



(10) DE 10 2020 001 022 B4 2022.09.29

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2020 001 022.9**

(22) Anmelddetag: **17.02.2020**

(43) Offenlegungstag: **24.09.2020**

(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **29.09.2022**

(51) Int Cl.: **B29C 44/14 (2006.01)**

**F01D 5/14 (2006.01)**

**F01D 5/00 (2006.01)**

**B29C 44/16 (2006.01)**

**B29C 44/18 (2006.01)**

**B29C 70/44 (2006.01)**

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

(30) Unionspriorität:  
**2019-050506**

**18.03.2019 JP**

(73) Patentinhaber:

**Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Tokyo, JP**

(74) Vertreter:

**Henkel & Partner mbB Patentanwaltskanzlei,  
Rechtsanwaltskanzlei, 80333 München, DE**

(72) Erfinder:

**Okabe, Ryoji, Tokyo, JP; Shindo, Kentaro, Tokyo, JP;  
Kamiya, Masami, Tokyo, JP**

(56) Ermittelter Stand der Technik:  
**siehe Folgeseiten**

### (54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR FORMGEBUNG EINER VERBUNDSCHAUFEL

(57) Hauptanspruch: Verfahren zur Formgebung einer aus einem Verbundmaterial bestehenden Verbundschaufel (10) durch Härt(en) eines Prepregs, in welchem Verstärkungsfasern mit Harz imprägniert worden sind, wobei die Verbundschaufel (10) einen saugseitigen Teil (12) und einen druckseitigen Teil (14) umfasst, welche überlappen und miteinander verbunden sind, wobei das Verfahren umfasst:

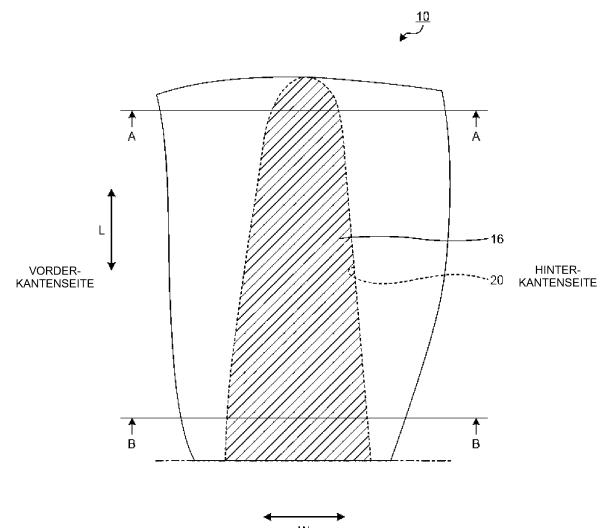
Aufeinanderlegen von Lagen des Prepregs in einer saugseitigen Form (32) zum Formen des saugseitigen Teils (12), um auf diese Weise ein saugseitiges Laminat (12a) zu bilden, und Aufeinanderlegen von Lagen des Prepregs in einer druckseitigen Form (34) zum Formen des druckseitigen Teils (14), um auf diese Weise ein druckseitiges Laminat (14a) zu bilden;

Durchführen einer Formeinstellung zwischen der saugseitigen Form (32) und der druckseitigen Form (34), so dass das saugseitige Laminat (12a) und das druckseitige Laminat (14a) überlappen, und Anordnen eines Schäumungsmittels (16) in einem durch Überlappung des saugseitigen Laminats (12a) und des druckseitigen Laminats (14a) gebildeten Innenraum (20); und

Druckbeaufschlagen des saugseitigen Laminats (12a) und des druckseitigen Laminats (14a) vom Inneren her in Richtung der saugseitigen Form (32) bzw. der druckseitigen Form (34) durch Erwärmen des Schäumungsmittels (16) zwecks Ausdehnung, und Erwärmen des saugseitigen Laminats (12a) und des druckseitigen Laminats (14a) zwecks Härtung, wobei

das Schäumungsmittel (16) eine Vielzahl von Schäum-

ungskörpern (26), welche derart konzipiert sind, dass sie beim Erwärmen aufschäumen, und ein Schäumungsmittelharz (25), welches derart konzipiert ist, dass es beim Erwärmen aushärtet, umfasst,  
die Vielzahl von Schäumungskörpern (26) niedertemperaturseitige Schäumungskörper (26a) und hochtemperaturseitige Schäumungskörper (26b) umfasst,  
die niedertemperaturseitigen Schäumungskörper (26a) und die hochtemperaturseitigen Schäumungskörper (26b)  
...



(19)



Deutsches  
Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2020 001 022 B4** 2022.09.29

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	38 05 100	A1
US	2017 / 0 087 777	A1
EP	1 811 129	A2
WO	2017/ 162 277	A1
JP	H09- 303 104	A

**Beschreibung****Gebiet**

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Formgebung einer Verbundschaufel.

**Hintergrund**

**[0002]** Herkömmlich wurde eine Gasturbinenschaufel mit einem Tragflächenteil, welches sich von einer Schaufel spitze in Richtung eines Schaufelfußes erstreckt, als Verbundschaufel bezeichnet (siehe beispielsweise Patentliteratur 1). Das Tragflächenteil umfasst ein Metallteil und ein Schaumstoffteil. Auf dem Metallteil ist eine Oberflächenvertiefung ausgebildet. In der Oberflächenvertiefung des Metallteils ist das Schaumstoffteil bereitgestellt. Das Metallteil und das Schaumstoffteil sind von einer Verbundhaut umschlossen und sind an die Verbundhaut gebunden. Das Tragflächenteil ist weiterhin mit einer Erosionsschutzschicht versehen, welche die Verbundhaut bedeckt.

**[0003]** Patentliteratur 2 offenbart ein Verfahren zur Herstellung eines Formkörpers mittels expandierbarer Mikrokügelchen. Das Verfahren umfasst das Erzeugen einer Vielzahl erster expandierter Mikrokügelchen durch Erwärmen einer Vielzahl erster, nicht-expandierter Mikrokügelchen; das Erzeugen eines Gemischs durch Vermischen der Vielzahl erster expandierter Mikrokügelchen mit einem Epoxidharz und mit einer Vielzahl zweiter, nicht-expandierter Mikrokügelchen; das Erzeugen eines Vorformlings aus dem Gemisch; das Erzeugen eines umwickelten Vorformlings durch Umdrehen des Vorformlings mit einem Faserband; das Anordnen des umwickelten Vorformlings in einem Formwerkzeug; das Erzeugen einer Vielzahl zweiter expandierter Mikrokügelchen durch Erwärmen des Formwerkzeugs und Expandieren der Vielzahl zweiter, nicht-expandierter Mikrokügelchen; das Kühlen des Formwerkzeugs; und das Entnehmen des Formkörpers aus dem Formwerkzeug. In einer bevorzugten Variante weisen die expandierbaren Mikrokügelchen jeweils eine aus einem thermoplastischen Polymer gebildete Schale auf.

**[0004]** Patentliteratur 3 offenbart ein Verfahren zur Herstellung eines Tragflügels für ein Gasturbinen-triebwerk mit verringertem Gewicht. Das Verfahren umfasst das Ausbilden eines Tragflügels mit einem Hohlraum; das Bereitstellen und Verteilen eines zellförmigen Materials innerhalb des gesamten Hohlraums; und das Einbringen eines schwingungsdämpfenden Mediums in den Hohlraum, wobei das schwingungsdämpfende Medium über das gesamte, in dem Hohlraum befindliche zellförmige Material verteilt ist. In einer bevorzugten Variante umfasst das Bereitstellen des zellförmigen Materials inner-

halb des Hohlraums das Aufschäumen eines pulvelförmigen Materials in dem Hohlraum, wobei als pulvelförmiges Material ein Metallpulver zur Anwendung gelangen kann und das Metallpulver in Gegenwart eines Schäumungsmittels zu einem Metallschaum aufgeschäumt wird.

**[0005]** Patentliteratur 4 offenbart ein Verfahren zur Herstellung eines direktausgeschäumten Formkörpers. Das Verfahren umfasst das Einlegen mehrerer Prepregs oder/und Prepregwickel in ein Formwerkzeug; Fixieren der Prepregs oder/und Prepregwickel in dem Formwerkzeug unter Erzeugung eines Hohlraums in dem Formwerkzeug; Einspritzen von Polyurethanschaum mit einer Dichte von 150 bis 300 kg/m<sup>3</sup> in den Hohlraum bei Raumtemperatur; und gemeinsames Aushärten der Prepregs oder/und Prepregwickel und des Polyurethanschaums bei einer Temperatur von 120 bis 180°C. Der Polyurethanschaum wird durch Umsetzung eines organischen Isocyanats mit einem Polyetherpolyol auf Zuckerbasis in Gegenwart eines Katalysators, eines Stabilisator, eines Treibmittels und Cyanamid erhalten.

**[0006]** Patentliteratur 5 offenbart ein Verfahren zur Herstellung einer mehrschichtigen Verbundstruktur mit einem schaumverstärkten inneren Kern. Das Verfahren umfasst das Bereitstellen eines Formwerkzeugs für die mehrschichtige Verbundstruktur; das Einbringen von zwei oder mehr Schichten, welche die äußere Oberfläche des mehrschichtigen Verbundstoffs bilden, in das Formwerkzeug; das Befüllen des Formwerkzeugs mit einem wärmeexpandierbaren Mikrokügelchen enthaltenden Gemisch; das Expandieren der wärmeexpandierbaren Mikrokügelchen bei einer Temperatur von 80 bis 140°C über einen Zeitraum von 2 bis 230 Minuten, wodurch in dem geschlossenen Formwerkzeug ein Druck von 0.1 bis 20 bar erzeugt wird; und das Entnehmen der mehrschichtigen Verbundstruktur aus dem Formwerkzeug. Die wärmeexpandierbaren Mikrokügelchen umfassen eine aus thermoplastischem Polymer gebildete Schale, welche einen aus niedrigsiedendem Kohlenwasserstoff bestehenden Kern ummantelt.

**Literaturliste****Patentliteratur**

Patentliteratur 1: JP H09-303104 A

Patentliteratur 2: US 2017/0087777 A1

Patentliteratur 3: EP 1 811 129 A2

Patentliteratur 4: DE 38 05 100 A1

Patentliteratur 5: WO 2017/162277 A1

## Zusammenfassung

## Technisches Problem

**[0007]** Eine Verbundschaufel muss in Bezug auf die Form der Schaufel, und insbesondere in Bezug auf die Oberflächenform der Schaufel, mit hochpräziser Maßgenauigkeit geformt werden. Bei der in Patentliteratur 1 offenbarten Verbundschaufel ist die Verbundhaut derart konzipiert, dass das Metallteil in Richtung ihrer Innenseite weist. Sofern das Metallteil und die Verbundhaut einstückig geformt werden, umfassen mögliche Prozesse dementsprechend das Anbringen einer Form an die Außenseite der Verbundhaut und das gleichzeitige Anbringen des Metallteils an die Innenseite der Verbundhaut. Sofern das Metallteil und die Verbundhaut getrennt voneinander geformt werden, umfassen mögliche Prozesse demgegenüber das Bilden der Verbundhaut mit hoher Genauigkeit und anschließend das Bilden des Metallteils mit hoher Genauigkeit, so dass die Form des Metallteils der Form eines Raums im Inneren der Verbundhaut entsprechen kann.

