

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 50183/2012
(22) Anmeldetag: 15.05.2012
(43) Veröffentlicht am: 15.10.2013

(51) Int. Cl. : **F16F 15/30** (2006.01)
F16F 15/305 (2006.01)
H02K 7/02 (2006.01)

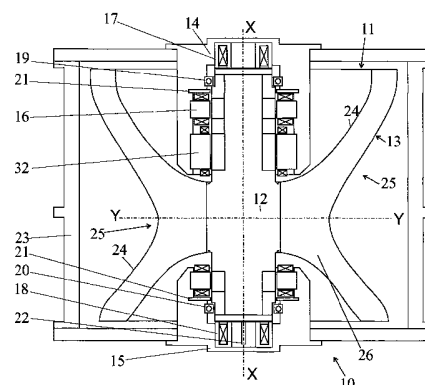
(56) Entgegenhaltungen:
DE 19651668 A1
US 2010231075 A1
US 2010206126 A1
US 5628232 A

(73) Patentanmelder:
TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
1040 WIEN (AT)

(72) Erfinder:
Schulz Alexander Dipl.Ing. Dr.
Wien (AT)
Hinterdorfer Thomas Dipl.Ing.
Wien (AT)
Sima Harald Dipl.Ing.
Herzogenburg (AT)
Wassermann Johann Dr.
Wien (AT)
Neumann Manfred Ing.
Wien (AT)

(54) **Schwungrad**

(57) Schwungrad (13) mit einem auf eine Drehachse bezogenen Rotationskörper (131), der einen radial äußeren Schwunmasseteil (24) aufweist, der, sich in radialer Richtung verjüngend, an einen inneren Wellen-Anbindungsteil (26) anschließt, wobei hohle auskragende Endteile (24') gebildet sind; der äußere Schwunmasseteil (24) weist an seiner Außenseite eine sich rundum erstreckende radiale Einbuchtung (25) auf.



Zusammenfassung:

Schwungrad (13) mit einem auf eine Drehachse bezogenen Rotationskörper (13'), der einen radial äußeren Schwungmasse-
teil (24) aufweist, der, sich in radialer Richtung verjüngend, an einen inneren Wellen-Anbindungsteil (26) anschließt, wobei hohle aus-
kragende Endteile (24') gebildet sind; der äußere Schwungmasse-
teil (24) weist an seiner Außenseite eine sich rundum erstreckende radiale Einbuchtung (25) auf.

(Fig. 5)

Die Erfindung betrifft ein Schwungrad mit einem auf eine Drehachse bezogenen Rotationskörper, der einen radial äußeren Schwungmasseeteil aufweist, der, sich in radialer Richtung verjüngend, an einen inneren Wellen-Anbindungsteil anschließt, wobei hohle auskragende Endteile gebildet sind. Ein derartiges Schwungrad ist aus McGroarty et al., "Flywheel Energy Storage System for Electric Start and an All-Electric Ship", Electric Ship Technologies Symposium, 2005 IEEE, S. 400-406, 25-27 Juli 2005, bekannt.

Schwungräder werden bei rotierenden Maschinen, insbesondere elektrischen Motoren/Generatoren, zur Energiespeicherung eingesetzt und bilden die zentrale Komponente eines Schwungrad-Energiespeichersystems, kurz FESS (Flywheel Energy Storage System). Der Rotor hat durch seine Form und Masse einen maßgeblichen Einfluss auf den Energieinhalt und die Energiedichte (Energieinhalt pro Masse), auf die Gesamtkosten des Systems sowie auf die Verlustleistung der Lagerung. Aufgrund herausragender Materialeigenschaften werden Verbundwerkstoffe (meist Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe, CFK, oder eine Kombination von CFK mit Glasfaser-Verbundwerkstoffen, GFK) für Schwungräder verwendet. Diese Werkstoffe weisen herausragende Materialeigenschaften in Faserrichtung auf, allerdings nur eine geringe Festigkeit quer zur Faserrichtung, womit sich bei vielen gängigen Rotor-Ausbildungen eine suboptimale Materialausnutzung ergibt, da sehr hohe Massenkräfte in radialer Richtung wirken.

Grundsätzlich kann bei den Rotorbauformen zwischen einem Innen- und einem Außenläufer unterschieden werden. Beim Innenläufer dient eine Vollwelle als Träger für Lager- und Motor/Generator-Komponenten. Beim Außenläufer wird eine Hohlwelle verwendet, und die elektrische Maschine sowie die Lagerung greifen am Innenradius der Hohlwelle an.

Bei am Markt kommerziell verfügbaren Schwungrädern werden, abgesehen von vollständig aus Stahl hergestellten Innenläufern mit meist rechteckförmigem Schwungmassenquerschnitt, wie erwähnt auch Schwungräder aus faserverstärkten Werkstoffen und mit rechteckförmigem (Axial-)Querschnitt eingesetzt. Eine weitere bekannte Rotorbauform ist ein Innenläufer mit H-förmigem Quer-

schnitt und Composite-Schwungmasse.

