



(10) **DE 10 2014 012 480 B4** 2016.06.09

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2014 012 480.0**
(22) Anmeldetag: **27.08.2014**
(43) Offenlegungstag: **03.03.2016**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **09.06.2016**

(51) Int Cl.: **B23P 15/04 (2006.01)**
F04D 29/18 (2006.01)
F01D 5/34 (2006.01)
B22F 3/105 (2006.01)
B33Y 10/00 (2015.01)

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

(73) Patentinhaber:
Rosswag GmbH, 76327 Pfinztal, DE

(74) Vertreter:
**mepat Patentanwälte Partnerschaftsgesellschaft
Dr. Mehl-Mikus, Goy, Dr. Drobnik mbB, 76135
Karlsruhe, DE**

(72) Erfinder:
**Donisi, Sven, Dr., 76327 Pfinztal, DE; Graf, Gregor,
76327 Pfinztal, DE**

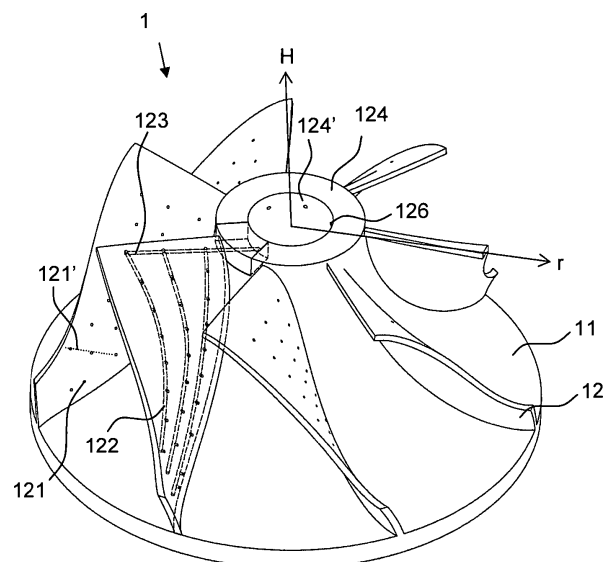
(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE 10 2006 049 216	A1
DE 10 2010 032 676	A1
DE 10 2010 033 889	A1
DE 10 2011 111 011	A1
DE 10 2013 219 250	A1
DE 14 76 877	A
EP 2 522 810	A1

(54) Bezeichnung: **Herstellverfahren für eine Beschauflung einer Strömungsmaschine, Beschauflung einer Strömungsmaschine und Laufrad**

(57) Hauptanspruch: Herstellverfahren für eine Beschauflung einer Strömungsmaschine, wobei die Beschauflung einen Schaufelträger (11) aufweist, mit dem zumindest eine Schaufel (12) verbunden ist, wobei das Herstellverfahren unter Verwendung einer generativen Fertigungsverfahren ausgeführt wird, umfassend die Schritte:

a) Bereitstellen eines Schaufelträgers (11) und Einlegen in einen Fertigungsraum der generativen Fertigungsverfahren,
b) in die Fertigungsverfahren Laden eines 3D-Volumen-Datensatzes, der die zumindest eine Schaufel (12) beschreibt,
c) Bereitstellen eines Ausgangsmaterials für die Schaufel (12) und mit der generativen Fertigungsverfahren vom Schaufelträger (11) ausgehend schichtweise Herstellen eines Materialzusammenhalts des Ausgangsmaterials, dabei stoffschlüssig Verbinden einer ersten Schicht mit dem Schaufelträger (11), Herstellen der Schaufel (12) und Erhalten der Beschauflung.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Herstellverfahren für eine Beschau felung einer Strömungsmaschine, die Beschau felung selbst und ein Laufrad einer Strömungsmaschine.

[0002] Das Laufrad ist das zentrale Bauteil einer Strömungsmaschine, egal ob Arbeitsmaschine oder Kraftmaschine, etwa Pumpe, Turbine, Ventilator usw., wobei dessen Design, insbesondere die Form der Laufschaufeln, den Wirkungsgrad und den optimalen Betriebspunkt bestimmt. Die Laufschaufelgeometrie wird daher unter Zuhilfenahme von numerischen Simulationsmethoden und/oder Strömungsmessungen an den entsprechenden Einsatzzweck angepasst. Soll eine Strömungsmaschine jedoch einen sehr weiten Betriebsbereich abdecken, muss stets ein Kompromiss gefunden werden; die Auslegung erfolgt für einen bestimmten Betriebspunkt.

[0003] Um über einen weiteren Bereich von Betriebspunkten einen effizienten Betrieb zu erreichen ist bekannt, die turbulente Grenzschicht abzusaugen, um dadurch ein laminares Anliegen der Strömung an der Oberfläche der Laufschaufel zu ermöglichen. Hierzu werden an der Laufschaufeloberfläche Öffnungen vorgesehen, die mit einem Unterdruckerzeuger verbunden sind. Solche Strömungsmaschinen mit Einrichtungen zur Grenzschichtbeeinflussung sind beispielsweise aus DE 1476877, DE 10 2010 033 889 A1 und DE 10 2010 032 676 A1 bekannt. Solche Lauf- oder Leiträder mit aufwändigeren Geometrien, etwa mit Öffnungen zur Grenzschichtbeeinflussung und deren Kanälen zum Anschluss an eine Differenzdruckquelle sind mit konventioneller Fertigungstechnik, d. h. beliebigen Kombinationen von Urformen, Umformen und Trennen mit der Notwendigkeit zum Werkzeugbau sehr schwer und teuer herstellbar.