**[0008]** Sofern das Metallteil und die Verbundhaut einstückig geformt werden, bereitet es allerdings gelegentlich Schwierigkeiten, die Oberflächenform der Verbundhaut mit hoher Genauigkeit auszubilden, da von innen nach außen kein Druck auf die Verbundhaut ausgeübt werden kann. Wenn die Verbundhaut geformt wird, ohne dass Druck auf die Verbundhaut ausgeübt wird, bereitet es Schwierigkeiten, die Entstehung von Hohlräumen im Inneren der Verbundhaut zu verhindern. Sofern das Metallteil und die Verbundhaut getrennt voneinander geformt werden, muss demgegenüber das Metallteil mit hoher Genauigkeit gebildet werden, weshalb die Kosten für die Bildung des Metallteils hoch sind und es Schwierigkeiten bereitet, die Herstellungskosten für die Verbundschaufel zu verringern. In jedem der Fälle ist das Metallteil im Inneren der Verbundschaufel bereitgestellt, was eine Gewichtsreduzierung erschwert und einen mit einer Verbundschaufel einhergehenden Vorteil, nämlich einen Nutzen hinsichtlich der Gewichtsreduzierung, kompensiert.

**[0009]** Dementsprechend wurde die Bildung einer Verbundschaufel unter Verwendung eines Verbundmaterials und ohne Verwendung eines metallischen Materials untersucht. Um die Oberflächenform einer Verbundschaufel mit hoher Genauigkeit ausbilden zu können, wird, wenn eine Verbundschaufel geformt wird, ein Schäumungsmittel in das Innere der Verbundschaufel eingeführt und dazu gebracht, während der Warmumformung aufzuschäumen, wodurch von der Innenseite in Richtung der Außenseite der Verbundschaufel Druck auf die Verbundschaufel ausgeübt wird.

**[0010]** Sofern ein wärmebeständiges Harz als Harz für die Verwendung in der Verbundschaufel verwendet wird, so tritt dieses Harz während der Warmumformung (während eines Erwärmungsprozesses) zur Härtung des Harzes in einen niedrigviskosen Zustand ein. Darüber hinaus erstreckt sich der niedrigviskose Zustand des Harzes über einen langen Zeitraum, so dass die Verbundschaufel über einen langen Zeitraum mit Druck beaufschlagt werden muss. Allerdings bereitet es Schwierigkeiten, das Schäumungsmittel über einen langen Zeitraum am Schäumen zu halten. Eine Druckanwendung unter Verwendung von Schaumstoffen wird mit der Zeit schwächer. Das Schäumungsmittel übt eine unzureichende Druckkraft aus, weshalb die Verbundschaufel einen Formdefekt erleiden kann. Dementsprechend enthält ein Schäumungsmittel ein Schäumungsmittelharz, welches thermisch härtet. Wenn sich die Erwärmungstemperatur im Zuge der Warmumformung erhöht, härtet das Schäumungsmittel folglich aus und kann dementsprechend nicht mehr aufschäumen. Die resultierende Verbundschaufel kann dementsprechend einen Formdefekt aufweisen.

**[0011]** Unter Berücksichtigung der vorstehend genannten Unzulänglichkeiten ist die vorliegende Erfindung darauf gerichtet, ein Verfahren zur Formgebung einer Verbundschaufel bereitzustellen, welches in der Lage ist, eine Verbundschaufel in geeigneter Weise zu formen, indem ein Innenraum der Verbundschaufel unter Verwendung eines Schäumungsmittels adäquat mit Druck beaufschlagt wird. Die Erfindung ist in dem Anspruch definiert.

## Lösung des Problems

**[0012]** Die Erfindung betrifft somit ein Verfahren zur Formgebung einer aus einem Verbundmaterial bestehenden Verbundschaufel, wie es in Anspruch 1 definiert ist. Die Formgebung erfolgt durch Härten eines Prepregs, in welchem Verstärkungsfasern mit Harz imprägniert worden sind, wobei die Verbundschaufel einen saugseitigen Teil und einen druckseitigen Teil umfasst, welche überlappen und aneinander gebunden sind.

**[0013]** Das Verfahren umfasst das Aufeinanderlegen von Lagen des Prepregs in einer saugseitigen Form zum Formen des saugseitigen Teils, um auf diese Weise ein saugseitiges Laminat zu bilden, und das Aufeinanderlegen von Lagen des Prepregs in einer druckseitigen Form zum Formen des druckseitigen Teils, um auf diese Weise ein druckseitiges Laminat zu bilden; das Durchführen einer Formeinstellung zwischen der saugseitigen Form und der druckseitigen Form, so dass das saugseitige Laminat und das druckseitige Laminat überlappen, und das Anordnen eines Schäumungsmittels in einem durch Überlappung des saugseitigen Laminats und

des druckseitigen Laminats gebildeten Innenraum; sowie das Druckbeaufschlagen des saugseitigen Laminats und des druckseitigen Laminats vom Inneren her in Richtung der saugseitigen Form bzw. der druckseitigen Form durch Erwärmen des Schäumungsmittels zwecks Ausdehnung, und Erwärmen des saugseitigen Laminats und des druckseitigen Laminats zwecks Härtung.

**[0014]** Das Schäumungsmittel umfasst eine Vielzahl von Schäumungskörpern, welche derart konzipiert sind, dass sie beim Erwärmen aufschäumen, und ein Schäumungsmittelharz, welches derart konzipiert ist, dass es beim Erwärmen aushärtet. Die Vielzahl von Schäumungskörpern umfasst niedertemperaturseitige Schäumungskörper und hochtemperaturseitige Schäumungskörper, wobei die niedertemperaturseitigen Schäumungskörper und die hochtemperaturseitigen Schäumungskörper jeweils einen mit Harz überzogenen Schäumungsbestandteil aufweisen und infolge der Verwendung verschiedener Arten von Harz als Beschichtung unterschiedliche Schäumungstemperaturen besitzen. Die niedertemperaturseitigen Schäumungskörper sind derart konzipiert, dass sie beim Erwärmen des zu härtenden saugseitigen Laminats und druckseitigen Laminats in einem niedrigen Temperaturbereich aufschäumen, wodurch sich in dem Innenraum ein bestimmter Schäumungsdruck entwickelt. Die hochtemperaturseitigen Schäumungskörper sind derart konzipiert sind, dass sie beim Erwärmen des zu härtenden saugseitigen Laminats und druckseitigen Laminats in einem hohen Temperaturbereich, der mit höheren Temperaturen als der Niedertemperaturbereich korrespondiert, aufschäumen, wodurch sich in dem Innenraum ein bestimmter Schäumungsdruck entwickelt, welcher höher ist als der durch das Aufschäumen der niedertemperaturseitigen Schäumungskörper erzielte Schäumungsdruck.

**[0015]** Mittels dieser Konfiguration kann das Schäumungsmittel im Rahmen der Härtung dienenden Schritts der Erwärmung des saugseitigen Laminats und des druckseitigen Laminats in mehreren Stufen aufschäumen. Dementsprechend kann die Druckbeaufschlagung im Innenraum der Verbundschaufel aufrechterhalten werden, und kann das Schäumungsmittel den Innenraum der Verbundschaufel adäquat unter Druck setzen. Dementsprechend kann verhindert werden, dass die Verbundschaufel einen Formdefekt aufweist, wodurch die Verbundschaufel in geeigneter Weise geformt werden kann. Als Schäumungskörper werden beispielsweise Schaumkugelchen verwendet, welche jeweils durch Überziehen eines Schäumungsbestandteils mit einer aus thermoplastischem Harz bestehenden Schicht erhalten werden.

## Figurenliste

**Fig. 1** ist eine Draufsicht, welche schematisch eine Verbundschaufel zeigt, die mittels eines Verfahrens zur Formgebung einer Verbundschaufel gemäß einer ersten Ausführungsform geformt worden ist.

**Fig. 2** ist eine Schnittansicht, welche schematisch einen dünnen Teil der Verbundschaufel gemäß der ersten Ausführungsform zeigt.

**Fig. 3** ist eine Schnittansicht, welche schematisch einen dicken Teil der Verbundschaufel gemäß der ersten Ausführungsform zeigt.

**Fig. 4** zeigt Diagramme betreffend ein Schäumungsmittel für die Verwendung in dem Verfahren zur Formgebung einer Verbundschaufel gemäß der ersten Ausführungsform.

**Fig. 5** zeigt Schäumungszustände des Schäumungsmittels für die Verwendung in dem Verfahren zur Formgebung einer Verbundschaufel gemäß der ersten Ausführungsform.

**Fig. 6** veranschaulicht das Verfahren zur Formgebung einer Verbundschaufel gemäß der ersten Ausführungsform.

**Fig. 7** zeigt Diagramme betreffend ein Schäumungsmittel für die Verwendung in einem Verfahren zur Formgebung einer Verbundschaufel gemäß einer zweiten Ausführungsform.

**Fig. 8** zeigt Schäumungszustände des Schäumungsmittels für die Verwendung in dem Verfahren zur Formgebung einer Verbundschaufel gemäß der zweiten Ausführungsform.

## Beschreibung von Ausführungsformen

**[0016]** Nachfolgend werden Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung auf Grundlage der Zeichnungen im Einzelnen beschrieben. Diese Ausführungsformen sollen diese Erfindung nicht einschränken. Komponenten der nachfolgenden Ausführungsformen umfassen auch jene, welche von einem Fachmann ausgetauscht werden können, oder jene, welche im Wesentlichen identisch zueinander sind. Jede der nachfolgend beschriebenen Komponenten kann bei Bedarf in Kombination mit einer beliebigen der anderen Komponenten verwendet werden. Sofern mehrere Ausführungsformen zur Verfügung stehen, kann zudem jede der Ausführungsformen in Kombination mit einer beliebigen der anderen Ausführungsformen verwendet werden.