Aktuelle Forschungsprojekte beschäftigen sich in der Regel mit Rotoren aus Faserverbundmaterialien (Kohlenstoff-, Glasfasern). Vertreten sind hier wiederum Innenläufer mit rechteckigem Querschnitt (Herbst et al., "Design, Fabrication, and Testing of 10 MJ Composite Flywheel Energy Storage Rotors, SAE Technical Paper 981282, 1998; Jansen et al., "G2 Flywheel Module Design", NASA/CR-2006-213862) bzw. mit H-förmigem Querschnitt (Park et al., "Development of 5kWh flywheel energy storage system using MATLAB/xPC Target", World Congress on Computer Science and Information Engineering 2008 IEEE, (2009): S. 701-705; McGroarty et al., "Flywheel Energy Storage System for Electric Start and an All-Electric Ship", Electric Ship Technologies Symposium, 2005 IEEE, S 400-406, 25-27 Juli 2005.

Einen komplett anderen Aufbau bildet der Außenläufer. Anstelle einer Welle verfügt dieser über eine zentrale Statoreinheit, die von der Schwungmasse umschlossen ist. Die gängigste Querschnittsform für diese Rotorbauform ist rechteckförmig (z.B. Benno et al., "End-of-life design for composite rotors", IEEE Transactions on Magnetics, 37 (1) (2001): 284-289) oder H-förmig.

Bei dieser Bauform besteht bei einer Ausführung mit Magnetlagern das generelle Problem, dass der Luftspalt der magnetischen Lagerung sowie des Motors/Generators aufgrund der auftretenden Dehnung des Rotors drehzahlabhängig zunimmt. Um auch bei einer Minimaldrehzahl einen ausreichenden Luftspalt zu gewährleisten, ergibt sich somit bei einer Höchstdrehzahl ein wesentlich größerer Luftspalt, der zu einer Reduktion der Energieeffizienz aufgrund der größeren erforderlichen Durchflutung bzw. zu einer Leistungsreduktion führt. Ein weiteres großes Problem stellt der fast direkte Kontakt des Motors/Generators mit dem Composite-Material dar. Die Verlustwärme des weichmagnetischen Motor/Generator-Läufers kann aufgrund des Vakuums ohnedies nur durch Strahlung abgegeben werden; ferner können Composites nur einer geringen Temperaturbelastung ausgesetzt werden. Des Weiteren ist die Trägerstruktur eine große konstruktive Herausforderung. Aufgrund des vergleichsweise großen Innenradius treten auch sehr hohe Spannungen im Metall auf.

Die theoretisch ideale Ausbildung eines Flywheel-Rotors, wenn nur die Funktionalität der Schwungmasse ohne Berücksichtigung der Motor/Generator- und Lager-Funktionalität betrachtet wird, stellt ein dünnwandiger Hohlzylinder aus Verbundwerkstoff als Außenläufer dar, an dessen Innenseite im oberen und unteren Bereich die Lagerung und in dessen Mitte der Motor/Generator angeordnet sind. Dies liegt daran, dass sich bei einem dünnwandigen Hohlzylinder nur geringe Radialspannungen ausbilden können und damit die größten Spannungen in Umfangsrichtung und damit in Faserrichtung auftreten (vgl. Arnold et al., "Deformation and life analysis of composite flywheel disk system", Composites: Part B 33 (2002): 433-459).

Aufgrund der oben angeführten Probleme, ist die typische Rotorform moderner Flywheel-Konstruktionen meist ein Innenläufer, bestehend aus einer Metallwelle, die zur Anbringung der Lager- und Motor/Generator-Baugruppen dient, und einem zylinder- bzw. H-förmigen Verbundwerkstoff-Schwungrad, mit der Welle verbunden durch einen ringförmigen Verbindungs- bzw. Anbindungsteil.

Bei einem im Axialschnitt H-förmigen Rotor ist ein Großteil der Masse für ein möglichst großes Trägheitsmoment weit außen angeordnet. Die auftretenden Eigenfrequenzen beschränken hierbei eine Anbindung mit sehr geringer axialer Länge bezogen auf die Länge des zylinderförmigen Schwungradteils. Die höchstbelasteten Bereiche befinden sich auf der Höhe der Anbindung, da hier die größten Massenkräfte auftreten. Hohe Spannungen treten am Übergang vom Anbindungsteil zum Hohlzylinder aufgrund des Biegespannungszustandes auf. Die Außenbereiche der H-Form, wo die größten anteiligen Trägheitsmomente erzielt werden können, sind nur gering belastet. Eine direkte Folgerung daraus ist, dass die Festigkeitseigenschaften des Verbundmaterials bei mit herkömmlichen Fertigungsverfahren herstellbaren Geometrien der Schwungmasse nur unzureichend genutzt werden können. Damit entstehen höhere Materialkosten und aufgrund der schwereren Schwungmasse eine größere erforderliche Lagerdimensionierung; in der Folge ergeben sich wiederum höhere Kosten und eine Reduktion der Energieeffizienz der Lagerung.

