(19) Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2018 208 541 A1** 2019.12.05

(12) # Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2018 208 541.2**
(22) Anmeldetag: **30.05.2018**
(43) Offenlegungstag: **05.12.2019**

(51) Int Cl.: ***F04D 3/00*** (2006.01)
A61M 1/10 (2006.01)
A61M 1/12 (2006.01)

(71) Anmelder:
Kardion GmbH, 70376 Stuttgart, DE

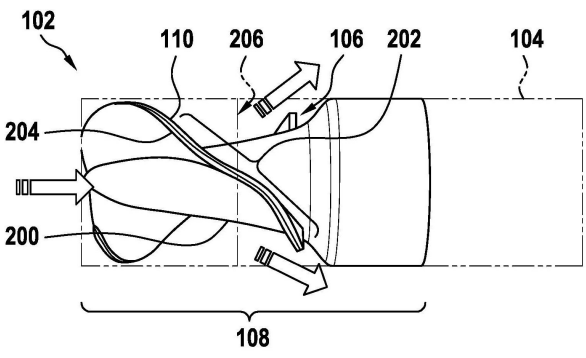
(74) Vertreter:
Pfiz/Gauss Patentanwälte PartmbB, 70178 Stuttgart, DE

(72) Erfinder:
Stotz, Ingo, 71254 Ditzingen, DE; Bäuerle, Niko, 75378 Bad Liebenzell, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Axialpumpe für ein Herzunterstützungssystem und Verfahren zum Herstellen einer Axialpumpe für ein Herzunterstützungssystem**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Axialpumpe (102) für ein Herzunterstützungssystem. Die Axialpumpe (102) umfasst ein Pumpengehäuse (104) zur Anordnung in einem Blutgefäß sowie einen in dem Pumpengehäuse (104) um eine Drehachse drehbar gelagerten oder lagerbaren Pumpenläufer (108) bestehend aus einer Nabe (200) und zumindest einem zumindest abschnittsweise schraubenförmig um die Nabe (200) gewundenen Schaufelelement (110) zum Fördern eines Fördermediums in Richtung der Drehachse (302). Zur Steigerung des Pumpenwirkungsgrades weist das Schaufelelement (110) zumindest einen Schaufelabschnitt (202) mit einer wellenförmigen Schaufelkrümmung auf.



Beschreibung

Stand der Technik

[0001] Die Erfindung geht aus von einer Vorrichtung oder einem Verfahren nach Gattung der unabhängigen Ansprüche. Gegenstand der vorliegenden Erfindung ist auch ein Computerprogramm.

[0002] Zur Herz-Kreislauf-Unterstützung herzinsuffizienter Patienten werden unter anderem Systeme eingesetzt, die einen Teil oder die komplette Pumpfunktion des Herzens übernehmen. Diese Systeme, auch Herzunterstützungssysteme oder kurz VAD (ventricular assist device) genannt, können in temporäre Systeme zur kurzeitigen Herzunterstützung und dauerhafte Systeme zum langzeitigen Verbleib am oder im Patienten untergliedert werden. Bestandteil eines solchen Systems ist in der Regel eine Blutpumpe, typischerweise eine Kreiselpumpe (Turbopumpe), die durch einen integrierten Elektromotor angetrieben wird und mittels eines Laufrades den geforderten Blutfluss erzeugt. Die Pumpe kann hierbei an unterschiedlichen Stellen implantiert werden. Beispielsweise kann die Pumpe durch eine invasive Operation per Sternotomie von außen an das Herz angenäht werden oder minimalinvasiv durch einen Katheter in der Aorta oder im Ventrikel abgesetzt werden. Im letzteren Fall ist der maximal zulässige Außendurchmesser der Pumpe in der Regel auf 10 mm limitiert, weshalb der Einsatz einer Pumpe axialer Bauart mit einem axial angeströmten Laufrad anzustreben ist. Dabei wird das zu fördernde Blut durch am Umfang eines zylindrischen Pumpengehäuses angebrachte Austrittsöffnungen ausgestoßen, um wieder der Aorta zugeführt zu werden.

[0003] Bei einer Kreiselpumpe wird durch die Rotation eines Laufrades Drall in die Strömung eingebracht. Der Drall kann beispielsweise durch ein nachgeschaltetes stehendes Leitrad, auch Stator genannt, reduziert werden.

Offenbarung der Erfindung

[0004] Vor diesem Hintergrund werden mit dem hier vorgestellten Ansatz eine Axialpumpe für ein Herzunterstützungssystem, ein Verfahren zum Herstellen einer Axialpumpe für ein Herzunterstützungssystem, eine Vorrichtung, die dieses Verfahren verwendet, und ein entsprechendes Computerprogramm gemäß den Hauptansprüchen vorgestellt. Durch die in den abhängigen Ansprüchen aufgeführten Maßnahmen sind vorteilhafte Weiterbildungen und Verbesserungen der im unabhängigen Anspruch angegebenen Vorrichtung möglich.

[0005] Der hier vorgestellte Ansatz beruht auf der Erkenntnis, dass durch eine zumindest abschnittsweise wellenförmig gekrümmte Schaufel an einem Laufrad für eine axiale Kreiselpumpe eines Herzunterstützungssystems in Verbindung mit einer geeigneten Positionierung des Laufrads relativ zu Austrittsöffnungen an einem Pumpengehäuse eine besonders schonende und effiziente Fluidförderung erreicht werden kann.

[0006] Die Art der Formgebung des Laufrades führt zu einem gesteigerten Wirkungsgrad bei reduzierter Blutschädigung. Unter gewissen Randbedingungen, etwa bei beschränktem Bauraum, ist es sinnvoll, auf ein feststehendes Leitrad zu verzichten, was in der Regel eine entsprechende Reduktion des Wirkungsgrades der Pumpe mit sich bringt. Durch die Formgebung des Laufrades bzw. dessen Schaufeln und dessen geeignete Positionierung relativ zum Pumpengehäuse ist es nun möglich, die Reduktion des Wirkungsgrades zumindest teilweise zu kompensieren. Weiterhin können dadurch Blutschädigungen durch Hämolyse reduziert werden.

