder absetzen und zu einer Modifizierung (beispielsweise Funktionalisierung) einer bestimmten oder aller Innenflächen des Raumes **120** führen.

[0156] Das Verfahren wird über einen Computer oder Mikrocontroller gesteuert, der über verschiedene Sensoren Eingangssignale erhält, diese verarbeitet und entsprechende Ausgangssignale zur Steuerung des Verfahrens ausgibt. Das Verfahren kann optisch überwacht werden, z.B. durch den Einsatz von Kamerasystemen. Mittels der Kamerasysteme können beispielsweise Fehlstrukturen an oder innerhalb der Eismikrostruktur **112** bestimmt werden, die eine an die bestimmte Fehlstruktur angepasste Nachbearbeitung der Eismikrostruktur **112** auslösen.

[0157] Fig. 2 zeigt eine Abfolge schematischer Schnittansichten zu Verfahrensschritten eines zweiten Ausführungsbeispiels des Verfahrens zur Herstellung eines Mikrosystembauteils. Einzelne Verfahrensschritte und/oder die dazu eingesetzten Mittel können jeweils mit den entsprechenden Verfahrensschritten und Mitteln des ersten Ausführungsbeispiels übereinstimmen oder diese weiterbilden.

[0158] Das zweite Ausführungsbeispiel umfasst eine Herstellung einer untergeordneten Struktur, insbesondere einer porösen Trägerstruktur, innerhalb eines Mikrosystembauteils **206**. Setzt man als wässriges System **110** (beispielsweise statt reinen Wassers als der wässrigen Lösungen) Dispersionen oder Emulsionen wasserlöslicher und/oder funktioneller Acrylate **200** ein, können an entsprechender Stelle der erzeugten Mikrostruktur **202** poröse Cryogele **204** erzeugt werden.

[0159] Fig. 3 zeigt eine Abfolge schematischer Schnittansichten zu Verfahrensschritten eines dritten Ausführungsbeispiels des Verfahrens zur Herstellung eines Mikrosystembauteils. Einzelne Verfahrensschritte und/oder die dazu eingesetzten Mittel können jeweils mit den entsprechenden Verfahrensschritten und Mitteln des ersten oder zweiten Ausführungsbeispiels übereinstimmen, diese ergänzen und/oder diese kombinieren.

[0160] Das dritte Ausführungsbeispiel umfasst eine Herstellung einer multifunktionalen Mikrostruktur innerhalb eines Mikrosystembauteils **312**. Die Beschreibung des dritten Ausführungsbeispiels kann Merkmale und Verfahrensschritte der vorangegangenen allgemeinen Verfahrensbeschreibung gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel sowie der Ausführungsbeschreibung zur Herstellung einer porösen Trägerstruktur innerhalb des Mikrosystembauteils gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel kombinieren.

[0161] Durch paralleles und/oder sequentielles Drucken aus mehreren Druckdüsen **100** mit unterschiedlichen wässrigen Systemen **300** und **304**, oder einer Druckdüse **100**, welche sequentiell mit unterschiedlichen wässrigen Systemen **300** und **304** beschickt wird, werden Eismikrostrukturen **302** bzw. **306** erzeugt, welche die unterschiedlichen wässrigen Systemen **300** und **304** (beispielsweise in unterschiedlichen Phasenzusammensetzungen) enthalten.

[0162] Während in Fig. 3 zwei unterschiedliche wässrige Systemen **300** und **304** und die daraus resultierenden Mikrostrukturen **302** und **306** schematisch gezeigt sind, können je nach Anwendungsfall viele unterschiedliche wässrige Systemen im Schritt **152** appliziert werden. Die sich ausbildenden Eismikrostrukturen können aufeinander oder nebeneinander, in Kontakt zueinander oder ohne Kontakt zueinander angeordnet sein. Während basierend auf den wässrigen Systemen **300** und **304** in Fig. 3 das Erzeugen von zwei Eismikrostrukturen **302** bzw. **306** beispielhaft dargestellt ist, können je nach Anwendungsfall viele unterschiedliche Mikrostrukturen mit jeweils unterschiedlichen wässrigen Systemen im Schritt **152** erzeugt werden. Wenn hierin auf die Mikrostruktur im Singular Bezug genommen wird, kann diese die aus unterschiedlichen wässrigen Systemen erzeugten Mikrostrukturen umfassen. Sofern diese sich hinsichtlich ihrer Funktionalisierung unterscheiden, kann von einer „multifunktionalen Mikrostruktur“ gesprochen werden. Die multifunktionale Mikrostruktur kann eine zusammenhängende Überschichtung **116** umfassen.

[0163] Aus den zwei Eismikrostrukturen **302** und **306** können unterschiedliche Abschnitte **308** und **310**, beispielsweise unterschiedlich funktionalisierte Cryogelabschnitte oder anderweitig unterschiedliche

Strukturen, in einem Mikrosystembauteil **312** resultieren.

[0164] Die nachfolgenden Ausführungen beschreiben mittels des Verfahrens hergestellte beispielhafte Mikrosystembauteile (z.B. Grundformen der Mikrosystembauteile) näher und nehmen Bezug auf **Fig. 4**. Das Verfahren kann so ausgeführt werden, dass die Strukturen der in **Fig. 4** schematisch dargestellten, beispielhaften Mikrosystembauteile (beispielsweise die Kombination der gedruckten übergeordneten Struktur und der chemisch erzeugten untergeordneten Struktur) in einer multifunktionalen Mikrostruktur und in einem mittels der multifunktionalen Mikrostruktur hergestellten Mikrosystembauteil kombiniert werden. Insbesondere sind die Grundformen der Mikrosystembauteile hinsichtlich ihrer übergeordneten und/oder untergeordneten Struktur kombinierbar.

[0165] Während die Beispiele der Mikrosystembauteile Acrylate als dem wässrigen System zugesetzte Substanz und/oder als aushärtbare Komponente der flüssigen Materialzusammensetzung einsetzen, kann jede andere strahlenhärtende Substanz bzw. Komponente (insbesondere jede hierin beschriebene Substanz und Komponente) eingesetzt werden.

[0166] Die beispielhafte Grundform **400** des Mikrosystembauteils weist eine offene Struktur **120** auf. Die offene Struktur **120** wurde durch das Drucken **152** der Mikrostruktur **112** aus dem wässrigen System **110** direkt auf die gekühlte Auflagefläche **102** (beispielsweise den Drucktisch und/oder das Peltier-Element) erzeugt. Fluidikchips mit offenen Mikrofluidikkanälen oder miniaturisierte Mikrotiterplatten mit Mikrowells, deren Durchmesser im Mikrometerbereich liegt, sind entsprechende Anwendungsfälle der Grundform **400**.

[0167] Die beispielhafte Grundform **122** des Mikrosystembauteils weist eine durch das Substrat **108** geschlossene Struktur **120** auf und wurde durch das Drucken **152** einer Mikrostruktur **112** aus wässriger Lösung direkt auf ein Substrat **108**, beispielsweise eine Folie, erzeugt. Fluidikchips mit Mikrofluidikkanälen sind entsprechende Anwendungsfälle.

[0168] Die beispielhafte Grundform **206** des Mikrosystembauteils weist eine durch das Substrat **108** geschlossene Struktur **204** auf und wurde durch das Drucken **152** einer Mikrostruktur **202** aus wässriger Lösung, Emulsion und/oder Dispersion von Acrylaten direkt auf ein Substrat **108**, beispielsweise eine Folie, erzeugt, wobei sich ein Cryogel innerhalb des Mikrosystembauteils am Ort der gedruckten Mikrostruktur ausbildet. Das Cryogel kann innerhalb des Mikrosystembauteils **206** mindestens eine der folgenden Funktionen erfüllen: Mischer (beispielsweise durch Verwirbelung bei Durchströmung), Festphase zur gezielten Immobilisierung und/oder Freisetzung

von Verbindungen und Komponenten und/oder Oberflächenfunktionalisierung.

[0169] Im Folgenden sind beispielhafte Mikrosystembauteile beschrieben, welche durch Ausführungsbeispiele des Verfahrens hergestellt sind und Kombinationen der Grundformen **122**, **206** und/oder **400** umfassen.

[0170] Das Mikrosystembauteil **312** ist ein Spezialfall des Mikrosystembauteils **206**. Hierbei wurden wässrige Lösungen unterschiedlicher Acrylate als wässrige Systeme **300** und **304** eingesetzt. Die sich ausbildenden Cryogelstrukturen weisen daher unterschiedliche Zusammensetzungen auf, die voneinander räumlich getrennt sind und unterschiedliche Funktionen übernehmen. Mikrosystembauteile, welche mikrofluidische Reaktionskaskaden oder Affinitätskaskaden aufweisen, sind entsprechende Anwendungsfälle.

[0171] Das beispielhafte Mikrosystembauteil **422** (bzw. das zugehörige Ausführungsbeispiel des Verfahrens zu seiner Herstellung) ist ein Spezialfall der Mikrosystembauteile **206** oder **312** (bzw. der entsprechenden Herstellungsverfahren), wobei im Schritt **152** das Drucken der Eismikrostrukturen basierend auf wässrigen Lösungen unterschiedlicher Acrylate übereinander (d.h. mehrlagig) erfolgt.

[0172] Die beispielhafte Mikrosystembauteile **424** bis **434** (und deren Herstellungsverfahren) sind Kombinationen aus den Grundformen **122** und **206** des Mikrosystembauteils (bzw. Kombinationen der entsprechenden Herstellungsverfahren). Das Drucken der entsprechenden Abschnitte von Eismikrostrukturen, die sich in ihren Anordnungen und/oder Substanzen unterscheiden können, kann mehrlagig und/oder nebeneinander erfolgen.

[0173] Das Übersichten **154** von Abschnitten der Eismikrostrukturen **112**, **202**, **302** und/oder **306** mit der mindestens einen Materialzusammensetzung **114**, die sich in ihrer Zusammensetzung unterscheiden können, kann mehrlagig und/oder nebeneinander erfolgen. Nach jedem Übersichtungsschritt mit einer Materialzusammensetzung schließt sich ein Härtungsschritt **155** an, um die jeweils vorhergehend gedruckte Materialzusammensetzung zu fixieren. Auf oder neben die eine Materialzusammensetzung wird die folgende Materialzusammensetzung appliziert.