## Erste Ausführungsform

**[0017]** Ein Verfahren zur Formgebung einer Verbundschaufel 10 gemäß einer ersten Ausführungsform ist ein Verfahren zur Formgebung einer Schaufel unter Verwendung eines aus Verstärkungsfasern

und Harz bestehenden Verbundmaterials. Die Verbundschaufel 10 kann beispielsweise in einer Turbinenlaufschaufel oder einer Turbinenleitschaufel Anwendung finden, welche in einer Vorrichtung wie z.B. einer Gasturbine oder einem Gasturbinenmotor verwendet wird. Im Rahmen der ersten Ausführungsform erfolgt die Beschreibung der Verbundschaufel 10 im Hinblick auf eine Turbinenlaufschaufel. Allerdings ist das Verfahren zur Formgebung der Verbundschaufel 10 auch auf eine Turbinenleitschaufel anwendbar.

**[0018]** **Fig. 1** ist eine Draufsicht, welche schematisch eine Verbundschaufel zeigt, die mittels eines Verfahrens zur Formgebung einer Verbundschaufel gemäß der ersten Ausführungsform geformt worden ist. **Fig. 2** ist eine Schnittansicht, welche schematisch einen dünnen Teil der Verbundschaufel gemäß der ersten Ausführungsform zeigt, wobei es sich um eine Schnittansicht entlang der Linie A-A in **Fig. 1** handelt. **Fig. 3** ist eine Schnittansicht, welche schematisch einen dicken Teil der Verbundschaufel gemäß der ersten Ausführungsform zeigt, wobei es sich um eine Schnittansicht entlang der Linie B-B in **Fig. 1** handelt. **Fig. 4** zeigt Diagramme betreffend ein Schäumungsmittel für die Verwendung in dem Verfahren zur Formgebung einer Verbundschaufel gemäß der ersten Ausführungsform. **Fig. 5** zeigt Schäumungszustände des Schäumungsmittels für die Verwendung in dem Verfahren zur Formgebung einer Verbundschaufel gemäß der ersten Ausführungsform. **Fig. 6** veranschaulicht das Verfahren zur Formgebung einer Verbundschaufel gemäß der ersten Ausführungsform.

**[0019]** Zunächst wird die Verbundschaufel 10 beschrieben, bevor das Verfahren zur Formgebung der Verbundschaufel 10 beschrieben wird. Wie in **Fig. 1** dargestellt ist, handelt es sich bei der Verbundschaufel 10 um eine Turbinenlaufschaufel, welche sich von einer als festes Ende ausgebildeten Schaufelfußseite bis zu einer als freies Ende ausgebildeten Schaufel spitzen Seite erstreckt. Hierbei stellen die die Schaufelfußseite und die Schaufel spitzen Seite verbindenden Richtungen Schaufellängsrichtungen dar, welche den in **Fig. 1** dargestellten L-Richtungen entsprechen. In den Richtungen der Schaufellängsrichtungen in **Fig. 1** handelt es sich bei einer Seite der Verbundschaufel 10 um eine Vorderkantenseite, und handelt es sich bei der anderen Seite um eine Hinterkantenseite. Hierbei stellen die die Vorderkantenseite und die Hinterkantenseite verbindenden Richtungen Schaufelbreitenrichtungen dar, welche den in **Fig. 1** dargestellten W-Richtungen entsprechen.

**[0020]** Wie in **Fig. 2** und **Fig. 3** dargestellt ist, ist die Verbundschaufel 10 derart ausgebildet, dass sie in den Schaufelbreitenrichtungen insgesamt eine Krümmung aufweist. Eine Seite der Verbundschaufel

10 ist ausgehend von ihrer Innenseite in Richtung ihrer Außenseite konvex ausgebildet und wird als Saugseite definiert. Die andere Seite der Verbundschaufel 10 ist ausgehend von ihrer Innenseite in Richtung ihrer Außenseite konkav ausgebildet und wird als Druckseite definiert. Hierbei stellen die die Saugseite und die Druckseite verbindenden Richtungen Schaufeldickenrichtungen dar, welche den in **Fig. 2** und **Fig. 3** dargestellten T-Richtungen entsprechen.

**[0021]** Was die Dicke in Schaufeldickenrichtung betrifft, so ist die Verbundschaufel 10 derart ausgebildet, dass sie in Richtung des Schaufelfußes dicker und in Richtung der Schaufel spitze dünner wird. Dementsprechend besitzt die Verbundschaufel 10 auf einer in Richtung der Schaufel spitze verlaufenden Seite einen dünnen Teil 10a, welcher, wie aus **Fig. 2** hervorgeht, in Schaufeldickenrichtung relativ dünn ist, und besitzt auf der anderen, in Richtung des Schaufelfußes verlaufenden Seite einen dicken Teil 10b, welcher, wie aus **Fig. 3** hervorgeht, in Schaufeldickenrichtung relativ dick ist.

**[0022]** Am Außenumfang eines sich um seine Achse drehenden Rotors ist eine Vielzahl derartiger Verbundschaufeln 10 bereitgestellt, und zwar in Umfangsrichtung nebeneinander mit bestimmten Abständen dazwischen. Zwischen den benachbarten Verbundschaufeln 10 strömt von der Vorderkante in Richtung der Hinterkante einer jeden Verbundschaufel 10 ein Fluid.

**[0023]** Wie in **Fig. 2** und **Fig. 3** dargestellt ist, umfasst die Verbundschaufel 10 ein saugseitiges Schaufelelement (einen saugseitigen Teil) 12, welches einem Teil an ihrer Saugseite entspricht, ein druckseitiges Schaufelelement (einen druckseitigen Teil) 14, welches einem Teil an ihrer Druckseite entspricht, und ein Schäumungsmittel 16, welches in einem von dem saugseitigen Schaufelelement 12 und dem druckseitigen Schaufelelement 14 gebildeten Innenraum 20 bereitgestellt ist.

**[0024]** Das saugseitige Schaufelelement 12 wird durch Aufeinanderlegen und thermisches Härteln einer Vielzahl von Lagen eines Prepregs, in welchem Verstärkungsfasern mit Harz imprägniert worden sind, erhalten. Das saugseitige Schaufelelement 12 wird unter Verwendung einer nachfolgend beschriebenen saugseitigen Form 32 geformt. In dem saugseitigen Schaufelelement 12 ist die Außenfläche der Verbundschaufel 10 derart ausgebildet, dass sie eine konvex gekrümmte Form aufweist. In dem saugseitigen Schaufelelement 12 ist die Innenfläche der Verbundschaufel 10 derart ausgebildet, dass sie eine konkav gekrümmte Form aufweist, und als Teil einer Innenfläche verwendet wird, welche den Innenraum 20 definiert.

**[0025]** In ähnlicher Weise wie das saugseitige Schaufelelement 12 wird das druckseitige Schaufelelement 14 durch Aufeinanderlegen und thermisches Härteln einer Vielzahl von Lagen eines Prepregs, in welchem Verstärkungsfasern mit Harz imprägniert worden sind, erhalten. Das druckseitige Schaufelelement 14 wird unter Verwendung einer nachfolgend beschriebenen druckseitigen Form 34 geformt. In dem druckseitigen Schaufelelement 14 ist die Außenfläche der Verbundschaufel 10 derart ausgebildet, dass sie eine konkav gekrümmte Form aufweist. In dem druckseitigen Schaufelelement 14 weist die Innenfläche der Verbundschaufel 10 eine konvex gekrümmte Form auf und bildet einen Teil einer Innenfläche, welche den Innenraum 20 definiert.

**[0026]** Die beiden gegenüberliegenden Endteile des saugseitigen Schaufelelements 12 in Schaufelbreitenrichtung und die korrespondierenden beiden gegenüberliegenden Endteile des druckseitigen Schaufelelements 14 in Schaufelbreitenrichtung sind über eine neutrale Ebene P, welche die Mitte der Verbundschaufel 10 in Schaufeldickenrichtung umfasst, miteinander verbunden. Eine Innenfläche des saugseitigen Schaufelelements 12 zwischen seinen beiden gegenüberliegenden Endteilen in Schaufelbreitenrichtung und eine Innenfläche des druckseitigen Schaufelelements 14 zwischen den beiden gegenüberliegenden Enden in Schaufelbreitenrichtung sind derart ausgebildet, dass sie in Richtung der Außenfläche, bezogen auf die neutrale Ebene P, voneinander beabstandet sind, wobei diese Innenflächen den Innenraum 20 ausbilden. Dieser Innenraum 20 ist in Richtung des Schaufelfußes der Verbundschaufel 10 größer, und ist in Richtung der Schaufelspitze der Verbundschaufel 10 kleiner.

**[0027]** Im Rahmen der ersten Ausführungsform ist das in dem Prepreg enthaltene Harz nach der thermischen Härtung wärmebeständig. Im Einzelnen handelt es sich bei dem in dem Prepreg enthaltenen Harz um ein Harz, welches bei einer Temperatur von etwa 170°C zu härten beginnt und bei einer Temperatur von 180°C thermisch aushärtet.

**[0028]** Während das die Verstärkungsfasern und das Harz enthaltende Prepreg in der ersten Ausführungsform verwendet wird, umfassen geeignete Beispiele für Verstärkungsfasern Kohlenstofffasern, Glasfasern und Aramidfasern, und umfassen weiterhin Kunststofffasern und Metallfasern, sind jedoch nicht hierauf beschränkt. Das Harz ist bevorzugt ein wärmehärtendes Harz, kann jedoch auch ein thermoplastisches Harz sein. Beispiele für ein wärmehärtendes Harz umfassen ein Epoxidharz, ein Polyesterharz und ein Vinylesterharz. Beispiele für ein thermoplastisches Harz umfassen ein Polyamidharz, ein Polypropylenharz, ein Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)-Harz, Polyetheretherketon (PEEK), Poly-

etherketonketon (PEKK) und Polypyrenylensulfid (PPS). Allerdings ist das Harz, mit welchem die Verstärkungsfasern imprägniert sind, nicht auf diese Beispiele beschränkt und kann auch ein anderes Harz sein.

**[0029]** Der Innenraum 20 ist mit dem Schäumungsmittel 16 gefüllt. Dieses Schäumungsmittel 16 wird in den Innenraum 20 eingebracht und sodann durch Erwärmen zum Schäumen gebracht, wodurch der Innenraum 20 hiermit gefüllt wird. Wie in **Fig. 5** dargestellt ist, besteht das Schäumungsmittel 16 vor dem Aufschäumen aus einem Schäumungsmittelharz 25 und einer Vielzahl von Schäumungskörpern 26. Das Schäumungsmittelharz 25 härtet, indem es erwärmt wird, wobei es sich um das gleiche Harz handeln kann wie jenes, welches in dem Prepreg enthalten ist.