Es ist nun Ziel der Erfindung, eine Ausbildung eines Schwungrads wie eingangs angegeben vorzuschlagen, bei der eine möglichst hohe Energiedichte, je nach Material und Dimensionierung, erzielt werden kann, und bei der eine gute Materialausnutzung bzw. Nutzung der Festigkeitseigenschaften des Materials ermöglicht wird.

Das erfindungsgemäße Schwungrad der eingangs angeführten Art ist dadurch gekennzeichnet, dass der äußere Schwungmasseeteil an seiner Außenseite eine sich rundum erstreckende radiale Einbuchtung aufweist. Diese radiale Einbuchtung führt, wie im Weiteren ausgeführt, zu einer erheblichen Steigerung der Energiedichte sowohl bei Innenläufer- als auch bei Außenläuferausführungen.

Vorteilhafte Ausführungsformen und Weiterbildungen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

So kann es, z.B. aus Herstellungsgründen, günstig sein, wenn der äußere Schwungmasseeteil im axialen Anschluss an die Einbuchtung eine allgemein hohlzylindrische Form aufweist.

Andererseits ist es zur zusätzlichen Energiedichte-Optimierung vorteilhaft, wenn der äußere Schwungmasseeteil, im Axialschnitt gesehen, sich vom Zentrum der Einbuchtung weg zu entgegengesetzten Seiten allgemein schräg erstreckende Schenkel aufweist. Dabei kann einer oder können beide der auskragenden Endteile achsparallel verlaufen und so einen Hohlzylinder definieren.

Für eine gute Platzausnutzung in der Maschine (Motor/Generator) kann der Wellen-Anbindungsteil auch eine geringere axiale Erstreckung als der äußere Schwungmasseeteil aufweisen.

Vor allem die Außenkontur des Schwungrads, zusätzlich oder alternativ hierzu aber auch die Innenkontur, wird zweckmäßig mit einem „weichen“ bzw. stetigen Verlauf ausgeführt. Von Vorteil ist dabei, wenn der Schwungmasseeteil außen und/oder innen eine Kontur mit einem oder mehreren geraden Segmenten aufweist. Weiters ist es günstig, wenn der Schwungmasseeteil außen und/oder innen eine Kontur mit einem oder mehreren Kurvensegmenten aufweist. Vorzugsweise liegt hier wenigstens ein kreisbogenförmiges Segment vor. Es ist aber auch möglich, wenigstens ein entspre-

chend einer Kurve höherer Ordnung, z.B. Ellipse oder Polynom, verlaufendes Segment vorzusehen. Für eine einfache Herstellung ist es auch vorteilhaft, wenn der Schwungmasse teil außen und/oder innen eine stufenförmige Kontur aufweist. Dabei ist es auch zweckmäßig, wenn der Schwungmasse teil mit aneinandergefü gten gesonderten Ringen aufgebaut ist.

Zur Beseitigung von etwaigen Unwuchten ist es weiters von Vorteil, wenn der Schwungmasse teil zumindest einen Ring mit Aufnahmen, Bohrungen oder dgl. zur Anbringung von Wuchtgewichten aufweist.

Der Schwungmasse körper kann symmetrisch oder aber, bei entsprechender Auslegung der zugehörigen Systemkomponenten (elektrische Maschine, Lagerung), mit Vorteil auch asymmetrisch bezüglich seiner Mittenebene (nämlich der Ebene mit dem kleinsten Außenradius) ausgebildet sein. Bevorzugt wird eine Ausbildung aus einem Faser-Verbundwerkstoff, insbesondere aus CFK bzw. einer Kombination von CFK und GFK.

Die Erfindung stellt somit eine vorteilhafte konstruktive Lösung zur, hinsichtlich Materialausnutzung, optimalen Formgebung von Schwungrädern, wie sie beispielsweise bei FESS eingesetzt werden, dar.

Kern der Erfindung ist, dass - entgegen einer technisch naheliegenden Auslegung mit möglichst hoher Masse bei großem Radius - eine Einbuchtung, d.h. Verjüngung, der Außenkontur in Richtung Anbindung an die Welle vorgesehen ist.