[0174] Die resultierenden teilweisen oder vollständigen Übersichtungen **116** und **117** können sich entsprechend der aufgetragenen unterschiedlichen Materialzusammensetzung **114** unterscheiden. Das in **Fig. 4** gezeigte beispielhafte Mikrosystembauteil **434** kann durch eine teilweise Übersichtung der Eismikrostruktur mit einer Materialzusammensetzung **114**, Aushärtung der Materialzusammensetzung

zung zur Teilüberschichtung **117**, vollständiger Überschichtung mit einer Materialzusammensetzung **114** und Aushärtung der Materialzusammensetzung zur Vollüberschichtung **116** erzeugt werden.

[0175] Fig. 5 zeigt schematische Schnittansichten einer Nachbearbeitung **153** der im Schritt **152** erzeugten Mikrostruktur, die dem Schritt des Überschichtens **154** vorausgehen kann. Die Nachbearbeitung **153** kann jede weitere Bearbeitung der erzeugten Mikrostruktur **502** umfassen. Hierbei kann die erzeugte Mikrostruktur **502** insbesondere eine der Eismikrostruktur **112**, **202**, **302** oder **306** sein oder solche Abschnitte umfassen.

[0176] Durch das Drucken **152** einzelner Tropfen des wässrigen Systems (beispielsweise einer wässrigen Lösung) auf der gekühlte Auflagefläche **102** und/oder dem Substrat **108** werden in der Regel Eismikrostrukturen **500** mit einer abgerundeten (beispielsweise sphärischen) Geometrie erhalten, wie in Fig. 5 schematisch dargestellt ist. Durch Veränderung von Prozessparametern, wie beispielsweise Veränderung der Geschwindigkeit der Tropfenerzeugung oder der Geschwindigkeit der Relativbewegung **104**, werden zusammenhängende Eismikrostrukturen **502** erhalten, welche aus der partiellen Überlagerung einzelner Tropfen entstehen. Die resultierende Eismikrostruktur **502** ist in ihrer Topografie nicht (zumindest nicht notwendigerweise) homogen. Darüber hinaus kann die Eismikrostruktur **502** Rauheiten aufweisen, welche beispielsweise durch den Kristallisationsvorgang (beim Gefrieren) oder die Kondensation (bzw. Kristallisation) feuchter Luft bedingt sind.

[0177] Die beim Drucken **152** erzeugte Eismikrostruktur **502** kann durch ein in die Prozesssequenz eingebundenen Zusatzschritt **153** bearbeitet (d.h. nachbearbeitet) werden. Dies kann beispielsweise durch einen Wärmestrahler **504** erfolgen, wobei die Eisstruktur partiell (z.B. in den exponierten oberflächennahen Bereichen) kurzzeitig aufgeschmolzen wird, so dass durch die hierbei temporäre flüssige Phase (beispielsweise getrieben durch Kapillarkräfte der Benetzung und/oder deren Oberflächenspannung) ein Strukturausgleich zwischen benachbarten Bereichen stattfindet, der zu einer Oberflächenglättung führt. Bei Abkühlung (beispielsweise nach Ausschalten, Ausblenden oder Verfahren des Wärmestrahlers **504**) bildet sich erneut eine homogenere Eisstruktur **506** mit geringerer Rauheit aus.

[0178] Ein alternativer oder zusätzlicher Nachbearbeitungsschritt verringert durch Sublimation die erzeugte Mikrostruktur (beispielsweise die Mikrostruktur **502** oder **506**) in ihrer räumlichen Ausdehnung.

[0179] Ein alternativer oder zusätzlicher Nachbearbeitungsschritt kann die erzeugte Mikrostruktur durch lokalen Materialabtrag bearbeiten (auch: subtrakti-

ve Nachbearbeitung). Der Nachbearbeitungsschritt kann ein Zerspanen (d.h. ein mechanischer Materialabtrag mittels Werkzeug) oder eine örtlich begrenzte Erwärmung umfassen. So können zusätzliche Strukturen, beispielsweise Löcher oder andere mikro- oder nanodimensionale Strukturen, in der erzeugten Mikrostruktur erzeugt werden. Hierzu kann ein Strahl eines Lasers auf einen Bearbeitungsort gerichtet werden. Der Laserstrahl kann vom Computer oder Mikrocontroller mittels schwenkbarer oder rotierender Spiegel örtlich und zeitlich gesteuert werden.

[0180] Ein viertes Ausführungsbeispiel des Verfahrens betrifft die Herstellung von Mikrosystembauteilen mit Hinterschneidungen (auch: Hinterschnitt) in den Innenräumen der Mikrosystembauteile. Hierzu werden Mikrostrukturen mit Hinterschneidung erzeugt. Das vierte Ausführungsbeispiel kann jedes der vorgenannten Ausführungsbeispiele weiterbilden. Das Herstellungsverfahren wird beispielhaft, und ohne drauf beschränkt zu sein, mit Bezug auf die Fig. 6 und unter Einsatz der wässrigen Lösung **110** beschrieben.

[0181] Das vierte Ausführungsbeispiel des Verfahrens betrifft insbesondere die Herstellung von Mikrosystembauteilen **122** mit Hinterschneidungen in Bezug auf die in den Schritten **154** und **155** erzeugte Überschichtung **116**. Hierzu werden Mikrostrukturen **112** innerhalb des Schrittes **152** oder in mehreren Schritten **152** erzeugt, welche der Struktur der Hinterschneidung komplementär sind.

[0182] Wie erwähnt lassen sich hinterschnittene Strukturen über einen Abformungsprozess, wie beispielsweise UV-gehärtetes Gießen (sogenanntes „UV moulding“) oder Heißprägen (sogenanntes „hot embossing“), nicht oder nur sehr eingeschränkt erzeugen. In der Literatur [Elsner, C., Zajadacz, J. und Zimmer, K., „Replication of 3D-microstructures with undercuts by UV-moulding“, Microelectron. Eng. 88, 60-63 (2011)] sind Probleme im Abformungsprozess beim Entformen hinterschnittener Strukturen aufgezeigt. Da Ausführungsbeispiele des erfindungsgemäßen Herstellungsverfahrens keinen Entformungsschritt benötigt, lassen sich hinterschnittene Strukturen prinzipiell einfacher und zuverlässiger herstellen. Hierbei erfolgt das Drucken **152** aus der Druckdüse **100** bei Wahl einer geeigneten Relativbewegung **104** in der Weise, dass sich beispielsweise Überhänge (d.h. Auskragungen in der ersten und/oder zweiten Richtung) in der Eismikrostruktur **112** bilden. Benachbarte und einander zugewandte Überhänge können geschlossen werden, wobei sich eine Brückenstruktur ausbildet. Durch Beschichten mit einer strahlenhärtenden Formulierung als flüssige Materialzusammensetzung **114** bildet sich eine Überschichtung **116** mit der aushärtbaren Komponente aus, welche die Eismikrostruktur **112** umschließt. Nach dem Aushärten **154** (beispielsweise durch strahlenchemische Po-

lymerisation) wird das Mikrosystembauteil **122** erhalten, deren Innenraum **120** eine hinterschnittene Struktur der aus der ausgehärteten Materialzusammensetzung **114** gebildeten Überschichtung **116** aufweist.

[0183] Während im in **Fig. 6** gezeigten Ausführungsbeispiel ein ungefüllter hinterschnittener Raum **120** hergestellt wird, können entsprechende Herstellungsverfahren und Mikrosystembauteile in einem hinterschnittenen Innenraum eine Funktionalisierung oder untergeordnete Struktur vorsehen, beispielsweise eine Cryogelstruktur **204**.

[0184] Die nachfolgenden Ausführungen betreffen den Einsatz eines Rolle-zu-Rolle-Verfahrens (R2R-Verfahren) zur Erzeugung von Mikrostrukturen bzw. zur Herstellung von Mikrosystembauteilen mittels der erzeugten Mikrostrukturen. Ausführungsbeispiele des erfindungsgemäßen Herstellungsverfahrens können in ein R2R-Verfahren integriert sein. Beispielsweise kann jedes hierin beschriebene Ausführungsbeispiel des Herstellungsverfahrens in einem der in den **Fig. 7** und **Fig. 8** schematisch gezeigte R2R-Verfahren implementiert sein. Zur Prägnanz, und ohne darauf beschränkt zu sein, ist nachfolgend die Implementierung des zweiten Ausführungsbeispiels des Herstellungsverfahrens als R2R-Verfahren beschrieben.

[0185] Die Implementierung des Herstellungsverfahrens als R2R-Verfahren ermöglicht einen kontinuierlichen oder quasi-kontinuierlichen Betrieb. Im R2R-Verfahren wird eine Substratfolie **108** durch ein Führungssystem, welches mindestens eine Rolle (beispielsweise rotierende Förderwalzen) umfasst, in einen Wirkungsbereich einer der Dosiereinheiten **100** (beispielsweise in einen Druckbereich des Schritts **152**) und aus dem Wirkungsbereich geführt. Beispielsweise wird die Substratfolie **108** von einem ersten Wirkungsbereich einer ersten Dosiereinheit **100** zu einem zweiten Wirkungsbereich einer zweiten Dosiereinheit **100** und/oder einer Strahlungsquelle **118** bewegt. Alternativ oder in Kombination können die Dosiereinheiten **100** und/oder die Strahlungsquelle **118** in der ersten oder zweiten Richtung bewegt werden. In den **Fig. 7** und **Fig. 8** sind beispielhafte Rollen bei den Bezugszeichen **700** bzw. **800** schematisch gezeigt.

[0186] Im Druckbereich wird zumindest der Schritt **152** des Herstellungsverfahrens ausgeführt, d.h. die Erzeugung einer gefrorenen Eismikrostruktur **202**, und optional die Nachbearbeitung **153** der Eismikrostruktur. Ferner können im Druckbereich oder einem Wirkungsbereich der Strahlungsquelle **118** der Schritt **154** des Übersichtens der Eismikrostruktur **202** mit der eine aushärtbare Komponente (beispielsweise einem strahlenhärtenden Lack) umfassenden flüssigen Materialzusammensetzung **114** und der Schritt **155**

des Aushärtens (beispielsweise eine Polymerisation des Lackes) ausgeführt werden. Diese Schritte können jeweils gemäß jedem der hierin beschriebenen Ausführungsbeispiele ausgeführt werden.

