

Verfahren zur Fertigung eines medizinischen Simulators, medizinischer Simulator sowie Verwendung eines medizinischen Simulators

Die vorliegende Patentanmeldung nimmt die Priorität der deutschen Patentanmeldung DE 10 2021 200 362.1 in Anspruch, deren Inhalt durch Bezugnahme hierin aufgenommen wird.

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Fertigung eines medizinischen Simulators und einen medizinischen Simulator. Bei dem medizinischen Simulator kann es sich insbesondere um einen Epiduralanästhesie-Simulator handeln. Die Erfindung betrifft des Weiteren die Verwendung eines medizinischen Simulators zur Schulung medizinischen Personals.

Medizinische Simulatoren sind aus dem Stand der Technik bekannt. Medizinische Simulatoren bilden Körperteile und/oder -eigenschaften eines, insbesondere menschlichen, Patienten nach. Sie werden verwendet, um eine medizinische Behandlung zu simulieren, insbesondere um medizinisches Personal hierzu zu schulen. Beispielsweise können Injektionen simuliert und trainiert werden. Ein Beispiel hierfür ist die Epiduralanästhesie, bei der es auf die ortsgenaue Injektion eines Anästhetikums im Epiduralraum ankommt.

Es ist eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein verbessertes Verfahren zur Fertigung eines medizinischen Simulators anzugeben, insbesondere ein Verfahren anzugeben, welches eine flexible und genaue Einstellung der zu simulierenden Eigenschaften und/oder Gewebestrukturen ermöglicht.

Diese Aufgabe ist gelöst durch ein Verfahren zur Fertigung eines medizinischen Simulators mit den in Anspruch 1 angegebenen Schritten. Eine erste

Schaumkomponente und mindestens eine weitere Schaumkomponente werden additiv gefertigt. Die erste Schaumkomponente und die mindestens eine weitere Schaumkomponente werden mit unterschiedlichen Schaumstrukturen und/oder aus unterschiedlichen Materialien gefertigt. Der gefertigte medizinische Simulator weist daher mindestens zwei Schaumkomponenten auf. Schaumkomponenten haben sich als besonders geeignet erwiesen, um Gewebestrukturen eines Körpers nachzubilden. Bei dem gefertigten medizinischen Simulator kann es sich insbesondere um einen Epiduralanästhesie-Simulator handeln.

Der Kern des erfindungsgemäßen Verfahrens besteht in der additiven Fertigung der ersten Schaumkomponente und der mindestens einen weiteren Schaumkomponente. Die additive Fertigung der Schaumkomponenten hat den Vorteil, dass Material, Geometrie und Eigenschaften der Schaumkomponenten gezielt festgelegt werden können. Vorteilhaft ist zudem, dass die verschiedenen Schaumkomponenten auf einfache Weise mit unterschiedlichen Eigenschaften, nämlich unterschiedlichen Schaumstrukturen und/oder unterschiedlichen Materialien gefertigt werden können. Hierdurch sind unterschiedliche Schaumstrukturen insbesondere auf engem Raum realisierbar. Mithilfe der unterschiedlichen Eigenschaften können zu simulierende Körper-Eigenschaften, insbesondere Gewebestrukturen, gezielt eingestellt und variiert werden. Die zu simulierenden Körper-Eigenschaften, insbesondere Gewebestrukturen, können insbesondere auf kleinen Raumskalen variiert, beispielsweise kontinuierlich variiert werden. Mithilfe der additiv gefertigten mindestens zwei Schaumkomponenten können gezielt unterschiedliche Gewebearten in dem medizinischen Simulator simuliert werden.

Mithilfe des Verfahrens können insbesondere ein Nadel-Eindringwiderstand und/oder ein Flüssigkeits-Eindringwiderstand der jeweiligen Schaumkomponenten gezielt eingestellt und variiert werden. Der Nadel-Eindringwiderstand ist der Widerstand, den ein Gewebe der Injektionsnadel entgegensetzt. Der Flüssigkeit-Eindringwiderstand ist der Widerstand, den ein Gewebe der zu injizierenden Flüssigkeit entgegensetzt. Der Flüssigkeits-Eindringwiderstand ist beispielsweise durch den Kolbenwiderstand einer auf die Injektionsnadel aufgesetzten flüssigkeitsgefüllten Spritze erstastbar. Das Flüssigkeits-Eindringverhalten ist bei der Injektion von Medikamenten, insbesondere der Injektion eines Anästhetikums, besonders relevant. Anhand des Flüssigkeits-Eindringwiderstands können insbesondere zwei Gewebetypen unterschieden werden, die einen im Wesentlichen gleichen Nadel-Eindringwiderstand aufweisen. Der Nadel-Eindringwiderstand und der Flüssigkeits-Eindringwiderstand sind wichtige Orientierungshilfen bei der ortsgenauen Platzierung einer Injektionsnadel und der Injektion. Der erfindungsgemäß gefertigte Simulator ist besonders gut zum Training von ortsgenauen Injektionen geeignet. Insbesondere ist der derart gefertigte Simulator als Epiduralanästhesie-Simulator geeignet. Bevorzugt werden sowohl unterschiedliche Nadel-Eindringwiderstände als auch unterschiedliche Flüssigkeits-Eindringwiderstände simuliert. Auch andere Arten medizinischer Simulatoren profitieren von der genauen Einstell- und Variierbarkeit der additiv gefertigten mindestens zwei Schaumkomponenten.

Ein weiterer Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass die Ausdehnung der additiv gefertigten Schaumkomponenten gezielt und präzise eingestellt werden kann. Insbesondere können Variationen der Schaumstrukturen und/oder der Materialien auf kleinem Raum erfolgen. Hierdurch ist eine genauere und flexiblere Simulation unterschiedlicher Gewebestrukturen möglich.

Der erfindungsgemäß gefertigte medizinische Simulator weist mindestens zwei Schaumkomponenten auf. Das Verfahren kann die additive Fertigung beliebig vieler Schaumkomponenten beinhalten. Beispielsweise können

5 drei, insbesondere vier, insbesondere fünf, vorzugsweise mehr als fünf Schaumkomponenten additiv gefertigt werden. Der medizinische Simulator kann insbesondere drei, insbesondere vier, insbesondere fünf, vorzugsweise mehr als fünf Schaumkomponenten aufweisen. Die Schaumkomponenten können wechselweise jeweils unterschiedliche Schaumstrukturen

10 und/oder unterschiedliche Materialien aufweisen. Es kann aber auch sein, dass einzelne der Schaumkomponenten mit der gleichen Schaumstruktur und/oder aus dem gleichen Material gefertigt werden.

Unter einer Schaumkomponente im Sinne der Erfindung sind insbesondere

15 Komponenten zu verstehen, die einen festen Schaum aufweisen. Fester Schaum besteht aus einer Schaumstruktur aus festem Material mit Gaseinschlüssen, insbesondere Lufteinschlüssen. Die Schaumstruktur weist insbesondere mit Gas gefüllte Elementarzellen aus festem Material auf. Hierunter fallen insbesondere elastisch verformbare Schäume und auch nur plastisch verformbare Schäume. Elastizität und Verformbarkeit der Schäume

20 können beispielsweise durch das Material und/oder die Schaumstruktur beeinflusst werden.

Der medizinische Simulator kann neben den additiv gefertigten mindestens

25 zwei Schaumkomponenten auch eine oder mehrere weitere Komponenten aufweisen, die nicht als Schaumkomponente ausgeführt sind. Beispielsweise können Vollvolumen-Komponenten gefertigt werden. Hier und im Folgenden sind Vollvolumen-Komponenten als Komponenten zu verstehen, die aus einem Vollmaterial gefertigt sind, also im Wesentlichen keine Ga-

seinschlüsse aufweisen. Beispielsweise können Vollvolumen-Komponenten zur Simulation von Knochenstrukturen und/oder Haut eingesetzt werden. Die weiteren Komponenten können ebenfalls additiv gefertigt sein. Alternativ können die weiteren Komponenten anderweitig gefertigt werden. Anderweitig gefertigte Komponenten können mit den additiv gefertigten Schaumkomponenten im Nachhinein verbunden werden. Wird hier und im Folgenden die Bezeichnung Komponente ohne weitere Zusätze verwendet, soll dies derart verstanden werden, dass die entsprechende Komponente entweder eine Schaumkomponente oder eine anderweitige Komponente, insbesondere eine Vollvolumen-Komponenten, ist.

Die Fertigung mit unterschiedlichen Schaumstrukturen ist derart zu verstehen, dass sich die jeweiligen Schaumkomponenten in mindestens einem die Schaumstruktur der Schaumkomponente definierenden Schaumstruktur-Parameter unterscheiden. Derartige Schaumstruktur-Parameter sind insbesondere die Geometrie der Elementarzellen, die Ausrichtung der Elementarzellen, die mittlere Größe der Elementarzellen, die Schaumdichte, die Stärke der Zellwandstrukturen und/oder die Porenstruktur. Mithilfe der additiven Fertigung können die jeweiligen Schaumstruktur-Parameter gezielt eingestellt werden. Die Schaumstruktur-Parameter der additiv gefertigten Schaumkomponenten sind insbesondere nicht auf Schaumstrukturen natürlicher oder anderweitig hergestellter Schäume eingeschränkt.

Der die Geometrie der Elementarzellen betreffende Schaumstruktur-Parameter kann beispielsweise festlegen, ob die die Schaumstruktur bildenden Elementarzellen eine gleiche oder unterschiedliche Geometrien haben. Beispielsweise können die Schaumstruktur-Elementarzellen eine fest vorgegebene Geometrie haben, beispielsweise eine kubische, hexagonale oder kugelförmige Geometrie. Alternativ können die Elementarzellen

einer Schaumstruktur auch unterschiedliche Geometrien aufweisen. Beispielsweise können gezielt unterschiedliche Geometrien kombiniert werden. Auch unregelmäßige Geometrien sind möglich. Insbesondere können die Elementarzellen beliebige unterschiedliche Geometrien aufweisen.