**[0030]** Die Schäumungskörper 26 schäumen auf, indem sie erwärmt werden, wobei sich die Schäumungskörper 26 beispielsweise in Kohlendioxid oder dergleichen umwandeln, was zur Erzeugung von Luftblasen 28 in dem Schäumungsmittelharz 25 führt. Die Schäumungskörper 26 weisen unterschiedliche Schäumungstemperaturen auf, bei welchen die Schäumungskörper 26 während der Erwärmung aufschäumen. Dies bedeutet, dass die Schäumungskörper 26 niedertemperaturseitige Schäumungskörper 26a und hochtemperaturseitige Schäumungskörper 26b umfassen. Die niedertemperaturseitigen Schäumungskörper 26a schäumen in einem Niedertemperaturbereich auf, welcher niedrigen Erwärmungstemperaturen während der thermischen Härtung entspricht. Die hochtemperaturseitigen Schäumungskörper 26b schäumen in einem Hochtemperaturbereich auf, welcher Temperaturen entspricht, die höher sind als der Niedertemperaturbereich während der thermischen Härtung. Als Schäumungskörper 26 werden beispielsweise Schaumkugelchen verwendet, welche jeweils durch Überziehen eines Schäumungsbestandteils mit einer aus thermoplastischem Harz bestehenden Schicht erhalten werden.

**[0031]** Was die niedertemperaturseitigen Schäumungskörper 26a betrifft, so umfassen Beispiele für das als Beschichtung verwendete Harz, mit welchem der Schäumungsbestandteil überzogen ist, Polyethylen und ein ABS-Harz. Was die hochtemperaturseitigen Schäumungskörper 26b betrifft, so umfassen Beispiele für das als Beschichtung verwendete Harz, mit welchem der Schäumungsbestandteil überzogen ist, Polyacetal, Nylon 6, Polyvinylidenchlorid und Polysulfon. Indem verschiedene Arten von Harz als Beschichtung verwendet werden, mit denen der Schäumungsbestandteil überzogen ist, besitzen die Schäumungskörper 26 folglich unterschiedliche Schäumungstemperaturen.

**[0032]** Damit die Schäumungskörper 26 einen einheitlichen und stabilen Schäumungszustand erzeugen, kann dem Schäumungsmittel 16 ein Faserbestandteil hinzugefügt werden.

**[0033]** Als nächstes wird unter Bezugnahme auf **Fig. 4** das Aufschäumen des Schäumungsmittels 16 beschrieben. Ein im oberen Teil von **Fig. 4** dargestelltes Diagramm zeigt die Temperaturveränderung des Harzes in dem Prepreg während der thermischen Härtung (nachfolgend beschriebener Härtungsschritt S3), wobei die Horizontalachse die Zeit angibt und die Vertikalachse die Temperatur angibt. Ein weiteres, im mittleren Teil von **Fig. 4** dargestelltes Diagramm zeigt die Viskositätsveränderung des Harzes in dem Prepreg während der thermischen Härtung, wobei die Horizontalachse die Zeit angibt und die Vertikalachse die Viskosität angibt. Noch ein weiteres, im unteren Teil von **Fig. 4** dargestelltes Diagramm zeigt die Veränderung des Schäumungsdrucks, bei welchem es sich um die Druckkraft des Schäumungsmittels 16 während der thermischen Härtung handelt, wobei die Horizontalachse die Zeit angibt und die Vertikalachse den Schäumungsdruck angibt.

**[0034]** Wie in **Fig. 4** dargestellt ist, wird die Temperatur, bei welcher das in dem Prepreg enthaltene Harz zu gelieren beginnt, als Prepreg-Gelierstarttemperatur (Harz-Gelierstarttemperatur) T1 (nachfolgend der Einfachheit halber als Temperatur T1 bezeichnet) eingestellt. Während der thermischen Härtung erhöht sich die Erwärmungstemperatur zum Erwärmen des Prepregs über die Zeit betrachtet mit konstanter Geschwindigkeit. Nachdem die Temperatur T1 erreicht worden ist, wird die Erwärmungstemperatur auf der Temperatur T1 gehalten. Die Viskosität des Harzes in dem Prepreg nimmt weiter ab, bis die Erwärmungstemperatur die Temperatur T1 erreicht, beginnt sich zum gleichen Zeitpunkt zu erhöhen, wie das Harz in der Nähe der Temperatur T1 zu gelieren (thermisch zu härteten) beginnt, und härtet schließlich vollständig aus.

**[0035]** Was das aus den Schäumungskörpern gebildete Schäumungsmittel 16 betrifft, so wird die Temperatur, bei welcher die niedertemperaturseitigen Schäumungskörper 26a aufschäumen, als niedertemperaturseitige Schäumungsstarttemperatur T2 (nachfolgend der Einfachheit halber als Temperatur T2 bezeichnet) eingestellt, wobei die Temperatur T2 niedriger ist als die Temperatur T1 ( $T_2 < T_1$ ). Die Temperatur, bei welcher die hochtemperaturseitigen Schäumungskörper 26b aufschäumen, wird als hochtemperaturseitige Schäumungsstarttemperatur T3 (nachfolgend der Einfachheit halber als Temperatur T3 bezeichnet) eingestellt, wobei die Temperatur T3 höher ist als die Temperatur T1 ( $T_3 > T_1$ ). Dies bedeutet, dass eine Beziehung zwischen der Tempe-

ratur T1, der Temperatur T2 und der Temperatur T3 besteht, in welcher „ $T_2 < T_1 < T_3$ “ gilt.

**[0036]** Dementsprechend schäumen die niedertemperaturseitigen Schäumungskörper 26a in dem Schäumungsmittel 16 während der thermischen Härtung auf, bevor das Harz in dem Prepreg die Temperatur T1 erreicht, wodurch sich im Innenraum der Verbundschaufel ein bestimmter Schäumungsdruck entwickelt. Dies bedeutet, dass, bevor das Harz in dem Prepreg die Temperatur T1 erreicht, aufgrund des Aufschäumens der niedertemperaturseitigen Schäumungskörper 26a eine erste Schäumungsdruckspitze auftritt. Zudem schäumen während der thermischen Härtung die hochtemperaturseitigen Schäumungskörper 26b in dem Schäumungsmittel 16 auf, nachdem das Harz in dem Prepreg die Temperatur T1 erreicht hat, wodurch sich im Innenraum der Verbundschaufel ein bestimmter Schäumungsdruck entwickelt. Der bestimmte Schäumungsdruck ist höher als der durch Aufschäumen der niedertemperaturseitigen Schäumungskörper 26a erzielte Schäumungsdruck. Dies bedeutet, dass, nachdem das Harz in dem Prepreg die Temperatur T1 erreicht hat, aufgrund des Aufschäumens der hochtemperaturseitigen Schäumungskörper 26b eine zweite Schäumungsdruckspitze auftritt.

**[0037]** Als nächstes werden unter Bezugnahme auf **Fig. 5** Zustände des Schäumungsmittels 16 in Bezug auf dessen Aufschäumverhalten im Einzelnen beschrieben. Ein Zustand des Schäumungsmittels 16 vor dem Aufschäumen ist im linken Teil von **Fig. 5** dargestellt, ein Zustand, in welchem die niedertemperaturseitigen Schäumungskörper 26a aufgeschäumt worden sind, ist in der Mitte von **Fig. 5** dargestellt, und ein Zustand, in welchem die hochtemperaturseitigen Schäumungskörper 26b aufgeschäumt worden sind, ist auf der rechten Seite von **Fig. 5** dargestellt.

**[0038]** Wie im linken Teil von **Fig. 5** dargestellt ist, wird das unaufgeschäumte Schäumungsmittel 16 vor dem Härteten in den zwischen dem saugseitigen Schaufelelement 12 und dem druckseitigen Schaufelelement 14 ausgebildeten Innenraum 20 platziert, wobei der Innenraum 20 einen Spalt 30 aufweist. Wenn das unaufgeschäumte Schäumungsmittel 16 erwärmt wird, schäumen zunächst die niedertemperaturseitigen Schäumungskörper 26a auf. Zum Zeitpunkt dieses Aufschäumens hat das Harz in dem Prepreg die Temperatur T1 noch nicht erreicht, und das ungehärtete saugseitige Schaufelelement 12 und druckseitige Schaufelelement 14 sind noch nicht gehärtet und haben sich noch nicht zusammengezogen. Dementsprechend schäumen die niedertemperaturseitigen Schäumungskörper 26a derart auf, dass das Schäumungsmittel 16 das saugseitige Schaufelelement 12 und das druckseitige Schaufelelement 14 vor dem Härteten von innen nach außen

mit einem vorbestimmten Schäumungsdruck mit Druck beaufschlagt.

**[0039]** Wenn das Schäumungsmittel 16 weiter erwärmt wird, schäumen danach die hochtemperaturseitigen Schäumungskörper 26b auf. Zum Zeitpunkt dieses Aufschäumens hat das Harz in dem Prepreg bereits die Temperatur T1 erreicht, und das saugseitige Schaufelelement 12 und das druckseitige Schaufelelement 14 wurden gehärtet und haben sich zusammengezogen. Beim Härteten und Zusammenziehen des saugseitigen Schaufelelements 12 und des druckseitigen Schaufelelements 14 dehnt sich der Innenraum 20 aus. Dementsprechend schäumen die hochtemperaturseitigen Schäumungskörper 26b derart auf, dass das Schäumungsmittel 16 das saugseitige Schaufelelement 12 und das druckseitige Schaufelelement 14 auch, nachdem sich der Innenraum 20 ausgedehnt hat und das saugseitige Schaufelelement 12 und das druckseitige Schaufelelement 14 gehärtet wurden und sich zusammengezogen haben, von innen nach außen mit einem vorbestimmten Schäumungsdruck mit Druck beaufschlagt.

**[0040]** Wenn die niedertemperaturseitigen Schäumungskörper 26a und die hochtemperaturseitigen Schäumungskörper 26b aufschäumen, werden darüber hinaus Luftblasen 28 gebildet, und das Volumen des Schäumungsmittels 16 erhöht sich aufgrund der gebildeten Luftblasen 28. In dem Schäumungsmittel 16 härtet, nachdem sich sein Volumen erhöht hat, das Schäumungsmittelharz 25 zusammen mit dem saugseitigen Schaufelelement 12 und dem druckseitigen Schaufelelement 14 aus.

**[0041]** Als nächstes wird das Verfahren zur Formgebung der vorstehend beschriebenen Verbundschaufel 10 unter Bezugnahme auf **Fig. 6** beschrieben. Das Verfahren zur Formgebung der Verbundschaufel 10 gemäß der ersten Ausführungsform umfasst einen Aufeinanderlegungsschritt S1, einen Formeinstellungsschritt S2, den Härtungsschritt S3 und einen Entformungsschritt S4.