[0187] Im in **Fig. 7** gezeigten ersten Implementierungsbeispiel wird die Substratfolie **108** über eine statische und gekühlte Auflagefläche **102** (beispielsweise einen Tisch und/oder ein Peltier-Element) geführt. Alternativ oder ergänzend kann mindestens einer der Zylinder **700** gekühlt sein. Beispielsweise kann eine zeitlich vor den Einheiten (d.h., entgegen der Vorschubrichtung stromauf der Einheiten) angeordnete Rolle **700** die Substratfolie **108** vor dem entsprechenden Schritt (beispielsweise des Erzeugens) kühlen oder vorkühlen.

[0188] Die Einheiten zur Erzeugung der Mikrostrukturen (wie beispielsweise Dosiereinheiten **100**, Strahlungsquellen **118**, Einheiten zur Nachbearbeitung) sind vorzugsweise in den drei Raumrichtung, beispielsweise quer (d.h. in der zweiten Richtung) zur Vorschubrichtung (d.h. der ersten Richtung) der Substratfolie **108** positionierbar. Der Vorschub der Substratfolie **108** kann kontinuierlich oder schrittweise erfolgen. Im ersten Fall kann die jeweilige Einheit während der Ausführung des entsprechenden Schritts in der ersten Richtung mitbewegt werden. Im zweiten Fall kann der Vorschub während der Ausführung des entsprechenden Schritts (beispielsweise des Druckprozesses **152**) unterbrochen sein.

[0189] Im in **Fig. 8** gezeigten zweiten Implementierungsbeispiel, dessen Merkmale mit jenen des ersten Implementierungsbeispiels der **Fig. 7** kombinierbar sind, wird die Substratfolie **108** über mindestens eine Rolle **800** geführt, beispielsweise einen Zylinder, eine Walze, eine Förderrolle oder eine Umlenkrolle.

[0190] Mindestens eine der Rollen **800** ist gekühlt, so dass seine Mantelfläche als die gekühlte Auflagefläche **102** fungiert. Beispielsweise kann eine oder jede Rolle **800**, welcher einer der Einheiten räumlich zugeordnet ist, gekühlt sein. Hierzu kann die gekühlte Rolle **800** in der Vorschubrichtung am Ort der Einheiten (beispielsweise der Dosiereinheit **100** oder der Strahlungsquelle **118**) und der jeweiligen Einheit gegenüberliegend angeordnet sein.

[0191] Die Drehung der Rollen **800** kann kontinuierlich oder schrittweise erfolgen. Im ersten Fall kann die jeweilige Einheit während der Ausführung des entsprechenden Schritts in der ersten Richtung (d.h. umlaufend) mitbewegt werden. Im zweiten Fall kann die Drehung während der Ausführung des entsprechenden Schritts (beispielsweise des Druckprozesses **152**) unterbrochen sein.

[0192] Während in **Fig. 8** verschiedenen Einheiten (beispielsweise die Dosiereinheit **100** zum Erzeugen

152 der Mikrostruktur, die Dosiereinheit **100** zum Überschichten **154** der Mikrostruktur und die Strahlungsquelle **118** zum Aushärten **155**) jeweils eigene Rollen **800** räumlich zugeordnet sind, können mehrere oder alle Einheiten auch an verschiedenen Winkelpositionen umlaufend um eine Rolle **800** angeordnet sein und/ oder in ihrer Position ausgetauscht werden, beispielsweise mit Hilfe eines steuerbaren Schlittens. Die verschiedenen Einheiten können in allen 3 Raumrichtungen beweglich sein.

[0193] In jedem Ausführungsbeispiel und jedem Implementierungsbeispiel kann dem wässrigen System mindestens eine Substanz zur Polymerisation zugegeben sein. Die Polymerisation kann strahlenchemisch ausgelöst werden, beispielsweise im Schritt **152** und/oder im Schritt **155**.

[0194] Der Fachmann ist ferner in der Lage, weitere strahlenchemische Reaktionen im Herstellungsverfahren, insbesondere in den Schritten **151**, **152**, **154** und/oder **155**, einzusetzen. Die strahlenchemische Polymerisation (insbesondere die Strahlenhärtung) und/oder Vernetzung zur Herstellung der untergeordneten Struktur (beispielsweise einer mikrostrukturierten und/oder mikrofluidischen Polymerstruktur **204**) und die strahlenchemische Polymerisation und/oder Vernetzung der mindestens einen flüssigen Materialzusammensetzung zur Überschichtung (beispielsweise zum Übergang von **114** zu **116** oder **117**) basiert auf der freien radikalischen Polymerisation und/oder der kationischen Polymerisation. Alternativ oder ergänzend können Thiolen-Reaktionen (die auch als „Click“-Reaktion bezeichnet werden) entsprechend funktionalisierter Komponenten (Monomere, Oligomere oder Präpolymere), die als Mischung (Formulierung) vorliegen können, unter der Zuhilfenahme geeigneter Fotoinitiatoren und Photosensitizern im Falle einer fotochemischen Induktion eingesetzt werden [Pereira, R. F. and Bártolo, P. J., „3D bioprinting of photocrosslinkable hydrogel constructs“, J. Appl. Polym. Sci., 132, 42458 (2015), Pereira, R. F. & Bártolo, P. J., „3D Photo-Fabrication for Tissue Engineering and Drug Delivery“, Engineering 1, 090-112 (2015)].

[0195] Darüber hinaus können die zugegebenen Substanzen weitere Bestandteile wie beispielsweise Additive und Füllstoffe enthalten. Neben den strahlenchemisch induzierten Polymerisations- und Vernetzungsreaktionen sind bei Einsatz entsprechender Substanzen auch weitere Reaktionen möglich, die nicht strahleninduziert ablaufen. Dies sind beispielsweise Hydrolyse- und/oder Kondensationsvorgänge wie sie bei Einsatz von Alkoxysilanen, Isocyanat-Amin-Systemen auftreten. Hierunter fallen auch sogenannte „dual cure“-Systeme, welche mindestens 2 unterschiedliche Polymerisations- bzw. Vernetzungsprozesse umfassen.

[0196] Für die vorstehend genannte freie radikalische Polymerisation werden als Substanzen Verbindungen eingesetzt, die der Stoffgruppe bestehend aus Acrylaten, Methacrylaten, Acrylamiden, Methacrylamiden, Vinylverbindungen oder Styrolverbindungen zugehörig sind. Diese Verbindungen weisen typischerweise mindestens eine radikalisch polymerisierbare funktionelle Gruppe auf. Als Vernetzer wirken Substanzen, welche mindestens zwei polymerisierbare Gruppen aufweisen.

[0197] Zusätzlich können die Substanzen mindestens eine weitere eigenschaftsbestimmende Funktionalität aufweisen. Für den speziellen Fall der Acrylate mit der allgemeinen Struktur $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{COOR}$ sowie für Methacrylate mit der allgemeinen Struktur $\text{CH}_2=\text{CH}(\text{CH}_3)-\text{COOR}$ ist die Art des Restes R mit eigenschaftsbestimmend. Wesentliche Eigenschaften wie Hydrophilie, Hydrophobie, Viskosität, Haftung etc. sind hierüber bestimmbar. Im speziellen Fall der Acrylate können diese beispielsweise folgenden kommerziell verfügbaren Gruppen zugehörig sein: aliphatische und aromatische Urethanacrylate, Polyetheracrylate, Polyesteracrylate, Epoxyacrylate, acrylische Acrylate, mono-, bi-, tri- und multifunktionale Acrylate.

[0198] Neben den radikalisch polymerisierenden Substanzen kann das zu polymerisierende System noch weitere Zusätze (Additive, Füllstoffe, Coinitiatoren, Sensitizer) enthalten, welche die Eigenschaften des Polymermaterials bzw. des Polymerkompositmaterials bestimmen. Die Zusätze sind bekannt oder können vom Fachmann anhand routinemäßiger Versuchsreihen bestimmt werden. Entsprechende Eigenschaften sind beispielsweise Haftung, Entformbarkeit, Hydrophobie, Hydrophilie, Substratbenetzung, mechanische Eigenschaften, Dispersion von Feststoffen, Luftblasenfreiheit (Entschäumer) etc.

[0199] Die Fotoinitiatoren, welche typischerweise einer strahlenhärtenden Formulierung bis zu einem Anteil von 10 % (m/m) zugesetzt werden, gehören im Fall der freien radikalischen Polymerisation beispielsweise folgenden Klassen an: Typ I-Photoinitiatoren (z.B. Benzoinderivate, Acetophenonderivate, Benzilketale, alpha-Hydroxyalkylphenone und alpha-Aminoalkylphenone, O-Acyl-alpha-oximinoketone, Acylphosphinoxide und Acylphosphonate, Peroxyverbindungen) und Typ II-Photoinitiatoren (z.B. Benzophenone, Xanthone und Thioxanthone, alpha-Ketocoumarine, aromatische 1,2-Diketone, Phenylglyoxylate).

[0200] Bei der vorgenannten fotoinitierten kationischen Polymerisation werden als Substanzen Verbindungen eingesetzt, die der Gruppe bestehend aus beispielsweise cycloaliphatischen Epoxiden (z.B. 3,4-Epoxy-cyclohexylmethyl-3', 4'-epoxycyclohexan-

carboxylat), Epoxiden, epoxidierte Verbindungen wie beispielsweise epoxidiertes Leinöl, Vinylethern, Polyolen, Oxetanen, Hydroxyverbindungen, Etherverbindungen, Siloxane zugehörig sind. Diese Verbindungen weisen mindestens eine kationische polymerisierbare Gruppe auf. In Analogie zu der radikalischen Polymerisation wirken als Vernetzer Substanzen, welche mindestens zwei polymerisierbare Gruppen aufweisen. Ebenso können die Substanzen weitere eigenschaftsbestimmende Funktionalitäten tragen. Ferner kann das wässrige System weitere (beispielsweise oben genannte) Zusätze wie beispielsweise Additive oder Füllstoffe (als Substanzen) enthalten.