[0007] Es wird eine Axialpumpe für ein Herzunterstützungssystem vorgestellt, wobei die Axialpumpe folgende Merkmale aufweist:

ein Pumpengehäuse zur Anordnung in einem Blutgefäß; und

einen in dem Pumpengehäuse um eine Drehachse drehbar gelagerten oder lagerbaren Pumpenläufer bestehend aus einer Nabe und zumindest einem zumindest abschnittsweise schraubenförmig um die Nabe gewundenen Schaufelelement zum Fördern eines Fördermediums in Richtung der Drehachse, wobei das Schaufelelement zumindest einen Schaufelabschnitt mit einer wellenförmigen Schaufelkrümmung aufweist.

[0008] Unter einer Axialpumpe kann eine Kreiselpumpe mit integriertem Elektromotor zum axialen Ansaugen eines Fördermediums verstanden werden. Ein Ausstoßen des angesaugten Fördermediums kann beispielsweise in radialer oder diagonaler Richtung durch eine oder mehrere seitliche Austrittsöffnungen im Pumpengehäuse erfolgen. Unter einem Herzunterstützungssystem kann insbesondere eine minimalinvasiv durch einen Katheter in der Aorta oder in einer Herzkammer platzierbare, rohr- oder schlauchförmige Pumpvorrichtung verstanden werden. Beispielsweise kann das Herzunterstützungssystem einen maximalen Außendurchmesser zwischen 10 und 15 mm aufweisen. Unter einem Pumpengehäuse kann ein Gehäuse in Form eines Schlauches oder Rohres verstanden werden. Unter einem Blutgefäß kann eine (Haupt-)Schlagader oder eine Herzkammer verstanden werden. Unter einem Fördermedium kann dementsprechend Blut verstanden werden. Unter einem Pumpenläufer kann ein axial anströmbares Laufrad der Axialpumpe verstanden werden. Der Pumpenläufer kann beispielsweise zwei

oder mehr Schaufelelemente aufweisen, die zumindest abschnittsweise schraubenförmig um die Nabe gewunden sein können und zumindest einen Schraubenabschnitt mit einer wellenförmigen Schaufelkrümmung aufweisen können. Unter einer wellenförmigen Schaufelkrümmung kann eine Wellenform einer Skelettlinie des Schaufelelements verstanden werden, die durch zumindest einen Wellenbauch und zumindest ein Wellental charakterisiert ist.

[0009] Gemäß einer Ausführungsform kann das Schaufelelement durch eine oder mehrere Skelettlinie mit je zumindest einem Wendepunkt und/oder eine lokal konstante oder variable Aufdickung beschrieben oder definiert sein, insbesondere wobei eine Tangentensteigung einer eine Krümmung der Skelettlinie repräsentierenden Tangente in Strömungsrichtung zunächst zunimmt und ab dem Wendepunkt wieder abnimmt, um die wellenförmige Schaufelkrümmung zu erzeugen. Dadurch kann die wellenförmige Schaufelkrümmung in Richtung der Skelettlinie erzeugt werden.

[0010] Gemäß einer weiteren Ausführungsform kann eine Mantelfläche des Pumpengehäuses zumindest eine Austrittsöffnung zum seitlichen Ausleiten des Fördermediums aufweisen. Dabei kann der Schaufelabschnitt im eingebauten Zustand des Pumpenläufers der Austrittsöffnung zumindest teilweise gegenüberliegen. Dadurch kann ein effizientes und schonendes radiales oder diagonales Ausleiten des Fördermediums gewährleistet werden.

[0011] Der Wendepunkt kann etwa im Bereich der Austrittsöffnung, insbesondere im Bereich einer im Betrieb der Axialpumpe stromaufwärts liegenden Kante der Austrittsöffnung, also beispielsweise dem Beginn der Austrittsöffnung, liegen. Dadurch kann die Effizienz der Axialpumpe weiter gesteigert werden.

[0012] Gemäß einer weiteren Ausführungsform kann das Schaufelelement ausgehend von einem Anfang des Pumpenläufers schraubenförmig um die Nabe gewunden sein, wobei die Tangentensteigung ausgehend von dem Anfang des Pumpenläufers zunimmt und ab dem Wendepunkt wieder abnimmt. Eine solche Ausführungsform steigert besonders gut den Wirkungsgrad der Axialpumpe bei reduzierter Blutschädigung.

[0013] Gemäß einer weiteren Ausführungsform kann die wellenförmige Schaufelkrümmung in Richtung einer radialen Ausdehnung des Schaufelelements variieren. Unter einer radialen Ausdehnung kann eine Ausdehnung in radialer Richtung ausgehend von der Drehachse verstanden werden. Dadurch kann die Schaufelkrümmung in mehreren Richtungen optimal an verschiedene Randbedingungen angepasst werden.

[0014] Gemäß einer weiteren Ausführungsform kann die wellenförmige Schaufelkrümmung mit zunehmendem Abstand von der Drehachse zunehmen. Somit kann eine größtmögliche Effizienz der Axialpumpe erreicht werden.

[0015] Es ist ferner von Vorteil, wenn die Nabe einen in Strömungsrichtung zunehmenden Durchmesser aufweist. Dadurch kann das schonende Ausleiten des Fördermediums in radialer oder diagonaler Richtung zur Drehachse unterstützt werden.

[0016] Der hier vorgestellte Ansatz schafft zudem ein Verfahren zum Herstellen einer Axialpumpe für ein Herzunterstützungssystem, wobei das Verfahren folgende Schritte umfasst:

Bilden eines Pumpengehäuses zur Anordnung in einem Blutgefäß und

eines Pumpenläufers bestehend aus einer Nabe und zumindest einem zumindest abschnittsweise schraubenförmig um die Nabe gewundenen Schaufelelement zum Fördern eines Fördermediums, wobei das Schaufelelement zumindest einen Schaufelabschnitt mit einer wellenförmigen Schaufelkrümmung aufweist; und

Anordnen des Pumpenläufers in dem Pumpengehäuse, wobei der Pumpenläufer um eine Drehachse drehbar gelagert wird, um das Fördermedium in Richtung der Drehachse zu fördern.