Die Außenkontur wird wie erwähnt idealerweise als „weicher“ bzw. stetiger Verlauf ausgeführt, und besteht beispielsweise aus Kreissegmenten und Geradenstücken. Aus funktionellen (Transport-sicherung, etc.) und/oder fertigungstechnischen Gründen sind auch nichtstetige Verläufe oder Kurven höherer Ordnung (Ellipsen, Polynome, etc.) vorteilhaft. Außerdem muss der Rotor nicht symmetrisch bezüglich seiner Mittenebene sein. Die Schwungmasse kann ferner wie erwähnt auch stufenförmig aufgebaut sein, wobei die Ringe separat gefertigt und anschließend gefügt werden können.

Durch die Verjüngung der Außenkontur in Richtung Anbindung an die Welle werden die Massenkräfte im Bereich der Wellenanbindung reduziert, wodurch die Radialspannungen sinken. Die Belastung im Bereich der Mittenebene verlagert sich zur Umfangsrichtung, in der die Materialfestigkeit wesentlich höher ist. Die Festigkeitseigenschaften des Materials werden somit besser genutzt.

Von Bedeutung ist, dass die, durch die Verjüngung der Außenkontur in Richtung Anbindung an die Welle, „fehlende“ Masse zwar zu einer Reduktion des Trägheitsmoments führt, dass dadurch allerdings aufgrund geringerer Radialspannungen höhere Drehzahlen erreicht werden können. Da jedoch die Wirkung der Steigerung der Drehzahl bedeutender ist als die Wirkung der Verringerung des Trägheitsmoments, kann bei gleicher Masse der Energieinhalt erhöht werden. Die nichtzylindrische Ausführung der Außenkontur führt daher zu einer besseren Materialausnutzung und zu einer einhergehenden Steigerung der Energiedichte.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand der Zeichnung sowie unter Bezugnahme auf Ausbildungen des Standes der Technik einerseits sowie auf bevorzugte, vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung andererseits noch weiter erläutert. Es zeigen:

Fig. 1A eine Draufsicht auf einen herkömmlichen Innenläufer-Rotor (Scheibenläufer);

Fig. 1B schematisch einen Quadranten eines Innenläufers mit einer radialsymmetrischen Finite-Elemente-Simulation des Rotors, wobei Linien mit gleicher Belastung nach dem Puck-Versagenskriterium bei maximaler Winkelgeschwindigkeit veranschaulicht sind (vgl. Puck A., "Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten", Modelle für die Praxis, Carl Hanser Verlag München Wien (1996));

Fig. 2 ein Diagramm von Radial- und Umfangsspannung im Verbundwerkstoff beim Innenläufer von Fig. 1B;

die Figuren 3A und 3B ähnliche Darstellungen wie Fig. 1A und 1B, nun jedoch für einen Innenläufer mit H-förmigem Querschnitt

gemäß Stand der Technik;

Fig. 4 einen Aufbau eines herkömmlichen Außenläufers mit H-förmigem Querschnitt;

Fig. 5 eine Darstellung eines prinzipiellen Aufbaus einer FESS-Anordnung mit einem Innenläufer-Rotor und mit einem Schwungrad gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung;

Fig. 6 einen Rotor wie in der Anordnung gemäß Fig. 5 vorgesehen in dreidimensionaler Darstellung, teilweise aufgeschnitten;

Fig. 7 ein Diagramm eines Quadranten eines Rotors mit auskragenden achsparallelen Endteilen, mit einer Darstellung der Linien gleicher Belastung nach dem Puck-Versagenskriterium entsprechend den Darstellungen in Figuren 1B und 3B;

Fig. 8 eine vergleichbare Darstellung eines Schwungrad-Quadranten wie in Fig. 7, nun jedoch mit einem auswärts divergierenden Endteil bzw. Schenkel;

Fig. 9 schematisch in einem gemeinsamen Diagramm einen Vergleich des Energieinhalts und der Energiedichte der bekannten Ausführungen gemäß Figuren 1B und 3B einerseits und der Ausführungsformen gemäß Figuren 7 und 8 andererseits;

die Figuren 10 bis 14 in, den Figuren 7 und 8 vergleichbaren Darstellungen weitere Ausführungsformen, um verschiedene mögliche Konturen des Schwungrads zu zeigen;

die Figuren 15 und 16 vergleichbare Darstellungen von auskragenden Endteilen der Schwungräder, mit Ringen zur Aufnahme von Wuchtgewichten; und

Fig. 17 in einer Darstellung ähnlich jenem in Fig. 10 bis 14 eine Ausführung als Außenläufer.

Die Figuren 1A bis 4 betreffen Rotor- bzw. Schwungrad-Ausführungen gemäß Stand der Technik.

Die Figuren 1A und 1B zeigen einen scheibenförmigen Rotor 1 mit einer Welle 2, z.B. aus Aluminium, und mit einer Scheibe 3, z.B. aus CFK, als Schwungmasse.