5

Der die Ausrichtung der Elementarzellen betreffende Schaumstruktur-Parameter ist insbesondere dann relevant, wenn die Schaumstruktur-Elementarzellen in mindestens einer Raumrichtung eine größere Ausdehnung aufweisen als in einer anderen Raumrichtung. Die Raumrichtung der größten Ausdehnung wird auch als Hauptstreckungsrichtung bezeichnet. Die Hauptstreckungsrichtungen der Elementarzellen können zufällig verteilt sein. Alternativ können die Elementarzellen auch eine gemeinsame Hauptstreckungsrichtung aufweisen. Hierdurch sind beispielsweise laminiare Strukturen herstellbar. Insbesondere sind Fließwege eines zu injizierenden Mediums gezielt einstellbar.

Die mittlere Größe der Elementarzellen wird insbesondere durch deren Ausdehnung, insbesondere Länge, entlang der Hauptstreckungsrichtung der Elementarzellen bestimmt. Die Länge entlang der Hauptstreckungsrichtung wird auch als Hauptstreckung bezeichnet. Die Elementarzellen einer Schaumkomponente können jeweils die gleiche Hauptstreckung aufweisen. Die mittlere Größe der Elementarzellen entspricht dann der Hauptstreckung jeder der Elementarzellen. Andernfalls kann die mittlere Größe durch Mittelung der Größe der Elementarzellen, insbesondere deren Hauptstreckung, bestimmt werden. Die mittlere Größe der Elementarzellen kann beispielsweise zwischen 1 μm und 2 mm, insbesondere zwischen 50 μm und 1 mm, bevorzugt zwischen 100 μm und 500 μm betragen. Die mittlere Größe der Elementarzellen hat insbesondere Einfluss auf die Strukturgrößen der jeweiligen Schaumkomponente. Die mittlere Größe der

Elementarzellen hat insbesondere einen Einfluss auf das Flüssigkeitsaufnahmevermögen der jeweiligen Elementarzellen und damit auf ein zu simulierendes Flüssigkeitsaufnahmeverhalten der jeweiligen Gewebestruktur.

5

Prinzipiell können die Schaumkomponenten mit beliebigen Geometrien, Ausrichtungen und/oder Größen der Elementarzellen gefertigt werden. Die jeweiligen Schaumstruktur-Parameter können sich jedoch auch gegenseitig beeinflussen. Beispielsweise sinkt der Einfluss der Geometrie der Element-

10 arzellen mit abnehmender mittlerer Größe der Elementarzellen. Dies ist insbesondere der Fall, wenn eine Injektion simuliert werden soll und die mittlere Größe der Elementarzellen kleiner als ein typischer Nadeldurchmesser ist. In einem derartigen Fall wird die Geometrie der Elementarzel-

15 len nicht mehr durch die Nadel beim Einstechen ertastet. Die Geometrie der Elementarzellen hat in einem derartigen Fall nur noch einen geringen Einfluss auf einen Nadel-Eindringwiderstand. Jedoch können Geometrie und Ausrichtung der Elementarzellen auch bei kleinen mittleren Größen der Elementarzellen einen großen Einfluss auf den Flüssigkeits-Eindring-

20 widerstand haben. Beispielsweise kann durch eine gezielte Ausrichtung der Elementarzellen eine laminare Struktur geschaffen werden, über die beispielsweise Fließwege in der Schaumstruktur steuerbar sind. Hierdurch kann auch bei kleinen mittleren Größen der Elementarzellen ein geringerer Flüssigkeits-Eindringwiderstand simuliert werden. Ebenso ist eine Stäb-

25 chenstruktur möglich. Insbesondere ist die Geometrie der Elementarzellen durch einen Stabdurchmesser, eine Stablänge und/oder die Verzweigungsstruktur der Stäbchenstruktur einstellbar. Stabdurchmesser, Stablänge und/oder Verzweigungsstruktur können insbesondere variabel und flexibel festgelegt werden.

Die Schaumdichte wird insbesondere durch die Porosität bestimmt. Die Porosität ist definiert als ein Verhältnis von Hohlraumvolumen zu Gesamtvolumen der Schaumstruktur. Die Porosität gibt daher ein Verhältnis von Material zu Gas, insbesondere von Material zu Luft, in der Schaumstruktur an. Der Schaum weist Gaseinschlüsse auf. Das Gesamtvolumen der Schaumkomponente teilt sich daher auf das von dem die Elementarzellenstruktur bildenden Material ausgefüllte Volumen und das durch die Gaseinschlüsse, insbesondere Lufteinschlüsse, ausgefüllte Volumen auf. Der Anteil des Materials an dem zur Verfügung stehenden Gesamtvolumen kann beispielsweise zwischen 1 % und 99 %, insbesondere zwischen 5 % und 50 %, bevorzugt zwischen 10 % und 30 % betragen. Bei den vorgenannten Prozentzahlen handelt es sich insbesondere um Volumenprozent. Je größer der Anteil an Material ist, desto größer sind insbesondere ein Nadel-Eindringwiderstand und ein Flüssigkeits-Eindringwiderstand der Schaumkomponente.

Die Stärke der Zellwandstrukturen wird insbesondere durch die Wandstärke der Zellwände bestimmt. Diese beeinflusst insbesondere wie stabil die jeweiligen Elementarzellen und damit die Schaumstruktur sind. Die Stärke der Zellwandstrukturen kann auch die Schaumdichte beeinflussen. Die Stärke der Zellwandstrukturen wirkt sich insbesondere auf einen Nadel-Eindringwiderstand aus. Beispielsweise kann die Wandstärke der Zellwände den Nadel-Eindringwiderstand beeinflussen.

Die Porenstruktur wird insbesondere über die Größe und Anzahl offener Verknüpfungspunkte zwischen einzelnen Elementarzellen bestimmt. Offene Verknüpfungspunkte zwischen den Elementarzellen erlauben einen Medien austausch, insbesondere einen Flüssigkeitsaustausch, zwischen den Elementarzellen. Offene Verknüpfungspunkte werden hier und im Folgen-

den auch als Poren bezeichnet. Offene Verknüpfungspunkte können durch Durchgangsöffnungen in den Zellwänden gebildet sein. Offene Verknüpfungspunkte können auch durch fehlende Zellwände gebildet sein. Dies kann insbesondere der Fall sein, wenn die Schaumstruktur in Form einer

5 Stäbchenstruktur gefertigt wird. Weisen die Zellwände keine offenen Verknüpfungspunkte, also keine Poren auf, handelt es sich um eine geschlossenzellige beziehungsweise geschlossenporige Schaumstruktur. Ein Medien-
austausch, insbesondere Flüssigkeitsaustausch, zwischen einzelnen der Elementarzellen ist in diesem Fall unterbunden. Es kann allerdings sein,

10 dass ein Mediendruck, insbesondere ein Flüssigkeitsdruck, derart hoch ist, dass ein Durchbrechen der Zellwände erfolgt. Je mehr offene Verknüpfungspunkte beziehungsweise Poren zwischen den Elementarzellen vorhanden sind, desto mehr Flüssigkeit kann von einer der Elementarzellen in die nächste gelangen. Sind derartige offene Verknüpfungspunkte beziehungsweise Poren zwischen den Elementarzellen vorhanden, wird von einer

15 offenzelligen beziehungsweise offenzelligen Schaumstruktur gesprochen. Die Porenstruktur wird insbesondere durch ein Verhältnis von offenzelligen zu geschlossenporigen Elementarzellen bestimmt. Über den Schaumstruktur-Parameter der Porenstruktur sind insbesondere ein Flüssigkeits-Eindringwiderstand und ein Flüssigkeits-Aufnahmeverhalten der

20 Schaumstruktur einstellbar.

Bei dem zur Fertigung der Schaumkomponente verwendeten Material kann es sich insbesondere um ein Basismaterial handeln, dem mindestens ein

25 Additiv hinzugefügt ist. Unterschiede im Material können sich daher auf das Basismaterial und/oder auf das mindestens eine Additiv beziehen.

Bei dem Basismaterial kann es sich insbesondere um ein Polymer handeln. Geeignete Basismaterialien sind beispielsweise Polyolefine, Polyester, Po-

lyether, Polyoxymethylene, Polyharnstoffe, Polyimide, Poylurethane, Polyamide und/oder Silikone. Vorteilhafte Basismaterialien sind beispielsweise Polypropylen (PP), Polyethylen (PE), Polylactide (PLA), Polyamid 12 (PA12), Polyurethane (PU), Silikone, Polyoxymethylen (POM), Polyethylenterephthalat (PET), Polysulfone (PES), Polybutylenterephthalat (PBT) und/oder thermoplastische Elastomere (TPE). Geeignete thermoplastische Elastomere (TPE) sind beispielsweise thermoplastische Polyamidelastomere (TPA), thermoplastische Elastomere auf Olefinbasis (TPO), thermoplastische Styrol-Copolymere (TPS), thermoplastische Elastomere auf Urethanbasis (TPU), thermoplastische Vulkanisate (TPV) und/oder nicht klassifizierte thermoplastische Elastomere jeglicher anderer Zusammensetzung oder Struktur als die vorgenannten (TPZ). Abhängig von dem Basismaterial kann insbesondere eine Festigkeit der jeweiligen Schaumstruktur einstellbar sein. Hierdurch ist insbesondere der Nadel-Eindringwiderstand beeinflussbar.

Das mindestens eine Additiv kann beispielsweise zur Einstellung eines Reibungskoeffizienten des Materials dienen. Hierdurch ist insbesondere ein Reibungskoeffizient zwischen einer Injektionsnadel und der Schaumkomponente einstellbar. Dies beeinflusst insbesondere den Nadel-Eindringwiderstand. Bevorzugt ist das mindestens eine Additiv ein Triboadditiv. Geeignete Triboadditive sind insbesondere Molybdändisulfid, Polytetrafluorethylen (PTFE), Wachse und/oder Öle, insbesondere fluoriierte Öle.

Alternativ oder zusätzlich hierzu kann das mindestens eine Additiv auch einen Weichmacher enthalten. Hierüber kann insbesondere eine Flexibilität der Schaumstruktur eingestellt werden.

Der Nadel-Eindringwiderstand kann beispielsweise durch die Verwendung eines geeigneten Basismaterials, insbesondere die Verwendung eines Basismaterials geeigneter Härte, und/oder die Additivierung des Basismaterials, insbesondere die Additivierung des Basismaterials mittels Triboadditiven, erfolgen. Zusätzlich oder alternativ hierzu kann der Nadel-Eindringwiderstand insbesondere über die Geometrie der Elementarzellen, die Orientierung der Elementarzellen, die mittlere Größe der Elementarzellen, die Stärke der Zellwandstrukturen und/oder die Schaumdichte, insbesondere die Porosität der Schaumstruktur, eingestellt werden.