[0017] Dieses Verfahren kann beispielsweise in Software oder Hardware oder in einer Mischform aus Software und Hardware, beispielsweise in einem Steuergerät, implementiert sein.

[0018] Der hier vorgestellte Ansatz schafft ferner eine Vorrichtung, die ausgebildet ist, um die Schritte einer Variante eines hier vorgestellten Verfahrens in entsprechenden Einrichtungen durchzuführen, anzusteuern bzw. umzusetzen. Auch durch diese Ausführungsvariante der Erfindung in Form einer Vorrichtung kann die der Erfindung zugrunde liegende Aufgabe schnell und effizient gelöst werden.

[0019] Hierzu kann die Vorrichtung zumindest eine Recheneinheit zum Verarbeiten von Signalen oder Daten, zumindest eine Speichereinheit zum Speichern von Signalen oder Daten, zumindest eine Schnittstelle zu einem Sensor oder einem Aktor zum Einlesen von Sensorsignalen von dem Sensor oder zum Ausgeben von Daten- oder Steuersignalen an den Aktor und/oder zumindest eine Kommunikationsschnittstelle zum Einlesen oder Ausgeben von Daten aufweisen, die in ein Kommunikationsprotokoll eingebettet sind. Die Recheneinheit kann beispielsweise ein Signalprozessor, ein Mikrocontroller oder dergleichen sein, wobei die Speichereinheit ein Flash-Speicher, ein EPROM oder eine magnetische Speiche-

reinheit sein kann. Die Kommunikationsschnittstelle kann ausgebildet sein, um Daten drahtlos und/oder leitungsgebunden einzulesen oder auszugeben, wobei eine Kommunikationsschnittstelle, die leitungsgebundene Daten einlesen oder ausgeben kann, diese Daten beispielsweise elektrisch oder optisch aus einer entsprechenden Datenübertragungsleitung einlesen oder in eine entsprechende Datenübertragungsleitung ausgeben kann.

[0020] Von Vorteil ist auch ein Computerprogrammprodukt oder Computerprogramm mit Programmcode, der auf einem maschinenlesbaren Träger oder Speichermedium wie einem Halbleiterspeicher, einem Festplattenspeicher oder einem optischen Speicher gespeichert sein kann und zur Durchführung, Umsetzung und/oder Ansteuerung der Schritte des Verfahrens nach einer der vorstehend beschriebenen Ausführungsformen verwendet wird, insbesondere wenn das Programmprodukt oder Programm auf einem Computer oder einer Vorrichtung ausgeführt wird.

[0021] Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in den Zeichnungen dargestellt und in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Es zeigt:

Fig. 1 eine schematische Darstellung eines Herzunterstützungssystems mit einer Axialpumpe gemäß einem Ausführungsbeispiel;

Fig. 2 eine schematische Darstellung der Axialpumpe aus **Fig. 1** in der Seitenansicht;

Fig. 3 eine schematische Darstellung eines Längsschnitts durch ein Schaufelelement aus den **Fig. 1** und **Fig. 2**;

Fig. 4 eine schematische Darstellung der Axialpumpe aus den **Fig. 1** und **Fig. 2** in perspektivischer Ansicht;

Fig. 5 eine schematische Darstellung eines Querschnitts durch einen Pumpenläufer aus den **Fig. 1** und **Fig. 2**;

Fig. 6 ein Diagramm zur Darstellung eines Verlaufs eines Schaufelwinkels β aus **Fig. 3**;

Fig. 7 ein Ablaufdiagramm eines Verfahrens zum Herstellen einer Axialpumpe gemäß einem Ausführungsbeispiel; und

Fig. 8 eine schematische Darstellung einer Vorrichtung zum Ausführen und/oder Ansteuern des Verfahrens aus **Fig. 7**.

[0022] In der nachfolgenden Beschreibung günstiger Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung werden für die in den verschiedenen Figuren dargestellten und ähnlich wirkenden Elemente gleiche oder ähnliche Bezugszeichen verwendet, wobei auf eine wiederholte Beschreibung dieser Elemente verzichtet wird.

[0023] **Fig. 1** zeigt eine schematische Darstellung eines Herzunterstützungssystems **100** mit einer Axialpumpe **102** gemäß einem Ausführungsbeispiel. Das Herzunterstützungssystem **100** weist eine rohr- oder schlauchförmige Gestalt auf. Beispielhaft ist das Herzunterstützungssystem **100** als ein minimalinvasiv durch einen Katheter in ein Blutgefäß wie etwa die Aorta oder eine Herzkammer einführbares axiales Kreiselpumpensystem realisiert. Die Axialpumpe **102** umfasst ein Pumpengehäuse **104**, das als ein rohrförmiger Abschnitt des Herzunterstützungssystems **100** realisiert ist und beispielhaft drei einander gegenüberliegende seitliche Austrittsöffnungen **106** zum seitlichen Ausleiten eines Fördermediums, hier von Blut, aufweist. Gemäß alternativen Ausführungsbeispielen weist das Pumpengehäuse **104** nur eine, zwei, drei oder auch mehr als drei in Umfangsrichtung verteilte Austrittsöffnungen **106** auf. In dem Pumpengehäuse **104** drehbar gelagert ist ein Pumpenläufer **108**, auch Laufrad genannt, der in dem in **Fig. 1** gezeigten zusammengebauten Zustand der Axialpumpe **102** abschnittsweise den Austrittsöffnungen **106** gegenüberliegt. Der Pumpenläufer **108** dient zum axialen Ansaugen und radialen oder diagonalen Ausstoßen des Blutes über die Austrittsöffnungen **106**.

[0024] Um einen möglichst effizienten und schonenden Transport des Blutes zu gewährleisten, weist der Pumpenläufer **108** zumindest ein schraubenförmig gewundenes Schaufelelement **110** auf. Die Skelettlinie des Schaufelelements **110** weist hierbei im Bereich des stromauf liegenden Beginns der Austrittsöffnungen **106** einen Wendepunkt auf.

