

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
13. August 2009 (13.08.2009)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2009/098007 A2**

- (51) **Internationale Patentklassifikation:**  
*F03B 13/14* (2006.01) *F03B 13/22* (2006.01)
- (21) **Internationales Aktenzeichen:** PCT/EP2009/000648
- (22) **Internationales Anmeldedatum:**  
31. Januar 2009 (31.01.2009)
- (25) **Einreichungssprache:** Deutsch
- (26) **Veröffentlichungssprache:** Deutsch
- (30) **Angaben zur Priorität:**  
10 2008 007 616.3  
4. Februar 2008 (04.02.2008) DE
- (71) **Anmelder** (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **VOITH PATENT GMBH** [DE/DE]; St. Polte-ner Str. 43, 89522 Heidenheim (DE).
- (72) **Erfinder; und**
- (75) **Erfinder/Anmelder** (nur für US): **ARLITT, Raphael** [DE/DE]; Wagnerstrasse 59, 89077 Ulm (DE). **CAROLUS, Thomas** [DE/DE]; Im Nassen 17, 57250 Netphen (DE). **TEASE, Ken** [GB/GB]; 13a Harbour Road, IV1 1SY Inverness (GB).
- (74) **Anwalt: WEITZEL & PARTNER**; Friedenstrasse 10, 89522 Heidenheim (DE).
- (81) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- Veröffentlicht:**  
— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)



WO 2009/098007 A2

(54) **Title:** ROTOR BLADE DESIGN FOR A WELLS TURBINE

(54) **Bezeichnung:** ROTORBLATTGESTALTUNG FÜR EINE WELLSTURBINE

(57) **Abstract:** The invention relates to a Wells turbine comprising a hub with a plurality of rotor blades having a symmetric profile in the form of a teardrop starting from a leading edge; the rotor blades have a connection line the extension of which in the rotation plane of the Wells turbine deviates at least in parts of the radial extension of the rotor blade from the radial distance associated with the corresponding rotor blade, the connection line having at least one curved portion.

(57) **Zusammenfassung:** Die Erfindung betrifft eine Wellsturbine, umfassend eine Nabe mit einer Vielzahl von Rotorblättern mit einem von einer Profilnase ausgehend tropfenförmig ausgebildeten, symmetrischen Profil; die Rotorblätter weisen eine Auffädellinie auf, deren Verlauf in der Rotationsebene der Wellsturbine gegenüber einem dem jeweiligen Rotorblatt zugeordneten Radialstrahl wenigstens in Teilen der radialen Erstreckung des Rotorblatts abweicht, wobei die Auffädellinie wenigstens einen gekrümmten Bereich umfasst.

## Rotorblattgestaltung für eine Wellsturbine

Die Erfindung betrifft eine Rotorblattgestaltung für eine Wellsturbine, insbesondere zur Verwendung in einem Wellenkraftwerk.

5

Wellsturbinen sind bekannt – hierzu wird beispielhaft auf die GB 1574379 A verwiesen. Turbinen dieses Typs sind für eine bidirektionale, im Wesentlichen axiale Anströmung ausgelegt, wobei der Rotor einer Wellsturbine die Umlaufrichtung unabhängig von der Richtung der Anströmung beibehält. Meist umfasst der Rotor eine Nabe mit über den Außenumfang verteilten, nach radial außen weisenden Rotorblättern. Dabei sind die Rotorblätter symmetrisch zur Rotationsebene gestaltet, wobei als Profile im Allgemeinen tropfenförmige Tragflächenprofile Verwendung finden. Ferner werden die Rotorblätter üblicherweise starr angelenkt. Allerdings sind auch Ausgestaltungen mit

10

winkelverstellbaren Rotorblättern bekannt, wobei für diesen Fall die voranstehend genannte Symmetrieebene der Rotorblätter für die Nullstellung in der Rotationsebene liegt.

15

Ferner offenbart die US 5191225A ein Wellenkraftwerk, in dem eine zweistufige Wellsturbine in einem Strömungskanal aufgenommen ist und durch eine bidirektionale Luftströmung angetrieben wird. In einem Wellenkraftwerk dieser Bauart wird Energie aus einer oszillierenden Wassersäule gewonnen. Hierzu ist eine Wellenkammer vorgesehen, die eine unter dem Wasserspiegel liegende Zuströmungsöffnung aufweist. Brandet eine Welle gegen die Außenwandung der Wellenkammer, so erfolgt ein Zustrom von Meerwasser in das Innere der

20

Kammer, wodurch sich der Wasserspiegel in der Kammer anhebt. Entsprechend wird bei einer auslaufenden Welle der Wasserspiegel absinken, sodass sich eine Oszillationsbewegung der Wassersäule in der Wellenkammer ergibt, die annähernd der Wellenfrequenz entspricht. Oberhalb des Wasserspiegels ist in der

25

Wellenkammer eine Luftmasse eingeschlossen, die durch einen begrenzten Belüftungskanal mit der Umgebungsatmosphäre in Verbindung steht.

30

Entsprechend zur Oszillationsbewegung des Wasserkörpers in der Wellenkammer

wird die darüber befindliche Luftmasse einer Druckschwankung unterliegen, sodass zum Druckausgleich im Belüftungskanal eine ständig wechselnde, bidirektionale Luftströmung hoher Geschwindigkeit entsteht, die zur Gewinnung elektrischer Energie verwendet werden kann.

5

Ein möglicher Profilverlauf für die Rotorblätter einer Wellsturbine ist durch die vierstellige NACA Reihe gegeben. So beschreibt das NACA 0012-Profil eine Profilkontur mit einer Dicke von 12 % bezogen auf die Sehnenlänge. Dabei verläuft die Profilsehne und damit die Symmetrielinie des Profils parallel zur  
10 Rotationsebene der Turbine. Beim Betrieb der Wellsturbine liegt ein effektiver Anströmungswinkel gegen das Profil der jeweiligen Turbinenblätter vor, der sich durch die Vektoraddition der Umlaufgeschwindigkeit und der Anströmungsgeschwindigkeit der antreibenden Luftströmung ergibt.

10

Typischerweise sind die Anströmungswinkel klein, sodass das symmetrische Profil im Sinne eines Tragflügels wirkt und die am aerodynamischen Zentrum  
15 angreifenden Kräfte eine Teilkomponente in Tangentialrichtung in Bezug auf die Nabe der Wellsturbine aufweisen, die dem Vortrieb dient. Die weiteren aerodynamischen Kräfte senkrecht zu dieser Tangentialrichtung sind über die Turbinenlager aufzufangen.

15

20

Für Wellsturbinen ergibt sich, neben der Problematik einer hohen Geräuschemission und dem schlechten Anlaufverhalten, die Schwierigkeit, dass mit zunehmendem Anströmungswinkel, typischerweise ab  $13^\circ$ , an den Turbinenblättern ein Strömungsabriss erfolgen kann. Ein solchermaßen großer  
25 Anströmungswinkel kann für große Durchflusskoeffizienten auftreten, wenn aufgrund eines stark variierenden Luftstroms eine schnelle Zunahme der Anströmungsgeschwindigkeit vorliegt und der Anstieg der Umfangsgeschwindigkeit der Wellsturbine nicht schnell genug erfolgt, beziehungsweise diese bereits auf ihrer Nenndrehzahl läuft.