[0004] Darüber hinaus ergeben sich auch bei Lauf- oder Leiträdern ohne Öffnungen zur Grenzschichtbeeinflussung, die als Einzelstück oder in Kleinserien hergestellt werden, sehr hohe Stückkosten, die eine Fertigung in vielen Fällen unwirtschaftlich machen.

[0005] Die Fertigung solcher Bauteile wird daher auch in verschiedenen Dokumenten des Standes der Technik adressiert. So ist ein Fertigungsverfahren für einen Turbinenrotor, bei dem vorgesehen ist, den Turbinenrotor zumindest teilweise durch ein generatives Herstellverfahren zu erzeugen aus der DE 10 2006 049 216 A1 bekannt. Der Turbinenrotor besteht aus einem Grundkörper (Scheibe), von dem mehrere Schaufeln abragen. Es können die Schaufeln, der Grundkörper oder beide generativ gefertigt sein. Die einzelnen Schaufeln bzw. die Schaufelgesamtheit wird zunächst durch ein generatives Verfah-

ren als Fertigteil erzeugt, um dann über ein Fügverfahren mit dem Träger verbunden zu werden.

[0006] DE 10 2011 111 011 A1 betrifft ein Verstell-schaufelelement und dessen Herstellung durch ein generatives Fertigungsverfahren, ohne aber die Verbindung der Schaufel zum Schaufelträger zu beschreiben.

[0007] Auch aus der EP 2 522 810 A1 ist ein Schaufelelement und ein Verfahren zu dessen Herstellung offenbart. Das Schaufelelement wird generativ erzeugt; darin wird ein Hohlraum belassen, sowie eine Öffnung zum Entleeren des Hohlraums von nicht verfestigtem Pulvermaterial. In den entleerten Hohlraum wird sodann ein Kern aus einem anderen Werkstoff eingesetzt.

[0008] Schließlich geht die DE 10 2013 219 250 A1 darauf ein, dass Bauteile im SLM-Verfahren gefertigt werden können und dass es möglich ist, etwa vorgefertigte Fahrwerksbauteile, etwa geschmiedete oder gegossene, als Basis zu nehmen und darauf durch Laserschmelzen von Metallpulvern bspw. Verstärkungsbereiche anzufügen.

[0009] Ausgehend von diesem Stand der Technik ist es Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Herstellverfahren für eine Beschau felung einer Strömungsmaschine zu schaffen, das es ermöglicht, die Beschau felung mit verbesserten mechanischen Eigenschaften und Strömungseigenschaften auch als Einzelstück wirtschaftlich herzustellen.

[0010] Diese Aufgabe wird durch ein Herstellverfahren für eine Beschau felung mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst.

[0011] Darüber hinaus ergibt sich die Aufgabe, eine Beschau felung für eine Strömungsmaschine zu schaffen, die sich durch eine erhöhte mechanische Belastbarkeit, bessere Strömungseigenschaften und die Möglichkeit zur Grenzschichtbeeinflussung auszeichnet.

[0012] Diese Aufgabe wird durch eine Beschau felung für eine Strömungsmaschine mit den Merkmalen des Anspruchs 5 gelöst.

[0013] Schließlich ergibt sich noch die Aufgabe, ein Laufrad für eine Strömungsmaschine zu schaffen, das strömungsmechanisch optimierte Laufräder auch für das Marktsegment Kleinströmungsmaschinen und bei Fertigung in Kleinserien wirtschaftlich interessant macht.

[0014] Diese Aufgabe wird durch ein Laufrad für eine Strömungsmaschine mit den Merkmalen des Anspruchs 10 gelöst.

[0015] Weiterbildungen des Verfahrens und der Vorrichtungen sind jeweils in den Unteransprüchen ausgeführt.

[0016] Die mit dem erfindungsgemäßen Herstellverfahren für eine Beschaukelung einer Strömungsmaschine herzustellende Beschaukelung hat einen Schaufelträger, mit dem eine oder mehrere Schaufeln verbunden ist/sind. Das Herstellverfahren wird unter Verwendung einer generativen Fertigungsvorrichtung ausgeführt und umfasst die Schritte:

- a) Bereitstellen eines Schaufelträgers und Einlegen in einen Fertigungsraum der Fertigungsvorrichtung,
- b) in die Fertigungsvorrichtung Laden eines 3D-Volumen-Datensatzes, der die zumindest eine Schaufel beschreibt,
- c) Bereitstellen eines Ausgangsmaterials für die Schaufel, und mit der generativen Fertigungsvorrichtung vom Schaufelträger ausgehend schichtweise Herstellen eines Materialzusammenhalts des Ausgangsmaterials, dabei stoffschlüssig Verbinden einer ersten Schicht mit dem Schaufelträger, Herstellen der Schaufel und Erhalten der Beschaukelung.