[0025] **Fig. 2** zeigt eine schematische Darstellung der Axialpumpe **102** aus **Fig. 1** in der Seitenansicht. Zu erkennen ist das Schaufelelement **110**, das um eine Nabe **200** der Axialpumpe **102** schraubenförmig gewunden ist. Die Nabe **200** bildet dabei einen inneren Kern des Pumpenläufers **108**. Eine Strömungsrichtung des Fördermediums ist mit drei Pfeilen schematisch angedeutet. Das Ansaugen des Fördermediums erfolgt durch eine dem Pumpenläufer **108** vorgeschaltete stirnseitige Ansaugöffnung im Pumpengehäuse **104**.

[0026] Gemäß diesem Ausführungsbeispiel erstreckt sich das Schaufelelement **110** ausgehend von einem stromauf liegenden Ende des Pumpenläufers **108** über eine gesamte Länge oder zumindest über einen größten Teil der Nabe **200**. Dabei weist die Nabe **200** einen in Strömungsrichtung zunehmenden Durchmesser auf, sodass sich eine in Strömungsrichtung dicker werdende Gestalt der Nabe **200** ergibt. Dadurch wird das radiale bzw. diagonale Ausleiten des Fördermediums erleichtert.

[0027] Das Schaufelelement **110** weist einen Schaufelabschnitt **202** mit einer wellenförmigen Schaufel-

krümmung auf, die durch eine mehrfache Krümmung einer Skelettlinie **204** des Schaufelelements **110** definiert ist. Unter einer wellenförmigen Schaufelkrümmung ist hierbei eine mit zumindest einem Vorzeichenwechsel verbundene Krümmungsänderung des Schaufelabschnitts **202** zu verstehen.

[0028] Wie aus **Fig. 2** ersichtlich, befindet sich im eingebauten Zustand des Pumpenläufers **108** zumindest ein Teilabschnitt des Schaufelabschnitts **202** gegenüber den Austrittsöffnungen **106**.

[0029] Gemäß diesem Ausführungsbeispiel befindet sich der Schaufelabschnitt **202** zumindest teilweise im Bereich einer strömungszugewandten Kante **206** der Austrittsöffnung **106**. Der Schaufelabschnitt **202** repräsentiert dabei einen Übergang zwischen einer konvexen und einer konkaven Wölbung.

[0030] Beispielhaft umfasst der Pumpenläufer **108** gemäß **Fig. 2** zwei Schaufelelemente **110**, die gleichsinnig um die Nabe **200** gewunden sind und je den Schaufelabschnitt **202** aufweisen. Gemäß einem alternativen Ausführungsbeispiel ist der Pumpenläufer **108** mit mehr als zwei solcher Schaufelelemente **110** realisiert.

[0031] **Fig. 3** zeigt eine schematische Darstellung der Abwicklung eines Schaufelelements **110** aus den **Fig. 1** und **Fig. 2**. Eingezeichnet sind beispielhaft zwei Schaufelwinkelpaare α_1, β_1 und α_2, β_2, die je eine Tangentensteigung einer die Krümmung der Skelettlinie **204** repräsentierenden Tangente **300** repräsentieren. Die Tangente **300** ist je in einem zylindrischen Koordinatensystem mit einer zu einer Drehachse **302** des Pumpenläufers parallelen z-Achse und einer zur z-Achse senkrechten ϕ-Achse eingezeichnet. Die ϕ-Achse repräsentiert eine Umfangsrichtung des Pumpenläufers.

[0032] Wie aus **Fig. 3** ersichtlich, wird die Tangentensteigung in Strömungsrichtung, angedeutet durch einen vertikalen Pfeil, zunächst größer und nimmt anschließend wieder ab . Gemäß diesem Ausführungsbeispiel nimmt die Tangentensteigung ausgehend von einer Schaufelvorderkante **304** bis zu einer Schaufelhinterkante **306** des Schaufelelements **110** zunächst kontinuierlich zu und bei Erreichen des Wendepunktes der Skelelettlinie **310** wieder ab. Ein Punkt **308** markiert eine Position eines Strömungsaustritts über die Austrittsöffnungen des Pumpengehäuses, genauer einen Beginn des Strömungsaustritts in axialer Richtung. Hierbei ist es anzustreben das der Wendepunkt **310** und der Punkt **308** des Beginns des Strömungsaustritts in räumlicher Nähe sind.

[0033] Wie bereits beschrieben, ist der Pumpenläufer gemäß einem Ausführungsbeispiel mit mindestens zwei Schaufelelementen **110** realisiert. Das Fördermedium wird dem Pumpenläufer axial zugeführt oder davon angesaugt und radial und diagonal durch eine oder mehrere Austrittsöffnungen im Pumpengehäuse ausgestoßen. Die Schaufelelemente **110** sind dabei so gestaltet, dass sich der Winkel α zwischen der mit einer Schaufeloberfläche oder der Skelettlinie **204** gebildeten Tangente **300** und der Drehachse **302** bzw. der z-Achse in axialer Richtung ändert. In entgegengesetztem Maße ändert sich der Winkel β zwischen der Umfangsrichtung bzw. der ϕ-Achse und der Schaufeloberfläche oder der Skelettlinie **204**. Der Winkel β ändert sich derart, dass er zumindest im Bereich des größten Durchmessers des Pumpenläufers, also in einem Schnitt im Bereich der Schaufelspitzen der Schaufelelemente **110**, vom Beginn des Pumpenläufers an, also ab der Schaufelvorderkante **304**, in Strömungsrichtung größer wird. Insbesondere nimmt der Winkel β im Bereich des Beginns des Strömungsaustritts **308** bzw. in räumlicher Nähe zu diesem seinen größten Wert an, zumindest im Bereich des größten Durchmessers des Pumpenläufers, also in einem Schnitt im Bereich der Schaufelspitzen der Schaufelelemente **110**.