25

30

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Wellsturbine so zu gestalten, dass der Arbeitsbereich erweitert wird und ein Abriss der Strömung an den

Rotorblättern zu höheren Durchflusskoeffizienten hin verschoben ist. Ferner soll sich die Wellsturbine durch konstruktive und fertigungstechnische Einfachheit und einen hohen Wirkungsgrad auszeichnen.

- 5 Die Erfindung wird durch die Merkmale des unabhängigen Anspruchs gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen ergeben sich aus den Unteransprüchen.

Die Erfinder haben erkannt, dass eine Rotorblattgeometrie, für die Auffädellinie der Profilschnitte in der Rotationsebene gegenüber Radialrichtung gekrümmt ist,  
10 einen Strömungsabriss im Fall hoher Durchflusskoeffizienten hinauszögert und damit den Betriebsbereich der Wellsturbine vergrößert. Dies betrifft im Wesentlichen Ausgestaltungen mit einer Auffädellinie, die gegenüber dem Radialstrahl wenigstens in Teilbereichen in Umlaufrichtung verlaufen.

15 Für eine Ausgestaltung einer gekrümmten Rotorblattgeometrie mit einem Nachlauf zum Radialstrahl kann für einen Betriebsbereich, für den eine Strömungsablösung nur lokal im nabennahen Bereich und nicht über einen wesentlichen Teil der radialen Erstreckung des Rotorblatts vorliegt, der Gesamtwirkungsgrad erhöht werden. Dieser Umstand folgt aus einer durch die Rotorblattgeometrie bedingten  
20 Strömungskonzentration in Verbindung mit einer Geschwindigkeitserhöhung der Anströmung in den radial äußeren Bereichen des Rotorblatts. Aufgrund des längeren Hebelarms der äußeren Rotorblattbereiche wird eine insgesamt höhere Leistung aus der Strömung entnommen. Des Weiteren werden mit der erfindungsgemäßen Rotorblattgeometrie, insbesondere bei der Wahl einer  
25 wenigstens in Teilabschnitten gekrümmten Auffädellinie, die Verluste verringert, die bei herkömmlichen Rotorblättern durch akustische Effekte entstehen.

Für eine erste, erfindungsgemäße Ausgestaltungsvariante der Rotorblätter liegt wenigstens in Teilbereichen der Längserstreckung der Auffädellinie eine  
30 Krümmung relativ zum Radialstrahl vor. Dabei wird eine Winkelabweichung gegenüber dem Radialstrahl von wenigstens 5° bevorzugt. Für eine alternative Ausgestaltung ist der Verlauf der Auffädellinie eines Rotorblatts so gekrümmt,

dass eine sichelförmige Blattgeometrie entsteht. Für diesen Fall wird für die Mindestabweichung einer sichelförmigen Auffädellinie vom Radialstrahl ein Vor- oder Nachlauf der Rotorblattspitze von wenigstens  $5^\circ$  zum Radialstrahl bevorzugt.

5 Vorliegend wird unter dem Begriff „Radialstrahl“ eine Gerade verstanden, die in der Rotationsebene der Wellsturbine liegt und die von der Drehachse der Wellsturbine ausgehend radial durch den Fußpunkt des zugeordneten Rotorblatts verläuft. Der Fußpunkt wird als Schnitt der Auffädellinie mit der Tragstruktur, gewöhnlich der Nabe der Wellsturbine, festgelegt. Dabei ist der Begriff einer  
10 Auffädellinie vorliegend so definiert, dass diese durch die Verbindungslinie charakteristischer Punkte der Profilschnitte entsteht. Dies kann beispielsweise der Schnittpunkt der Skelettlinie mit der Mittellinie eines Profilschnitts oder ein Punkt auf der Skelettlinie für eine vorgegebene Profiltiefe, etwa bei einem Viertel der Profiltiefe, sein. Im letztgenannten Fall ist der charakteristische Punkt der  
15 Angriffspunkt der aerodynamischen Kräfte für den jeweiligen Profilschnitt. Unabhängig von der im Einzelfall getroffenen Wahl zur Festlegung der Auffädellinie soll für eine erfindungsgemäße Rotorblattgeometrie gelten, dass durch die Krümmung eine Abweichung zum Verlauf des Radialstrahls in der  
20 Rotationsebene vorliegt.

20

Ein weiterer Vorteil, der sich neben der Strömungsstabilisierung für eine erfindungsgemäße Rotorblattgeometrie ergibt, ist in der verringerten Geräuschemission zu sehen. Dabei zeichnen sich insbesondere sichelförmige  
25 Gestaltungen der Rotorblätter durch eine verminderte Lärmerzeugung aus.

25

Weitere akustische Verbesserungen können durch eine Symmetriebrechung in Umfangsrichtung bewirkt werden. Für die erfindungsgemäße Geometrie kann beispielsweise eine Variation der radiusabhängigen Abweichung der Auffädellinie vom Radialstrahl für aufeinander folgende Rotorblätter gewählt sein.

30

Ferner erlaubt eine Krümmung der Auffädellinie gegenüber dem Radialstrahl den Vorstau- oder Nachlaufbereich um feststehende Strömungshindernisse, wie Streben oder Leitbleche, über einen weiteren Drehwinkelbereich der Wellsturbine

zu durchqueren, sodass die Entstehung von Druckpulsen an den Rotorblättern verringert wird.

Nachfolgend wird die Erfindung anhand von Ausführungsbeispielen und im  
5 Zusammenhang mit Figurendarstellungen genauer erläutert. Diese zeigen im Einzelnen Folgendes:

- 10  
Figur 1 zeigt in einer Draufsicht auf die Rotationsebene einer Wellsturbine eine Ausgestaltung der Erfindung mit in Sichelform verlaufenden Rotorblättern.
- 15  
Figur 2 zeigt die Anströmungsverhältnisse im Fall einer Strömungsablösung für ein dem Stand der Technik entsprechendes Rotorblatt mit Radialstrahlgeometrie.
- Figuren  
3a und 3b zeigen die Anströmung des in Figur 2 gezeigten Rotorblatts für die Radien  $r_1$  und  $r_3$ .
- 20  
Figur 4 zeigt die Strömungsablösung im Fall eines erfindungsgemäßen Rotorblatts mit einer in Umlaufrichtung der Wellsturbine gegenüber dem Radialstrahl in Umlaufrichtung gekrümmten Auffädellinie.
- 25  
Figur 5 zeigt die Anströmungsverhältnisse für einen Durchflusskoeffizienten, für den noch keine großflächige Strömungsablösung vorliegt im Fall einer erfindungsgemäßen Rotorblattgeometrie mit einer gegenüber dem Radialstrahl nachlaufenden Auffädellinie.
- 30  
Figur 6 zeigt eine weitere Gestaltungsvariante eines erfindungsgemäßen Rotorblatts mit einer sichelförmig zurückspringenden Auffädellinie.