Die wichtigsten Materialdaten des, für diesen und die weiteren angeführten Rotoren, verwendeten CFKs (epoxidharzverstärkte HTS40 Kohlenstofffasern der Fa. TohoTenax) und Aluminiums sind in der nachfolgenden Tab. 1 angeführt.

Tabelle 1: Materialeigenschaften

E-Modul des CFK in Faserrichtung	145 GPa
E-Modul des CFK quer zur Faserrichtung	9 GPa
Dichte des CFK	1535 kg/m ³
Zugfestigkeit des CFK in Faserrichtung	2179 MPa
Zugfestigkeit des CFK quer zur Faserrichtung	98 MPa
E-Modul Aluminium	70 GPa
Dichte Aluminium	2700 kg/m ³
Zugfestigkeit Aluminium	275 MPa

Fig. 1B zeigt eine axialsymmetrische Finite-Elemente-Simulation des Rotors 1, wobei die Symmetrie des Rotors 1 bezüglich seiner Mittenebene 4 genutzt wurde. Dargestellt sind Linien mit gleicher Belastung nach dem Puck-Versagenskriterium bei maximaler Winkelgeschwindigkeit. Dieses Kriterium ist normiert, d.h. bei einem Wert von 1 tritt Versagen auf. Da der Rotor 1 mit einer Sicherheit von 2 dimensioniert wurde, ist der Maximalwert 0,5.

Der Rotor in Fig. 1B wurde exemplarisch auf einen Energieinhalt von 5 kWh ausgelegt und erreicht diesen bei einer maximalen Winkelgeschwindigkeit von 2010 rad/s. Die Rotormasse beträgt 260 kg und das Trägheitsmoment um die Rotationsachse ist 9,89 kgm². Aus diesen Daten ergibt sich eine Energiedichte von 19,23 Wh/kg.

(Für einen effizienten Betrieb der elektrischen Maschine wird ein FESS innerhalb eines bestimmten Drehzahlbereichs betrieben. Daher entspricht der Energieinhalt nicht der kinetischen Energie. Die minimale Betriebsdrehzahl sei hier und im Weiteren zu einem Drittel der maximalen Drehzahl gewählt.)

Die höchste Belastung tritt bei einem mittleren Radius von ca. 0,22 m auf und ist in axialer Richtung, abgesehen von Randeffekten, annähernd konstant, wie in Fig. 1B ersichtlich ist. Diese höchste Belastung ist bedingt durch die relativ geringe maximale Zugfestigkeit quer zur Faserrichtung von Verbundwerkstoffen. Die an der Anbindungsstelle zur Welle 2 auftretenden Massenkkräfte führen zu hohen Radialspannungen und daher zu einer schlechten Materialausnutzung.

Fig. 2 zeigt die Verläufe von Radial- und Umfangsspannung im Composite (Schwungmasse 3) und soll diesen Sachverhalt verdeutlichen. Die Radialspannung 5 weist an ihrem Maximum einen Sicherheitsfaktor von 2 zum maximal zulässigen Wert aus Tab. 1 auf, während die Sicherheit der strichliert dargestellten Umfangsspannung 6 wesentlich höher ist. Die hervorragenden Eigenschaften des Composites in Faserrichtung werden daher nicht ausreichend genützt.

Die hier im Weiteren angeführten Rotortypen sind zur besseren Vergleichbarkeit mit derselben Masse wie der Rotor gemäß Fig. 1B ausgeführt.

Eine zweckmäßigere Rotorgeometrie zeigen Figuren 3A und 3B (ebenfalls Stand der Technik): Bei gleicher Masse wird durch eine H-förmige Struktur ein höheres Trägheitsmoment ($13,18 \text{ kgm}^2$) erreicht; in der Folge werden ein höherer Energieinhalt von 5,7 kWh und damit auch eine höhere Energiedichte von $22,19 \text{ Wh/kg}$ erzielt. Wie auch bei der Struktur in Fig. 1B treten bei einem Radius von ungefähr 0,22 m sehr hohe Radialspannungen auf. Des Weiteren kommt es aufgrund der auskragenden H-Form und deren Aufweitung zu hohen Biegespannungen am Übergang, die die maximal erreichbare Winkelgeschwindigkeit (1871 rad/s) beschränken.

Fig. 4 zeigt in einer schematischen Ansicht ähnlich Fig. 1A einen andersartigen Rotor, einen Außenläufer 1', mit einer Hohlwelle 2' und mit einer äußeren Schwungmasse 3', wobei die gängigste Querschnittsform für diese Rotorbauform rechteckig ist. Im Inneren befindet sich eine nicht näher veranschaulichte zentrale Statoreinheit, die vom Rotor bzw. Schwungrad umschlossen

ist. Die Hohlwelle 2' und die eigentliche Schwungmasse 3' sind über einen im Querschnitt H-förmigen Anbindungsteil 7' miteinander verbunden; vgl. im Übrigen auch den Anbindungsteil 7 gemäß Fig. 3A.