[0034] **Fig. 4** zeigt eine schematische Darstellung der Axialpumpe **102** aus den **Fig. 1** und **Fig. 2** in perspektivischer Ansicht. Ein von dem Pumpengehäuse umschlossener Bereich des Pumpenläufers **108** ist mit einem Rechteck **400** markiert. Gut zu erkennen ist die wellenförmige Schaufelkrümmung des Schaufelelements **110**. Zum Vergleich ist neben dem Schaufelelement **110** ein herkömmliches Schaufelelement **402** ohne wellenförmige Schaufelkrümmung eingezeichnet.

[0035] **Fig. 5** zeigt eine schematische Darstellung eines Querschnitts durch den Pumpenläufer **108** aus den **Fig. 1** und **Fig. 2**. Eingezeichnet sind fünf horizontale Linien, die unterschiedliche Schaufelhöhen des Schaufelelements **110** relativ zu einer Oberfläche der Nabe **200** repräsentieren. Dabei repräsentiert eine erste Linie **501 0** Prozent, eine zweite Linie **502 25** Prozent, eine dritte Linie **503 50** Prozent, eine vierte Linie **504 75** Prozent und eine fünfte Linie **505 100** Prozent einer maximalen Schaufelhöhe.

[0036] **Fig. 6** zeigt ein Diagramm zur Darstellung eines Verlaufs des Schaufelwinkels β aus **Fig. 3** entlang einer normierten meridionalen Koordinate m/mMax. Der Verlauf des Schaufelwinkels β ist anhand von fünf Kurven in Abhängigkeit von der Schaufelhöhe des Schaufelelements, d. h. von einem radialen Abstand dessen Skelettlinie von der Nabe, für verschiedene Schaufelschnitte dargestellt. Analog zu **Fig. 5** entspricht eine erste Kurve **601** einem Schnitt des Schaufelelements entlang der ersten Linie **501** auf Höhe der Nabe bei 0 Prozent Schaufelhöhe, eine zweite Kurve **602** einem Schnitt des Schaufelelements entlang der zweiten Linie **502** bei 25 Prozent Schaufelhöhe, eine dritte Kurve **603** einem Schnitt

des Schaufelelements entlang der dritten Linie **503** bei 50 Prozent Schaufelhöhe, eine vierte Kurve **604** einem Schnitt des Schaufelelements entlang der vierten Linie **504** bei 75 Prozent Schaufelhöhe und eine fünfte Kurve **605** einem Schnitt des Schaufelelements entlang der fünften Linie **505** bei 100 Prozent Schaufelhöhe, also an den Schaufelspitzen bei maximalem Laufraddurchmesser. Der Beginn des Strömungsaustritts an den Austrittsöffnungen des Pumpengehäuses ist mit einem schraffierten Bereich **606** markiert.

[0037] Aus dem Diagramm ist zum einen ersichtlich, dass der Schaufelwinkel β, und damit die Krümmung der Skelettlinie, in Strömungsrichtung je nach radialem Abstand von der Nabe unterschiedliche Verläufe aufweist. Zum anderen ist daraus ersichtlich, dass der Schaufelwinkel β in den betrachteten Schnitten jeweils in Strömungsrichtung zunächst zunimmt und ab einem Hochpunkt, der hier ein jeweiliges Maximum der Kurven bzw. der Schaufelwinkel β repräsentiert, wieder abnimmt. Die Lage des Hochpunktes entlang der meridionalen Koordinate variiert dabei je nach radialem Abstand der Skelettlinie von der Nabe. Gemäß **Fig. 6** liegt der Umkehrpunkt für die Schaufelhöhen von 25 bis 100 Prozent entweder in oder kurz vor oder kurz hinter dem schraffierten Bereich **606**. Hingegen befindet sich der Umkehrpunkt für die Schaufelhöhe von 0 Prozent deutlich vor dem schraffierten Bereich **606**, hier in einem Bereich der meridionalen Koordinate zwischen 10 und 20 Prozent.

[0038] Gemäß einem Ausführungsbeispiel weist der Pumpenläufer den Hochpunkt im Schaufelwinkel β im Bereich des Beginns des Strömungsaustritts über die Austrittsöffnungen oder auch in räumlicher Nähe zum Strömungsaustritt, zumindest aber im äußeren Bereich an den Schaufelspitzen auf. Es liegt in diesem Bereich also eine Änderung der Skelettlinienkrümmung von konkav nach konvex vor. Durch diese Formgebung des Schaufelelements kann der Drall in der Strömung reduziert werden, was einen effizienten Betrieb und, damit verbunden, eine schonende Fluidförderung mit reduzierter Schädigung ermöglicht.

[0039] **Fig. 7** zeigt ein Ablaufdiagramm eines Verfahrens **700** zum Herstellen einer Axialpumpe gemäß einem Ausführungsbeispiel, etwa der vorangehend anhand der **Fig. 1** bis **Fig. 6** beschriebenen Axialpumpe. Dabei werden in einem Schritt **710** das Pumpengehäuse und der Pumpenläufer mit der Nabe und dem schraubenförmig um die Nabe gewundenen Schaufelelement gebildet. Das Schaufelelement wird dabei zumindest abschnittsweise mit einer wellenförmigen Schaufelkrümmung ausgeformt. In einem weiteren Schritt **720** erfolgt das Anordnen des Pumpenläufers in dem Pumpengehäuse. Dabei wird der Pumpenläufer um eine Drehachse drehbar gelagert, um das Fördermedium in Richtung der Drehachse zu fördern.

[0040] **Fig. 8** zeigt eine schematische Darstellung einer Vorrichtung **800** zum Ausführen und/oder Ansteuern des Verfahrens **700** aus **Fig. 7**. Die Vorrichtung **800** umfasst eine erste Einheit **810** zum Bilden des Pumpengehäuses und des Pumpenläufers sowie eine zweite Einheit **820** zum Anordnen des Pumpenläufers im Pumpengehäuse.

[0041] Umfasst ein Ausführungsbeispiel eine „und/oder“-Verknüpfung zwischen einem ersten Merkmal und einem zweiten Merkmal, so ist dies so zu lesen, dass das Ausführungsbeispiel gemäß einer Ausführungsform sowohl das erste Merkmal als auch das zweite Merkmal und gemäß einer weiteren Ausführungsform entweder nur das erste Merkmal oder nur das zweite Merkmal aufweist.