Figur 7 zeigt eine alternative Gestaltung eines erfindungsgemäßen Rotorblatts mit einer sichelförmig vorspringenden Auffädellinie.

Figur 1 zeigt eine Draufsicht in Axialrichtung auf eine erfindungsgemäß gestaltete Wellsturbine 1. Skizziert ist eine Nabe 2 mit einer exemplarischen Anordnung von drei Rotorblättern 3.1, 3.2 und 3.3. Diese sind äquidistant, d.h. mit einem Winkelabstand von  $120^\circ$ , über den Umfang der Nabe 2 verteilt. Für jedes der Rotorblätter 3.1, 3.2, 3.3 ist ein von der Drehachse 4 der Nabe 2 ausgehender Radialstrahl 5.1, 5.2, 5.3 dargestellt. Dieser stellt eine in radialer Richtung weisende Gerade dar, die durch den jeweiligen Fußpunkt des Rotorblatts 3.1, 3.2, 3.3 läuft. Als Fußpunkt ist für den unmittelbar an die Nabe 2 angrenzenden Profilschnitt der Punkt bei einem Viertel der Profiltiefe auf der Profilsehne festgelegt.

Erfindungsgemäß ist die Geometrie der Rotorblätter 3.1, 3.2, 3.3 so gewählt, dass die Auffädellinie 6.1, 6.2, 6.3 wenigstens in Teilabschnitten vom Verlauf des Radialstrahls 5.1, 5.2, 5.3 aufgrund der Krümmung abweicht. Unter der Auffädellinie wird die Verbindung definierter Punkte der Profilschnitte verstanden. Vorliegend ist dies der Punkt auf der Profilsehne bei einem Viertel der Profiltiefe. Dabei kann eine Auffädellinie aus anderen charakteristischen Punkten des Profils zusammengesetzt werden, beispielsweise dem Schnitt der Mittellinie mit der Skelettlinie. Für diesen Fall wird zur Festlegung des Radialstrahls der Fußpunkt des an die Nabe angrenzenden Profilschnitts entsprechend gewählt. Die erfindungsgemäße Rotorblattgeometrie zeichnet sich dadurch aus, dass für jede mögliche Wahl der Auffädellinie diese wenigstens in Teilabschnitten entlang ihrer Radialerstreckung vom Radialstrahl abweicht. Im Allgemeinen ist diese Abweichung eine radiusabhängige Funktion.

Für die in Figur 1 skizzierte Ausgestaltung erfolgt die Abweichung vom Radialstrahl in Form einer gekrümmten Auffädellinie, sodass sichelförmige Rotorblattgeometrien entstehen. Für die gezeigte Variante weist die Sichelung in Richtung des Umlaufs der Wellsturbine. Demnach liegt an der radial äußeren

Kante des Rotorblatts der Punkt der größten Radialstrahlabweichung 7 zur Auffädellinie 6.1, 6.2, 6.3, wobei für die dargestellte Gestaltung ein Vorlauf vorliegt.

5 Zwischen der radial verlaufenden Gerade durch den Punkt der größten Radialstrahlabweichung 8 und dem Radialstrahl 5.1, 5.2, 5.3 kann für das jeweilige Rotorblatt 3.1, 3.2, 3.3 eine Winkelabweichung  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  ermittelt werden. Die Winkelabweichungen  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  müssen nicht notwendigerweise übereinstimmen. Dabei ist es möglich, dass die Auffädellinie in der  
10 Rotationsebene dem Radialstrahl 5.1, 5.2, 5.3 vorausläuft und somit in Vorwärtsrichtung eine Krümmung erzeugt. Alternativ kann auch ein Nachlauf, d.h. eine Krümmung entgegen der Rotationsrichtung vorliegen. Im Hinblick auf eine Geräuschverminderung sind Rotorblattgeometrien mit einem Vorlauf oder einem Nachlauf zum Radialstrahl 5.1, 5.2, 5.3 vorteilhaft. Des Weiteren ist es denkbar,  
15 einen gesichelten Verlauf der Auffädellinie 6.1, 6.2, 6.3 zu wählen, die im radial äußersten Punkt des Rotorblatts 3.1, 3.2, 3.3 wieder zum Radialstrahl 5.1, 5.2, 5.3 zurückführt. Eine solche Ausgestaltung wird später anhand der Figuren 6 und 7 exemplarisch dargestellt.

20 Aus den Figuren 2 bis 4 ist der Vorteil ersichtlich, der sich aus der erfindungsgemäßen Gestalt der Rotorblätter im Hinblick auf eine Strömungsablösung ergibt. Gezeigt ist der Fall eines hohen Durchflusskoeffizienten und damit einer hohen axialen Geschwindigkeit der antreibenden Strömung gegenüber der Umfangsgeschwindigkeit der Rotorblätter.

25 In Figur 2, die ein dem Stand der Technik entsprechendes Rotorblatt 3 mit Radialstrahlgeometrie darstellt, ist ein erster Bereich 14 skizziert, in dem eine Strömungsablösung auftritt. Dieser erste Bereich 14 liegt nabennah und reicht an der Hinterkante 11 des Rotorblatts 3 bis zum Radius  $r_2$ .

30 In den Figuren 3a und 3b sind exemplarisch die Anströmungsverhältnisse für die Radien  $r_1$  und  $r_3$  aus Figur 2 jeweils an der Profilnase 12 dargestellt. Für den

Radius  $r_1$  zeigt Figur 3a die vektorielle Geschwindigkeitsaddition aus einer ersten Umlaufgeschwindigkeit  $u_1$  und Anströmungsgeschwindigkeit  $v_1$ , die zu einer ersten effektiven Anströmungsgeschwindigkeit  $v_{\text{eff}1}$  mit einem ersten Anstellwinkel  $\beta_1$  führt. Dieser erste Anstellwinkel  $\beta_1$  übersteigt einen kritischen Wert, sodass eine Strömungsablösung an einem bestimmten Punkt der Strömung entlang des Profils resultiert. Im Vergleich hierzu ist in Figur 3b, welche die Anströmungsverhältnisse für den Radius  $r_3$  verdeutlicht, die zweite effektive Anströmungsgeschwindigkeit  $v_{\text{eff}2}$  gezeigt, die aus der Vektoraddition der Anströmungsgeschwindigkeit  $v_1$  und der gegenüber dem Radius  $r_1$  höheren zweiten Umlaufgeschwindigkeit  $u_2$  resultiert. Entsprechend entsteht ein zweiter Anstellwinkel  $\beta_2$ , der kleiner ist als der erste Anstellwinkel  $\beta_1$  und der den kritischen Anstellwinkel, für den Strömungsablösung auftritt, unterschreitet. Allerdings tritt aufgrund der Ablösung im ersten Bereich 14 eine Blockade der radial inneren Anströmung des Rotorblatts 3 auf, sodass entsprechend der in Figur 2 skizzierten Strömungsumlenkung radial nach außen gerichtete Strömungsanteile vorliegen, die die ursprüngliche Anströmungsgeschwindigkeit im Bereich des Radius  $r_3$  um den Betrag  $\Delta v$  erhöhen. Gemäß Figur 3b führt diese Zunahme der Anströmungsgeschwindigkeit zu einer dritten effektiven Anströmungsgeschwindigkeit  $v_{\text{eff}3}$  mit einem zugehörigen dritten Anströmungswinkel  $\beta_3$ , der wiederum oberhalb der Schwelle der Ablösung liegt.