10

Als besonders geeignet zur Einstellung des Flüssigkeits-Eindringwiderstands haben sich die folgenden Schaumstruktur-Parameter erwiesen: Die Geometrie der Elementarzellen, die Ausrichtung der Elementarzellen, die mittlere Größe der Elementarzellen, die Schaumdichte, insbesondere die Porosität der Schaumstruktur, und die Porenstruktur, insbesondere Größe und Anzahl der offenen Verknüpfungspunkte beziehungsweise Poren zwischen den Elementarzellen.

Zur Fertigung der mindestens zwei Schaumkomponenten können beliebige Verfahren der additiven Fertigung eingesetzt werden. Als besonders geeignet haben sich selektives Lasersintern (LS), Elektronenstrahlschmelzen (electron beam melting, EBM, beziehungsweise electron beam additive manufacturing, EBAM), Stereolithografie (SL) und/oder Digital Light Processing (DLP) erwiesen. Bevorzugt kann die additive Fertigung der Schaumkomponenten mittels Fused Filament Fabrication (FFF), Multijet Modeling (MJM) und/oder Arburg-Kunststoff-Freiformen (AKF) erfolgen. Für die Verarbeitung verschiedener Materialien haben sich FFF und AKF als besonders geeignet erwiesen.

Die Fertigung der mindestens zwei Schaumkomponenten kann derart erfolgen, dass die Größe und Form der jeweiligen Schaumkomponente spezifiziert wird. Die Größe und Form der Schaumkomponente kann Größe und Form eines entsprechenden Gewebes in einem Körper entsprechen. Die

5 Schaumstruktur der jeweiligen Schaumkomponente kann dann mittels standardisierter Füllmuster automatisch generiert werden, insbesondere mithilfe einer CAD-Software. Hierbei können die zu verwendenden Materialien, insbesondere ein zu verwendendes Basismaterial und/oder mindestens ein Additiv, und/oder zu verwendende Schaumstruktur-Parameter vor-

10 gegeben werden. Auf Basis der vorgegebenen Materialien und Schaumstruktur-Parameter kann dann mittels eines Computerprogramms automatisch ein geeignetes Füllmuster für die Schaumkomponente festgelegt werden. Alternativ kann neben der Größe und Form der Schaumkomponenten auch die Elementarzellenstruktur genau vorgegeben werden. Dies ist insbe-

15 sondere dann von Vorteil, wenn bestimmte Strukturen zur Erzielung eines bestimmten Flüssigkeits-Fließverhaltens verwendet werden sollen. Die Spezifizierung der Größe und Form der Schaumkomponenten und/oder der jeweiligen Schaumstrukturen kann insbesondere mithilfe von CAD-Programmen erfolgen. Die entsprechenden CAD-Modelle können dann mithilfe

20 fe eines geeigneten 3D-Druckers zur additiven Fertigung der mindestens zwei Schaumkomponenten ausgedruckt werden.

Die additive Fertigung der mindestens zwei Schaumkomponenten und gegebenenfalls weiterer Komponenten des medizinischen Simulators erfolgt

25 nicht zwingend sequentiell. Insbesondere werden verschiedene additiv gefertigte Komponenten des medizinischen Simulators nicht nacheinander gefertigt. Vielmehr können verschiedene Komponenten des medizinischen Simulators parallel gefertigt werden. Beispielsweise bedienen sich viele Verfahren der additiven Fertigung einer schichtweisen Fertigung. In die-

sem Fall wird der medizinische Simulator schichtweise gefertigt werden. Hierbei werden die in einer Fertigung-Schicht liegenden Schichten unterschiedlichen Komponenten, insbesondere Schaumkomponenten, parallel gefertigt, bevor weitere Schichten der jeweiligen Komponenten gefertigt werden. Je Fertigungs-Schicht werden daher einzelne Schichten unterschiedlicher Komponenten gefertigt.

Ein Verfahren nach Anspruch 2 ermöglicht eine besonders effektive und gezielte Einstellung zu simulierender Eigenschaften, insbesondere des Flüssigkeits-Eindringverhaltens. Durch die gezielte Vorgabe der Geometrie der Elementarzellen, der Ausrichtung der Elementarzellen, der Größe der Elementarzellen und/oder der Zellwandstruktur können die Eigenschaften des Simulators bereits auf Ebene der Elementarzellen beeinflusst werden. Die Vorgabe dieser Parameter kann beispielsweise mittels CAD-Programmen erfolgen. Die vorgegebenen Elementarzellenstrukturen können dann beispielsweise gezielt mittels eines 3D-Druckers ausgedruckt werden. Insbesondere können die Zellwandstrukturen gezielt gedruckt werden, um die Elementarzellenstruktur präzise festzulegen.

Bevorzugt werden die mindestens zwei Schaumkomponenten mit einer vorgegebenen Geometrie der Elementarzellen, Ausrichtung der Elementarzellen, Größe der Elementarzellen und/oder Zellwandstruktur, insbesondere mit einer vorgegebenen Ausrichtung der Elementarzellen und/oder Größe der Elementarzellen, gefertigt.

Ein Verfahren nach Anspruch 3 ermöglicht eine besonders effektive und zielgerichtete Einstellung des Flüssigkeits-Eindringverhaltens. Für eine gezielte Platzierung der Injektion, insbesondere bei der Epiduralanästhesie, ist der Arzt auf die Kenntnis des Flüssigkeits-Eindringwiderstands in den

jeweiligen Gewebeschichten des Patienten angewiesen. Mithilfe des entsprechend additiv gefertigten medizinischen Simulators können realistische Flüssigkeits-Eindringwiderstände und deren Variation über verschiedene Gewebearten auf einfache und zuverlässige Weise simuliert werden.

5

Ein Verfahren nach Anspruch 4 ermöglicht eine besonders einfache und effiziente Änderung der Materialeigenschaften der mindestens zwei Schaumkomponenten bei der additiven Fertigung. Ein Austauschen des Basismaterials, insbesondere des Basispolymers, ist nicht erforderlich. Bei
10 der Fertigung der mindestens zwei Schaumkomponenten kann insbesondere auf den gleichen Feedstock zurückgegriffen werden. Die Additivierung kann während der additiven Fertigung erfolgen, beispielsweise durch eine weitere Düse eines 3D-Druckers. Dies vereinfacht das Fertigungsverfahren und erhöht dessen Effizienz. Mithilfe der unterschiedlichen Additivierung
15 können die Materialparameter auf einfache Weise eingestellt werden. Insbesondere kann eine Härte und/oder ein Reibungskoeffizient des jeweiligen Materials eingestellt werden.

Ein Verfahren nach Anspruch 5 erlaubt die Fertigung eines besonders realistischen medizinischen Simulators. Der additiv gefertigte Übergangsbe-
20 reich weist insbesondere eine Schaumstruktur mit einem graduellen Übergang zwischen mindestens einem unterschiedlichen Schaumstruktur-Parameter der benachbarten Schaumkomponenten auf. Über den Übergangsbe-
reich erfolgt insbesondere eine graduelle Anpassung unterschiedlicher
25 Schaumstruktur-Parameter benachbarter Schaumkomponenten. Zusätzlich oder alternativ hierzu kann in dem mindestens einen Übergangsbereich beispielsweise eine Materialmischung und/oder Additivierung der benachbarten Schaumkomponenten graduell angepasst werden. Die graduelle Anpassung ist als eine schrittweise Anpassung, insbesondere schrittweise Va-

riation der Schaumstruktur-Parameter, zu verstehen. Die schrittweise Anpassung erfolgt bevorzugt auf der Größenskala einzelner Elementarzellen des Übergangsbereichs. Vorteilhafterweise können mithilfe des additiv gefertigten Übergangsbereichs fließende Übergänge zwischen verschiedenen
5 Schaumkomponenten, insbesondere zwischen deren unterschiedlichen Schaumstrukturen, erzeugt werden. Abrupte Übergänge zwischen den Schaumkomponenten sind vermieden. Hierdurch lassen sich realistische Übergänge zwischen verschiedenen Gewebearten simulieren. Unrealistische, sprunghafte Übergänge zwischen den Schaumkomponenten und insbesondere den hierdurch simulierten Körper-Eigenschaften sind vermieden.
10

Beispielsweise kann eine erste Schaumkomponente aus einem Material A und eine zweite, benachbarte Schaumkomponente aus einem Material B bestehen. Im Übergangsbereich werden dann ausgehend von der Schaumkomponente aus Material A einem zur Fertigung des Übergangsbereichs
15 verwendeten Material schrittweise mehr und mehr Anteile des Materials B zugemischt. Insbesondere kann ein Anteil eines geeigneten Additivs graduell erhöht oder erniedrigt werden. Entsprechend kann eine graduelle Anpassung mindestens eines unterschiedlichen Schaumstruktur-Parameters
20 erfolgen. Beispielsweise kann eine der Schaumkomponenten geschlossenzellig bzw. geschlossenzellig ausgeführt sein. Die zweite, benachbarte Schaumkomponente kann offenporig ausgebildet sein. Im Übergangsbereich können schrittweise die Anzahl und/oder Größe der die Elementarzellen verbindenden Poren erhöht werden.

25

Ein Verfahren nach Anspruch 6 ermöglicht eine effiziente Fertigung sowie einen besonders realistischen medizinischen Simulator. Die integrale Fertigung der mindestens zwei Schaumkomponenten kann insbesondere zu einer einstückigen Ausführung der beiden Schaumkomponenten und eventu-

eller Übergangsbereiche führen. Ein nachträgliches Zusammenfügen unterschiedlicher Schaumkomponenten ist vermieden. Hierdurch ist es insbesondere nicht nötig, Fügeverbindungen zwischen den Schaumkomponenten und/oder den Übergangsbereichen vorzusehen. Derartige Fügeverbindungen, beispielsweise Klebstoffschichten, können sich nachteilig auf die Eigenschaften des medizinischen Simulators auswirken. Insbesondere können hierdurch Eigenschaften hervorgerufen werden, die in dem zu simulierenden Gewebe nicht vorliegen. Beispielsweise kann durch eine Fügeverbindung ein lokal stark erhöhter Nadel-Eindringwiderstand gegeben sein, der so nicht in entsprechenden Gewebestrukturen eines Patienten vorkommt.