**[0042]** Der Aufeinanderlegungsschritt S1 umfasst einen saugseitigen Aufeinanderlegungsschritt S1a in Form des Bildens eines saugseitigen Laminats 12a, bei welchem es sich um eine Version des saugseitigen Schaufelelements 12 vor seiner Formgebung handelt, und einen druckseitigen Aufeinanderlegungsschritt S1b in Form des Bildens eines druckseitigen Laminats 14a, bei welchem es sich um eine unausgebildete Version des druckseitigen Schaufelelements 14 handelt.

**[0043]** Im Rahmen des saugseitigen Aufeinanderlegungsschritts S1a wird das saugseitige Laminat 12a durch Aufeinanderlegen von Lagen des Prepregs auf die saugseitige Form 32 gebildet, mittels welcher das

saugseitige Schaufelelement 12 geformt wird. Die saugseitige Form 32 weist eine saugseitige Formgebungsfläche 32a auf, mittels welcher die Außenfläche des saugseitigen Schaufelelements 12 geformt wird, und weist eine flache saugseitige Formeinstellungsfläche 32b auf, welche am äußeren Rand der saugseitigen Formgebungsfläche 32a bereitgestellt ist. Die saugseitige Formgebungsfläche 32a ist derart ausgebildet, dass sie in einer konkaven Form verbeult ist, wodurch die Außenfläche des saugseitigen Schaufelelements 12 in einer konvex gekrümmten Form ausgebildet werden kann. Im Rahmen des saugseitigen Aufeinanderlegungsschritts S1a wird die saugseitige Form 32 derart platziert, dass die saugseitige Formgebungsfläche 32a senkrecht nach oben weist. Anschließend wird das saugseitige Laminat 12a durch Aufeinanderlegen von Lagen des Prepregs auf die saugseitige Formgebungsfläche 32a der saugseitigen Form 32 gebildet. Im Rahmen des saugseitigen Aufeinanderlegungsschritts S1a wird jedes Mal, wenn mehrere Lagen des Prepregs aufeinandergelegt werden, Vakuum angelegt, und wird auf diese Weise das saugseitige Laminat 12a gebildet.

**[0044]** Im Rahmen des druckseitigen Aufeinanderlegungsschritts S1b wird das druckseitige Laminat 14a durch Aufeinanderlegen von Lagen des Prepregs auf die druckseitige Form 34 gebildet, mittels welcher das druckseitige Schaufelelement 14 geformt wird. Die druckseitige Form 34 weist eine druckseitige Formgebungsfläche 34a auf, mittels welcher die Außenfläche des druckseitigen Schaufelelements 14 geformt wird, und weist eine flache druckseitige Formeinstellungsfläche 34b auf, welche am äußeren Rand der druckseitigen Formgebungsfläche 34a bereitgestellt ist. Die druckseitige Formgebungsfläche 34a ist derart ausgebildet, dass sie in einer konvexen Form aufquillt, damit die Außenfläche des druckseitigen Schaufelelements 14 in einer konkav gekrümmten Form ausgebildet werden kann. Im Rahmen des druckseitigen Aufeinanderlegungsschritts S1b wird die druckseitige Form 34 derart platziert, dass die druckseitige Formgebungsfläche 34a senkrecht nach oben weist. Anschließend wird das druckseitige Laminat 14a durch Aufeinanderlegen von Lagen des Prepregs auf die druckseitige Formgebungsfläche 34a der druckseitigen Form 34 gebildet. Wie beim saugseitigen Aufeinanderlegungsschritt S1a wird im Rahmen des druckseitigen Aufeinanderlegungsschritts S1b jedes Mal, wenn mehrere Lagen des Prepregs aufeinandergelegt werden, Vakuum angelegt, und wird auf diese Weise das druckseitige Laminat 14a gebildet.

**[0045]** Im Rahmen des Formeinstellungsschritts S2 wird eine Formeinstellung zwischen der saugseitigen Form 32 und der druckseitigen Form 34 durchgeführt, und wird das Schäumungsmittel 16 eingebracht. Im Einzelnen werden im Rahmen des Form-

einstellungsschritts S2 die saugseitige Formeinstellungsfläche 32b der saugseitigen Form 32 und die druckseitige Formeinstellungsfläche 34b der druckseitigen Form 34 überlappend angeordnet, wodurch das auf der saugseitigen Form 32 aufliegende saugseitige Laminat 12a und das auf der druckseitigen Form 34 aufliegende druckseitige Laminat 14a in Bezug auf die neutrale Ebene P überlappen. Das auf diese Weise überlappende saugseitige Laminat 12a und druckseitige Laminat 14a bilden den hohen Innenraum 20. Im Rahmen des Formeinstellungsschritts S2 gemäß der vorliegenden Ausführungsform erfolgt die Formeinstellung zwischen der saugseitigen Form 32 und der druckseitigen Form 34 auf folgende Weise: während die druckseitige Form 34 im gleichen Zustand wie im druckseitigen Aufeinanderlegungsschritt S1b auf der Unterseite platziert wird, wird die saugseitige Form 32, nachdem sie aus ihrem Zustand im saugseitigen Aufeinanderlegungsschritt S1a senkrecht gedreht wurde, auf die Oberseite der druckseitigen Form 34 platziert.

**[0046]** Im Rahmen des Formeinstellungsschritts S2 wird das unaufgeschäumte Schäumungsmittel 16 in den Innenraum 20 eingebracht, bevor das saugseitige Laminat 12a und das druckseitige Laminat 14a überlappen. Das unaufgeschäumte Schäumungsmittel 16 ist in Plattenform ausgebildet. Stattdessen kann das Schäumungsmittel 16 auch in Pastenform vorliegen. Das unaufgeschäumte Schäumungsmittel 16 kann derart angeordnet werden, dass es in dem Innenraum 20 einen Bereich einnimmt, in welchem der Temperaturanstieg in Schaufelbreitenrichtung am geringsten ist. Allerdings ist der Bereich, in welchem das Schäumungsmittel 16 angeordnet ist, nicht in besonderer Weise beschränkt. Beispiele für den Bereich, in welchem der Temperaturanstieg am geringsten ist, umfassen den Mittelbereich des Innenraums 20, einen Bereich, welcher in dem Innenraum 20 in Schaufeldickenrichtung am dicksten ist, und einen Bereich, welcher den dicksten Teilen der Lamine 12a und 14a entspricht. Im Rahmen des Formeinstellungsschritts S2 gemäß der vorliegenden Ausführungsform wird das Schäumungsmittel 16 auf jenem Laminat platziert, welches mittels der auf der Unterseite positionierten Form gebildet wird. Wenn beispielsweise die druckseitige Form 34 auf der Unterseite der saugseitigen Form 32 positioniert wird, wird das unaufgeschäumte Schäumungsmittel 16 auf der Oberseite des druckseitigen Lamine 14a platziert.

**[0047]** Im Rahmen des Härtungsschritts S3 werden das saugseitige Laminat 12a, das druckseitige Laminat 14a und das Schäumungsmittel 16 erwärmt, während die saugseitige Form 32 und die druckseitige Form 34 in Richtungen, in welchen sich diese Formen 32 und 34 aufeinander zubewegen, mit Druck beaufschlagt werden. Wie vorstehend beschrieben, wird in diesem Schritt das Schäum-

ungsmittel 16 in zwei Stufen aufgeschäumt, wobei die niedertemperaturseitigen Schäumungskörper 26a und die hochtemperaturseitigen Schäumungskörper 26b in unterschiedlichen Stufen aufschäumen. Dementsprechend werden im Rahmen des Härtungsschritts S3 das saugseitige Laminat 12a, das druckseitige Laminat 14a und das Schäumungsmittel 16 erwärmt, wodurch die niedertemperaturseitigen Schäumungskörper 26a in dem Schäumungsmittel 16 aufschäumen, bevor das Harz in dem Prepreg aushärtet. Wenn die niedertemperaturseitigen Schäumungskörper 26a aufschäumen, bilden die niedertemperaturseitigen Schäumungskörper 26a Luftblasen 28, wodurch sich das ungehärtete Schäumungsmittelharz 25 ausdehnt. Somit wird der Druck im Inneren des Innenraums 20 durch die Ausdehnung des Schäumungsmittels 16 hervorgerufen, wodurch das saugseitige Laminat 12a und das druckseitige Laminat 14a vor der Härtung von dem Schäumungsmittel 16 in Richtung der saugseitigen Form 32 und der druckseitigen Form 34 gedrückt werden.

**[0048]** Nachdem die niedertemperaturseitigen Schäumungskörper 26a in dem Schäumungsmittel 16 aufgeschäumt worden sind und das Harz in dem Prepreg die Temperatur T1 erreicht hat, beginnt das Schäumungsmittelharz 25 in dem Schäumungsmittel 16 zusammen mit dem Harz in dem Prepreg auszuhärten. Nachdem das Harz in dem Prepreg auszuhärten beginnt, schäumen die hochtemperaturseitigen Schäumungskörper 26b in dem Schäumungsmittel 16 auf. Wenn die hochtemperaturseitigen Schäumungskörper 26b aufschäumen, bilden die hochtemperaturseitigen Schäumungskörper 26b Luftblasen 28, wodurch sich das Schäumungsmittelharz 25 nach dem Beginn der Härtung ausdehnt. Somit wird der Druck im Inneren des Innenraums 20 durch die Ausdehnung des Schäumungsmittels 16 hervorgerufen, wodurch das saugseitige Laminat 12a und das druckseitige Laminat 14a nach Beginn der Härtung von dem Schäumungsmittel 16 in Richtung der saugseitigen Form 32 und der druckseitigen Form 34 gedrückt werden. Als Ergebnis der thermischen Härtung des Schäumungsmittelharzes 25 in dem Schäumungsmittel 16 zusammen mit dem Harz des Prepregs wird das Schäumungsmittel 16 in das saugseitige Laminat 12a und das druckseitige Laminat 14a integriert, wodurch die Verbundschaufel 10 geformt wird.

**[0049]** Im Rahmen des Entformungsschritts S4 werden die saugseitige Form 32 und die druckseitige Form 34 in Richtungen bewegt, in welchen diese Formen 32 und 34 auseinandergezogen werden, wodurch die auf diese Weise geformte Verbundschaufel 10 von der saugseitigen Form 32 und der druckseitigen Form 34 abgetrennt wird.