Demnach folgt, dass für die in Figur 2 gezeigten Verhältnisse auch in einem zweiten Bereich 15 ein Strömungsabriss vorliegt. Entsprechend zieht sich der Strömungsabriss im Wesentlichen über die gesamte radiale Erstreckung des Rotorblatts 3 und reicht bis zu dessen radial äußeren Bereichen, die an die Wandung 13 des Strömungskanals angrenzen. Als Folge wird der Wirkungsgrad stark abfallen.

Nachfolgend wird anhand von Figur 4 erläutert, dass mit einer erfindungsgemäßen Rotorblattgeometrie, die eine Krümmung mit Vorlauf der Auffädellinie zum Radialstrahl aufweist, die Ablösungsschwelle zu größeren Durchflusskoeffizienten hin verschoben werden kann. Dargestellt sind wiederum der erste Radius  $r_1$ , der

zweite Radius  $r_2$  und der dritte Radius  $r_3$ , die in Entsprechung zu Figur 2 gewählt sind. Angenommen wird, dass der Radius  $r_2$  den ersten Bereich 14 mit der initialen Strömungsablösung nach radial außen begrenzt. Aufgrund der Strömungsablösung im ersten Bereich 14, erfolgt, wie voranstehend dargelegt, eine Blockadewirkung und eine Strömungsverdrängung nach radial außen. Allerdings ergibt sich aufgrund des Vorlaufs der Auffädellinie des Rotorblatts 3 und der folglich vorwärts geneigten Hinterkante 11 ein kleiner Bereich auf dem Rotorblatt 3, für den die Anströmungsgeschwindigkeit durch diesen Effekt zunimmt. Damit reduziert sich die radiale Erstreckung des zweiten Bereichs 15, in dem durch die Strömungsumlenkung ein Strömungsabriss bewirkt wird, im Vergleich zu einem Radialstrahlrotor. Wesentlich für die Ausweitung des zur Verfügung stehenden Betriebsbereichs ist, dass die erfindungsgemäße Rotorblattgeometrie im Vergleich zu einer Radialstrahlgeometrie für den in Figur 4 skizzierten Betriebsbereich noch nicht zu einer sich über den gesamten Radius erstreckenden Vollablösung der Strömung führt.

Entsprechend der vorangehenden Darlegung führt eine Krümmung der Auffädellinie 6 relativ vom Radialstrahl 5, die bezüglich der Umlaufrichtung zu einem Nachlauf der Auffädellinie 6 führt, zu einer Verstärkung der Strömungsablösung. Allerdings kann auch eine solche Abweichung von der Radialstrahlgeometrie in bestimmten Betriebsbereichen vorteilhaft sein, sodass Wellsturbinen, für die aufgrund der Anlagenkonfiguration die Problematik eines vollständigen Strömungsabrisses ausgeschlossen werden kann, im Umkehrschluss über alle Betriebspunkte gemittelt einen höheren Wirkungsgrad aufweisen. Dieser Umstand ergibt sich aus einer Wirkungsgraderhöhung bei Durchflusskoeffizienten, für die keine über die volle radiale Erstreckung reichende Strömungsablösung vorliegt – ein solcher Betriebspunkt ist in Figur 5 skizziert.

In Figur 5 ist ein Ausführungsbeispiel mit einem Nachlauf der gekrümmten Auffädellinie 6 gegenüber dem Radialstrahl 5 dargestellt. Zusätzlich wird von einem Betriebspunkt ausgegangen, für den ein maximaler Durchflusskoeffizient vorliegt, der nur in einem stark lokal begrenzten, nabennahen Bereich zu einem

initialen Strömungsabriss führt. Hierzu ist in Figur 5 wiederum der erste Bereich 14 skizziert, der radial außen durch den Radius  $r_4$  begrenzt wird. Aufgrund der Blockadewirkung und der hieraus resultierenden radialen Strömungsablenkung tritt zusätzlich in einem zweiten Bereich 15, der durch den Radius  $r_5$  nach radial außen begrenzt ist, eine Strömungsablösung auf. Aufgrund der erfindungsgemäßen Abweichung der Auffädellinie 6 vom Radialstrahl 5 erstreckt sich sowohl der erste Bereich 14 als auch der zweite Bereich 15 gegenüber einer Radialstrahlgeometrie weiter in Radialrichtung. Demnach weicht die Strömung aufgrund der Blockadewirkung durch den Strömungsabriss weiter nach radial außen aus und vergrößert das antreibende Moment auf größeren Radien des Rotorblatts und damit in den Bereichen des größeren Hebels, mit der Folge einer höheren Leistungsaufnahme. Dies führt zu einem verbesserten Wirkungsgrad der Wellsturbine.

Die erfindungsgemäße Geometrie für die Rotorblätter einer Wellsturbine kann durch zusätzliche Maßnahmen, die ihrerseits einen Strömungsabriss verzögern, ergänzt werden. Hierbei kommen Rauheiten auf der Oberfläche der Rotorblätter in Betracht, die Einfluss auf die Strömungsgrenzschicht nehmen und die Bildung von Strömungsablösungen hinauszögern.

Weitere Modifikationen der Erfindung im Rahmen der nachfolgenden Schutzansprüche sind möglich. Eine weitere Maßnahme ist darin zu sehen, die erfindungsgemäße Rotorblattgeometrie mit einem aktiven oder passiven Winkelverstellmechanismus 9 zum Herausdrehen des Rotorblatts aus der Rotationsebene zu versehen. Dieser kann dazu dienen, im Falle hoher Durchflusskoeffizienten die Anstellwinkel für die Anströmung zu verringern und damit einen Strömungsabriss hinauszuzögern. Zusätzlich wird durch diese Maßnahme das Selbstanlaufverhalten der Wellsturbine verbessert. Auch für diese Ausführungsgestaltung wird die Auffädellinie 6 in der Nullstellung des Rotorblatts 3, bei der die Symmetrieebene des Profils in der Rotationsebene liegt, erfindungsgemäß eine Krümmung zum Radialstrahl 5 aufweisen. Dabei kommt sowohl ein Vorlauf als auch eine Nachlauf in Frage.

Figur 6 skizziert ein weiteres Ausgestaltungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Rotorblatts 3. Für den vorliegenden Fall liegt eine sichelförmig gekrümmte Auffädellinie 6 vor, die nachlaufend zum Radialstrahl 5 angelegt ist. In  
5 Abweichung zu den voranstehend beschriebenen Ausführungen wird die Auffädellinie 6 im radial äußeren Bereich des Rotorblatts 3 wieder zum Radialstrahl zurückgeführt und schneidet diesen an der radial äußersten Erstreckung des Rotorblatts 3.