In Fig. 5 und 6 ist ein Beispiel für ein Schwungrad-Energiespeichersystem, kurz FESS, 10 gezeigt, wobei ein Innenläufer-Rotor 11 eingesetzt ist, der eine Welle 12 mit einer Drehachse X-X aufweist. Die elektrische Maschine (Motor/Generator) ist mit 32 bezeichnet und weist einen außenliegenden Stator mit einer oberen Trägerhülse 14 und einer unteren Trägerhülse 15 für die an sich üblichen und nicht alle näher bezeichneten Elektromagneten, z.B. 16 zur radialen Lagerung, auf. Weiters sind ein oberes Axialmagnetlager 17 und ein unteres Axialmagnetlager 18 für die Welle 12 des Rotors 11 veranschaulicht, ebenso wie Fanglager 19 bzw. 20. Radialpositions-Sensoren 21 sowie ein Axialpositions-Sensor 22 dienen zur Erfassung der Position der Welle 12 relativ zur oberen bzw. unteren Trägerhülse 14 bzw. 15, die für die Lagerregelung erforderlich ist. Schließlich ist auch schematisch ein Gehäuse 23 für das FESS 10 gezeigt.

Die auf der Welle 12, d.h. am Rotor 11, angebrachten Komponenten des Magnetlagersystems sind an sich herkömmlich und in Fig. 5 zwar schematisch veranschaulicht, aber nicht näher bezeichnet, und es kann sich auch hierzu eine eingehende Erläuterung dieser Komponenten erübrigen.

Die Welle 12 ist bevorzugt als Vollwelle ausgeführt, um als Trägerstruktur für die erforderlichen Lager- und Motor/Generator-Komponenten sowie als Lagerfläche für die Fanglager 19, 20 zu dienen.

Das Schwungrad 13 bzw. dessen Rotationskörper 13' (Fig.6) mit seinem radial äußeren Schwungmasse teil 24 besteht aus einem Verbundwerkstoff.

Der Rotor 11 läuft innerhalb des Gehäuses 23, welches vakuumdicht und evakuiert ist, und das auch als Träger der Statorkomponenten (s. die Trägerhülsen 14, 15) dient, um die Achse X-X. Wie erwähnt sind an den Trägerhülsen 14, 15 die Statorbleche der

Lagerung und der elektrischen Maschine, Wicklungen sowie die Sensoren 21 und 22 angebracht.

Fig. 6 zeigt den Rotor 11 der FESS-Anordnung 10 gemäß Fig. 5 in einer aufgeschnittenen dreidimensionalen Darstellung. Der Schwunghasseteil 24 ist, wie hier besonders deutlich, zusätzlich zur Axialschnittdarstellung gemäß Fig. 5, ersichtlich ist, mit einer Verjüngung oder Einbuchtung 25 an der Außenkontur ausgeführt, so dass sich beispielsweise ein zwirrspulenartiges Aussehen des Schwungrads bzw. des Schwungrads 13 ergibt, wie insbesondere aus Fig. 6 ersichtlich ist.

Zur Fertigung eines solchen Rotors 11 mit Schwungrad 13 eignet sich ein an sich bekanntes Wickelverfahren, bei dem die Fasern (Kohlenstofffasern, Glasfasern) durch ein Tränkbad geführt und anschließend auf einem rotierenden Kern nass abgelegt werden. Aus der Sicht der Festigkeit des Rotors 11 ist ein Faserwinkel von 90° zur Drehachse X-X ideal. Alternativ können auch vorimprägnierte Fasern - sogenannte Prepregs - verwendet werden.

Aus Fig. 5 ist weiters erkennbar, dass der Rotor 11 nicht unbedingt symmetrisch bezüglich seiner Mittenebene Y-Y (im rechten Winkel zur Rotorachse X-X) ausgeführt sein muss, auch wenn das vielfach zu bevorzugen sein wird. Eine derartige asymmetrische Ausführung kann dann zweckmäßig sein, wenn besondere Platzanforderungen hinsichtlich der Unterbringung der einzelnen Motor/Generator-Komponenten etc. zu berücksichtigen sind.

Durch die beschriebene und veranschaulichte Verjüngung bzw. Einbuchtung 25 des Schwungrads, die in Umfangsrichtung rundum verläuft, lässt sich eine wesentliche Verbesserung der Materialausnutzung erreichen.