[0201] Die Fotoinitiatoren gehören im Fall der kationischen Fotopolymerisation u.a. folgenden Verbindungsklassen an: Onium-Salze (Aryldiazoniumsalze, Diaryliodonium- und Triarylsulfoniumsalze, Phenacylsulfonium- und 4-Hydroxyphenylsulfoniumsalze, Sulfoxoniumsalze) und gemischte Ligand-Aren-Cyclopentadienyl-Metallsalze. Additive, welche mit einem Anteil von bis zu 10 % (m/m) einer strahlenhärtenden Formulierung zugegeben werden, sind beispielsweise Verlaufs- und/oder Benetzungsadditive, Dispergieradditive, Oberflächenadditive, welche die Oberflächenspannung beeinflussen, Additive, welche die mechanischen Eigenschaften beeinflussen, Entschäumer und Entlüfter.

[0202] Das R2R-Verfahren kann in jedem Implementierungsbeispiel einen Vorgang umfassen, bei dem sich ein auf einer Rolle **700** und/oder **800** befindliches Ausgangsmaterial (Substrat oder Substratfolie **108**) abgerollt, bearbeitet, d.h. im vorliegenden Fall einem komplexen Druckprozess unterworfen wird, und schließlich wieder aufgerollt wird. Der Abrollvorgang (auch: Abwicklung) und Aufrollvorgang (auch: Aufwicklung) sowie die Beförderung des Ausgangsmaterials (Substrat oder Substratfolie **108**) wird durch bekannte rotierende Zylinder- bzw. Walzensysteme bewerkstelligt, welche in den **Fig. 7** bis **Fig. 9** schematisch dargestellt sind und hierin allgemein als Rollen bezeichnet werden.

[0203] Das in **Fig. 7** vereinfacht dargestellte erste Implementierungsbeispiel umfasst zwei Rollen **700** zur Führung der Substratfolie **108**. Im gezeigten ersten Beispiel wird eine von der Abwicklung kommende Substratfolie **108** über einen Kühltisch **102** geführt, so dass sich die Substratfolie unter den Gefrierpunkt des wässrigen Systems (beispielsweise 110, 200, 300 oder 304) abkühlt. Die Führung der Substratfolie ist so ausgelegt, dass diese im direkten Kontakt mit dem Kühltisch **102** steht, beispielsweise über ein Andrucksystem.

[0204] Der Druckprozess **152** erfolgt über die nachfolgenden Schritte: Über eine Druckdüse **100** wird das wässrige System (beispielsweise 110, 200, 300

oder 304) unter Relativbewegung **104** auf die gekühlte Substratfolie **108** appliziert. Das wässrige System friert ein und bildet eine Eismikrostruktur (beispielsweise 112, 202, 302 oder 306). Nachfolgend wird über eine Druckdüse **100** eine unter den Gefrierpunkt des wässrigen Systems gekühlte flüssigen Materialzusammensetzung **114** (auch: (strahlenhärtende Formulierung)) appliziert, wobei sich eine Übersichtung **116** ausbildet, welche die Eismikrostruktur einbettet oder teilweise einbettet.

[0205] Die Druckdüsen **100** und/oder Strahlungsquellen **118** können beispielsweise über einen Schlitten oder andere Vorrichtungen in allen drei Raumrichtungen **104** frei über dem Substrat **108** positioniert werden. Darüber hinaus können weitere Vorrichtungen im Wirkungsbereich (auch: Arbeitsbereich) angeordnet sein, die dazu ausgebildet sind, eine Nachbearbeitung **153** der Eismikrostruktur durchzuführen. Für den mehrere Schritte umfassenden Druckvorgang **152** kann der Vorschub der geführten Substratfolie **108** ausgesetzt werden bzw. der Druckvorgang kann unter Vorschub der Substratfolie durchgeführt werden. Nach der Passage des Druckbereiches wird die Folie **108** weiter in Richtung Aufwicklung transportiert. Im Rahmen des Herstellungsverfahrens kann die erhaltene mikrostrukturierte Folie **108** gegen eine andere Folie von jeder Folienseite laminiert werden. Der Laminierungsprozess ist Stand der Technik und dem Fachmann bekannt.

[0206] Im in **Fig. 8** vereinfacht dargestellten zweiten Implementierungsbeispiel umfasst der Abrollvorgang (Abwicklung) und Aufrollvorgang (Aufwicklung) sowie die Führung des Ausgangsmaterials (Substrat oder Substratfolie **108**) Rollen **800** zur Führung und Kühlung der Substratfolie **108**. Im zweiten Implementierungsbeispiel wird eine von der Abwicklung kommende Substratfolie **108** über eine Rolle **800** geführt, so dass sich die Substratfolie unter den Gefrierpunkt des wässrigen Systems (beispielsweise 110, 200, 300 oder 304) abkühlt. Die Führung der Substratfolie **108** ist so ausgelegt, dass diese im direkten Kontakt mit dem Zylinder **800** steht, beispielsweise über ein Andrucksystem.

[0207] Das Herstellungsverfahren kann entsprechend jedem Ausführungsbeispiel, insbesondere analog zum ersten Implementierungsbeispiel ausgebildet sein.

[0208] **Fig. 9A** und **Fig. 9B** zeigen jeweils Varianten eines dritten Beispiels zur Implementierung des Verfahrens zur Herstellung eines Mikrosystembauteils **900** als R2R-Verfahren. Eine Rolle **800** führt und kühlt mit ihrer Mantelfläche **102** eine mit einer flüssigen (beispielsweise flüssig bis zähflüssigen) Materialzusammensetzung **114** (auch: strahlenhärtenden Formulierung) beschichteten Folie **902**.

[0209] In jedem Ausführungsbeispiel oder jedem Implementierungsbeispiel kann der Druckprozess **152** mindestens einen der nachfolgenden Teilschritte umfassen. Über eine Druckdüse **100** wird das wässrige System (beispielsweise **110**, **200**, **300** oder **304**) unter der Relativbewegung **104** auf die Auflagefläche **102** (beispielsweise den gekühlten Zylinder **800**) appliziert. Das wässrige System gefriert und bildet die Eismikrostruktur (beispielsweise **112**, **202**, **302** oder **306**) auf der Auflagefläche **102**. Eine von der Abwicklung kommende Folie **902**, welche mit einer flüssigen bis zähflüssigen strahlenhärtenden Formulierung als Materialzusammensetzung **114** beschichtet ist, wird über die gekühlte Auflagefläche geführt. Die Überschichtung **154** der Folie **902** erfolgt in einem dem Stand der Technik entsprechenden Verfahren in einem Auftragswerk, welches hier nicht weiter aufgeführt wird. Die Überschichtung **154** der Folie **902** mit einer flüssigen bis zähflüssigen strahlenhärtenden Formulierung **114** kann weiterhin über den Stand der Technik entsprechende Verfahren wie beispielsweise Besprühen, Auftrag aus einer Schlitzdüse, Auftrakeln erfolgen. Die Führung der Folie **902** ist so ausgelegt, dass diese im direkten Kontakt mit der Auflagefläche **102** steht, beispielsweise über ein Andrucksystem.

[0210] Während die beschichtete Folie **902** über den Zylindermantel **102** der Rolle **800** geführt wird, wird die aufgedruckte Eismikrostruktur (beispielsweise **112**, **202**, **302** und/oder **306**) in die flüssige bis zähflüssige strahlenhärtende Formulierung **114** eingepreßt bzw. eingedrückt.

[0211] Durch eine strahlenchemische Polymerisation bzw. strahlenchemische Vernetzung im Schritt **155** wird die flüssige bzw. zähflüssige Materialzusammensetzung **114** gehärtet und fixiert. Es entsteht eine gehärtete Überschichtung **116**. Hierzu werden geeignete Strahlungsquelle **118** eingesetzt (beispielsweise UV-Lampe, UV-LED Lampe, Elektronenbeschleuniger, gamma-Strahler etc.).

[0212] In der in **Fig. 9A** gezeigten Variante ist das erste Ausführungsbeispiel implementiert. Die gedruckte Eismikrostruktur **112** übernimmt die Aufgabe eines Platzhalters, an dem ein ungefüllter Bereich **120** entsteht. In der in **Fig. 9B** gezeigten Variante ist das zweite Ausführungsbeispiel implementiert. Die gedruckte Eismikrostruktur **202** bildet funktionalisierte Bereiche **204** aus, die beispielsweise Cryogele umfassen.

[0213] Der Schritt **154** (in diesem Fall auch: Prägeschritt) und der Härtungsschritt **155** finden im Kontaktbereich der beschichteten Folie **902** mit dem Zylindermantel **102** statt. Die für das Drucken **152** der gefrorenen Mikrostrukturen eingesetzten Druckdüsen **100** können beispielsweise über einen Schlitten in allen drei Raumrichtungen **104** frei über dem

Zylindermantel **102** als Substrat positioniert werden. Darüber hinaus können weitere Vorrichtungen in den Arbeitsbereich montiert sein, die es erlauben, eine Nachbearbeitung **153** der Eismikrostruktur durchzuführen.

[0214] Obwohl die Erfindung in Bezug auf exemplarische Ausführungsbeispiele beschrieben worden ist, ist es für einen Fachmann ersichtlich, dass verschiedene Änderungen vorgenommen werden können und Äquivalente als Ersatz verwendet werden können. Ferner können viele Modifikationen vorgenommen werden, um eine bestimmte Situation oder ein bestimmtes Material an die Lehre der Erfindung anzupassen. Folglich ist die Erfindung nicht auf die offenbarten Ausführungsbeispiele beschränkt, sondern umfasst alle Ausführungsbeispiele, die in den Bereich der beigefügten Patentansprüche fallen.