10 Durch den Nachlauf der radial inneren Bereiche bis zu einem ersten Schwellwert für den Durchflusskoeffizienten tritt die voranstehend im Zusammenhang mit Figur 5 erläuterte Wirkungsgradsteigerung durch eine Strömungsverdrängung nach radial außen ein. Für höhere Durchflusskoeffizienten wird jedoch die radiale  
15 Erstreckung der Strömungsablösung durch ein sukzessives Zurückführen der Auffädellinie 6 des Rotorblatts zum Radialstrahl beschränkt. Entsprechend wird die Hinterkante 11 radial außerhalb des Radius  $r_2$  vorwärtsgekrümmt verlaufen und die Ausdehnung des zweiten Bereichs 15 der sekundären Strömungsablösung begrenzen, sodass die Strömungsablösung nicht vollflächig auftritt.

20 Ferner zeigt Figur 7 eine Ausgestaltungsalternative mit einer vorwärtsgekrümmten Sichelung des Auffädellinienverlaufs, wobei die Auffädellinie 6 am radial außen liegenden Ende des Rotorblatts 3 wieder zur Auffädellinie 6 zurückgeführt ist. Für den Punkt der größten Radialstrahlabweichung 7 ist die Winkelabweichung  $\alpha_1$   
25 zum Radialstrahl für dieses Ausführungsbeispiel festgelegt, das sich durch eine Geräuschreduzierung auszeichnet. Entsprechend sind die auf akustische Effekte zurückzuführenden Verluste verringert.

Weitere Ausgestaltungen der Erfindung im Rahmen der nachfolgenden Ansprüche  
30 sind denkbar. So kann die Abweichung der Auffädellinie 6 vom Radialstrahl 5 nur über eine beschränkte Radialerstreckung des Rotorblatts 3 vorliegen. Bevorzugt

wird allerdings, die Auffädellinie 6 über wenigstens ein Drittel ihres Verlaufs nicht deckungsgleich mit dem Radialstrahl 5 auszubilden.

## Bezugszeichenliste

	1	Wellsturbine
	2	Nabe
5	3, 3.1, 3.2, 3.3	Rotorblatt
	4	Drehachse
	5, 5.1, 5.2, 5.3	Radialstrahl
	6, 6.1, 6.2, 6.3	Auffädellinie
	7	Punkt der größten Radialstrahlabweichung
10	8	Gerade durch den Punkt der größten Radialstrahlabweichung
	9	Blattwinkelverstelleinrichtung
	10	Blattspitzenwirbel
	11	Hinterkante
	12	Profilnase
15	13	Wandung des Strömungskanals
	14	erster Bereich
	15	zweiter Bereich
	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	Winkelabweichung

## Patentansprüche

1. Wellsturbine (1), umfassend
  - 1.1 eine Nabe (2) mit einer Vielzahl von Rotorblättern (3, 3.1, 3.2, 3.3) mit  
5 einem von einer Profilnase (12) ausgehend tropfenförmig ausgebildeten, symmetrischen Profil;
  - 1.2 die Rotorblätter (1) weisen eine Auffädellinie (6, 6.1, 6.2, 6.3) auf, deren  
Verlauf in der Rotationsebene der Wellsturbine (1) gegenüber einem dem  
jeweiligen Rotorblatt zugeordneten Radialstrahl (5, 5.1, 5.2, 5.3) wenigstens  
10 in Teilen der radialen Erstreckung des Rotorblatts (1) abweicht, wobei die  
Auffädellinie (6, 6.1, 6.2, 6.3) wenigstens einen gekrümmten Bereich  
umfasst.
2. Wellsturbine nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Vor- oder  
15 Rücklage der Auffädellinie (6, 6.1, 6.2, 6.3) an der Rotorblattspitze gegenüber dem Radialstrahl (5, 5.1, 5.2, 5.3) wenigstens 5° beträgt.
3. Wellsturbine nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet,  
20 dass die Auffädellinie (6) über wenigstens ein Drittel ihres Verlaufs nicht deckungsgleich mit dem Radialstrahl (5) ist.
4. Wellsturbine nach einem der vorausgehenden Ansprüche, dadurch  
gekennzeichnet, dass die Auffädellinie (6) im radial äußeren Bereich des  
Rotorblatts (3) zum Radialstrahl (5, 5.1, 5.2, 5.3) zurückgeführt ist und  
25 diesen an der radial äußersten Erstreckung des Rotorblatts (3) schneidet.
5. Wellsturbine nach einem der vorausgehenden Ansprüche, dadurch  
gekennzeichnet, dass das Rotorblatt (3) eine wenigstens in Teilbereichen  
gegenüber einer Parallelen zum Radialstrahl (5, 5.1, 5.2, 5.3) geneigte  
30 und/oder gekrümmte Hinterkante (11) umfasst.

6. Wellsturbine nach einem der vorausgehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Auffädellinie (6) durch die Punkte festgelegt ist, die für zylindrische Profilschnitte auf der Skelettlinie bei einem Viertel der Profiltiefe liegen.

5

7. Wellsturbine nach einem der vorausgehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens in Teilbereichen auf der Fläche wenigstens eines Rotorblatts (3, 3.1, 3.2, 3.3) die Grenzschichtströmung beeinflussende Unebenheiten vorliegen.

10

8. Wellenkraftwerk, dadurch gekennzeichnet, dass das Wellenkraftwerk wenigstens eine Wellsturbine nach einem der Ansprüche 1 bis 7 umfasst.