[0017] Das Herstellen der Schaufel im Schritt c) geschieht hierbei unter Nutzung des 3D-Volumendatensatzes. Mit „3D-Volumendatensatz“ ist hierin ein CAD-Volumenmodell der Schaufel gemeint, das nicht nur die Hüllflächen beschreibt, sondern quasi als „Volumenpixel“ (Voxel) das Volumen. Die Volumendaten können auch erst in der generativen Fertigungsvorrichtung erzeugt werden, wobei die 3D-Daten etwa als Flächenmodell im STL-Format zur Verfügung gestellt werden und vollständig umschlossene Flächenzüge von der generativen Fertigungsvorrichtung als Volumen interpretiert werden. Um einen Volumenkörper zu erhalten wird zunächst in einer Ebene der Materialzusammenhalt vorgegebener Punkte hergestellt und dann Ebene für Ebene fortgefahren.

[0018] „Beschaukelung“ meint hierin im Gegensatz zur üblichen Definition nicht nur die abstrakte Schaufelgesamtheit, sondern auch den Schaufelträger, d. h. eine Vorrichtung zur mechanischen Anbindung an weitere Systemkomponenten der Strömungsmaschine. Bei dem Schaufelträger kann es sich dabei um einen Schaufelträger für eine Leitbeschaukelung als auch für eine Laufbeschaukelung handeln; d. h., er kann entweder eine Nabe oder ein „Ringträger“ sein.

[0019] Unter Strömungsmaschine werden hierin sämtliche Arten von Arbeits- und Kraftmaschinen verstanden, etwa Pumpen, Turbinen, Ventilatoren etc. Bei der generativen Fertigungsvorrichtung im Sinne der Erfindung kann es sich um jede beliebige generative Fertigungsvorrichtung handeln; etwa eine Vorrichtung zur Ausführung eines Materialauftragsverfahrens, bevorzugt eine Vorrichtung zum Laserauf-

tragsschweißen oder eine Vorrichtung zur Ausführung eines Pulverauftragsverfahrens, etwa zur Direct Metal Deposition; solche Vorrichtungen sind auch unter der ugs. Bezeichnung „3D-Drucker“ bekannt. Alternativ kann es sich bei der generativen Fertigungsvorrichtung auch um eine Vorrichtung zur Ausführung eines Pulverbettverfahrens handeln, etwa um eine Vorrichtung zum selektiven Laserschmelzen oder selektiven Lasersintern oder eine Vorrichtung zur Stereolithografie. Die genannten Fertigungsvorrichtungen sind jedoch nur Beispiele; das erfindungsgemäße Herstellverfahren kann auch unter Verwendung anderer generativer Fertigungsvorrichtungen durchgeführt werden, die beispielsweise Elektronenstrahlen oder andere hochenergetische Strahlung als Energiequelle verwenden.

[0020] Erfindungsgemäß wird also der Schaufelträger, der meist voluminöser ist als die Schaufeln, als vorgefertigtes Bauteil bereitgestellt und es werden nur die Schaufeln mit der generativen Fertigungsvorrichtung erzeugt.

[0021] Über generative Fertigungsverfahren, die in Abgrenzung zu den „konventionellen“ Fertigungsverfahren, die einen Werkzeug-/Formenbau erfordern, auch additive Fertigungsverfahren genannt werden, können selbst komplexeste Geometrien mit Hinterschnitten, verborgenen Innenteilen etc. hergestellt werden, die mittels Gießen und/oder spanender Bearbeitung o. ä. nicht fertigbar wären. Hierdurch kann das Bauteil quasi in einem Schritt, mit geringem Nacharbeitsaufwand oder sogar nacharbeitsfrei und mit hoher Genauigkeit hergestellt werden. Als sinnvoller Nacharbeitsschritt kommt beispielsweise eine Oberflächenglättung in Frage.

[0022] Bei dem Ausgangsmaterial kann es sich in Abhängigkeit der einzusetzenden Fertigungsvorrichtung um ein drahtförmiges oder pulverförmiges Ausgangsmaterial handeln. Es können dabei Metalle, Metalllegierungen oder Kunststoffe eingesetzt werden. Ferner gibt es noch die Möglichkeit der chemischen Abscheidung aus der Gasphase.

[0023] Der Schaufelträger kann dabei ein konventionell vorgefertigter Schaufelträger sein. Insbesondere kann der Schaufelträger hierbei vorgeschmiedet sein.

[0024] Unter „konventionell“ werden eben die nicht additiven Fertigungsverfahren verstanden; beispielsweise urformende Herstellverfahren wie Gießen, Sintern und/oder trennende Herstellverfahren wie Drehen, Fräsen, Bohren und/oder umformende Herstellverfahren wie Schmieden, Walzen und/oder fügende Herstellverfahren und/oder Herstellverfahren zur Änderung der Stoffeigenschaften, insbesondere Wärmebehandlungen, Beschichtungsverfahren etc.

[0025] Durch die erfindungsgemäße Kopplung eines konventionell vorgefertigten Schaufelträgers und generativer/additiver Herstelltechnologie für die Schaufeln werden die Vorteile beider Herstellverfahren vereint; während sich die konventionelle Herstelltechnik durch hohe Durchsätze und niedrige Stückkosten bei großen Stückzahlen auszeichnet können mit generativer Fertigungstechnologie kostengünstig Einzelstücke oder Kleinserien hergestellt werden. Indem nun der Schaufelträger konventionell vorgefertigt wird und nur die Schaufeln (die das individuell anzupassende Bauelement sind) generativ erzeugt werden, kann die Verweilzeit in der generativen Fertigungsvorrichtung deutlich reduziert werden, was die Stückkosten senkt.