Bezugszeichenliste

100	Dosiereinheit, insbesondere Druckdüse oder Spritze
102	Gekühlte Auflagefläche, insbesondere Tischfläche oder Rollenmantel
104	Bewegung und Positionierung der Dosiereinheit
106	Flüssige Formulierung für Substrat
108	Substrat, insbesondere Substratfolie
110, 200, 300, 304	Wässriges System
112, 202, 302, 306	Mikrostruktur, insbesondere Eismikrostruktur
114	Flüssige Materialzusammensetzung mit aushärtbarer Komponente
116	Überschichtung mit aushärtbarer oder ausgehärteten Materialzusammensetzung
117	anders zusammengesetzte Überschichtung mit aushärtbarer oder ausgehärteter Materialzusammensetzung

118	Strahlungsquelle, insbesondere eine oder mehrere Strahlereinheiten	3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei die Mikrostruktur durch berührungsloses Aufbringen einzelner Tropfen des wässrigen Systems erzeugt wird.
120, 204, 308, 310	Innenraum, insbesondere Hohlraum, Füllung oder funktionale Stelle	4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei der Schritt (152) des Erzeugens vor dem Schritt (154) des Überschichtens eine Nachbearbeitung (153) der Mikrostruktur (502) umfasst.
122, 206, 312, 400-434, 900	Mikrosystembauteil	5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, ferner nach dem Schritt (155) des Aushärtens mindestens einen der Schritte umfassend: Schmelzen und/oder Sublimieren des gefrorenen wässrigen Systems; und Entfernen des geschmolzenen oder sublimierten wässrigen Systems.
151	Schritt des Bereitstellens des Substrats	6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die Mikrostruktur einen von einem Fluid befüllbaren und/oder durchströmbaren Raum (120; 204; 308, 310) des Mikrosystembauteils bestimmt.
152	Schritt des Erzeugens der Mikrostruktur	7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei im Schritt (152) des Erzeugens die Mikrostruktur auf einer Oberfläche des Substrats aufgebracht wird und im Schritt (154) des Überschichtens die Mikrostruktur von der mindestens einen Materialzusammensetzung (114, 116, 117) zusammenhängend bedeckt wird bis einschließlich zur Oberfläche des Substrats an gegenüberliegenden Seiten der Mikrostruktur.
153	Schritt des Nacharbeitens der Mikrostruktur	8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei die Mikrostruktur eine Füllung (204; 308, 310) des Mikrosystembauteils beinhaltet.
154	Schritt des Überschichtens oder Einprägens der Mikrostruktur	9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei das wässrige System mindestens eine weitere Substanz beinhaltet.
155	Schritt des Aushärtens der Überschichtung	10. Verfahren nach Anspruch 9, wobei das gefrorene wässrige System mindestens eine strahlenchemische Substanz umfasst, und wobei das Verfahren ferner umfasst: Bestrahlen (155) der Mikrostruktur zur Initiierung einer Reaktion der strahlenchemischen Substanz.
700, 800	Rolle	11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, wobei die mindestens eine Substanz wasserunlösliche Polymerstrukturen bildet, die in einem Teilvolumen (204; 308, 310) des Mikrosystembauteils verankert sind.
902	Trägerfolie der Materialzusammensetzung	12. Verfahren nach Anspruch 10 und 11, wobei die mindestens eine Substanz ein Cryogel bildet.
		13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, wobei das wässrige System mindestens eine Substanz beinhaltet, welche sich bei Sublimation, Verdunsten oder Verdampfen des wässrigen Systems

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung eines Mikrosystembauteils (122; 206; 312; 400-434; 900), umfassend die Schritte:

Erzeugen (152) einer Mikrostruktur (112; 202; 302, 306; 502; 506) auf einem Substrat (102; 108), welche mindestens ein gefrorenes wässriges System (110; 200; 300, 304) umfasst, wobei die Mikrostruktur (112; 202; 302, 306; 502, 506) durch additive Fertigung auf einer Oberfläche des Substrats (102; 108) erzeugt wird;

Überschichten (154) der Mikrostruktur (112; 202; 302, 306) mit mindestens einer flüssigen Materialzusammensetzung (114, 116, 117), die mindestens eine aushärtbare Komponente umfasst; und Aushärten (155) der mindestens einen Materialzusammensetzung (114, 116, 117).

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das wässrige System aus einer steuerbar beweglichen Dosiereinheit (100), mit einer steuerbaren Strahlrichtung und/oder über einem steuerbar beweglichen Substrat ausgestoßen wird.

auf einer Innenfläche des Mikrosystembauteils niederschlägt.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, wobei die mindestens eine Materialzusammensetzung (114, 116, 117) ohne Wärmezufuhr und/oder bei einer Temperatur unter dem Schmelzpunkt des wässrigen Systems aushärtet.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, wobei die mindestens eine flüssige Materialzusammensetzung (114, 116, 117) einen Lack umfasst.

16. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 15, wobei die mindestens eine aushärtbare Komponente mindestens eine polymerisierbare und/oder vernetzbare Komponente umfasst, und das Aushärten ein Polymerisieren und/oder ein Vernetzen der mindestens einen Komponente umfasst.

17. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 16, wobei der Schritt (152) des Erzeugens der Mikrostruktur ferner umfasst:
Integrieren mindestens eines Bauteils in der Mikrostruktur.

18. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 17, wobei das Substrat (102; 108) zumindest beim Schritt (152) des Erzeugens der Mikrostruktur (112; 202; 302, 306) auf einem rotierenden, gekühlten Zylinder (800) angeordnet ist oder eine Oberfläche (102) des Zylinders (800) umfasst.

19. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 18, wobei die flüssige Materialzusammensetzung (114, 116, 117) eine Folie (902) beschichtet und beim Überschichten (154) mit der erzeugten Mikrostruktur (112; 202; 302, 306) in Kontakt gebracht wird.