Besonders bevorzugt wird der gesamte medizinische Simulator integral gefertigt. Alle Komponenten des medizinischen Simulators, insbesondere auch Vollvolumen-Komponenten können integral additiv gefertigt werden. Der medizinische Simulator kann insgesamt einstückig ausgeführt sein. Ein nachträgliches Zusammenfügen von verschiedenen Komponenten des medizinischen Simulators ist konsequent vermieden. Ein insgesamt additiv gefertigter medizinischer Simulator bildet die Eigenschaften gewachsener Gewebestrukturen besonders genau ab.

Ein Verfahren nach Anspruch 7 erlaubt die Fertigung eines medizinischen Simulators, der ein hohes Flüssigkeitsaufnahmevermögen, insbesondere bei gleichzeitig hoher struktureller Festigkeit, aufweist. Mithilfe der Stäbchenstruktur werden insbesondere nur die Kanten der Elementarzellen nachgebildet. Zellwände zwischen den aus Stäbchen gebildeten Kanten können teilweise oder gänzlich weggelassen werden. Hierdurch wird eine besonders große Porenstruktur zwischen den Elementarzellen geschaffen. Die resultierende Schaumdichte ist sehr gering. Das Flüssigkeitsaufnahmevermögen ist stark erhöht. Der Flüssigkeits-Eindringwiderstand ist sehr

gering. Gleichzeitig können über die Fertigung steifer Stäbchenstrukturen hohe Festigkeiten der Schaumstruktur erzielt werden. Mithilfe der Stäbchenstruktur ist ein geringer Flüssigkeits-Eindringwiderstand bei gleichzeitig hohem Nadel-Eindringwiderstand simulierbar. Derartige Stäbchenstrukturen unterscheiden sich signifikant von natürlichen oder anderweitig gefertigten Schäumen.

Ein Verfahren nach Anspruch 8 ermöglicht die Fertigung eines besonders an einen Patienten und/oder Simulationszweck angepassten medizinischen Simulators. Die Anpassung an einen Patienten kann allgemein an einen bestimmten Patienten-Typus erfolgen, beispielsweise an Patienten unterschiedlicher Statur und/oder unterschiedlichen Gewichts. Bevorzugt sind die mindestens zwei Schaumkomponenten, insbesondere der gesamte medizinische Simulator, an einen konkreten Patienten angepasst. Auf diese Weise können komplizierte medizinische Eingriffe zuverlässig mithilfe des medizinischen Simulators geübt werden. Insbesondere die bei der Epiduralanästhesie relevanten Gewebestrukturen und deren jeweilige Ausdehnung können erheblich von der jeweiligen Statur eines Patienten abhängen. Die Anpassung der mindestens zwei Schaumkomponenten, insbesondere des medizinischen Simulators insgesamt, an einen Patienten, kann beispielsweise derart erfolgen, dass mittels bildgebender Verfahren eine zu simulierende Gewebestruktur des Patienten erfasst wird. Die erfasste Gewebestruktur kann dann mithilfe geeigneter Verfahren in eine entsprechende Struktur aus mindestens zwei Schaumkomponenten übertragen werden. Die resultierende Struktur kann mindestens zwei Schaumkomponenten und mindestens eine Vollvolumen-Komponente aufweisen. Als bildgebendes Verfahren könne insbesondere die Computertomographie (CT) oder die Magnetresonanztomographie (MRT) eingesetzt werden. Mit diesen sind

unterschiedliche Weichgewebeschichten, die durch die additiv gefertigten Schäume besonders gut simuliert werden können, erfassbar.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, einen verbesserten medizinischen Simulator zu schaffen, insbesondere einen medizinischen Simulator zu schaffen, der gezielt unterschiedliche Eigenschaften der Gewebestruktur eines Patienten, insbesondere unterschiedliche Nadel-Eindringwiderstände und/oder Flüssigkeits-Eindringwiderstände, zuverlässig und genau simuliert.

10 Diese Aufgabe ist gelöst durch einen medizinischen Simulator mit den in Anspruch 9 angegebenen Merkmalen. Der medizinische Simulator weist mindestens zwei additiv gefertigte Schaumkomponenten auf, wobei sich die Schaumkomponenten mindestens in einem der folgenden Merkmale unterscheiden: Schaumstruktur und Material. Wie in Bezug auf das Verfahren beschrieben ist, kann anhand der geeigneten Wahl der Unterschiede der Schaumstruktur, insbesondere einzelner Schaumstruktur-Parameter, und/oder des Materials eine gezielte und effektive Anpassung der Eigenschaften der Schaumstrukturen an Eigenschaften zu simulierender Gewebearten erzielt werden.

Der medizinische Simulator kann auch mehr als zwei Schaumkomponenten aufweisen. Beispielsweise kann der medizinische Simulator drei, insbesondere vier, insbesondere fünf, insbesondere mehr als fünf, Schaumkomponenten aufweisen. Die Schaumkomponenten des medizinischen Simulators können jeweils unterschiedlich ausgeführt sein. Einzelne der Schaumkomponenten können auch aus dem gleichen Material und/oder der gleichen Schaumstruktur bestehen. Verschiedene Schaumkomponenten können beispielsweise aus dem gleichem Material, aber mit unterschiedlichen Ferti-

gungsparametern, insbesondere unterschiedlichen Druckparametern, additiv gefertigt worden sein. Der medizinische Simulator ist insbesondere ein Epiduralanästhesie-Simulator. Der medizinische Simulator weist insbesondere die Merkmale und Vorteile auf, die im Zusammenhang mit dem Fertigungsverfahren diskutiert sind.

Ein medizinischer Simulator nach Anspruch 10 ist besonders geeignet, unterschiedliche Flüssigkeits-Eindringwiderstände zu simulieren. Der medizinische Simulator eignet sich besonders gut zum Nachbilden des Injektionsverhaltens, insbesondere der gezielten Injektion in bestimmte Gewebeteile. Dies ist besonders vorteilhaft für einen Epiduralanästhesie-Simulator.

Ein medizinischer Simulator nach Anspruch 11 ist auf einfache und effiziente Weise fertigbar. Die mindestens zwei Schaumkomponenten des medizinischen Simulators weisen insbesondere zwei gezielt einstellbare unterschiedliche Nadel-Eindringwiderstände auf.

Ein medizinischer Simulator nach Anspruch 12 ist besonders geeignet, echte Gewebestrukturen nachzubilden. Unnatürlich harsche Übergänge zwischen verschiedenen Schaumkomponenten, die unterschiedliche Gewebearten simulieren, sind vermieden. Mittels des Übergangsbereichs ist ein fließender Übergang zwischen verschiedenen Gewebearten realitätsnah abgebildet.

Ein medizinischer Simulator nach Anspruch 13 weist ein hohes Flüssigkeitsaufnahmevermögen bei gleichzeitig hoher struktureller Stabilität auf. Mithilfe der Stäbchenstruktur werden insbesondere nur die Kanten der Elementarzellen nachgebildet. Zellwände zwischen den Kanten können teilweise oder gänzlich weggelassen werden. Hierdurch können hohe Na-

del-Eindringwiderstände mit geringen Flüssigkeits-Eindringwiderständen kombiniert werden.

Ein medizinischer Simulator nach Anspruch 14 ist besonders effizient fertigbar und weist eine hohe Stabilität auf. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass ein einstückiger Simulator eine gewachsene Gewebestruktur besonders realitätsnah abbildet. Ein nachträgliches Verbinden verschiedener Schaumkomponenten ist vermieden. Fügenschichten, beispielsweise Klebeschichten, die zu unnatürlichen Eigenschaften führen, sind vermieden. Besonders bevorzugt ist der gesamte medizinische Simulator einstückig ausgebildet. Der gesamte medizinische Simulator kann insbesondere integral additiv gefertigt sein.

Ein medizinischer Simulator nach Anspruch 15 ermöglicht eine besonders effektive und gezielte Einstellung zu simulierender Eigenschaften, insbesondere des Flüssigkeits-Eindringverhaltens. Durch die gezielt vorgegebene Geometrie der Elementarzellen, Ausrichtung der Elementarzellen, Größe der Elementarzellen und/oder Zellwandstruktur werden die Eigenschaften des Simulators bereits auf Ebene der Elementarzellen beeinflusst. Die Elementarzellenstruktur, insbesondere die Geometrie und/oder Ausrichtung der einzelnen Elementarzellen, ist präzise festgelegt. Beispielsweise weisen die Elementarzellen eine kubische, hexagonale oder kugelförmige Geometrie auf. Alternativ können die Elementarzellen einer Schaumstruktur auch unterschiedliche Geometrien aufweisen. Beispielsweise können gezielt unterschiedliche Geometrien kombiniert werden. Auch unregelmäßige Geometrien sind möglich. Insbesondere können die Elementarzellen beliebige unterschiedliche Geometrien aufweisen.

Bevorzugt weisen die mindestens zwei Schaumkomponenten eine vorgegebene Geometrie der Elementarzellen, Ausrichtung der Elementarzellen, Größe der Elementarzellen und/oder Zellwandstruktur, insbesondere eine vorgegebene Ausrichtung der Elementarzellen und/oder Größe der Elementarzellen, auf.

Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, eine Schulung medizinischen Personals mithilfe eines medizinischen Simulators zu verbessern.

Die Aufgabe ist gelöst durch die Verwendung gemäß Anspruch 16. Hier-
nach wird der zuvor beschriebene medizinische Simulator zur Schulung
medizinischen Personals verwendet. Vorteilhafterweise lassen sich hier-
durch Schulungen mit einem medizinischen Simulator durchführen, dessen
Eigenschaften genau an die Eigenschaften natürlichen Gewebes angepasst
sind. Die Schulung kann insbesondere die Injektion von Medikamenten,
insbesondere eines Anästhetikums, betreffen. Mithilfe des medizinischen
Simulators kann insbesondere die Epiduralanästhesie simuliert und ge-
schult werden. Die hieraus resultierenden Vorteile entsprechen denen, die
oben im Zusammenhang mit dem Herstellungsverfahren sowie dem medi-
zinischen Simulator beschrieben sind.