[0026] Neben dem positiven Kostenaspekt ergibt sich auch eine verbesserte mechanische Belastbarkeit der mit dem erfindungsgemäßen Verfahren hergestellten Beschaukelung. Die Korngrößen unterscheiden sich in den konventionell hergestellten und in den generativ hergestellten Bereichen. Da bei der generativen Herstellung stets nur ein räumlich eng umgrenzter Bereich durch Mikroschweißprozesse verbunden wird, ist dort ein feines Korn zu erwarten, während in dem konventionell hergestellten Bereich des Schaufelträgers ein gröberes Korn in einem Materialgefüge mit einer bestimmten Vorzugsrichtung vorliegt. Dies trägt dazu bei, die Abriebfestigkeit aufgrund der hohen Oberflächenhärte der Schaufeln zu erhöhen (bspw. Kavitationsresistenz) und gleichzeitig die Duktilität im Bereich des Schaufelträgers zu erhalten, was vorteilhaft ist, da die Beschaukelung mit diesem an ein Gehäuse oder eine Welle der Strömungsmaschine mechanisch angebunden wird.

[0027] Im Ergebnis können mit dem erfindungsgemäßen Verfahren kosteneffizient belastungsoptimierte Beschaukelungen als Einzelstück und in Kleinserien hergestellt werden. Es kann dabei etwa auch vorgesehen sein, bestimmte „Größenklassen“ an Laufschaufelträgern vorzuhalten, sodass quasi wie mit einem Baukastensystem eine große Bandbreite an Nenndurchmessern abgedeckt werden kann.

[0028] In einer weiteren Ausführungsform kann im Schritt c) beim schichtweise Herstellen der Schaufel eine Mehrzahl Kanäle in der Schaufel und Öffnungen an einer Oberfläche der Schaufel, in denen die Kanäle münden, erzeugt werden. Die Kanäle verlaufen dabei zumindest entlang eines Längenabschnitts parallel zu einer Längsachse der Schaufel. Die Öffnungen und Kanäle sind dabei in dem 3D-Volumendatensatz als Bereiche enthalten, in denen kein Materialzusammenhalt hergestellt werden soll. Je nach eingesetzter generativer Fertigungsvorrichtung wird in diesen Bereichen entweder kein Material aufgetragen (Auftragsverfahren) oder in diesen Bereichen wird das

Pulver nicht verfestigt und wird nachträglich entfernt (Pulverbettverfahren).

[0029] Die Öffnungen können insbesondere zur Grenzschichtbeeinflussung vorgesehen sein, wobei diese über die Kanäle mit einer Differenzdruckquelle verbunden werden, geeigneter Weise mit einer Unterdruckquelle zur Absaugung der Grenzschicht. Alternativ kann auch mit Hilfe einer Überdruckquelle versucht werden, die Strömung in Gebieten, die durch Kavitation gefährdet sind, durch ein „Luftpolster“ in einem ausreichenden Abstand zur Schaufeloberfläche zu halten.

[0030] Eine mit dem erfindungsgemäßen Verfahren erzeugte Beschaukelung ist mit konventioneller Fertigungstechnik nur unter erhöhtem Aufwand oder gar nicht fertigbar: Mehrere Kanäle in einer ansonsten massiven Laufschaufel aus einem Vollmaterial herzustellen, ist mit herkömmlicher Bohrtechnik in den Durchmesserbereichen kaum darstellbar, da Schaufeln, im besonderen Laufschaufeln, in der Regel eine strömungsgünstige Formgebung im Sinne einer mehrachsigen Krümmung haben. Gerade bei Beschaukelungen für Laufräder für kleine Strömungsmaschinen mit Laufraddurchmessern unter 100 mm und Laufschaufeldicken unter 2 mm ist es nahezu unmöglich, einen solchen Kanal zu bohren. Auch die zu bohrenden Längen, von der Öffnung an der Schaufeloberfläche zur Nabenfläche, übersteigen wirtschaftlich erreichbare Durchmesser-/Längen-Verhältnisse bei Weitem. Vorteilhaft kann also durch das erfindungsgemäße Fertigungsverfahren nicht nur eine einzelne Laufschaufel, sondern das erfindungsgemäße Laufrad kann in einem Fertigungsschritt erhalten werden.

[0031] Unter Verwendung generativer Fertigungstechnologie können beliebig viele Kanäle mit nahezu beliebig vielen Öffnungen ohne Zusatzkosten hergestellt werden; hierbei ist es sogar möglich, die innere Kanalverzweigung bzw. den Übergang zum Sammelkanal strömungsmechanisch optimal zu gestalten; insbesondere können Totwassergebiete vermieden werden. Auch die Kanallänge ist nicht mehr begrenzt; so können beliebige Durchmesser-/Längen-Verhältnisse erreicht werden, die selbst bei Einsatz extrem teurer Tiefbohrtechnik kaum, und aufgrund der Krümmung gar nicht zu erreichen wären.

[0032] Es ist sogar denkbar, einen nicht runden Kanalquerschnitt zu realisieren, etwa quadratisch oder flach quaderförmig; dadurch kann eine vergleichsweise große durchströmte Querschnittsfläche auch in extrem dünnen Laufschaufeln erreicht werden.