Es folgen 9 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

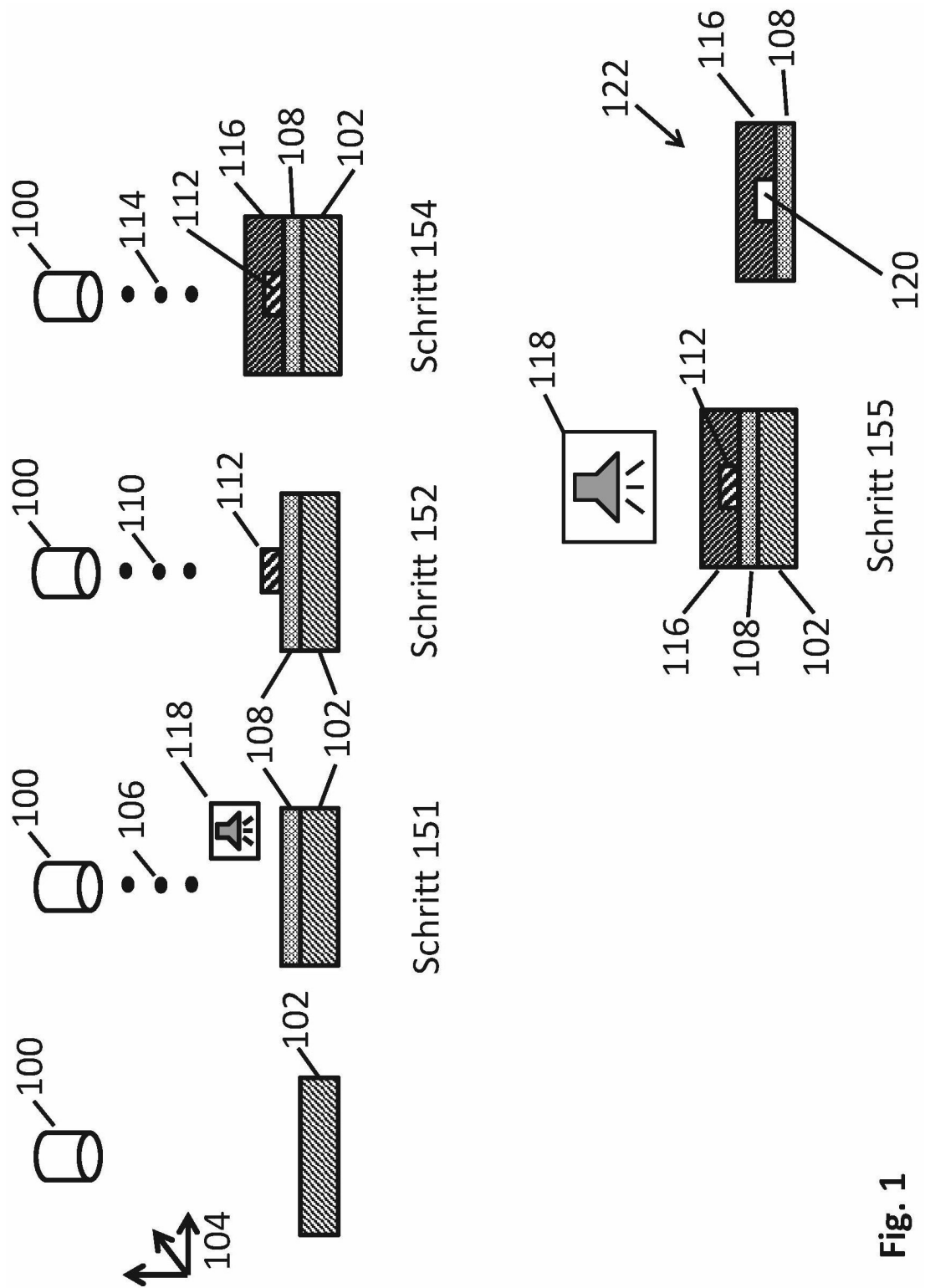


Fig. 1

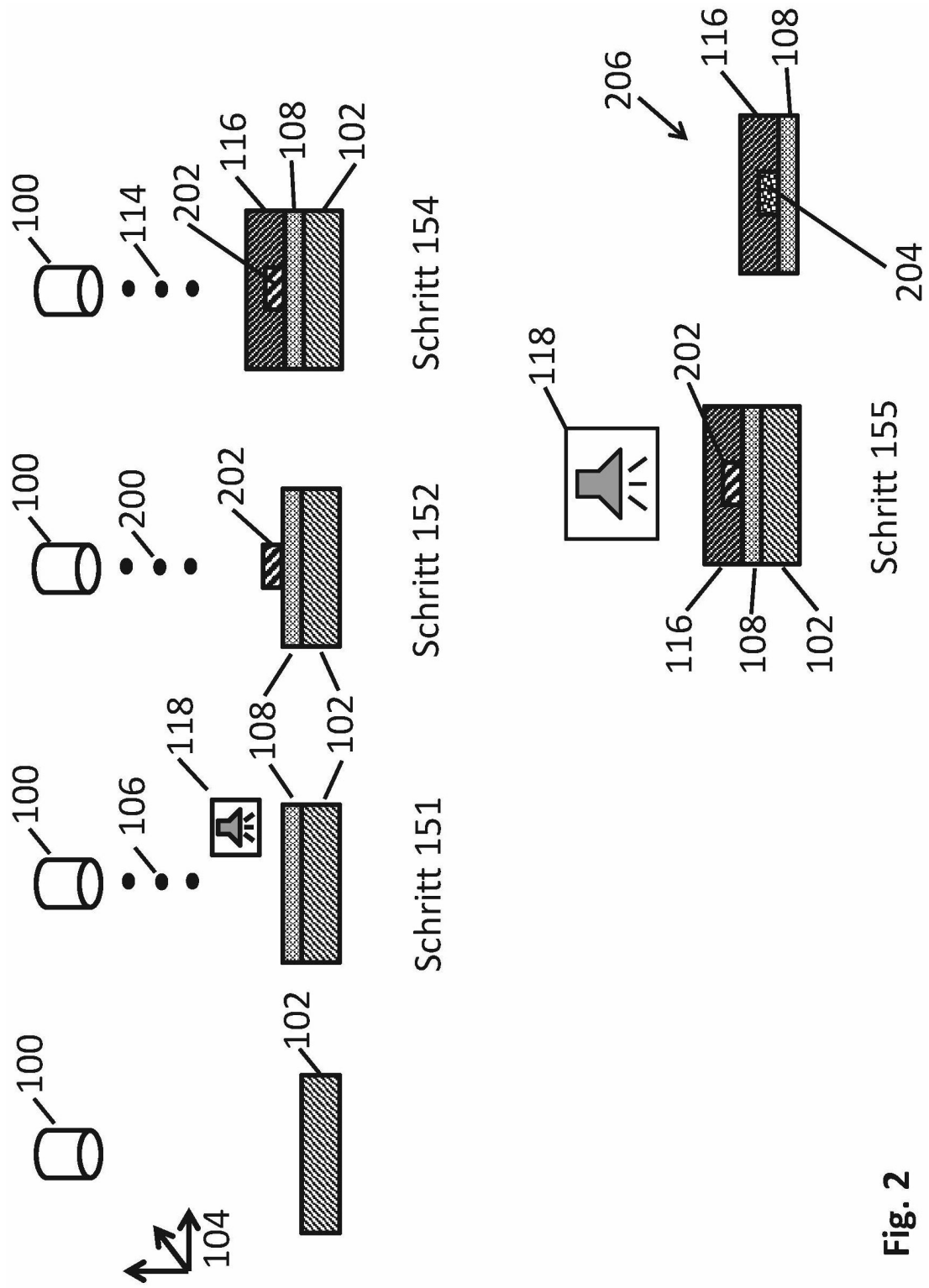


Fig. 2

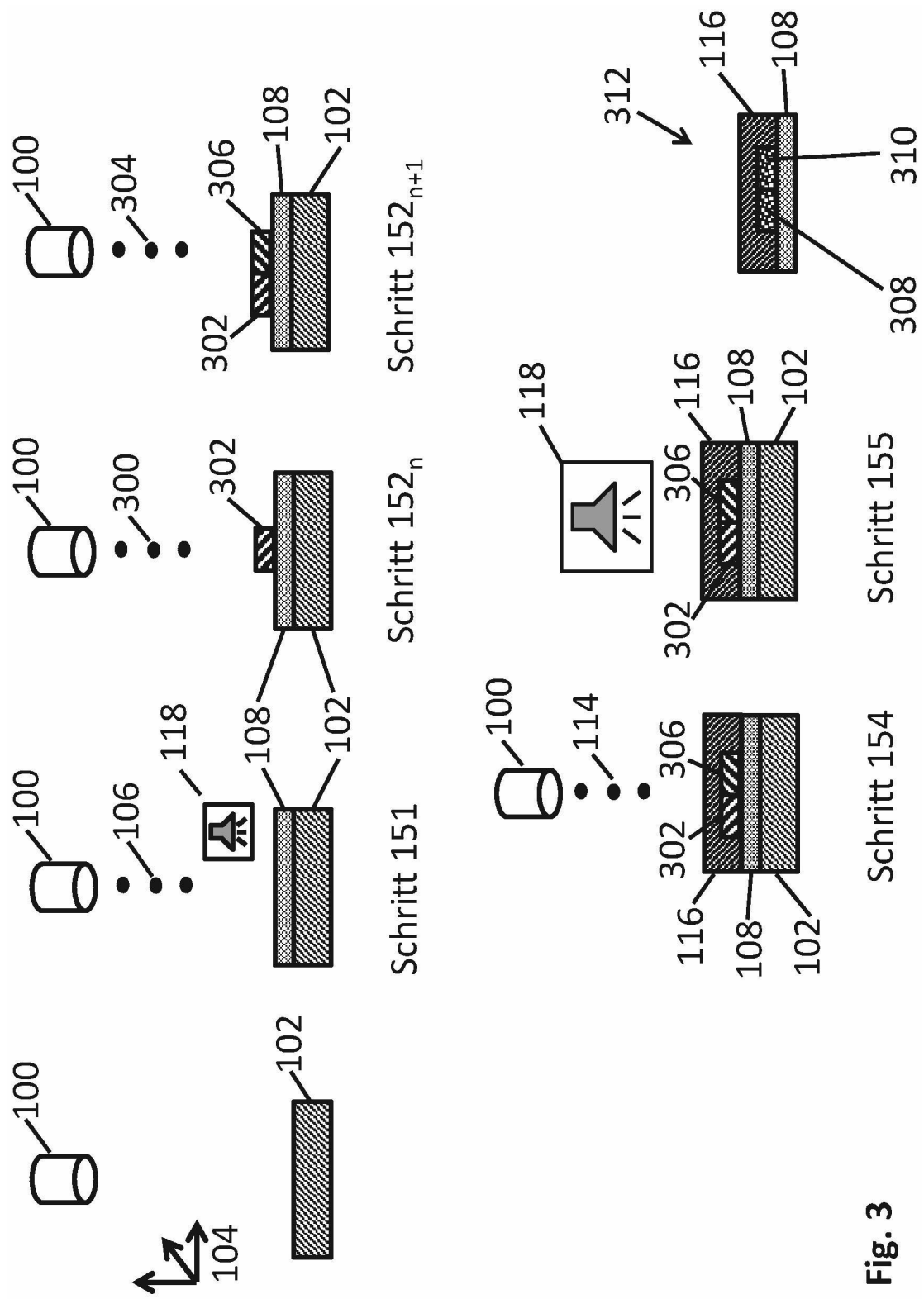