Eine Verwendung gemäß Anspruch 17 ist besonders für die Schulung hin-
sichtlich punktgenauer Injektionen, insbesondere hinsichtlich der Epi-
duralanästhesie, geeignet. Der Nadel-Eindringwiderstand und der Flüssig-
keits-Eindringwiderstand sind zwei wesentliche Parameter, anhand derer
die Positionierung einer Injektionsnadel in einem Patientengewebe be-
stimmt werden kann. Durch die Verwendung unterschiedlicher Schaum-
komponenten, die sich mindestens in ihrer Schaumstruktur und/oder ihrem

Material unterscheiden, können diese wesentlichen Eigenschaften realitätsnah abgebildet werden.

Bevorzugt kann die Schulung mittels eines an einem Patienten angepassten
5 Simulators erfolgen. Besonders bevorzugt ist der zur Schulung verwendete Simulator an die Gewebestruktur eines konkreten Patienten angepasst. Beispielsweise kann die Gewebestruktur eines konkreten Patienten anhand bildgebender Verfahren erfasst und mittels geeigneter Programme in entsprechende Schaumstrukturen umgerechnet werden. Die entsprechenden an
10 das Gewebe des Patienten angepassten Schaumkomponenten können dann mithilfe der additiven Fertigung zielgerichtet gefertigt werden.

Weitere Merkmale, Vorteile und Einzelheiten der Erfindung ergeben aus der nachfolgenden Beschreibung bevorzugter Ausführungsbeispiele anhand
15 der Figuren. Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung eines Längsschnitts durch eine Gewebestruktur eines Menschen sowie eines die entsprechende Gewebestruktur nachbildenden medizinischen Simulators,
20

Fig. 2 eine schematische Darstellung zweier unterschiedlicher Schaumkomponenten des medizinischen Simulators gemäß Fig. 1 sowie eines dazwischenliegenden Übergangsbereichs,
25

Fig. 3 ein schematischer Verfahrensablauf für die Fertigung eines medizinischen Simulators und

Fig. 4 zwei Schaumkomponenten, die additiv in Form einer Stäbchenstruktur gefertigt sind.

In der oberen Hälfte der Fig. 1 ist schematisch ein Längsschnitt durch das Gewebestruktur 1 eines Patienten im Bereich der Wirbelsäule gezeigt. In der unteren Hälfte von Fig. 1 ist schematisch ein Längsschnitt durch einen an die Gewebestruktur 1 des Patienten angepassten medizinischen Simulator 2 gezeigt. Für die jeweiligen Gewebearten der Gewebestruktur 1 werden im Folgenden die gleichen Bezugszeichen verwendet wie für die entsprechenden Komponenten des medizinischen Simulators 2, jedoch um den Buchstaben a ergänzt.

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Gewebearten der Gewebestruktur 1 von außen nach innen beschrieben. Die Haut 4a weist die Epidermis, die Lederhaut sowie die Unterhaut (Subcutis) auf. Hieran schließt sich Fettgewebe 5a und Muskelgewebe 6a an. Hieran schließt sich das Ligamentum 7a an. Die Wirbel der Wirbelsäule sind aus Knochen 8a. Zwischen den Wirbeln ist ein Wirbelkanal ausgebildet, der die Dura Mater 10a und den Liquorraum 11a aufweist. Zwischen den Wirbelfortsätzen und der Dura Mater 10a befindet sich der Epiduralraum 9a.

Bei der Epiduralanästhesie muss das Anästhetikum in den Epiduralraum 9a injiziert werden. Hierbei ist es von enormer Wichtigkeit, dass der Mediziner den Nadelvorschub beim Erreichen der richtigen Position rechtzeitig beendet, um das Anästhetikum in den Epiduralraum 9a einzubringen. In Fig. 1 ist mit dem Pfeil A eine beispielhafte Injektionsrichtung für das Einbringen der Nadel gezeigt. Bei der Epiduralanästhesie muss der Mediziner anhand der Eindringtiefe, dem Nadel-Eindringwiderstand N und dem Flüssigkeits-Eindringwiderstand F auf die richtige Positionierung der Nadel

rückschließen. Da die unterschiedlichen Gewebearten 4a bis 11a unterschiedliche Nadel-Eindringwiderstände N und/oder Flüssigkeits-Eindringwiderstände F aufweisen, ist eine entsprechende Positionierung der Injektionsnadel für den geschulten Mediziner anhand dieser Parameter möglich.

5

Der medizinische Simulator 2 ist ein Epiduralanästhesie-Simulator. Der medizinische Simulator 2 ist additiv gefertigt und weist eine Mehrzahl von Komponenten 4 bis 11 auf, die den jeweiligen Geweben 4a bis 11a in Größe und Form entsprechen. Die verschiedenen Komponenten 4 bis 11 des
10 medizinischen Simulators 2 sind als Schaumkomponenten oder Vollvolumen-Komponenten ausgeführt.

Die unterschiedlichen Komponenten 4 bis 11 sind jeweils aus einem Polymer gefertigt. Die die Knochen 8a nachbildenden Komponenten 8 sind als
15 Vollvolumen-Komponenten aus einem Polymer gefertigt. Hierdurch sind der extrem hohe Nadel-Eindringwiderstand N und Flüssigkeits-Eindringwiderstand F der Knochen 8a nachgebildet. Auch die die Haut 4a nachbildende Komponente 4 ist eine Vollvolumen-Komponente. Auch kann die
20 die Dura Mater 10a nachbildende Komponente 10 als Vollvolumen-Komponente ausgebildet sein. Die verbleibenden Komponenten 5 bis 7, 9 und 11 sind Schaumkomponenten ausgeführt. Auch die die Dura Mater 10a nachbildende Komponente 10 kann als Schaumkomponente ausgebildet sein.

25 Zur Simulation unterschiedlicher Nadel-Eindringwiderstände N und Flüssigkeits-Eindringwiderstände F unterscheiden sich die Komponenten 4 bis 11 zumindest in ihrer Schaumstruktur und/oder in ihrem Material. Durch gezielte Anpassung der Schaumstrukturen und/oder des Materials weisen die Komponenten 4 bis 11 Flüssigkeits-Eindringwiderstände F und Nadel-

Eindringwiderstände N auf, die denen der entsprechenden Gewebe 4a bis 11a entsprechen.

Unterschiede in dem Material können durch das jeweils verwendete Polymer erzeugt werden. Es ist jedoch auch möglich, unterschiedliche Additive bei gleichem Basispolymer einzusetzen. Beispielsweise kann die Härte des Materials durch unterschiedliche Weichmacher eingestellt werden. Zudem können unterschiedliche Schaumkomponenten Triboadditive zur Einstellung eines Reibungswiderstands zwischen der Schaumstruktur und einer Nadel aufweisen.

Hinsichtlich der Schaumstruktur sind insbesondere Unterschiede in den folgenden Schaumstruktur-Parametern möglich: Geometrie der Elementarzellen, Ausrichtung der Elementarzellen, mittlere Größe der Elementarzellen, Schaumdichte, Stärke der Zellwandstrukturen und/oder Porenstruktur.

Zur Einstellung des Nadel-Eindringwiderstands haben sich insbesondere die folgenden Parameter als geeignet erwiesen: Geometrie und Orientierung der Elementarzellen, Stärke der Zellwandstrukturen, mittlere Größe der Elementarzellen, Schaumdichte, verwendetes Basispolymer und/oder Additivierung des Basispolymers. Zur Einstellung des Flüssigkeits-Eindringwiderstands haben sich insbesondere die folgenden Parameter als geeignet erwiesen: Geometrie der Elementarzellen, Ausrichtung der Elementarzellen, mittlere Größe der Elementarzellen, Porenstruktur und Schaumdichte, insbesondere die Porosität der Schaumstruktur.

In Tabelle 1 sind die verschiedenen Gewebearten hinsichtlich deren Nadel-Eindringwiderstände N und Flüssigkeits-Eindringwiderstände F aufgelistet. Zudem sind mögliche Ausgestaltungen der entsprechenden Komponenten 4

bis 11 des medizinischen Simulators 2 und der jeweils verwendeten Materialien angegeben.

Bezugszeichen	Anatomische Bezeichnung	Nadel-Eindringwiderstand	Flüssigkeits-Eindringwiderstand	Schaumstruktur und Material
4a; 4	Haut mit Epidermis und Lederhaut sowie Unterhaut	Erst hoch, dann niedrig (Unterhaut)	Hoch	Vollvolumen-Komponente, aus TPE
5a; 5	Fettgewebe	Gering	Gering	Offenzellige, vergleichsweise kleinzellige Schaumstruktur mit geringer Schaumdichte aus TPE
6a; 6	Muskelgewebe	Gering	Mittel	Offenzellige, vergleichsweise kleinzellige Schaumstruktur mit höherer Schaumdichte aus TPE
7a; 7	Ligamentum (supraspinale,	Mittel	Hoch	Geschlossenzellige Schaumstruktur

	interspinale, flavum)			tur mit höherer Schaumdichte aus TPE
9a; 9	Epiduralraum	Mittel/ Gering	Gering	Offenzellige Schaumstruktur geringer/mittlerer Schaumdichte aus TPE
10a; 10	Dura Mater (harte Hirn- haut)	Etwas höher als Epidural- raum	Hoch	Klein- und ge- schlossenzellige Schaumstruktur höherer Schaum- dichte oder dünne Schicht aus Voll- volumen-Material aus TPE
11a; 11	Liquorraum	Mittel	Sehr niedrig	Offenzellige Schaumstruktur mit größerer mitt- lerer Größe der Elementarzellen und sehr niedriger Schaumdichte aus TPE, alternativ auch als vollstän- diger Hohlraum ausgeführt
8a; 8	Knochen	Extrem hoch	Extrem hoch	Vollvolumen-

				Komponente aus TPE oder einem reinen Polyolefin (PE, PP) oder PLA
--	--	--	--	---

Tabelle 1: Zuordnung der Nadel-Eindringwiderstände N und Flüssigkeits-Eindringwiderstände F zu den unterschiedlichen in Fig. 1 gezeigten Gewebearten 4a bis 11a sowie entsprechende Ausführung der Komponenten 4 bis 11 des medizinischen Simulators 2

Die in Tabelle 1 genannten Ausführungen der Komponenten 2 bis 11 des medizinischen Simulators 2 sind rein beispielhaft. Je nach Anforderungen können andere Schaumstruktur-Parameter variiert werden. Es ist auch möglich, vergleichbare Nadel-Eindringwiderstände N und Flüssigkeits-Eindringwiderstände F durch eine andere Kombination aus Material und Schaumstruktur zu erzielen. Beispielsweise können andere Polymermaterialien mit geeigneten Additiven verwendet werden.