Patentansprüche

1. Axialpumpe (102) für ein Herzunterstützungssystem (100), wobei die Axialpumpe (102) folgende Merkmale aufweist:
ein Pumpengehäuse (104) zur Anordnung in einem Blutgefäß; und
einen in dem Pumpengehäuse (104) um eine Drehachse (302) drehbar gelagerten oder lagerbaren Pumpenläufer (108) bestehend aus einer Nabe (200) und zumindest einem zumindest abschnittsweise schraubenförmig um die Nabe (200) gewundenen Schaufelelement (110) zum Fördern eines Fördermediums in Richtung der Drehachse (302), wobei das Schaufelelement (110) zumindest einen Schaufelabschnitt (202) mit einer wellenförmigen Schaufelkrümmung aufweist.

2. Axialpumpe (102) gemäß Anspruch 1, bei der das Schaufelelement (110) durch eine oder mehrere Skelettlinie (204) mit zumindest je einem Wendepunkt und/oder durch eine lokal variable Verdickung definiert ist, insbesondere wobei eine Tangentensteigung einer eine Krümmung der Skelettlinie (204) repräsentierenden Tangente (300) in Strömungsrichtung zunächst zunimmt und ab dem Wendepunkt wieder abnimmt, um die wellenförmige Schaufelkrümmung zu erzeugen.

3. Axialpumpe (102) gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, bei der eine Mantelfläche des Pumpengehäuses (104) zumindest eine Austrittsöffnung (106) zum seitlichen Ausleiten des Fördermediums aufweist, wobei der Schaufelabschnitt (202) im eingebauten Zustand des Pumpenläufers (108) der Austrittsöffnung (106) zumindest teilweise gegenüberliegt.

4. Axialpumpe (102) gemäß Anspruch 2 und 3, bei der der Wendepunkt zumindest einer Skelettlinie im Bereich der Austrittsöffnung (106), insbesondere im Bereich einer strömungszugewandten oder strom-

aufwäts liegenden Kante (206) der Austrittsöffnung (106), liegt.

5. Axialpumpe (102) gemäß einem der Ansprüche 2 bis 4, bei der das Schaufelelement (110) ausgehend von einem Anfang (304) des Pumpenläufers (108) schraubenförmig um die Nabe (200) gewunden ist, wobei die Tangentensteigung ausgehend von dem Anfang (304) des Pumpenläufers (108) zunimmt und ab dem Wendepunkt wieder abnimmt.

6. Axialpumpe (102) gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, bei der die wellenförmige Schaufelkrümmung in Richtung einer radialen Ausdehnung des Schaufelabschnitts (202) variiert.

7. Axialpumpe (102) gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, bei der die wellenförmige Schaufelkrümmung mit zunehmendem Abstand von der Drehachse (302) zunimmt.

8. Axialpumpe (102) gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, bei der die Nabe (200) einen in Strömungsrichtung zunehmenden Durchmesser aufweist.

9. Verfahren (700) zum Herstellen einer Axialpumpe (102) für ein Herzunterstützungssystem (100), wobei das Verfahren (700) folgende Schritte umfasst:
Bilden (710) eines Pumpengehäuses (104) zur Anordnung in einem Blutgefäß und eines Pumpenläufers (108) bestehend aus einer Nabe (200) und zumindest einem zumindest abschnittsweise schraubenförmig um die Nabe (200) gewundenen Schaufelelement (110) zum Fördern eines Fördermediums, wobei das Schaufelelement (110) zumindest einen Schaufelabschnitt (202) mit einer wellenförmigen Schaufelkrümmung aufweist; und
Anordnen (720) des Pumpenläufers (108) in dem Pumpengehäuse (104), wobei der Pumpenläufer (108) um eine Drehachse (302) drehbar gelagert wird, um das Fördermedium in Richtung der Drehachse (302) zu fördern.

10. Vorrichtung (800) mit Einheiten (810, 820), die ausgebildet sind, um das Verfahren (700) gemäß Anspruch 9 auszuführen und/oder anzusteuern.