Fig. 3

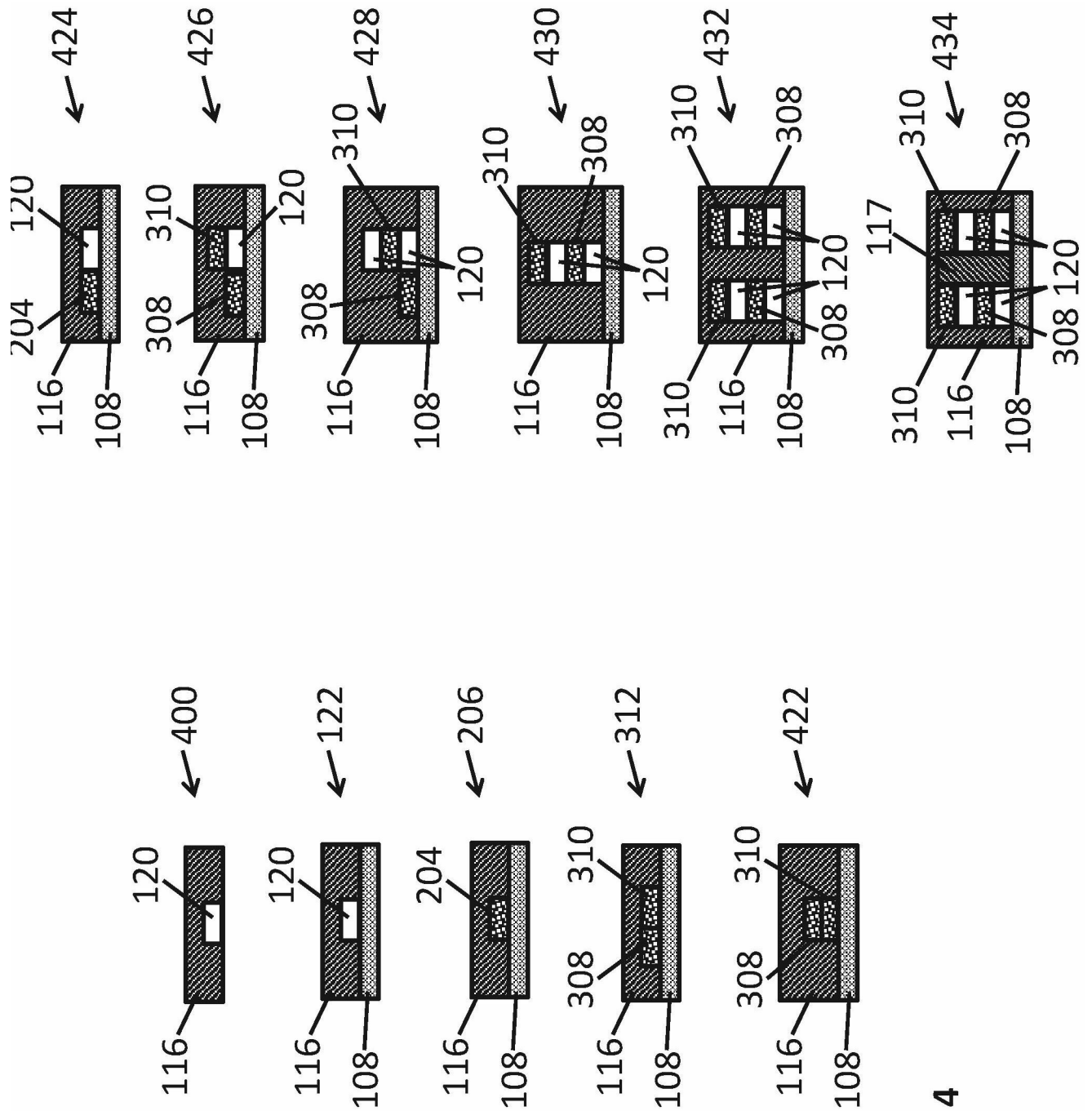


Fig. 4

Schritt 152

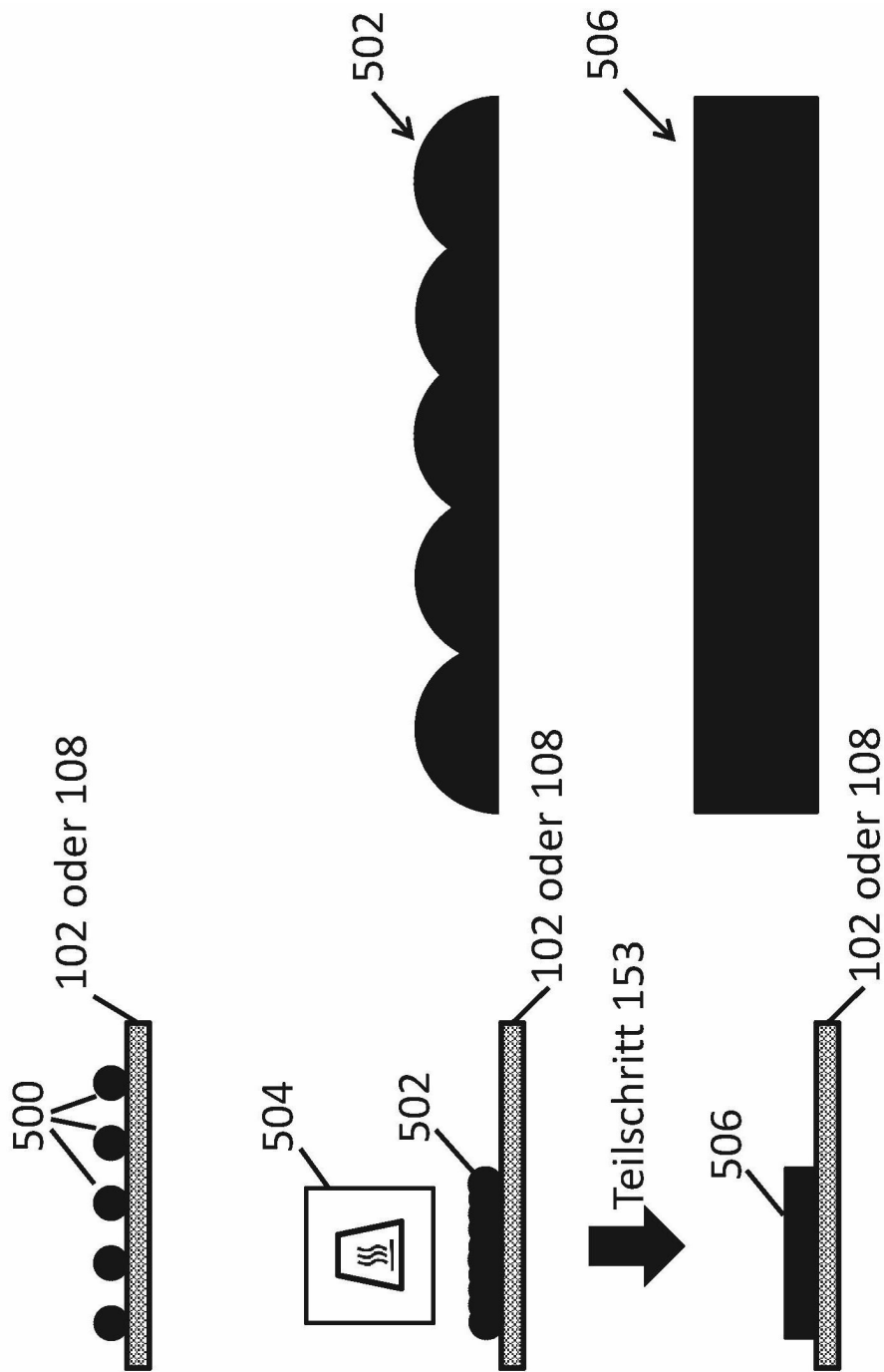


Fig. 5

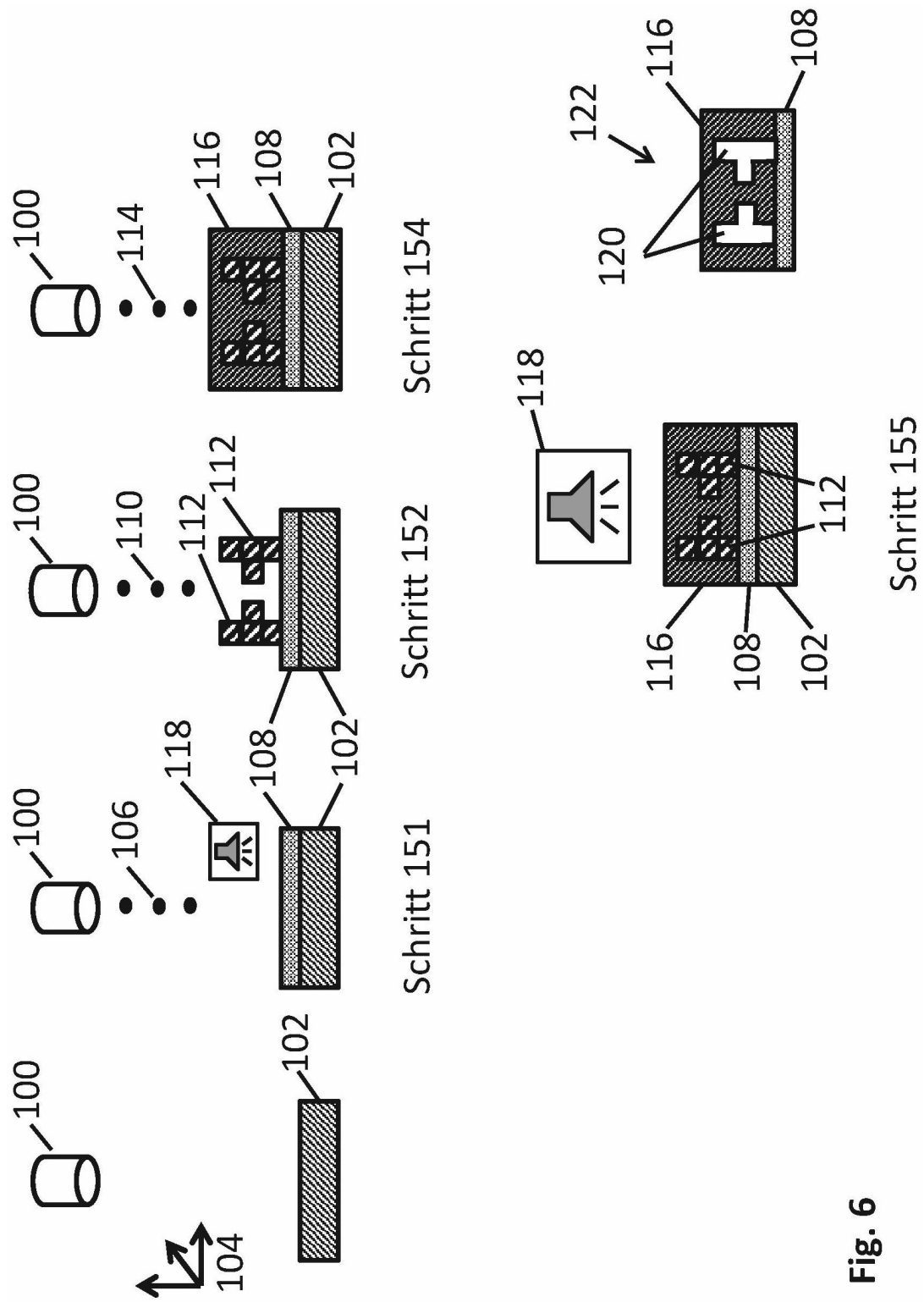


Fig. 6