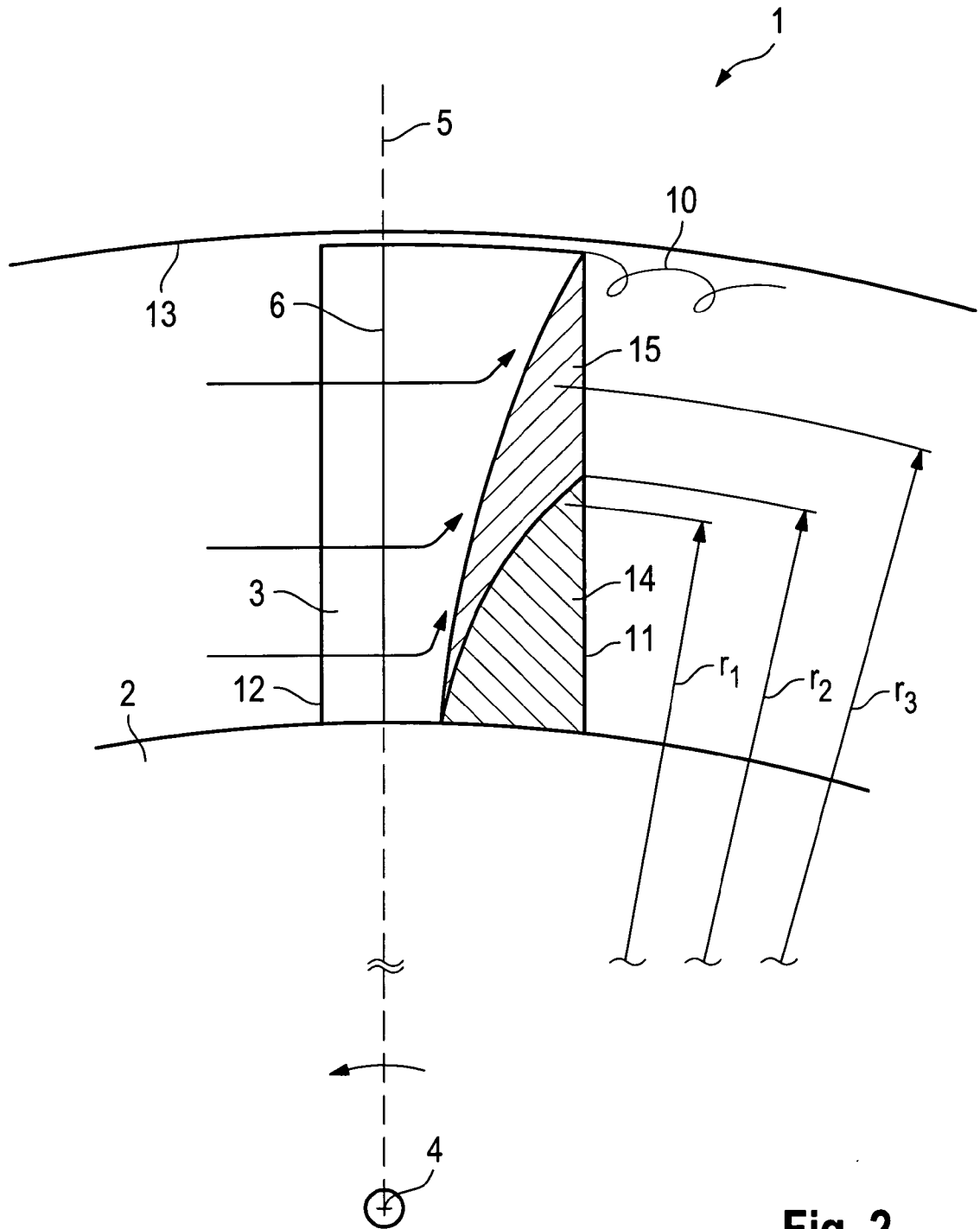
15

9. Wellenkraftwerk nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass im Vorstau- oder Nachlaufbereich zur Wellsturbine feststehende Strömungshindernisse vorliegen.

20

10. Wellenkraftwerk nach Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Rotorblätter (3, 3.1, 3.2, 3.3) der Wellsturbine in Radialrichtung an die Wandung (13) eines Strömungskanals angrenzt.