Bei den in Tabelle 1 genannten geschlossenzelligen Schaumstrukturen weisen die Elementarzellen der Schaumstrukturen keine offenen Verknüpfungspunkte bzw. Poren auf, über welche ein Flüssigkeitsaustausch möglich ist. Eine offenzellige Schaumstruktur zeichnet sich durch derartige offene Verknüpfungspunkte bzw. Poren zwischen den Elementarzellen auf, sodass ein Flüssigkeitsaustausch zwischen diesen stattfinden kann. Bei den in Tabelle 1 genannten kleinzelligen Schaumstrukturen handelt es sich um Schaumstrukturen mit einer mittleren Größe der Schaumstrukturen zwischen 1 μm und 500 μm mm, insbesondere zwischen 100 μm und 500 μm ,

- insbesondere zwischen 200 μm und 400 μm . Größere Zellgrößen entsprechen einer mittleren Größe der Elementarzelle zwischen 500 μm und 2 mm, insbesondere zwischen 500 μm und 1 mm. Schaumstrukturen mit höherer Dichte weisen ein Verhältnis von Material zu Luft auf zwischen 40
- 5 Vol.-% und 99 Vol.-%, insbesondere zwischen 40 Vol.-% und 60 Vol.-%. Schaumstrukturen mit geringerer Dichte weisen ein Verhältnis von Material zu Luft auf zwischen 1 Vol.-% und 40 Vol.-%, insbesondere zwischen 5 Vol.-% und 30 Vol.-%.
- 10 Die Verwendung unterschiedlicher Schaumstrukturen und deren Einfluss auf den Nadel-Eindringwiderstand N beziehungsweise dem Flüssigkeits-Eindringwiderstand F werden mit Bezug auf Fig. 2 im Folgenden erläutert. In Fig. 2 sind eine erste Schaumkomponente 15 und eine zweite Schaumkomponente 16 exemplarisch gezeigt. Je Schaumkomponente 15, 16 sind
- 15 nur einige wenige Elementarzellen 17 exemplarisch dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind in Fig. 2 nur einzelne der Elementarzellen 17 beispielhaft mit einem Bezugszeichen versehen. Die Elementarzellen 17 der Schaumkomponenten 15, 16 sind jeweils als gleichmäßige Sechsecke schematisch dargestellt. Die Elementarzellen 17 sind jeweils mit der gleichen Größe, Geometrie und Ausrichtung ausgeführt. Bei der ersten
- 20 Schaumkomponente 15 kann es sich beispielsweise um die das Ligamentum 7a nachbildende Komponente 7 in Fig. 1 handeln. Bei der zweiten Schaumkomponente 16 kann es sich beispielsweise um die das Muskelgewebe 6a nachbildende Komponente 6 in Fig. 1 handeln.
- 25 Zwischen den beiden Schaumkomponenten 15, 16 ist ein Übergangsbereich 18 ausgebildet. Der Übergangsbereich 18 wird integral mit den Schaumkomponenten 15, 16 additiv gefertigt. Wie im Folgenden beschrieben wird, erfolgt über der Übergangsbereich 18 eine graduelle Anpassung

zwischen unterschiedlichen Schaumstruktur-Parametern der Schaumkomponenten 15, 16. Durch den Übergangsbereich 18 ist eine sprunghafte Änderung der Eigenschaften der unterschiedlichen Schaumkomponenten 15, 16 vermieden. Hierdurch ist ein fließender Übergang zwischen verschiedenen Schaumkomponenten, wie er auch in echten Gewebestrukturen gegeben ist, simuliert. Im Allgemeinen ist der Übergangsbereich derart bemessen, dass ein der abzubildenden Gewebestruktur angepasster Übergang zwischen den benachbarten Schaumkomponenten ermöglicht ist. Regelmäßig ist der Übergangsbereich, wie in Fig. 2 gezeigt, nur wenige Elementarzellen 17 breit. In Fig. 1 sind entsprechende Übergangsbereiche aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht gezeigt.

Unter den beispielhaft dargestellten Schaumkomponenten 15, 16 und dem Übergangsbereich 18 ist jeweils ein räumlicher Verlauf des Flüssigkeits-Eindringwiderstands F und des Nadel-Eindringwiderstands N qualitativ gezeigt.

Die Schaumkomponente 15 weist eine Schaumstruktur mit geschlossenzelligen Elementarzellen 17 auf. Das bedeutet, dass zwischen den einzelnen Elementarzellen 17 keine offenen Poren bestehen, die einen Medienaustausch zwischen den Elementarzellen 17 ermöglichen würden. Wird eine Flüssigkeit 19 in eine der Elementarzellen 17 injiziert verbleibt die Flüssigkeit 19 in der jeweiligen Elementarzelle 17. Das Flüssigkeitsaufnahmevermögen der Schaumkomponente 15 ist daher äußerst gering. Der Flüssigkeits-Eindringwiderstand F der Schaumkomponente 15 ist hoch.

Im Übergangsbereich 18 nimmt die Anzahl offener Poren 20 zwischen den Elementarzellen 17 schrittweise zu. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind in Fig. 2 nur einzelne der offenen Poren 20 beispielhaft mit einem Be-

zugszeichen versehen. Mit Zunahme der offenen Poren 20 ändert sich auch die Porenstruktur, insbesondere steigt ein Verhältnis von offenporigen Elementarzellen 17 zu geschlossenporigen Elementarzellen 17. Wird beispielsweise eine Flüssigkeit 21 in eine der Elementarzellen 17 injiziert, 5 kann sich die Flüssigkeit 21 über die entsprechende Elementarzelle 17 und benachbarte Elementarzellen 17 ausbreiten. Hierdurch ist das Flüssigkeitsaufnahmevermögen vergrößert und der Flüssigkeits-Eindringwiderstand F sinkt ab. Je mehr Elementarzellen 17 über Poren 20 miteinander verbunden sind, desto geringer ist der Flüssigkeits-Eindringwiderstand F . In der 10 Schaumkomponente 16 weisen die Elementarzellen 17 jeweils eine Vielzahl von offenen Poren 20 auf, sodass in der Schaumkomponente 16 nur ein geringer Flüssigkeits-Eindringwiderstand F besteht. Entsprechend sinkt der qualitativ dargestellte Flüssigkeits-Eindringwiderstand F von einem hohen Wert für die Schaumkomponente 15 über den Übergangsbereich 18 15 zu einem niedrigen Wert für die Schaumkomponente 16.

Alternativ oder zusätzlich zu der Anzahl der offenen Poren 20 zwischen den Elementarzellen 17 besteht weiterhin die Möglichkeit mittels der Größe der Poren 20 den Flüssigkeits-Eindringwiderstand F zu variieren. Alternativ oder zusätzlich kann auch die Größe der Elementarzellen 17 variiert 20 werden, sodass jede Elementarzelle 17 mehr beziehungsweise weniger Flüssigkeit aufnehmen kann. Auch die Schaumdichte, insbesondere die Porosität, kann zur Einstellung des Flüssigkeits-Eindringwiderstands F variiert werden. Je geringer die Schaumdichte ist, desto einfacher kann Flüssigkeit in die jeweilige Schaumkomponente 15, 16 eingebracht werden. 25

In Fig. 2 ist auch gezeigt, dass eine Wandstärke d der Zellwände 22 der Elementarzellen 17 von der Schaumkomponente 15 zur Schaumkomponente 16 hin über den Übergangsbereich 18 graduell abnimmt. Mit der Wand-

stärke d nimmt die Festigkeit der jeweiligen Schaumstruktur ab, zumindest sofern das Material unverändert bleibt. Bei gleichbleibender Größe der Elementarzellen 17 nimmt zudem das Verhältnis von Material zu Luft und damit die Schaumdichte ab. Aufgrund der hohen Wandstärke d in der

5 Schaumstruktur der Schaumkomponente 15 weist die Schaumkomponente 15 einen hohen Nadel-Eindringwiderstand N auf. Mit abnehmender Wandstärke d nimmt der Nadel-Eindringwiderstand N über den Übergangsbereich 18 ab. Aufgrund der geringen Wandstärke d der Zellwände 22 der Elementarzellen 17 der Schaumkomponente 16 ist ein Nadel-Eindring-

10 widerstand N in der Schaumkomponente 16 gering.

Zusätzlich oder alternativ zu der veränderten Wandstärke d in Fig. 2 kann der Nadel-Eindringwiderstand N insbesondere durch Materialien verschiedener Härte eingestellt werden. Beispielsweise können unterschiedliche

15 Basispolymere für die Schaumkomponenten 15, 16 verwendet werden. Zusätzlich oder alternativ hierzu kann eine unterschiedliche Additivierung des Basispolymers erfolgen. Als besonders geeignet haben sich hierbei Triboadditive erwiesen, über welche ein Reibungswiderstand zwischen der Schaumstruktur und der Nadel einstellbar ist.

20

Bei dem in Fig. 2 dargestellten Beispiel wird also beim Übergang von der Schaumkomponente 16 über den Übergangsbereich 18 hin zur Schaumkomponente 15 sowohl der Flüssigkeits-Eindringwiderstand F als auch der Nadel-Eindringwiderstand N erhöht. Eine entsprechende Erhöhung des

25 Flüssigkeits-Eindringwiderstands F und des Nadel-Eindringwiderstands N ist beispielsweise der Fall bei einem Übergang von Mustergewebe 6a hin zum Ligamentum 7a (vgl. Fig. 1 und Tabelle 1). Ein derartiger Übergang kann daher mit den in Fig. 2 dargestellten Schaumkomponenten 15, 16 und deren jeweiligen Schaumstrukturen realitätsnah nachgebildet werden.

Es versteht sich von selbst, dass auch andere Kombinationen aus sich ändernden Flüssigkeits-Eindringwiderstand F und Nadel-Eindringwiderstand N möglich sind. Beispielsweise kann der Nadel-Eindringwiderstand N
5 durch die Erhöhung der Wandstärke d erhöht werden, während gleichzeitig durch das Vorsehen von Poren 20 ein Flüssigkeits-Eindringwiderstand F verringert wird.

In Fig. 3 ist schematisch ein Ablauf eines Fertigungsverfahrens 25 zur Fertigung eines medizinischen Simulators gezeigt. Das Fertigungsverfahren 25
10 eignet sich insbesondere zur Fertigung des medizinischen Simulators 2.