In Fig. 7 ist in einer Darstellung ähnlich Fig. 1B und Fig. 3B schematisch ein Quadrant des Schwungrads 13 im Axialschnitt veranschaulicht. Wie ersichtlich besteht die Rotorgeometrie aus Kreissegmenten K_n und Geraden G_n (mit $n = 1, 2, \dots$) und weist eine Verjüngung 25 der Außenkontur auf. Durch den geringeren Außenradius r im Bereich der Mittenebene Y-Y sinkt das Trägheitsmoment auf $10,93 \text{ kgm}^2$. Aufgrund der geringeren Massenkräfte in

diesem Bereich sinken allerdings auch die Radialspannungen, womit höhere Winkelgeschwindigkeiten (2188 rad/s) möglich werden. Somit hat der Rotor 11 einen Energieinhalt von 6,55 kWh, und bei einer Masse von ebenfalls 260 kg ergibt sich eine Energiedichte von 24,58 Wh/kg. Wünschenswert wäre hier aber (s. die eingezeichneten „Belastungslinien“), die hohlzylindrischen Bereiche, die durch die auskragenden achsparallelen Endteile 24' definiert sind, effizienter zu machen, d.h. stärker zu belasten.

Durch Schrägstellung der auskragenden Teile 24', wie aus Fig. 8 ersichtlich, lassen sich die Vorteile der Erfindung noch weiter nutzen. Aufgrund der Neigung werden die Biegespannungen am Übergang vom inneren Anbindungsteil 26 zum (eigentlichen) Schwungmasse teil 24 „entschärft“. Damit verringern sich die Radialspannungen, und die Umfangsspannungen steigen, was aufgrund der Materialorientierung einen günstigeren Spannungszustand und eine bessere Materialausnutzung ergibt. Bei etwa gleicher Winkelgeschwindigkeit wie beim Rotor 11 gemäß Fig. 7 (2151 rad/s) beträgt das Trägheitsmoment beim Rotor 11 gemäß Fig. 8 14,9 kgm², was einem Energieinhalt von 8,27 kWh entspricht. Bei gleicher Masse ergibt sich eine Energiedichte von 31,18 Wh/kg, was eine erhebliche Steigerung im Vergleich zu den anderen Strukturen ist.

Dies ist insbesondere aus der schematischen Darstellung von Fig. 9 ersichtlich, in der die vier bisher angeführten Rotorstrukturen, gemäß Figuren 1B, 3B, 7 und 8, einander gegenübergestellt sind, und in der Energieinhalt 30 und Energiedichte 31 veranschaulicht sind. Es ist erkennbar, dass bei den Ausführungen gemäß der Erfindung, also gemäß Fig. 7 und 8, bei dieser exemplarischen Auslegung, eine Steigerung z.B. der Energiedichte 31 von 65% erzielt werden kann.

In den bisher gezeigten Ausbildungen setzt sich die Rotorkontur immer aus Geraden-Segmenten Gn und Kreissegmenten Kn zusammen. Aus funktionellen Gründen (Transportsicherung, etc.) und/oder fertigungstechnischen Gründen können aber auch nichtstetige Verläufe oder Kurven höherer Ordnung, wie z.B. Ellipsen, Polynome etc., vorteilhaft sein; vgl. beispielsweise die Ausführungsformen gemäß den Figuren 10 bis 12 und 14. Gemäß Fig. 13 ist der

Schwungmasseeteil 24 stufenförmig, beispielsweise aus einzeln gewickelten Composite Ringen 24A-24E, aufgebaut. Diese Ringe 24A-24E können separat gefertigt und anschließend gefügt werden. Dabei ergibt sich eine stufenförmige Kontur, wie aus Fig.13 ersichtlich. Ganz allgemein ist mit einer stufenförmigen Ausbildung, ob in einem Stück oder mit gesonderten Ringen, eine einfachere Herstellung möglich, da die Fasern beim Wickeln nicht vom Wickelkern abrutschen können.

Als wesentlicher Vorteil, der bei den Ausbildungen gemäß Fig.7, 8 und 10 bis 14 gegeben ist, ist jedenfalls zu nennen dass die Verjüngung 25 der Außenkontur zu einem, im Sinne der Materialorientierung, besseren Spannungszustand führt. Die Radialspannungen werden verringert, und damit werden die Umfangsspannungen erhöht.

Die Rotorstrukturen gemäß Fig.8 und 10 bis 14 weisen noch den zusätzlichen Vorteil auf, dass die „Neigung“ der Innenkontur zu einer noch besseren Spannungsverteilung am Übergang zur inneren „Scheibe“ und damit zu geringeren Biegespannungen führt. Außerdem lässt sich damit der Trägheitsradius erhöhen, wodurch bei gleicher Masse ein höherer Energieinhalt erzielt wird.