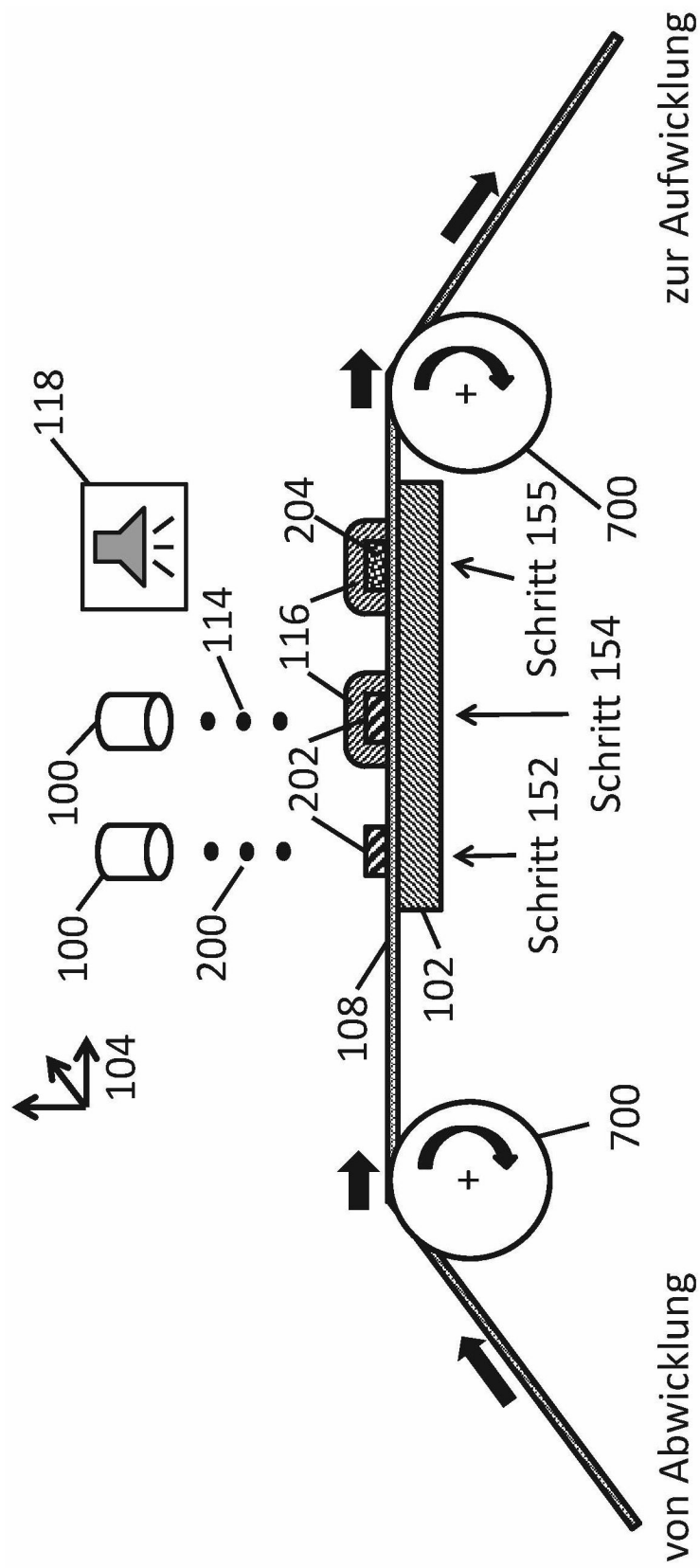


Fig. 7

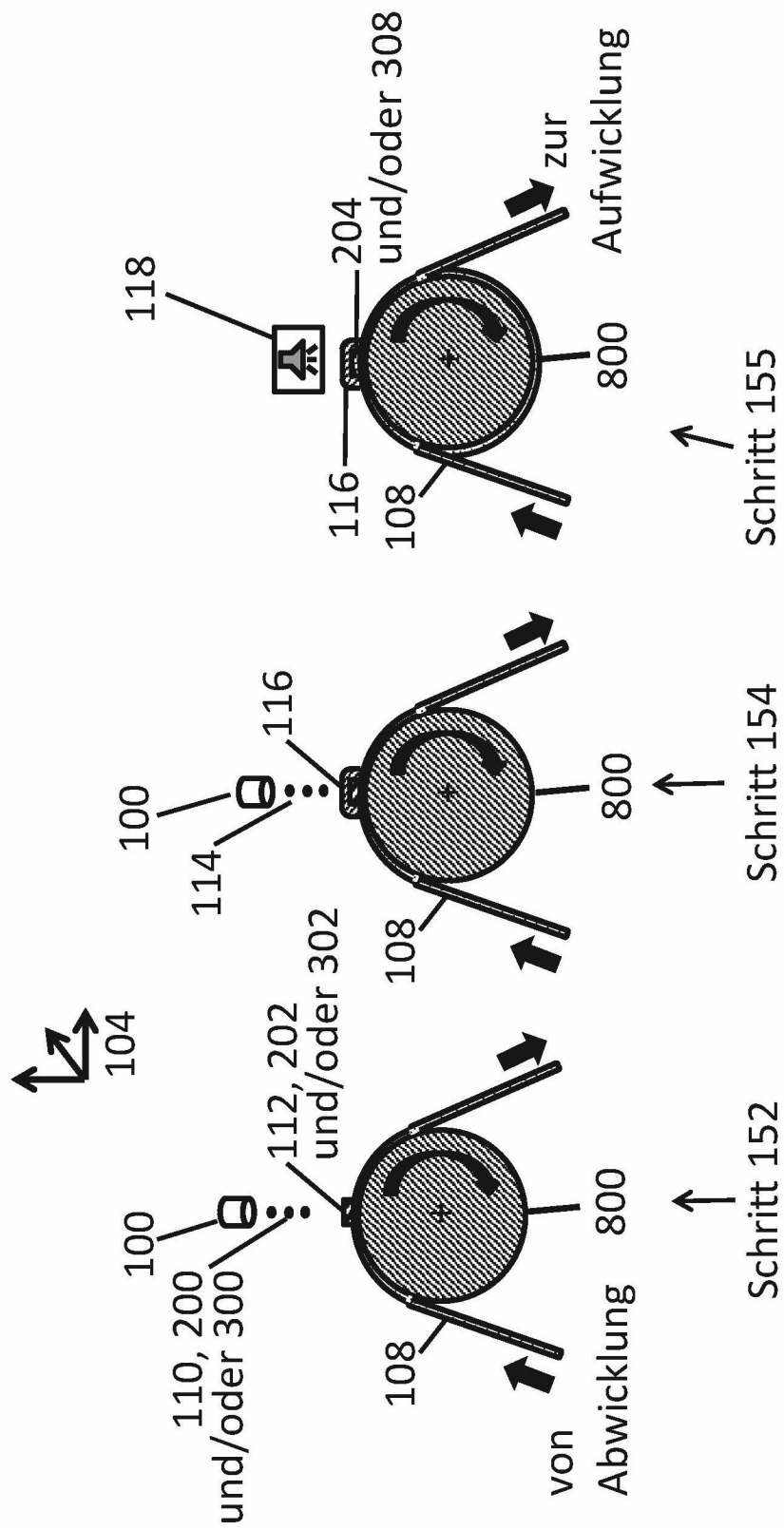


Fig. 8

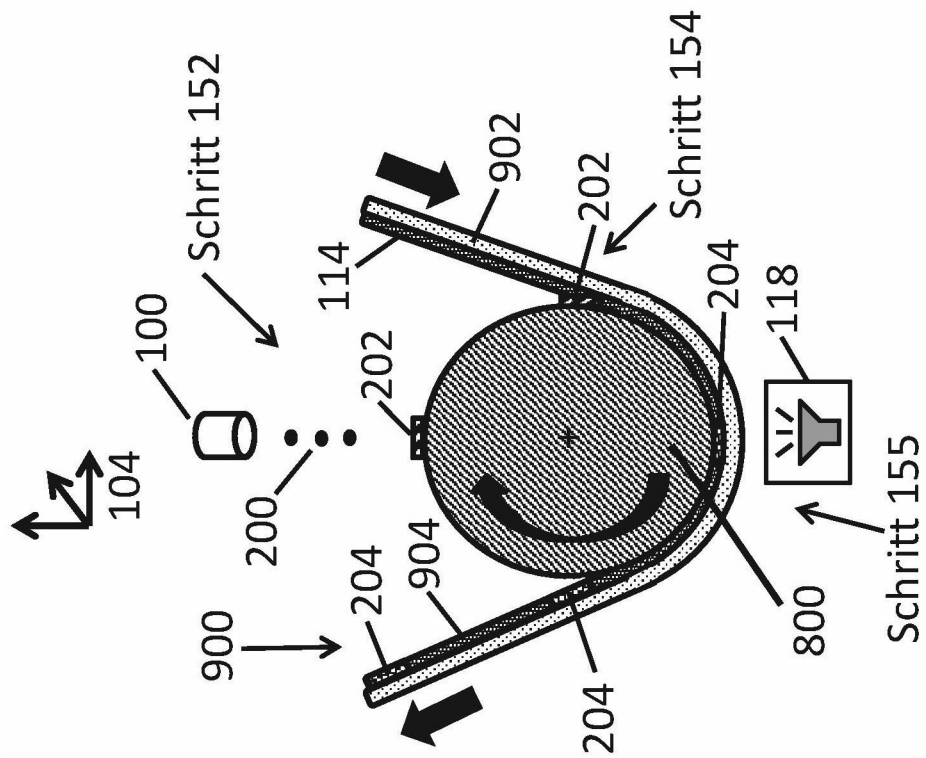


Fig. 9B

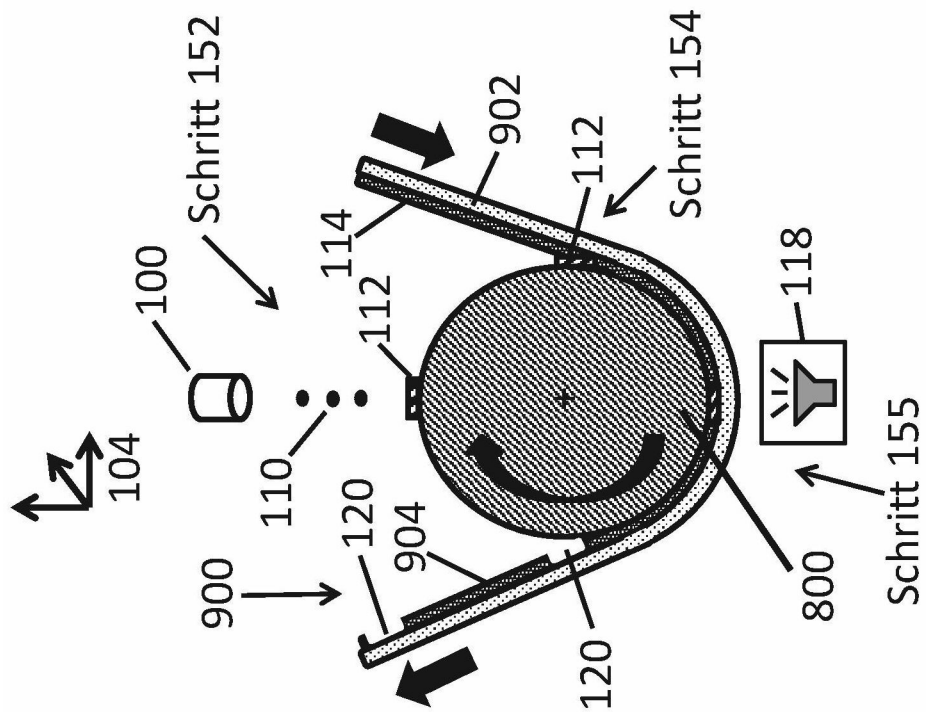


Fig. 9A