In einem Erfassungsschritt 26 wird eine Gewebestruktur, die mithilfe des medizinischen Simulators nachgebildet werden soll, erfasst. Bei der Gewe-
15 bestruktur kann es sich allgemein um die typische Gewebestruktur eines Patienten handeln. Beispielsweise können Durchschnittswerte für die in Fig. 1 gezeigte Gewebestruktur 1 herangezogen werden, um einen Aufbau des Bereichs der Wirbelsäule, an welchem eine Epiduralanästhesie vorgenommen wird, allgemein festzulegen. Es versteht sich von selbst, dass auch
20 beliebige andere Gewebestrukturen hierfür in Betracht kommen.

Bevorzugt wird in dem Erfassungsschritt 26 die Gewebestruktur eines konkreten Patienten, an dem ein Eingriff vorgenommen werden soll, erfasst. Anhand der konkreten Gewebestrukturen kann der medizinische Simulator
25 exakt an den Patienten angepasst werden. Im vorliegenden Fall kann beispielsweise die Gewebestruktur eines Patienten mithilfe von bildgebenden Verfahren, beispielsweise mithilfe der Computertomographie und/oder der Magnetresonanztomografie erfasst werden. Aus den erhaltenen Bilddaten

können dann geeignete die Gewebestruktur des Patienten nachbildende Schaumkomponenten errechnet werden.

An den Erfassungsschritt 26 schließt sich ein Schaumstruktur-Bestimmungsschritt 27 an. In dem Schaumstruktur-Bestimmungsschritt 27 wird aus den erfassten Gewebestrukturen eine diese möglichst genau nachbildende Kombination mindestens zweier Schaumkomponenten ermittelt. In dem Schaumstruktur-Bestimmungsschritt 27 werden daher die für die spätere additive Fertigung erforderlichen Struktur-Parameter bestimmt.

Beispielsweise können die Größe und Form der jeweiligen Gewebearten 4a bis 11a der Gewebestruktur 1 in Fig. 1 vorgegeben werden, um die zu erstellenden Komponenten 4 bis 11 hinsichtlich ihrer Größe und Form zu definieren. Des Weiteren kann für jede der Komponenten 4 bis 11 ein zu erzielender Nadel-Eindringwiderstand N und Flüssigkeits-Eindringwiderstand F bestimmt werden. Auf Basis dieser Parameter kann beispielsweise ein Computersystem eine geeignete Schaumstruktur der jeweiligen Schaumkomponenten und/oder geeignete Materialien ermitteln. Beispielsweise können die Schaumstruktur-Parameter festgelegt werden und anhand dessen ein geeignetes Füllmuster zur Ausbildung der Schaumstrukturen automatisch bestimmt werden.

In einem anderen Ausführungsbeispiel werden die Komponenten 4 bis 11 anhand von Durchschnittswerten vieler Patienten hinsichtlich ihrer Größe und Form bestimmt werden.

In wiederum anderen Ausführungsbeispielen kann eine Schaumstruktur für die jeweiligen Schaumkomponenten auch explizit vorgegeben werden. Auf diese Weise sind zu simulierende Eigenschaften noch genauer einstellbar.

Insbesondere kann ein Injektions-Verhalten, insbesondere der Nadel-Eindringwiderstand N und/oder der Flüssigkeits-Eindringwiderstand F, präzise definiert werden. Auch können Variationen der zu simulierenden Eigenschaften auf kleinen Raumskalen präzise variiert werden.

5

Der Schaumstruktur-Bestimmungsschritt 27 kann insbesondere mithilfe eines geeigneten Konstruktionsprogramms, beispielsweise eines CAD-Programms erfolgen. Erzeugte CAD-Daten können dann zur Ansteuerung einer Anlage zur additiven Fertigung des medizinischen Simulators und

10

dessen unterschiedlicher Komponenten genutzt werden.

An den Schaumstruktur-Bestimmungsschritt 27 schließt sich die eigentliche additive Fertigung 28 an. Bei der additiven Fertigung 28 werden die unterschiedlichen Komponenten des medizinischen Simulators additiv ge-

15

fertigt. Beispielsweise werden die Komponenten 4 bis 11 des medizinischen Simulators 2 additiv gefertigt. Hierbei wird der medizinische Simulator insgesamt integral gefertigt. Wie eine gewachsene Gewebestruktur liegt der medizinische Simulator daher einstückig vor. Hierdurch lassen sich echte Gewebeeigenschaften besonders realitätsnah nachbilden.

20

Bei der additiven Fertigung wird eine erste Schaumkomponente, beispielsweise die Schaumkomponente 15, in einem Schaumkomponenten-Fertigungsschritt 29 gefertigt. Der Schaumkomponenten-Fertigungsschritt 29 wird mindestens noch einmal durchgeführt, um mindestens eine weitere

25

Schaumkomponente, beispielsweise die Schaumkomponente 16, additiv zu fertigen. Die Durchführung des Schaumkomponenten-Fertigungsschritt 29 erfolgt so oft, bis alle Schaumkomponenten des medizinischen Simulators fertiggestellt sind. Die mehrfache Durchführung des Schaumkomponenten-

Fertigungsschritts 29 ist durch eine Wiederholungsschleife 30 in Fig. 3 symbolisch dargestellt.

5 Zwischen der Fertigung unterschiedlicher Schaumkomponenten wird ein Parameter-Wechselschritt 31 durchgeführt, bei welchem die Parameter an die jeweils zu fertigende Schaumkomponente angepasst werden. Beispielsweise kann im Parameterwechselschritt 31 auch ein zur Fertigung verwendetes Basispolymer und/oder dessen Additivierung verändert werden.

10

Die additive Fertigung 28 umfasst zudem einen Übergangsbereichs-Fertigungsschritt 32. In dem Übergangsbereichs-Fertigungsschritt 32 wird ein Übergangsbereich, beispielsweise der Übergangsbereich 18, zwischen zwei benachbarten Schaumkomponenten erstellt. Der Übergangsbereichs-Fertigungsschritt 32 entspricht im Wesentlichen den Schaumstruktur-Fertigungsschritten 29. Insbesondere weist der Übergangsbereich, beispielsweise der Übergangsbereich 18, selbst eine Schaumstruktur auf. Der Übergangsbereichs-Fertigungsschritt 32 wird so oft ausgeführt, bis alle Übergangsbereiche additiv gefertigt sind. Dies ist anhand der Wiederholungsschleife 33 in Fig. 3 schematisch dargestellt.

15
20

Die additive Fertigung 28 enthält auch einen Vollvolumen-Fertigungsschritt 34. Der Vollvolumen-Fertigungsschritt 34 dient zur Fertigung mindestens einer Vollvolumen-Komponente des medizinischen Simulators. Beispielsweise werden mit dem Vollvolumen-Fertigungsschritt 34 die die Knochen 8a nachbildenden Vollvolumen-Komponenten 8 des medizinischen Simulators 2 gefertigt. Der Vollvolumen-Fertigungsschritt 34 wird so oft durchgeführt, bis alle Vollvolumen-Komponenten des medizinischen

25

Simulators vollständig gefertigt sind. Dies ist anhand der Wiederholungsschleife 35 in Fig. 3 schematisch dargestellt.

Es versteht sich von selbst, dass die einzelnen Schritte der additiven Fertigung 28 nicht strikt sequentiell, insbesondere nicht nacheinander ausgeführt werden. Vielmehr können die verschiedenen Schritte der additiven Fertigung 28 parallel durchgeführt werden. Beispielsweise bedienen sich viele Verfahren der additiven Fertigung einer schichtweisen Fertigung in einem Pulverbett. In diesem Fall würde der medizinische Simulator 2 schichtweise gefertigt werden. Hierbei werden beispielsweise unterschiedliche Schichten der Komponenten 4 bis 11 des medizinischen Simulators 2 schichtweise aufgetragen. Je Pulverschicht werden daher einzelne Schichten unterschiedlicher der Komponenten 4 bis 11 gefertigt.

Für die Durchführung der additiven Fertigung 28 kann jedes geeignete additive Fertigungsverfahren angewandt werden. Als besonders geeignet haben sich selektives Lasersintern (LS), Elektronenstrahlschmelzen (electron beam melting, EBM, beziehungsweise electron beam additive manufacturing, EBAM), Stereolithografie (SL) und/oder Digital Light Processing (DLP) erwiesen. Bevorzugt kann die additive Fertigung der Schaumkomponenten mittels Fused Filament Fabrication (FFF), Multijet Modeling (MJM) und/oder Arburg-Kunststoff-Freiformal (AKF) erfolgen.

In Fig. 4 ist ein weiteres Ausführungsbeispiel zweier additiv gefertigter Schaumkomponenten 40, 41 für einen medizinischen Simulator gezeigt. Die Schaumkomponente 40 kann eine erste Schaumkomponente sein. Die Schaumkomponente 41 kann eine zweite Schaumkomponente sein.

Die Schaumkomponenten 40, 41 sind integral aus einem Polymer additiv gefertigt. Die Schaumkomponente 40 ist umfangsseitig, d.h. ringförmig, um die Schaumkomponente 41 angeordnet. Die Grenzen der Schaumkomponenten 40, 41 sind jeweils mit gestrichelten kreisförmigen Linien angedeutet. Die Schaumkomponenten 40, 41 weisen jeweils eine Stäbchenstruktur 42 auf. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist die Stäbchenstruktur 42 nur in einem Ausschnitt der Schaumkomponenten 40, 41 gezeigt. Die Stäbchenstruktur 42 ist derart ausgebildet, dass die Kanten von Elementarzellen 43 der jeweiligen Schaumstrukturen in Form von miteinander verbundenen Stäbchen 44 ausgebildet sind. Die Elementarzellen 43 weisen bis auf die die Kanten ausbildenden Stäbchen 44 keine Zellwände auf. Die Elementarzellen 43 sind hierdurch fluidisch miteinander verbunden. Der Flüssigkeits-Eindringwiderstand F der Schaumkomponenten 40, 41 ist hierdurch minimal.

In anderen, nicht dargestellten Ausführungsbeispielen wird der Flüssigkeits-Eindringwiderstand F in entsprechenden Stäbchenstrukturen erhöht, indem zumindest einzelne der Zellwände zwischen den Stäbchen ausgebildet sind.