**Fig. 2**  
(Stand der Technik)

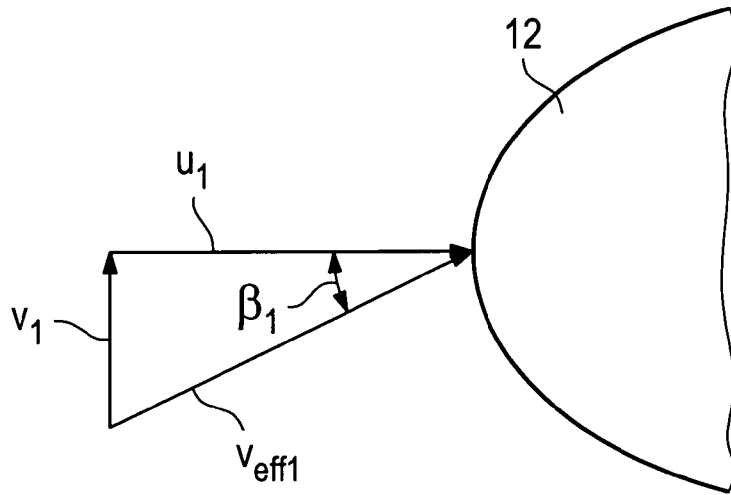


Fig. 3a

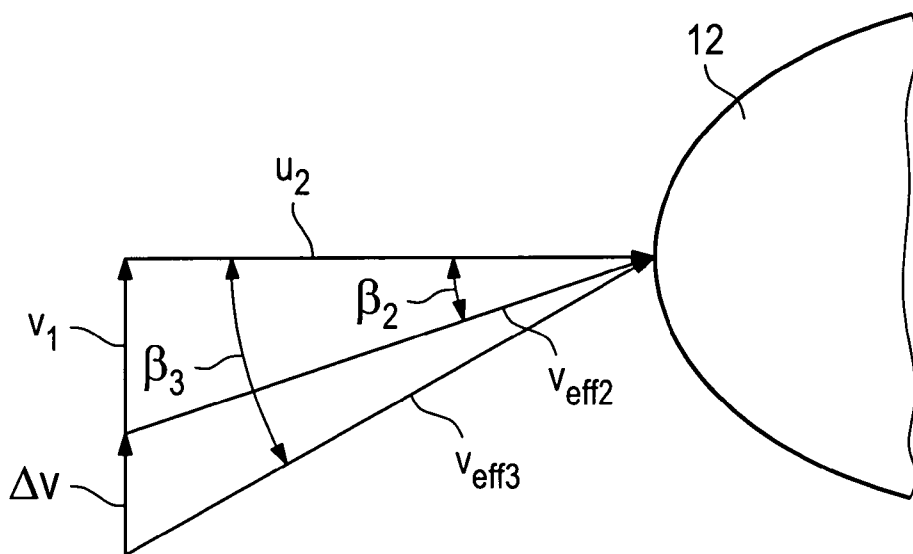


Fig. 3b

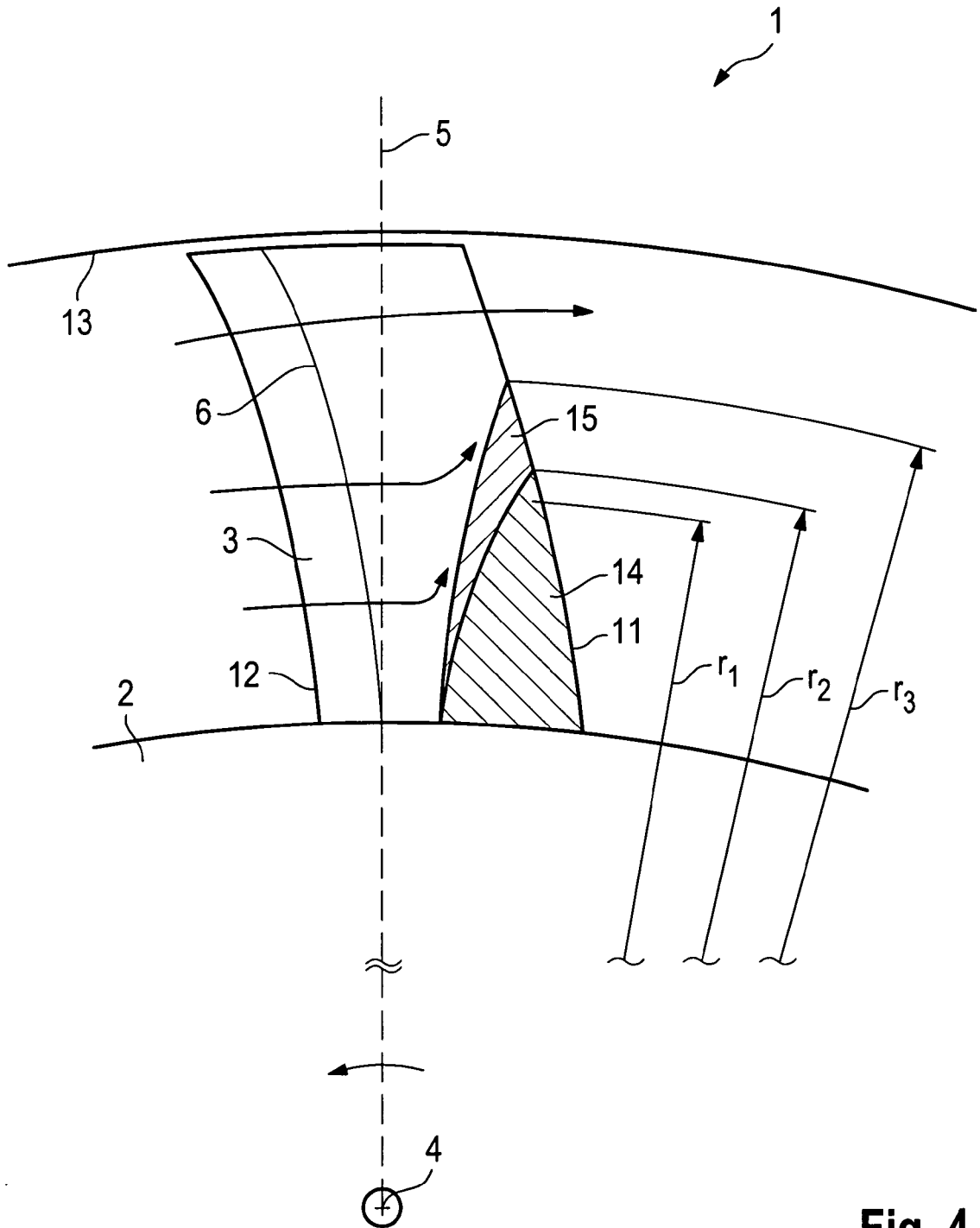