**[0050]** Gemäß der ersten Ausführungsform kann das Schäumungsmittel 16 im Rahmen des Härtungsschritts S3, wie vorstehend beschrieben, in zwei Stufen aufschäumen. Dementsprechend kann der Druck im Innenraum 20 der Verbundschaufel 10 aufrechterhalten werden, und kann das Schäumungsmittel 16 den Innenraum 20 der Verbundschaufel 10 adäquat mit Druck beaufschlagen. Hierdurch kann verhindert werden, dass die Verbundschaufel 10 einen Formdefekt aufweist, so dass die Verbundschaufel 10 in geeigneter Weise geformt werden kann.

**[0051]** Gemäß der ersten Ausführungsform schäumen die hochtemperaturseitigen Schäumungskörper 26b auf, nachdem das Prepreg die Temperatur T1 erreicht hat. Dementsprechend kann, selbst wenn die Druckbeaufschlagung aufgrund einer Ausdehnung des Innenraums 20 infolge Härtung des Prepregs geschwächt wird, eine unzureichende Druckbeaufschlagung vermieden werden, da die Druckbeaufschlagung im Innenraum 20 durch das Aufschäumen der hochtemperaturseitigen Schäumungskörper 26b nach Erreichen der Temperatur T1 aufrechterhalten werden kann.

**[0052]** Gemäß der ersten Ausführungsform schäumen zudem die niedertemperaturseitigen Schäumungskörper 26a auf, bevor das Prepreg die Temperatur T1 erreicht. Durch Aufschäumen der niedertemperaturseitigen Schäumungskörper 26a kann dementsprechend eine Trennung zwischen den Lagen des Prepregs aufgrund einer Viskositätsabnahme des Harzes in dem Prepreg während der Erwärmung des Prepregs verhindert werden.

**[0053]** Während das Schäumungsmittel 16 im Rahmen der ersten Ausführungsform in zwei Stufen zum Aufschäumen gebracht wird, muss das Schäumungsmittel 16 in mindestens zwei Stufen aufgeschaumt werden, und kann auch in drei oder mehr Stufen zum Aufschäumen gebracht werden.

#### Zweite Ausführungsform

**[0054]** Als nächstes wird ein Verfahren zur Formgebung der Verbundschaufel 10 gemäß einer zweiten Ausführungsform unter Bezugnahme auf **Fig. 7** und **Fig. 8** beschrieben. Um redundante Beschreibungen zu vermeiden, werden im Rahmen der zweiten Ausführungsform sich von der ersten Ausführungsform unterscheidende Teile beschrieben, und werden Komponenten, welche mit jenen der ersten Ausführungsform übereinstimmen, unter Verwendung der gleichen, ihnen zugeordneten Bezugszeichen beschrieben. **Fig. 7** zeigt Diagramme betreffend ein Schäumungsmittel für die Verwendung in dem Verfahren zur Formgebung einer Verbundschaufel gemäß der zweiten Ausführungsform. **Fig. 8** zeigt Schäumungszustände des Schäumungsmittels für die Verwendung in dem Verfahren zur Formgebung

einer Verbundschaufel gemäß der zweiten Ausführungsform.

**[0055]** In dem Verfahren zur Formgebung der Verbundschaufel 10 gemäß der ersten Ausführungsform sind die niedertemperaturseitigen Schäumungskörper 26a derart konzipiert, dass sie vor Erreichen der Temperatur T1 aufschäumen. In dem Verfahren zur Formgebung der Verbundschaufel 10 gemäß der zweiten Ausführungsform sind die niedertemperaturseitigen Schäumungskörper 26a derart konzipiert, dass sie vor Erreichen einer Temperatur aufschäumen, bei der das Schäumungsmittelharz 25 geliert.

**[0056]** Wie in **Fig. 7** dargestellt ist, wird die Temperatur, bei welcher das in dem Schäumungsmittel 16 enthaltene Schäumungsmittelharz 25 geliert, als Schäumungsmittel-Gelierstarttemperatur T4 (nachfolgend der Einfachheit halber als Temperatur T4 bezeichnet) eingestellt. In dieser Ausführungsform ist die Temperatur T4 eine Temperatur, welche niedriger ist als die Temperatur T1. Dementsprechend beginnt das Schäumungsmittelharz 25 zu gelieren, bevor das Harz in dem Prepreg geliert.

**[0057]** Im Rahmen der zweiten Ausführungsform erhöht sich während der thermischen Härtung die Erwärmungstemperatur zum Erwärmen des Prepregs und des Schäumungsmittels 16 über die Zeit betrachtet mit konstanter Geschwindigkeit. Nachdem die Temperatur T1 erreicht worden ist, wird die Erwärmungstemperatur auf der Temperatur T1 gehalten. Die Viskosität des Schäumungsmittelharzes 25 nimmt weiter ab, bis die Erwärmungstemperatur die Temperatur T4 erreicht, beginnt sich zum gleichen Zeitpunkt zu erhöhen, wie das Harz in der Nähe der Temperatur T4 zu gelieren (thermisch zu härten) beginnt, und härtet schließlich vollständig aus. Danach nimmt die Viskosität des Harzes in dem Prepreg weiter ab, bis die Erwärmungstemperatur die Temperatur T1 erreicht, beginnt sich zum gleichen Zeitpunkt zu erhöhen, wie das Harz in der Nähe der Temperatur T1 zu gelieren (thermisch zu härten) beginnt, und härtet schließlich vollständig aus.

**[0058]** In dieser Ausführungsform ist die Temperatur T2, bei welcher die niedertemperaturseitigen Schäumungskörper 26a aufschäumen, niedriger als die Temperatur T4 ( $T4 < T1$ ). Wie im Rahmen der ersten Ausführungsform ist darüber hinaus die Temperatur T3, bei welcher die hochtemperaturseitigen Schäumungskörper 26b aufschäumen, höher als die Temperatur T1 ( $T3 > T1$ ). Dies bedeutet, dass die Beziehung zwischen der Temperatur T1, der Temperatur T2, der Temperatur T3 und der Temperatur T4 wie folgt ist: „ $T2 < T4 < T1 < T3$ “.

**[0059]** Wie in **Fig. 8** dargestellt ist, wird dementsprechend mit einer Erwärmung des Schäumungsmittels 16 begonnen, nachdem es im Rahmen der ther-

schen Härtung (Härtungsschritt S3) in den Innenraum 20 der Verbundschaufel 10 (Schritt S11) eingebracht worden ist. Dementsprechend schäumen die niedertemperaturseitigen Schäumungskörper 26a in dem Schäumungsmittel 16 auf, bevor das Schäumungsmittelharz 25 die Temperatur T4 erreicht, wodurch sich im Inneren des Innenraums 20 der Verbundschaufel 10 ein bestimmter Schäumungsdruck entwickelt. Dies bedeutet, dass, bevor das Schäumungsmittelharz 25 die Temperatur T4 erreicht, aufgrund des Aufschäumens der niedertemperaturseitigen Schäumungskörper 26a eine erste Schäumungsdruckspitze auftritt. In diesem Fall weist das Schäumungsmittelharz 25 eine geringe Viskosität auf. Aufgrund des Aufschäumens der niedertemperaturseitigen Schäumungskörper 26a ist der Innenraum 20 dementsprechend mit dem Schäumungsmittelharz 25 befüllt (Schritt S12). Danach beginnt, wenn das Schäumungsmittelharz 25 die Temperatur T4 erreicht, das Schäumungsmittelharz 25 zu gelieren, und beginnt, wenn das Harz in dem Prepreg die Temperatur T1 erreicht, das Prepreg zu gelieren. Wie im Rahmen der ersten Ausführungsform schäumen während der thermischen Härtung die hochtemperaturseitigen Schäumungskörper 26b in dem Schäumungsmittel 16 auf, nachdem das Harz in dem Prepreg die Temperatur T1 erreicht hat, wodurch sich im Innenraum 20 der Verbundschaufel 10 ein bestimmter Schäumungsdruck entwickelt (Schritt S13). Der bestimmte Schäumungsdruck ist höher als der durch Aufschäumen der niedertemperaturseitigen Schäumungskörper 26a erzielte Schäumungsdruck. Dies bedeutet, dass, nachdem das Harz in dem Prepreg die Temperatur T1 erreicht hat, aufgrund des Aufschäumens der hochtemperaturseitigen Schäumungskörper 26b eine zweite Schäumungsdruckspitze auftritt.

**[0060]** Wie vorstehend beschrieben, ist die Prepreg-Gelierstarttemperatur T1 gemäß der zweiten Ausführungsform höher als die Schäumungsmittel-Gelierstarttemperatur T4, so dass das Schäumungsmittelharz 25 in dem Schäumungsmittel 16 früher härtet als das Harz in dem Prepreg. Dementsprechend schäumen die niedertemperaturseitigen Schäumungskörper 26a auf, bevor das Schäumungsmittelharz 25 die Temperatur T4 erreicht, wodurch der Innenraum 20 der Verbundschaufel 10 durch Dispergieren mit dem Schäumungsmittel 16 befüllt werden kann, bevor das Schäumungsmittel 16 härtet.

#### Bezugszeichenliste

10	Verbundschaufel	14	druckseitiges Schaufelelement
10a	dünner Teil	14a	druckseitiges Laminat
10b	dicker Teil	16	Schäumungsmittel
12	saugseitiges Schaufelelement	20	Innenraum
12a	saugseitiges Laminat	25	Schäumungsmittelharz
		26	Schäumungskörper
		26a	niedertemperaturseitiger Schaumstoff
		26b	hochtemperaturseitiger Schaumstoff
		28	Luftblase
		30	Spalt
		32	saugseitige Form
		32a	saugseitige Formgebungsfläche
		32b	saugseitige Formeinstellungsfläche
		34	druckseitige Form
		34a	druckseitige Formgebungsfläche
		34b	druckseitige Formeinstellungsfläche

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Formgebung einer aus einem Verbundmaterial bestehenden Verbundschaufel (10) durch Härten eines Prepregs, in welchem Verstärkungsfasern mit Harz imprägniert worden sind, wobei die Verbundschaufel (10) einen saugseitigen Teil (12) und einen druckseitigen Teil (14) umfasst, welche überlappen und miteinander verbunden sind, wobei das Verfahren umfasst:

Aufeinanderlegen von Lagen des Prepregs in einer saugseitigen Form (32) zum Formen des saugseitigen Teils (12), um auf diese Weise ein saugseitiges Laminat (12a) zu bilden, und Aufeinanderlegen von Lagen des Prepregs in einer druckseitigen Form (34) zum Formen des druckseitigen Teils (14), um auf diese Weise ein druckseitiges Laminat (14a) zu bilden;

Durchführen einer Formeinstellung zwischen der saugseitigen Form (32) und der druckseitigen Form (34), so dass das saugseitige Laminat (12a) und das druckseitige Laminat (14a) überlappen, und Anordnen eines Schäumungsmittels (16) in einem durch Überlappung des saugseitigen Laminats (12a) und des druckseitigen Laminats (14a) gebildeten Innenraum (20); und