[0033] Schließlich kann bei der Ausführung des Herstellungsverfahrens ein Schritt zur inneren Glättung der Kanäle, etwa Strömungsschleifen, ausgeführt werden. Dieser Schritt wird geeigneter Weise

nach Fertigstellung des Bauteils ausgeführt, kann aber grundsätzlich auch zu jedem anderen Zeitpunkt ausgeführt werden. Unter Strömungsschleifen wird das wiederholte Durchpumpen einer mit Schleifpartikeln versetzten Schleiflösung verstanden, wobei hierdurch die Oberflächenrauigkeit wirksam reduziert werden kann, was u. a. zu einem geringeren Strömungswiderstand, beziehungsweise geringerem Druckverlust während der Durchströmung beiträgt. Die gewünschte Ausbildung von laminaren Strömungen in den Kanälen kann hierbei die Folge sein. Insbesondere können über das Strömungsschleifen Funktionskanten wie Bifurkationen im „Netzwerk“ von Kanälen, d. h. an Verzweigungen, wirksam geglättet werden. Zusätzlich können durch den generativen Fertigungsprozess in der Kanalstruktur verbleibende Pulveranhaftungen und Querschnittsverengungen entfernt werden und eine nachträgliche Vergrößerung des Kanaldurchmessers erreicht werden. Die Oberflächenbeschaffenheit der mittels Strömungsschleifen geglätteten Kanäle hat zusätzlich in Strömungsrichtung ausgerichtete Schleifspuren. Diese bieten bei der Durchströmung einen geringeren Reibungswiderstand und können durch Bohr- oder Reibprozesse nicht in dieser Art erzeugt werden.

[0034] Die erfindungsgemäße Beschaukelung einer Strömungsmaschine weist in einer ersten Ausführungsform einen Schaufelträger auf, mit dem zumindest eine Schaufel verbunden ist, bevorzugt drei oder mehr Schaufeln. Die Schaufel ist erfindungsgemäß nicht vollständig hohl ausgeführt und in der Schaufel erstreckt sich zu jeder der Öffnungen ein zugeordneter Kanal. Bei dem Schaufelträger handelt es sich um ein konventionell gefertigtes Bauteil und die Schaufel ist ein generativ hergestelltes Bauteil und ist stoffschlüssig an den Schaufelträger gefügt.

[0035] Eine solche Beschaukelung hat die vorstehend im Bezug zum Herstellverfahren beschriebenen Vorteile; sie kann gegenüber einer vollständig generativ hergestellten Beschaukelung deutlich kostengünstiger hergestellt werden, bietet im Vergleich mit vollständig konventioneller Fertigung größeres Anpassungspotential für Kleinserien und Einzelstücke und hat verbesserte mechanische Eigenschaften.

[0036] Der Kanal der Schaufel kann entlang wenigstens eines Längenabschnitts parallel zu einer Längsachse der Schaufel verlaufen und mit einer Differenzdruckquelle verbunden werden. Bei der Beschaukelung kann es sich um eine Leitbeschaukelung oder eine Laufbeschaukelung handeln.

[0037] Alternativ oder zusätzlich kann die Schaufel gekrümmt sein, etwa auch zweiachsig gekrümmt und/oder die Schaufel kann entweder massiv ausgeführt sein oder eine innere Versteifungsstruktur haben, etwa eine Skelettstruktur.

[0038] Mit „Differenzdruckquelle“ ist eine Vorrichtung gemeint, die eine Druckdifferenz zwischen der dem Kanal zugeordneten Öffnung und einem anderen Ort an der Strömungsmaschine herstellen kann. So kann es sich entweder um eine Unterdruckquelle oder um eine Überdruckquelle handeln; ein Hilfsaggregat wie eine Pumpe oder ein Kompressor kann den Differenzdruck erzeugen. Es kann also eine Grenzschichtabsaugung oder Grenzschichtausblasung erfolgen.

[0039] Eine „Öffnung“ im Sinne der Erfindung ist ein Durchbruch der Oberfläche der Schaufel, um eine fluidische Verbindung zu dem Kanal herzustellen; die Öffnung kann hierbei beispielsweise eine runde oder längliche Form haben. Eine Öffnung kann aber auch aus mehreren Teilöffnungen bestehen, so beispielsweise aus zwei bis vier Teilöffnungen; so dass ermöglicht wird, dass diese Teilöffnungen über einen gemeinsamen Kanal mit dem Differenzdruck beaufschlagt werden.

[0040] „Nicht vollständig hohl“ meint hier, dass die Schaufel keine innere zusammenhängende Kammer hat und keinen internen Unterdruckspeicher vorsieht. Gerade durch den Verzicht auf eine solche Kammer wird eine besonders lange Lebensdauer der Schaufel erreicht; so führt eine Erosion der Oberfläche, beispielsweise aufgrund von Kavitation und/oder Korrosion nicht sofort zu Lochfraß, der einen Durchbruch zur Kammer bewirken kann, sondern lediglich einen Abtrag der Schaufeldicke erreicht; der – wie bekannt – noch durch gängige Materialauftragsverfahren ausgeglichen werden kann.