11. Computerprogramm, das ausgebildet ist, um das Verfahren (700) gemäß Anspruch 9 auszuführen und/oder anzusteuern.

12. Maschinenlesbares Speichermedium, auf dem das Computerprogramm nach Anspruch 11 gespeichert ist.

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

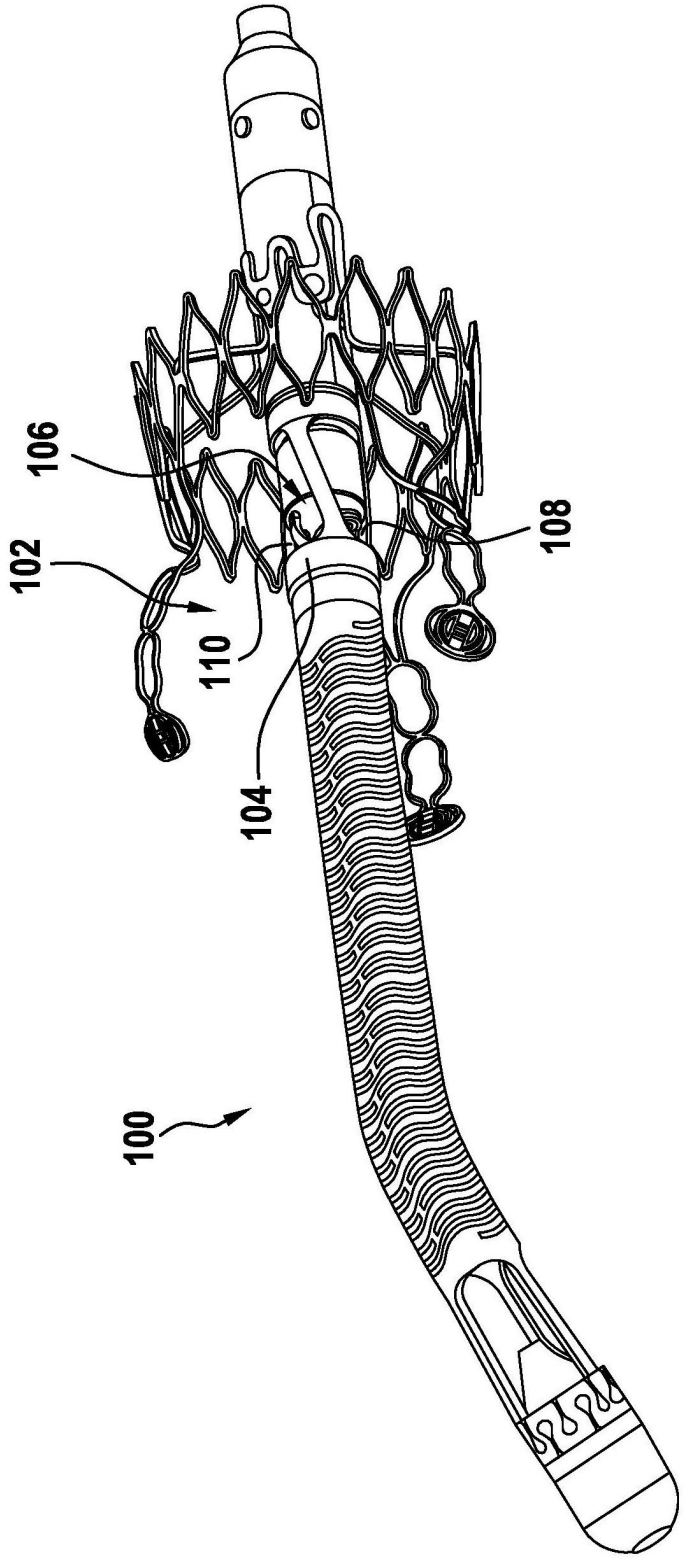


Fig. 1

Fig. 2

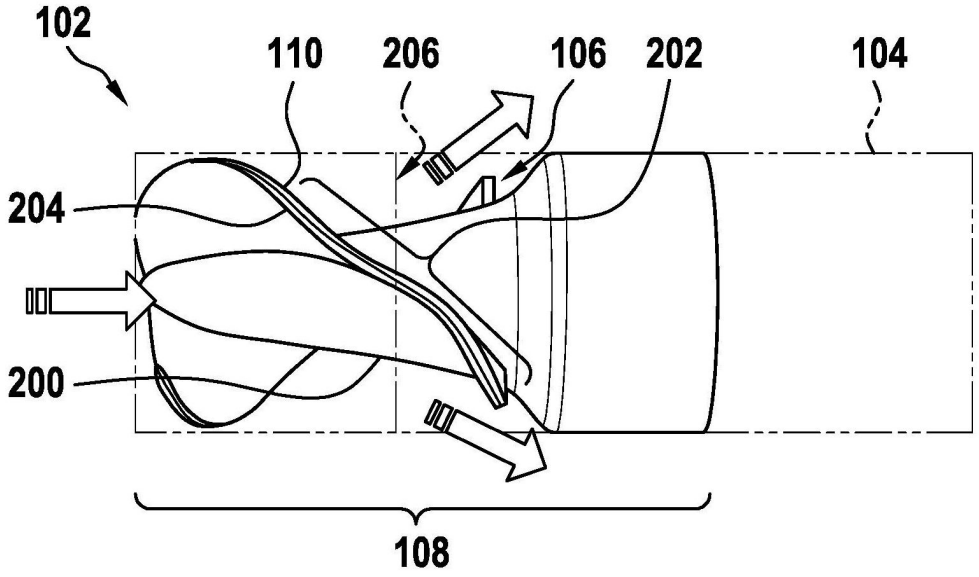

102
110
206
106
202
104
204
200
108

Fig. 3

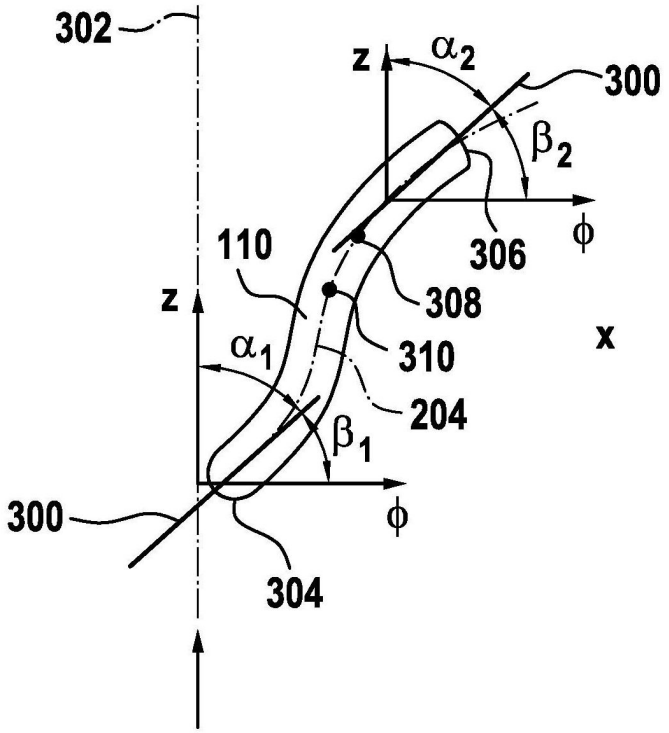

302