Druckbeaufschlagen des saugseitigen Laminats (12a) und des druckseitigen Laminats (14a) vom Inneren her in Richtung der saugseitigen Form (32) bzw. der druckseitigen Form (34) durch Erwärmen des Schäumungsmittels (16) zwecks Ausdehnung, und Erwärmen des saugseitigen Laminats (12a) und des druckseitigen Laminats (14a) zwecks Härtung, wobei das Schäumungsmittel (16) eine Vielzahl von Schäumungskörpern (26), welche derart konzipiert

sind, dass sie beim Erwärmen aufschäumen, und ein Schäumungsmittelharz (25), welches derart konzipiert ist, dass es beim Erwärmen aushärtet, umfasst,

die Vielzahl von Schäumungskörpern (26) niedertemperaturseitige Schäumungskörper (26a) und hochtemperaturseitige Schäumungskörper (26b) umfasst,

die niedertemperaturseitigen Schäumungskörper (26a) und die hochtemperaturseitigen Schäumungskörper (26b) jeweils einen mit Harz überzogenen Schäumungsbestandteil aufweisen und infolge der Verwendung verschiedener Arten von Harz als Beschichtung unterschiedliche Schäumungstemperaturen besitzen,

die niedertemperaturseitigen Schäumungskörper (26a) derart konzipiert sind, dass sie beim Erwärmen des zu härtenden saugseitigen Laminats (12a) und druckseitigen Laminats (14a) in einem niedrigen Temperaturbereich aufschäumen, wodurch sich in dem Innenraum (20) ein bestimmter Schäumungsdruck entwickelt, und

die hochtemperaturseitigen Schäumungskörper (26b) derart konzipiert sind, dass sie beim Erwärmen des zu härtenden saugseitigen Laminats (12a) und druckseitigen Laminats (14a) in einem hohen Temperaturbereich, der mit höheren Temperaturen als der Niedertemperaturbereich korrespondiert, aufschäumen, wodurch sich in dem Innenraum (20) ein bestimmter Schäumungsdruck entwickelt, welcher höher ist als der durch das Aufschäumen der niedertemperaturseitigen Schäumungskörper (26a) erzielte Schäumungsdruck.