[0041] Es kann jedoch vorgesehen sein, dass die Schaufel im inneren Hohlräume hat, die auch miteinander verbunden sein können, wenn etwa die Schaufel alternativ zur Ausführung als massives Bauteil einige hohle Teilbereiche hat, die durch eine innere Versteifungsstruktur wie etwa eine Skelettstruktur abgestützt werden, so dass eine Gewichtsreduktion erreicht wird. Eine Versteifungsstruktur kann beliebige Rippungen, Verstrebungen etc. umfassen, wobei bevorzugt die genaue Ausgestaltung der Versteifungsstruktur durch eine belastungsabhängige Strukturoptimierung bestimmt werden kann. Hierdurch kann eine sehr leichtgewichtige und dennoch im Hinblick auf die zu erwartenden Belastungen hochwiderstandsfähige Schaufel erhalten werden. Die reduzierte Masse hat unter anderem einen Vorteil beim dynamischen Betrieb der Strömungsmaschine; insbesondere, wenn die erfindungsgemäße Schaufel in der Laufbeschaukelung der Turbine und/oder des Kompressors eines Turboladers eingesetzt wird, der im Betrieb häufige Drehzahländerungen erfährt.

[0042] Dadurch, dass pro Öffnung jeweils ein eigener Kanal vorgesehen wird, lässt sich die Absaugrate bzw. Ausblasrate pro Öffnung sehr gut steuern; ins-

besondere ist die Durchsatzrate einer jeweiligen Öffnung unabhängig von den Durchsatzraten der anderen Öffnungen, was beispielsweise bei einer bekannten Ausführungsform mit innerer Kammer nicht der Fall ist.

[0043] Bei der erfindungsgemäßen Schaufel kann es sich um eine Laufschaufel oder eine Leitschaufel handeln. In einer Strömungsmaschine kann also vorgesehen sein, die erfindungsgemäßen Schaufeln sowohl für die Laufschaufeln als auch für die Leitschaufeln einzusetzen.

[0044] Die Schaufel kann in einer noch weiteren Ausführungsform gekrümmt sein, bevorzugt zumindest zweiachsig gekrümmt; die Krümmungsform und Schaufelgeometrie ergibt sich als Ergebnis einer strömungsmechanischen Optimierung; eine solche durchzuführen ist der Fachmann gewohnt. Die Längsachse der Schaufel verläuft in diesem Fall entlang der zweiachsigen Krümmung, wobei auch die Kanäle der Krümmung folgen. Solche Kanäle sind über konventionelle Bohrtechnik bzw. Gusstechnik nicht mehr herstellbar; jedoch durch das erfindungsgemäße Herstellverfahren.

[0045] In einer weiteren Ausführungsform können die Kanäle an ihren den Öffnungen abgewandten Enden in einem Sammelkanal münden, der mit der Differenzdruckquelle verbindbar ist, sodass die Kanäle quasi nur „indirekt“ mit der Differenzdruckquelle verbunden sind. Hierbei kann auch vorgesehen sein, dass nicht alle Kanäle in den Sammelkanal zusammengeführt werden, sondern nur einige wenige. Der Sammelkanal wird dabei zweckmäßiger Weise eine etwas größere Querschnittsfläche haben als die Kanäle. Zur Festlegung der Volumenstromverhältnisse durch die einzelnen Kanäle bzw. zum hydraulischen Abgleich können hierbei auch Drosseln an dem Übergang vom Sammelkanal in die jeweiligen Kanäle vorgesehen werden; der Übergangsbereich kann insbesondere durch eine sanfte Verrundung strömungsgünstig gestaltet werden.

[0046] Gemäß einer zusätzlichen Ausführungsform können die Öffnungen in einer Höhenrichtung und/oder einer Radialrichtung nach einem vorbestimmten Muster verteilt angeordnet sein und bevorzugt in voneinander beabstandeten Reihen vorliegen. Bei einem Diagonallauftrad kann beispielsweise ein „Stapeln“ der Öffnungen in Höhenrichtung übereinander vorgesehen werden, so dass die Reihen parallel zur Welle liegen, während die einzelnen Reihen in Radialrichtung beabstandet angeordnet werden. Bei der Auswahl des Abstands ist insbesondere auf die „Reichweite“ der Öffnungen abzustellen; bei großen Laufrädern kann über eine Öffnung natürlich nicht die ganze Grenzschicht abgesaugt/ausgeblasen werden, sondern nur in einem bestimmten Umkreis um die Öffnung.

[0047] Alternativ oder zusätzlich ist es möglich, dass der oder die Kanäle oder der Sammelkanal einen nicht-kreisförmigen Querschnitt aufweist. Über einen nicht kreisförmigen Querschnitt, der beispielsweise flach sein kann, z. B. elliptisch, kann anhand der Ausrichtung der langen Achse eine im Vergleich zum runden Kanal vorteilhafte Beeinflussung der Steifigkeit der Laufschaufel vorgenommen werden. Zudem ist es möglich, einen vergleichsweise großen Kanalquerschnitt bei kleiner Höhe zu realisieren, was den Bau extrem dünner Laufschaufeln mit integrierten Kanälen ermöglicht.

[0048] Darüber hinaus wird die Verwendung des erfindungsgemäßen Herstellverfahrens zur Herstellung der erfindungsgemäßen Beschaukelung beansprucht.