z
α_2
300
β_2
110
306
ϕ
z
308
x
α_1
310
204
β_1
300
ϕ
304

Fig. 4

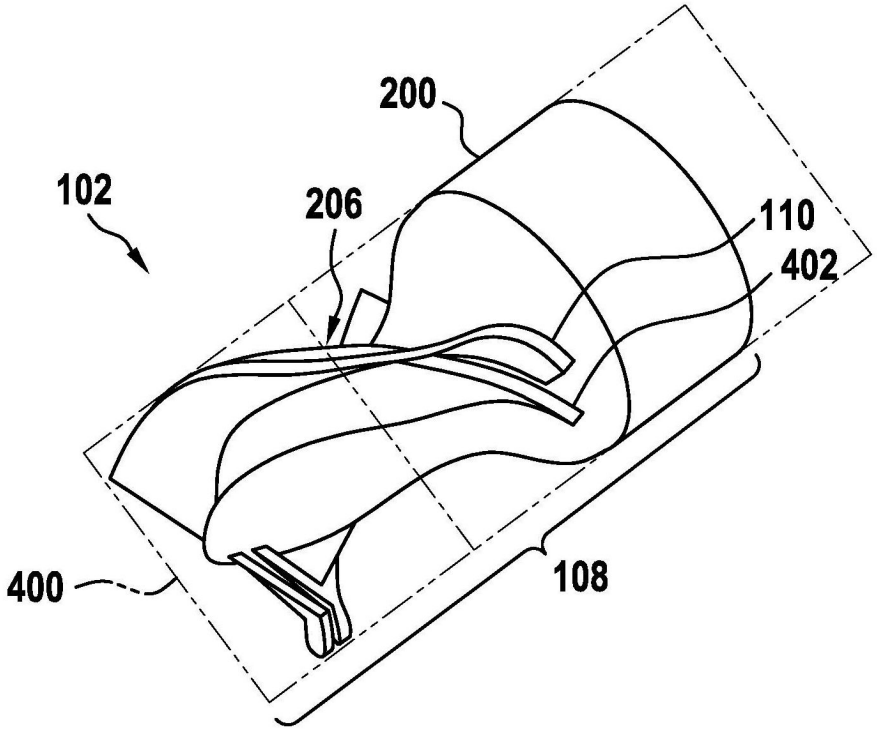

200
102
206
110
402
400
108

Fig. 5

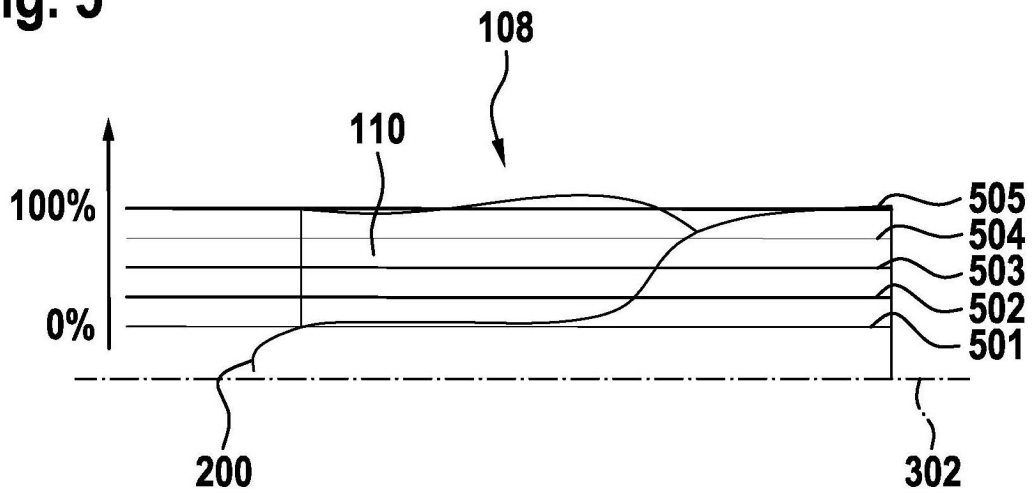

108
110
100%
0%
505
504
503
502
501
200
302

Fig. 6

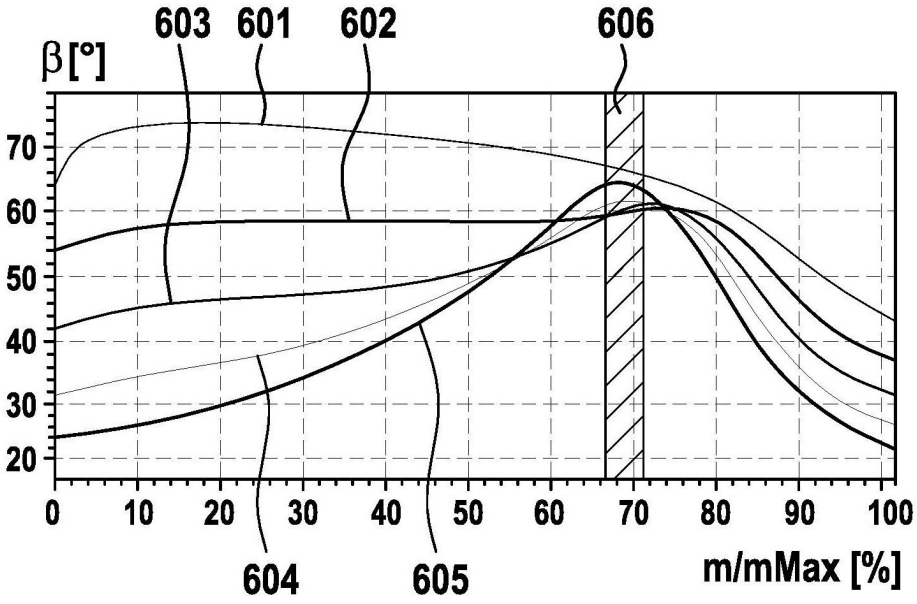

603
601
602
606
β [°]
70
60
50
40
30
20
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
604
605
m/mMax [%]

Fig. 7

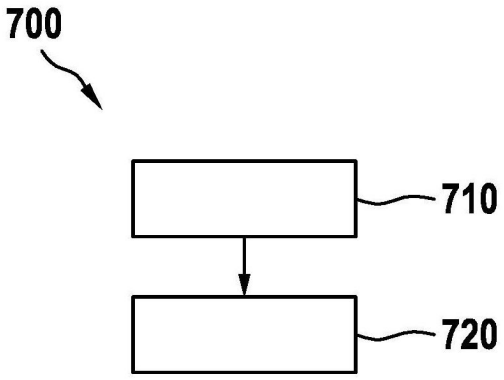

700
710
720

Fig. 8