Es folgen 7 Seiten Zeichnungen

## Anhängende Zeichnungen

FIG.1

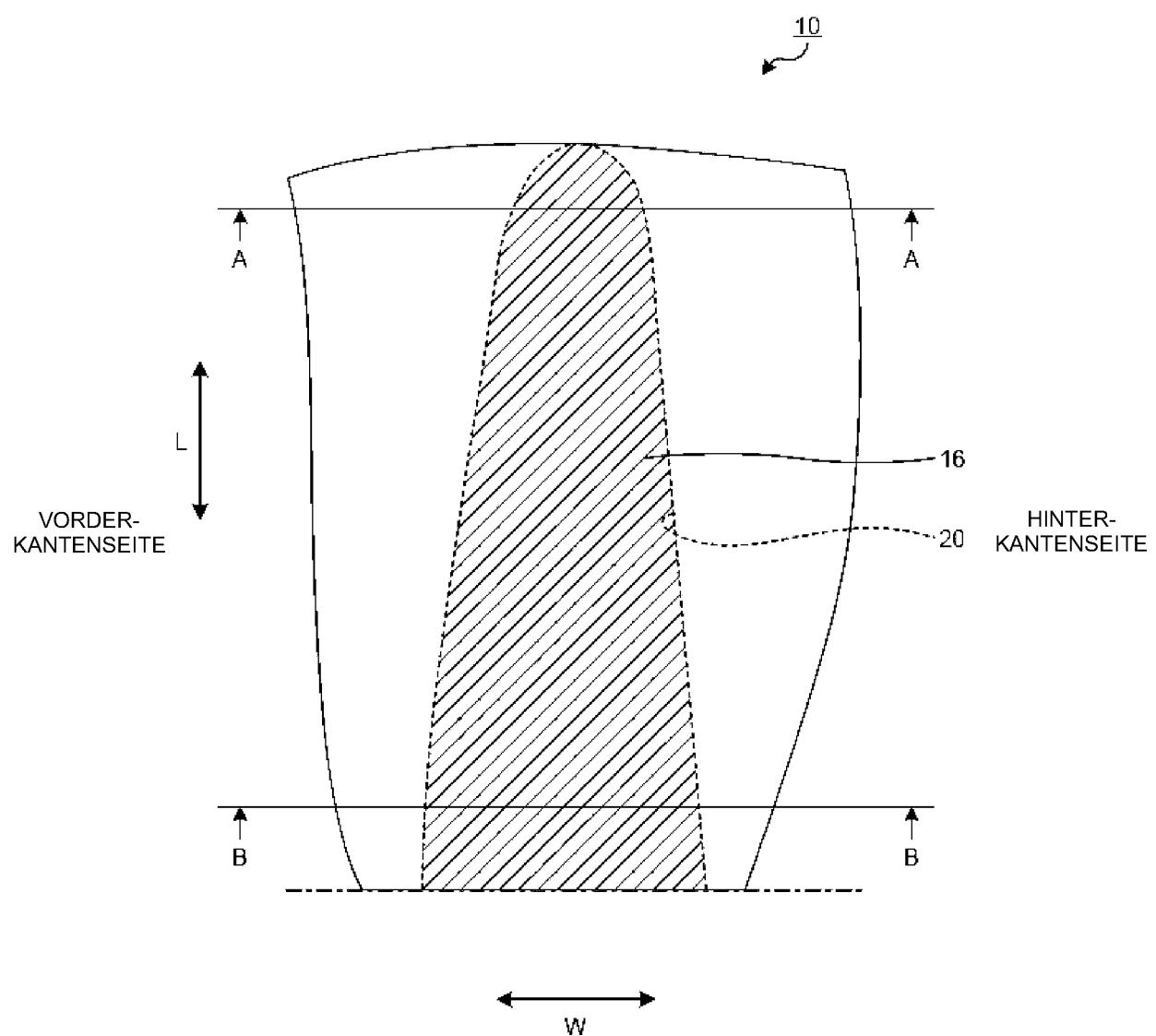


FIG.2

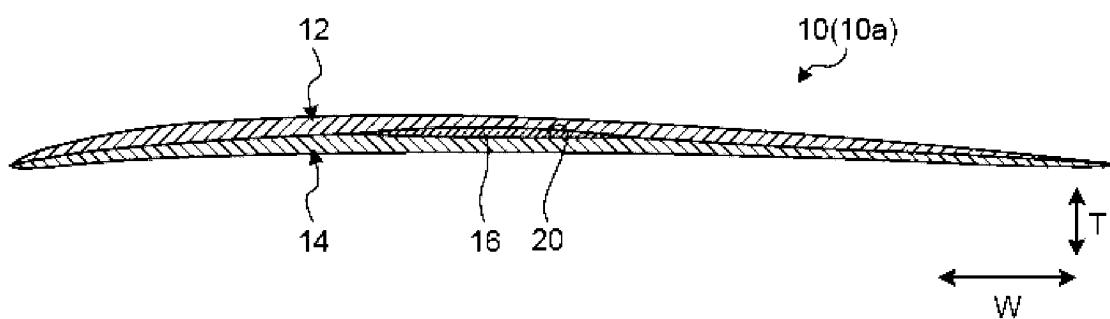


FIG.3

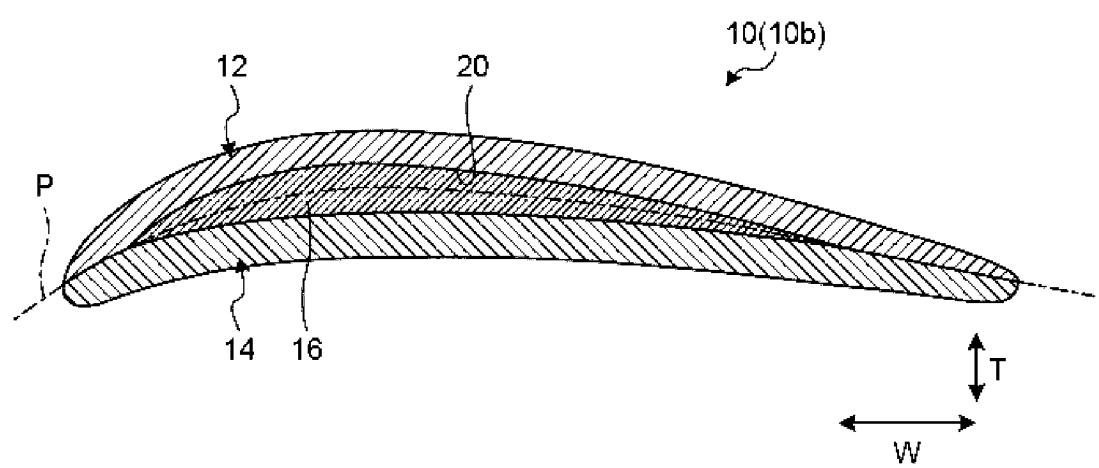


FIG.4

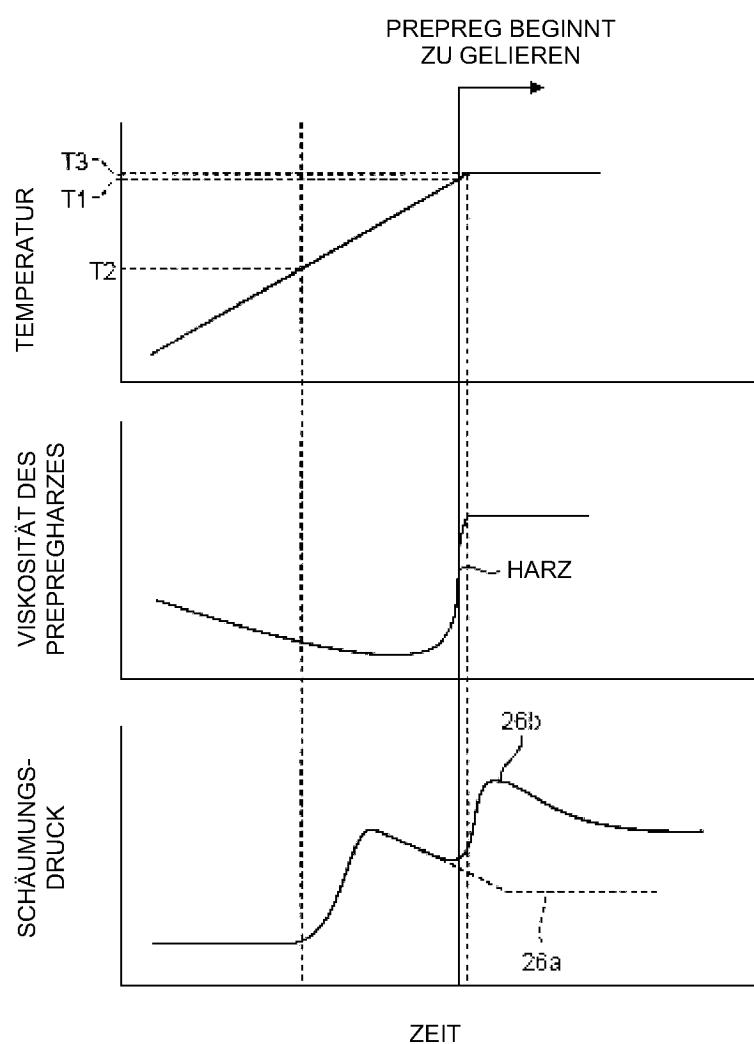


FIG.5

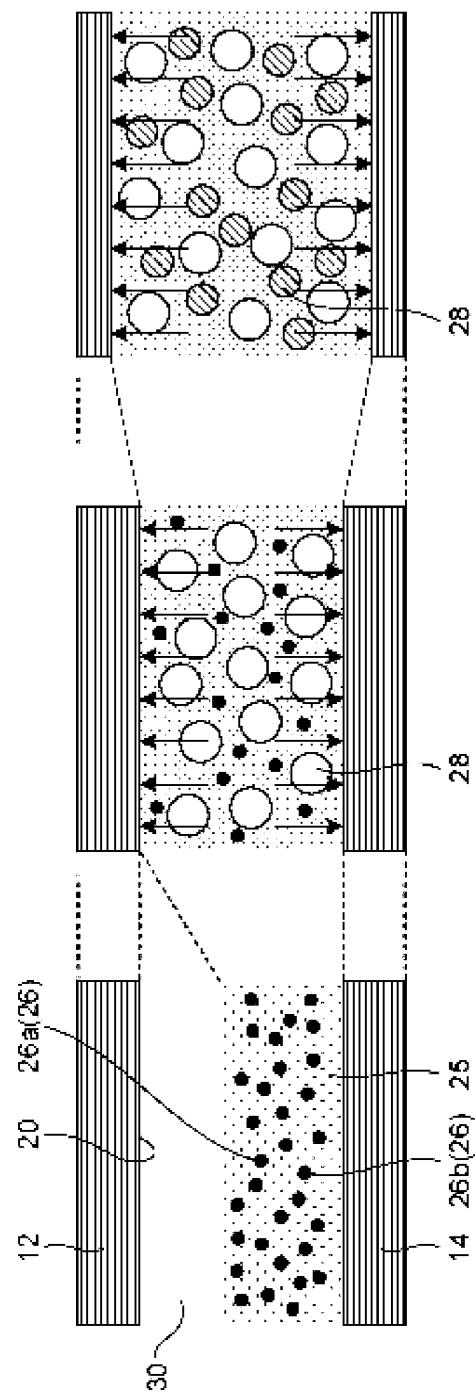


FIG.6

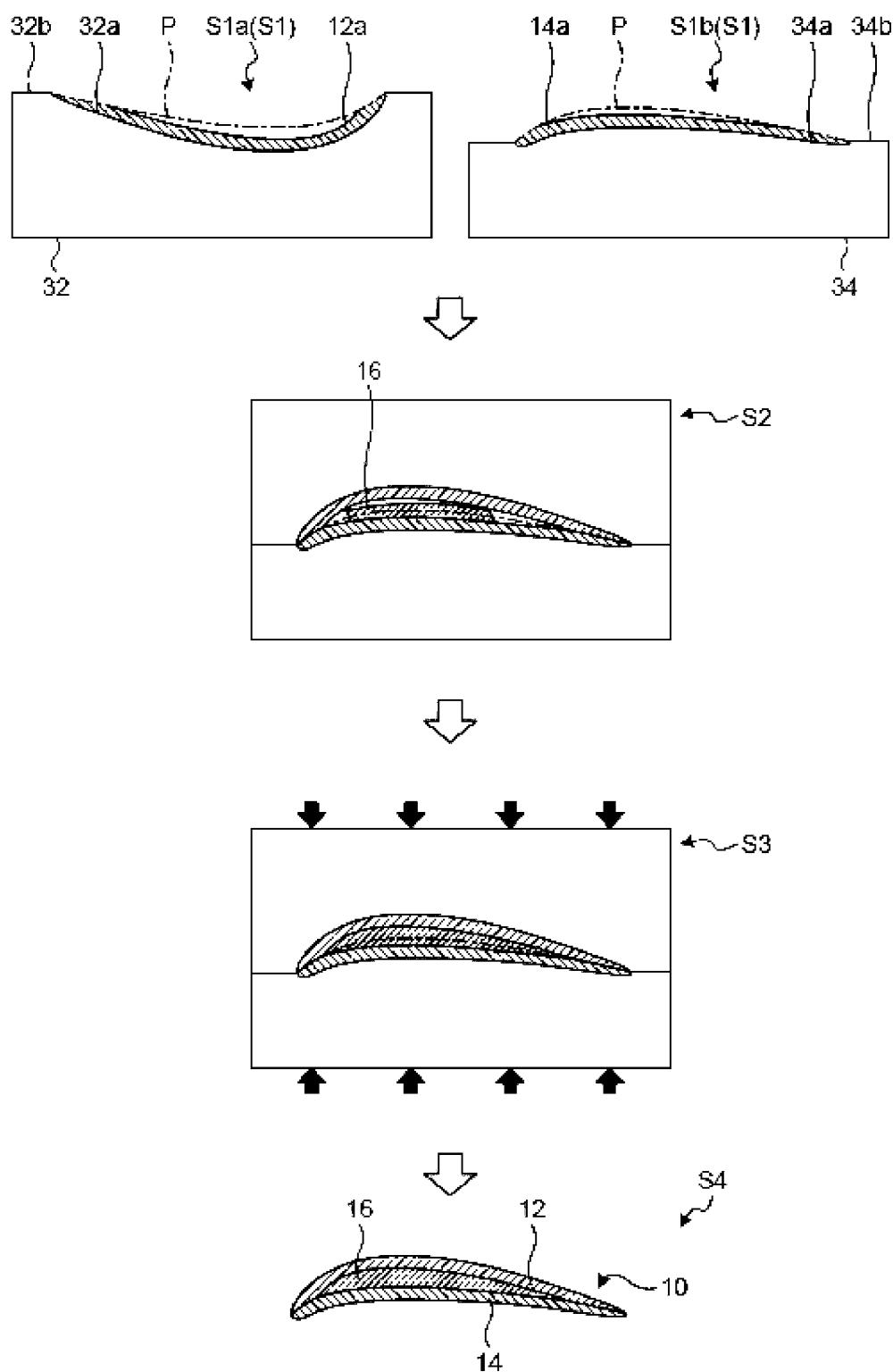


FIG.7

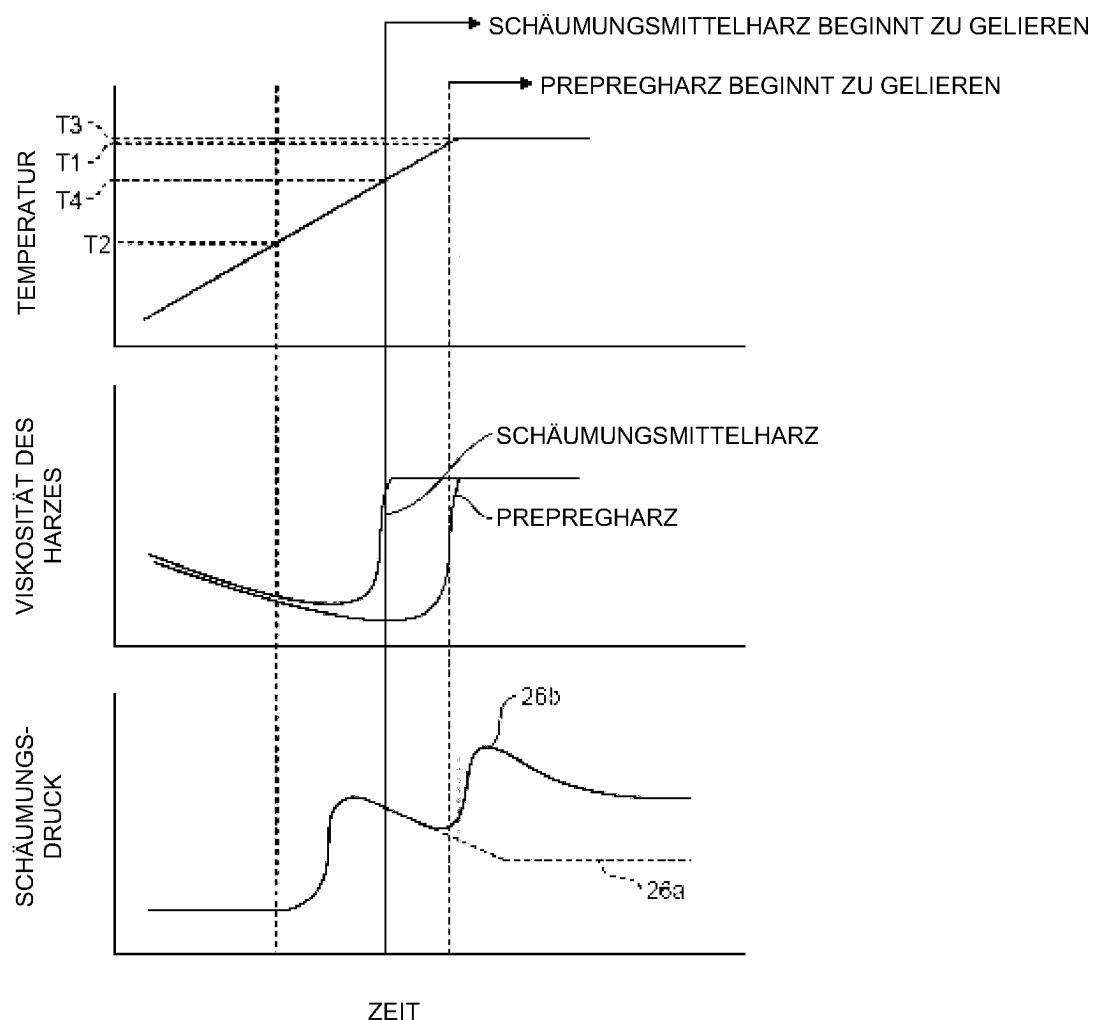


FIG.8