[0049] Das erfindungsgemäße Laufrad einer Strömungsmaschine weist eine erfindungsgemäße Beschaukelung auf. Bei dem Laufrad kann es sich um ein Radial-, Axial- oder Hybridlaufrad handeln, das alternativ oder zusätzlich für eine Kleinströmungsmaschine vorgesehen sein kann. Als Laufrad für eine Kleinströmungsmaschine werden hierbei Laufräder bezeichnet, die einen Laufraddurchmesser in einen Bereich von 3 mm bis 300 mm haben. Insbesondere kann das Laufrad ein Impeller sein, der für eine Strömungsmaschine vorgesehen ist, bei der das Laufrad von einem ring- oder röhrenförmigen Gehäuse umgeben ist.

[0050] Ein solches Laufrad kann vorteilhaft auch bei einer Fertigung als Einzelstück oder in Kleinserien optimal an die vom Einsatzfall gestellten Randbedingungen angepasst werden und kann dabei kostengünstiger bereitgestellt werden als vergleichbare vollständig generativ gefertigte Laufräder.

[0051] Schließlich kann der Schaufelträger der Beschaukelung eine Nabe aufweisen oder sein. Alternativ oder zusätzlich kann/können einer oder mehrere der Kanäle und/oder der Sammelkanal von der Längsachse der Schaufel in eine radiale Richtung abknicken und an einer Nabenoberfläche wieder austreten und eine Druckverbindungsöffnung bilden.

[0052] Eine Ausführungsform sowie einige der Vorteile, die mit dieser Ausführungsform verbunden sind, werden durch die nachfolgende ausführliche Beschreibung unter Bezug auf die begleitende Figur deutlich und besser verständlich. Die Figur ist lediglich eine schematische Darstellung einer Ausführungsform der Erfindung.

[0053] Bei dem in der einzigen Figur perspektivisch gezeigten Laufrad **1** handelt es sich um ein Diagonallauftrad, wobei über einen Umfang des Laufschaufelträgers **11** Laufschaufeln **12** in gleichmäßigen Winkelabständen verteilt vorliegen. Die Laufschaufeln **12**

sind stoffschlüssig mit dem Laufschaufelträger **11** verbunden und sind innen massiv, oder jedenfalls nicht vollständig hohl ausgeführt. Dies hat den Vorteil, dass Verschleiß, der beispielsweise bei Pumpen/Propellern aufgrund von Kavitation auftritt, anders als bei bekannten Laufschaufeln mit Grenzschichtabsaugung nicht zum Lochfraß der „Hülle“ führt, sondern repariert werden kann, etwa durch Auftragsschweißen.

[0054] Das Laufrad **1** wird unter Verwendung einer generativen Fertigungsvorrichtung hergestellt, bspw. einer Vorrichtung zum Laserauftragsschweißen; dazu wird ein vorgeschmiedeter Schaufelträger **11** als Rohling bereitgestellt und die Schaufeln **12** schichtweise ausgehend von einer Oberfläche des Schaufelträgers **11** additiv gefertigt, wobei ein Fußbereich der Schaufel **12** stoffschlüssig mit dem Schaufelträger **11** verbunden wird. Es ergeben sich insbesondere Vorteile ggü. der vollständig additiven Fertigung, nämlich eine kürzere Verweilzeit in der generativen Fertigungsvorrichtung und dadurch Kosteneinsparungen als auch verbesserte mechanische Eigenschaften des Schaufelträgers **11**, da die Gefügeeigenschaften bei konventioneller Fertigung besser beherrschbar sind. Ferner wird hierdurch die Herstellung mit vergleichsweise wenig Nacharbeit oder sogar quasi nacharbeitsfrei ermöglicht, was die Kosten der Herstellung senkt und das Laufrad **1** dadurch auch für Kleinströmungsmaschinen im Massenmarkt wirtschaftlich interessant macht.

[0055] An der Laufschaufel **12** liegen mehrere in Reihen **121'** zusammengefasste Öffnungen **121** vor, die jeweils über Kanäle **122**, die im Laufschaufelinneren vorliegen, zur Grenzschichtabsaugung mit einer Unterdruckquelle verbunden werden können. Die Kanäle **122** verlaufen entlang der gekrümmten Längsachse der jeweiligen Laufschaufel **12** und vereinen sich in einem der Drehachse nahen Abschnitt der Laufschaufel **12** in einem Sammelkanal **123**, der nach radial innen in die Nabe **124** geführt ist, wo die fluidische und druckdichte Anbindung an die Unterdruckquelle erfolgt. Hierzu tritt der Sammelkanal **123** aus der Nabenoberfläche **124'**, die eine innere Mantelfläche ist, aus und bildet eine Druckanbindungsöffnung **126**. Die Unterdruckquelle kann eine Pumpe sein; es kann jedoch auch einfach ein anderer Ort innerhalb der Strömungsmaschine, an dem ein niedrigerer statischer Druck herrscht, „angezapft“ werden. Die Druckanbindungsöffnung **126** kann insbesondere in druckdichten Kontakt mit einem Schlitz oder einer form-korrespondierenden Öffnung der Antriebs- bzw. Abtriebswelle gebracht werden, die wiederum zu der Unterdruckquelle führt. Die Antriebswelle wird in Richtung H in die Nabe **124** eingeführt und kann bspw. über eine Presspassung mit dem Laufrad **1** verbunden werden.