Die Elementarzellen 43 der Stäbchenstrukturen 42 beider Schaumkomponenten 40, 41 weisen die gleiche mittlere Größe auf. Die Elementarzellen 43 weisen eine unregelmäßige Geometrie auf. Die Elementarzellen 43 weisen unterschiedliche, beliebig verteilte Geometrien auf. Der einzige Unterschied zwischen den Schaumstrukturen der Schaumkomponenten 40, 41 liegt in einem Stabdurchmesser der Stäbchen 44. Der Stabdurchmesser der Stäbchen 44 in der Schaumkomponente 40 ist wesentlich größer als der Stabdurchmesser der Stäbchen 44 in der Schaumkomponente 41. Mithilfe des Stabdurchmessers kann eine strukturelle Integrität der Schaumkompo-

nenten 40, 41 festgelegt werden. Je höher der Stabdurchmesser der Stäbchen 44 ist, desto höher ist ein Nadel-Eindringwiderstand N. In dem in Fig. 4 gezeigten Ausführungsbeispiel ist daher der Nadel-Eindringwiderstand N der Schaumkomponente 40 höher als der der Schaumkomponente 41. Aufgrund des unterschiedlichen Stabdurchmessers weisen die beiden Schaumkomponenten 40, 41 auch unterschiedliche Schaumdichten auf.

Zwischen den Schaumkomponenten 40, 41 ist ein ringförmiger Übergangsbereich 45 ausgebildet. In dem Übergangsbereich 45 weisen die Stäbchen 44 einen Stabdurchmesser auf, der kleiner als der Stabdurchmesser der Stäbchen 44 in der Schaumkomponente 40 und größer als der Stabdurchmesser der Schaumkomponente 41 ist. Der Stabdurchmesser des Übergangsbereichs 45 liegt zwischen den Stabdurchmessern der Stäbchen 44 der Schaumkomponenten 40, 41. Hierdurch wird ein weniger harter Übergang der Stabdurchmesser der beiden Schaumkomponenten 40, 41 und damit der Nadel-Eindringwiderstände N gewährleistet. Im Übergangsbereich 45 weisen die Stäbchen 44 einen einheitlichen Stabdurchmesser auf. Die Anpassung erfolgt daher in einem einzigen Schritt. Der Übergangsbereich 45 ist selbst als Schaumkomponente ausgebildet.

Zwischen den Schaumkomponenten 40, 41 kann in weiteren Ausführungsbeispielen ein Übergangsbereich ausgebildet sein, in dem der Stabdurchmesser graduell in mehreren Schritten oder kontinuierlich abnimmt.

In weiteren, nicht dargestellten Ausführungsbeispielen kann die strukturelle Integrität der Schaumstrukturen alternativ oder zusätzlich zu dem Stabdurchmesser durch die Stablänge und/oder die Verzweigungsstruktur und Anzahl der Verzweigungen pro Knoten, also die Komplexität der Geometrie der Elementarzellen 43, variiert werden.

Mithilfe der Stäbchenstrukturen 42 ist ein hohes Flüssigkeitsaufnahmevermögen, d.h. ein sehr geringer Flüssigkeits-Eindringwiderstand F , bei gleichzeitig hohem Nadel-Eindringwiderstand N simulierbar. Entsprechende Stäbchenstrukturen können daher beispielsweise für die Realisierung
5 des Liquorraums, der einen zumindest mittleren Nadel-Eindringwiderstand N und einen sehr geringen Flüssigkeits-Eindringwiderstand F aufweist, verwendet werden.

Die hier beschriebenen medizinischen Simulatoren, insbesondere der me-
10 dizinische Simulator 2, verbessern die Schulung medizinischen Personals. Insbesondere kann hierüber die Epiduralanästhesie trainiert werden. Vorteilhaft ist insbesondere, dass sowohl unterschiedliche Nadel-Eindringwiderstände N als auch unterschiedliche Flüssigkeits-Eindringwiderstände F realitätsnah und gezielt simuliert werden. Dies verbessert den Schulungs-
15 effekt.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Fertigung eines medizinischen Simulators, insbesondere eines Epiduralanästhesie-Simulators, mit mindestens zwei Schaum-
5 komponenten (15, 16; 40, 41), wobei das Verfahren die Schritte aufweist:
 - additives Fertigen einer ersten Schaumkomponente (15; 40) und
 - additives Fertigen mindestens einer weiteren Schaumkomponente (16; 41),
10 wobei die erste Schaumkomponente (15; 40) und die mindestens eine weitere Schaumkomponente (16; 41) mit unterschiedlichen Schaumstrukturen und/oder aus unterschiedlichen Materialien gefertigt werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass**
15 mindestens eine der mindestens zwei Schaumkomponenten (15, 16; 40, 41) mit einer vorgegebenen Geometrie der Elementarzellen (17; 43), Ausrichtung der Elementarzellen (17; 43), Größe der Elementarzellen (17; 43) und/oder Zellwandstruktur, insbesondere mit einer vorgegebenen Ausrichtung der Elementarzellen (17; 43) und/oder Größe der
20 Elementarzellen (17; 43), gefertigt wird.
3. Verfahren nach einem der vorgenannten Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass**
25 die erste Schaumkomponente (15; 40) und die mindestens eine weitere Schaumkomponente (16; 41) mit unterschiedlichen Schaumstrukturen gefertigt werden, wobei sich die unterschiedlichen Schaumstrukturen durch mindestens einen der folgenden Schaumstruktur-Parameter unterscheiden: Geometrie der Elementarzellen (17; 43), Ausrichtung der

Elementarzellen (17; 43), mittlere Größe der Elementarzellen (17; 43), Porenstruktur und Schaumdichte, insbesondere Porosität.

4. Verfahren nach einem der vorgenannten Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass**
5 die erste Schaumkomponente (15; 40) und die mindestens eine weitere Schaumkomponente (16; 41) aus einem gleichen Basismaterial, insbesondere aus einem gleichen Basispolymer, mit jeweils unterschiedlicher Additivierung gefertigt werden.
10
5. Verfahren nach einem der vorgenannten Ansprüche, **gekennzeichnet durch**
additives Fertigen eines Übergangsbereichs (18) zwischen zwei benachbarten Schaumkomponenten (15, 16), wobei der Übergangsbe-
15 reich (18) einen graduellen Übergang zwischen den unterschiedlichen Schaumstrukturen und/oder Materialien der benachbarten Schaumkomponenten (15, 16) aufweist.
6. Verfahren nach einem der vorgenannten Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass**
20 die mindestens zwei Schaumkomponenten (15, 16; 40, 41) integral gefertigt werden.
7. Verfahren nach einem der vorgenannten Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass**
25 mindestens eine der Schaumkomponenten (40, 41) mit einer Schaumstruktur in Form einer Stäbchenstruktur (42) gefertigt wird, wobei die Kanten der Elementarzellen (43) durch Stäbchen (44) gebildet sind.

8. Verfahren nach einem der vorgenannten Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass**
die mindestens zwei Schaumkomponenten (15, 16; 40, 41) an eine Gewebestruktur (1) eines Patienten angepasst sind.
- 5
9. Medizinischer Simulator, insbesondere Epiduralanästhesie-Simulator, mit mindestens zwei additiv gefertigten Schaumkomponenten (15, 16; 40, 41), wobei sich die Schaumkomponenten (15, 16; 40, 41) mindestens in einem der folgenden Merkmale unterscheiden: Schaumstruktur und Material.
- 10
10. Medizinischer Simulator nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet, dass**
sich die Schaumstrukturen der ersten Schaumkomponente (15; 40) und der mindestens einen weiteren Schaumkomponente (16; 41) durch mindestens einen der folgenden Schaumstruktur-Parameter unterscheiden: Geometrie der Elementarzellen (17; 43), Ausrichtung der Elementarzellen (17; 43), mittlere Größe der Elementarzellen (17; 43), Porenstruktur und Schaumdichte, insbesondere Porosität.
- 15
- 20
11. Medizinischer Simulator nach Anspruch 9 oder 10, **dadurch gekennzeichnet, dass**
die erste Schaumkomponente (15; 40) und die mindestens eine weitere Schaumkomponente (16; 41) das gleiche Basismaterial, insbesondere das gleiche Basispolymer, bei jeweils unterschiedlicher Additivierung aufweisen.
- 25
12. Medizinischer Simulator nach einem der Ansprüche 9 bis 11, **gekennzeichnet durch**

- einen Übergangsbereich (18) zwischen zwei benachbarten Schaumkomponenten (15, 16), wobei der Übergangsbereich (18) einen graduellen Übergang zwischen den unterschiedlichen Schaumstrukturen und/oder Materialien der benachbarten Schaumkomponenten (15,16) aufweist.
- 5
13. Medizinischer Simulator nach einem der Ansprüche 9 bis 12, **dadurch gekennzeichnet, dass**
- mindestens eine der unterschiedlichen Schaumstrukturen (40, 41) eine Stäbchenstruktur (42) aufweist, wobei die Kanten der Elementarzellen (43) durch Stäbchen (44) gebildet sind.
- 10
14. Medizinischer Simulator nach einem der Ansprüche 9 bis 13, **dadurch gekennzeichnet, dass**
- 15 die mindestens zwei Schaumkomponenten (15, 16; 40, 41) einstückig ausgebildet sind.
15. Medizinischer Simulator nach einem der Ansprüche 9 bis 14, **dadurch gekennzeichnet, dass**
- 20 mindestens eine der mindestens zwei Schaumkomponenten (15, 16; 40, 41) eine vorgegebene Geometrie der Elementarzellen (17; 43), Ausrichtung der Elementarzellen (17; 43), Größe der Elementarzellen (17; 43) und/oder Zellwandstruktur, insbesondere eine vorgegebene Ausrichtung der Elementarzellen (17; 43) und/oder Größe der Elementar-
- 25 zellen (17; 43), aufweist.
16. Verwendung eines medizinischen Simulators nach einem der Ansprüche 9 bis 15 zur Schulung medizinischen Personals.

- 45 -

17. Verwendung nach Anspruch 16, **dadurch gekennzeichnet, dass** mit-
hilfe der mindestens zwei Schaumkomponenten (15, 16; 40, 41) unter-
schiedliche Nadel-Eindringwiderstände (N) und unterschiedliche Flüs-
sigkeits-Eindringwiderstände (F) simuliert werden.