Fig. 4

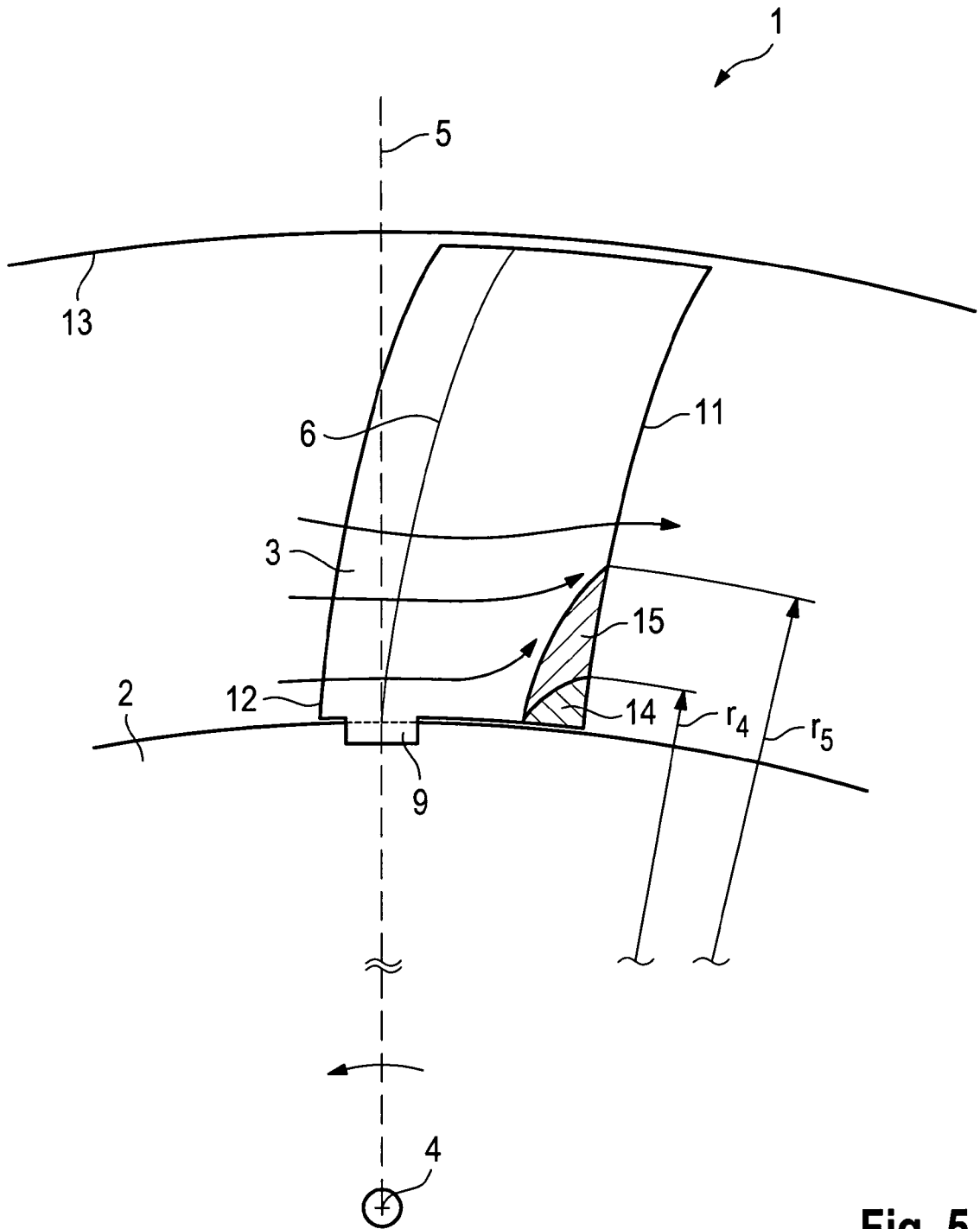


Fig. 5

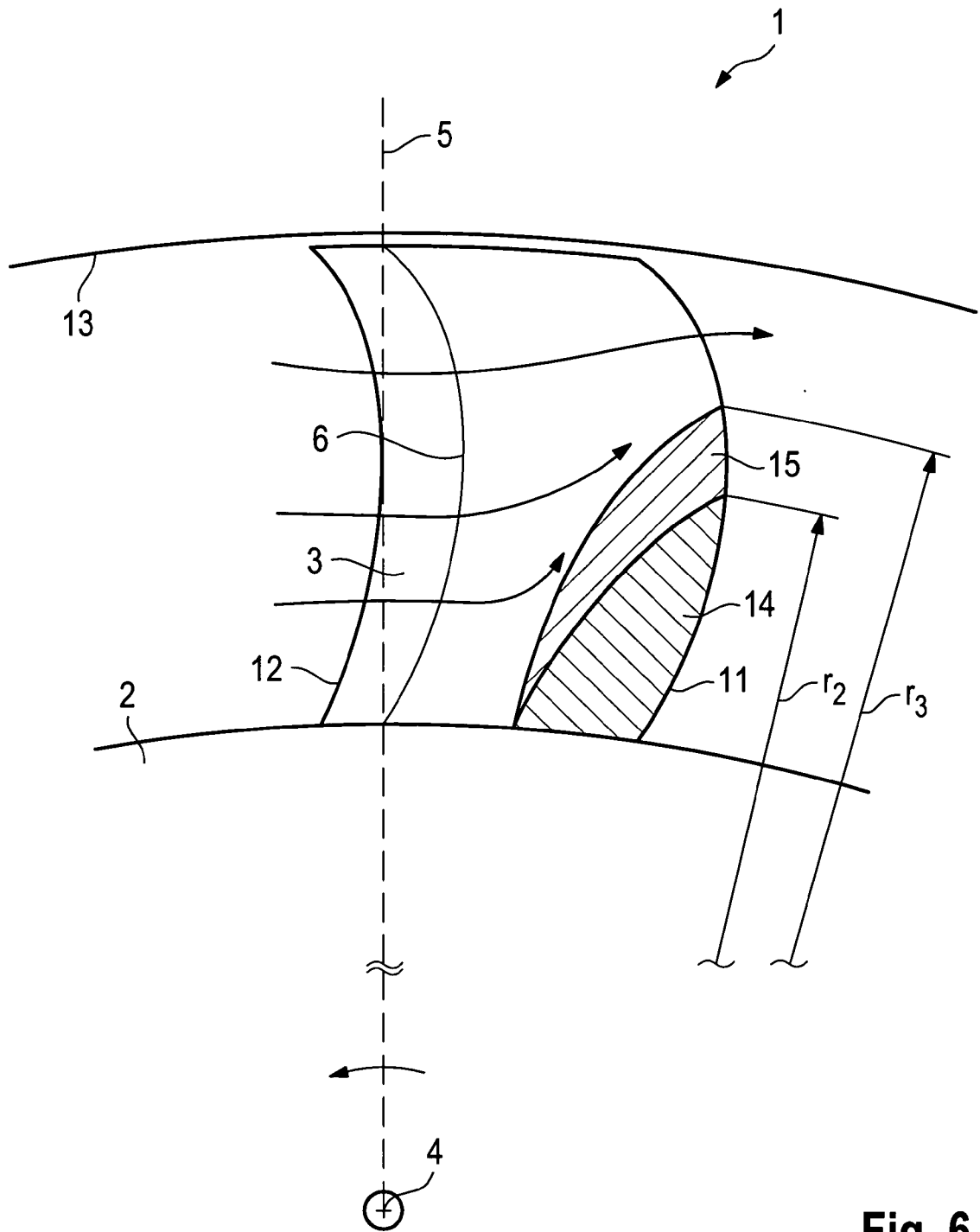


Fig. 6

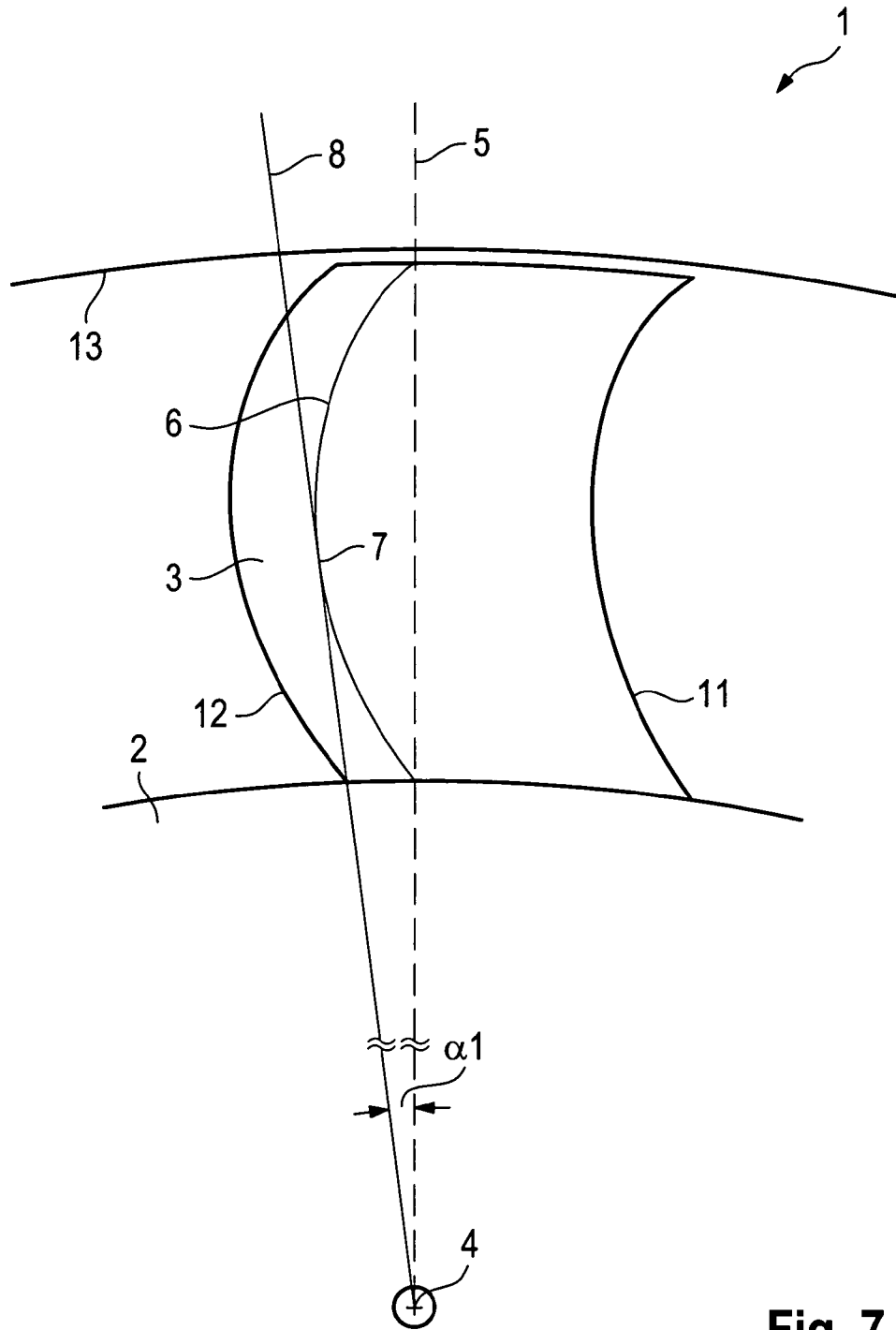


Fig. 7