[0056] Mit herkömmlicher Fertigungstechnik lässt sich das erfindungsgemäße Laufrad **1** nicht herstel-

len; Bohr-, auch Tiefbohrverfahren, sind wegen der starken Krümmung und der Umlenkung der Kanäle nicht einsetzbar; Gussverfahren sind nicht einsetzbar, so dass das Entkernen der langen und mitunter kapillarartigen Kanäle **122** unmöglich ist.

Patentansprüche

1. Herstellverfahren für eine Beschaukelung einer Strömungsmaschine, wobei die Beschaukelung einen Schaufelträger (**11**) aufweist, mit dem zumindest eine Schaufel (**12**) verbunden ist, wobei das Herstellverfahren unter Verwendung einer generativen Fertigungsvorrichtung ausgeführt wird, umfassend die Schritte:

a) Bereitstellen eines Schaufelträgers (**11**) und Einlegen in einen Fertigungsraum der generativen Fertigungsvorrichtung,
b) in die Fertigungsvorrichtung Laden eines 3D-Volumen-Datensatzes, der die zumindest eine Schaufel (**12**) beschreibt,
c) Bereitstellen eines Ausgangsmaterials für die Schaufel (**12**) und mit der generativen Fertigungsvorrichtung vom Schaufelträger (**11**) ausgehend schichtweise Herstellen eines Materialzusammenhalts des Ausgangsmaterials, dabei stoffschlüssig Verbinden einer ersten Schicht mit dem Schaufelträger (**11**), Herstellen der Schaufel (**12**) und Erhalten der Beschaukelung.

2. Herstellverfahren nach Anspruch 1, wobei der Schaufelträger (**11**) ein konventionell vorgefertigter Schaufelträger (**11**) ist, bevorzugt ein vorgeschmiedeter Schaufelträger (**11**).

3. Herstellverfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei der Schritt c) beim schichtweise Herstellen der Schaufel (**12**) Ausbilden einer Mehrzahl Kanäle (**122**) in der Schaufel (**12**) und Öffnungen (**121**) an der Schaufeloberfläche, in denen die Kanäle (**122**) münden, wobei die Kanäle (**122**) zumindest entlang eines Längenabschnitts parallel zu einer Längsachse der Schaufel (**12**) verlaufen.

4. Herstellverfahren nach Anspruch 3, wobei das Verfahren d) Ausführen eines Schritts zur inneren Glättung der Kanäle (**122**), bevorzugt Ausführen eines Strömungsschleifschritts, aufweist.

5. Beschaukelung einer Strömungsmaschine, – die einen Schaufelträger (**11**) aufweist, mit dem zumindest eine Schaufel (**12**) verbunden ist, – wobei der Schaufelträger (**11**) ein konventionell gefertigtes Bauteil ist und die Schaufel (**12**) generativ gefertigt und stoffschlüssig an den Schaufelträger (**11**) gefügt ist **dadurch gekennzeichnet**, dass die Schaufel (**12**)

– nicht vollständig hohl ausgeführt ist und
 – an einer Schaufeloberfläche eine Mehrzahl Öffnungen (121) aufweist, zu denen sich jeweils ein den Öffnungen (121) zugeordneter Kanal (122) erstreckt.

ten und eine Druckverbindungsöffnung (126) bildet/
 bilden

Es folgt eine Seite Zeichnungen

6. Beschaukelung nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Kanal (122)
 – zumindest entlang eines Längenabschnitts parallel zu einer Längsachse der Schaufel (12) verläuft und
 – mit einer Differenzdruckquelle verbindbar ist, und/oder
 – die Beschaukelung eine Leitbeschaukelung oder eine Laufbeschaukelung ist, und/oder dass die Schaufel (12)
 – gekrümmt ist, bevorzugt zweiachsig gekrümmt und/oder dass die Schaufel (12)
 – massiv ausgeführt ist oder
 – eine innere Versteifungsstruktur aufweist, insbesondere eine Skelettstruktur.

7. Beschaukelung nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Mehrzahl Kanäle (122) an ihren den Öffnungen (121) abgewandten Enden in einen Sammelkanal (123) münden, der mit der Differenzdruckquelle verbindbar ist.

8. Beschaukelung nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Öffnungen (121) in einer Höhenrichtung (H) und/oder einer Radialrichtung (r) nach einem vorbestimmten Muster verteilt sind, und besonders bevorzugt in voneinander beabstandeten Reihen (121') vorliegen und/oder
 – zumindest einer der Kanäle (122) und/oder der Sammelkanal (123) einen nicht-kreisförmigen Querschnitt aufweist/aufweisen.

9. Verwendung des Herstellverfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 4 zur Herstellung einer Beschaukelung nach zumindest einem der Ansprüche nach 5 bis 8.

10. Laufrad (1) einer Strömungsmaschine, das eine Beschaukelung aufweist, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Beschaukelung eine Beschaukelung nach zumindest einem der Ansprüche 5 bis 8 ist.

11. Laufrad (1) nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass
 – der Schaufelträger (11) eine Nabe (124) aufweist und/oder
 – zumindest einer der Kanäle (122) und/oder der Sammelkanal (123) von der Längsachse der Schaufel (12) in eine radiale Richtung (r) abknickt/abknicken und an einer Nabenoberfläche (124') austritt/austre-

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1