Die Dicke des „auskragenden“ Teils 24' (Figuren 7, 8 und 10 bis 14) ist ausreichend groß zu wählen, um hohe Steifigkeiten und damit hohe elastische Eigenfrequenzen zu erreichen. Die Kontur des Rotors 11 ist so zu wählen, dass die Energiedichte maximal wird. Dabei sind fertigungstechnische Grenzen gegeben. Ausgehend vom in Fig. 3B dargestellten Belastungszustand des, mit einfachen fertigungstechnischen Mitteln herstellbaren, H-förmigen Schwungrades ergibt sich, hinsichtlich Geometrieoptimierung, bereits rein anschaulich, dass es sinnvoll ist, den als Hohlzylinder ausgeführten Schwungradteil als Doppel-Hohlkegel bzw. in einer hohlkegelähnlichen Form auszuführen (siehe Fig. 8 etc.). Das führt zu einer Erhöhung des Trägheitsradius sowie zu einer Reduktion der Biegespannungen am Übergang von der inneren Scheibe 26 zum äußeren Schwungmasseeteil 13.

Die starke Anisotropie aufgrund des lamellaren Molekülaufbaus von Kohlenstofffasern ergibt eine geringe Festigkeit des Ver-

bundwerkstoffs quer zur Faserrichtung, wodurch nur geringe Radialspannungen zulässig sind. Die aufgrund der Massenkräfte bei den erforderlichen maximalen Drehzahlen sehr hohen Radialspannungen lassen sich durch kleinere Wandstärken verringern. Hierdurch wird ein günstigerer Spannungszustand erreicht, da die Umfangsspannungen steigen und die Festigkeit in dieser Richtung wesentlich höher ist. Allerdings führen geringere Wandstärken auch zu niedrigeren Eigenfrequenzen. Bei Flywheel-Applikationen mit geringer Motorleistung wird ein Betrieb unterhalb elastischer Eigenfrequenzen angestrebt, da ein Durchfahren der Rotoreigenfrequenzen – aufgrund der dafür nötigen Zeitdauer – kritisch ist. Ein von 90° abweichender Faserwinkel kann eine zusätzliche Steifigkeit in Richtung der Achse X-X erbringen. Hier ist ein Kompromiss aus Festigkeits- und dynamischen Anforderungen zu finden.

Aufgrund der angeführten Vorteile ermöglicht die Erfindung durch eine bessere Materialausnutzung eine Steigerung der Energiedichte und damit geringere Materialkosten im Vergleich zu herkömmlichen Rotorstrukturen.

Durch die wesentlich bessere Materialausnutzung, hin zu einem „Fully-Stressed-Design“, lassen sich zum einen die Investitionskosten aufgrund der höheren Energiedichte wesentlich reduzieren und zum anderen die Gesamtenergieeffizienz steigern, wodurch hocheffiziente Flywheels für ein breites Anwendungsfeld wirtschaftlich nutzbar werden. Die grundsätzliche Zielfunktion ist die Minimierung der Masse bei gegebenem Energieinhalt und die Maximierung der Energieeffizienz. Idealerweise ergibt sich somit eine Geometrie, in der jeder Bereich laut geeignetem Versagenskriterium maximal belastet wird, woraus die bestmögliche Materialausnutzung folgt.

Der oben angeführte Verbundwerkstoff (CFK bzw. Kombinationen CFK-GFK) weist eine starke Anisotropie, allerdings auch herausragende Materialeigenschaften in Faserrichtung auf. Bloße Glasfaserverbunde (GFK) sind weniger anisotrop und auch kostengünstiger. Ihre Steifigkeitseigenschaften und insbesondere ihre Dichte sind im Vergleich zu CFK jedoch weniger ideal für Flywheel-Applikationen.

Ein „Rundlauf“ des Rotors, d.h. die Wuchtgüte, hat einen wichtigen Einfluss auf die auftretenden Lagerkräfte des Rotors bzw. auf den erforderlichen Luftspalt bei der magnetischen Lagerung des Rotors und somit auf die Energieeffizienz des Gesamtsystems, und dies gilt im besonderen Maße für die vorliegenden Schwungräder mit den angesprochenen hohen Drehzahlen. Eine Positionierung von Wuchtgewichten in Bereichen mit hohen Radialspannungen ist festigkeitstechnisch ungünstig. Dies erschwert die Montage, da es erforderlich ist, Kerben bzw. eine Schwächung des Materials zu vermeiden. Zusätzlich wäre zu gewährleisten, dass die angebrachten Wuchtgewichte über den gesamten Lebenszyklus an Ort und Stelle bleiben.

Um diese Problematik zu lösen, können beim vorliegenden Schwungrad 13 spezielle Ringe 27 (s. z.B. Fig. 12, 14) zur Aufnahme von Wuchtgewichten in das Composite-Schwungrad 13 integriert werden, die Ausformungen bzw. Aufnahmen 28 für Wuchtgewichte, wie z.B. Bohrungen (s. Fig. 12), aufweisen. An erforderlicher Stelle werden diese teilweise oder zur Gänze mit Material gefüllt. Alternativ ist auch eine Materialentnahme 29 (s. Fig. 14) aus dem Ring 27 möglich, um eine Unwucht auszugleichen. Die Platzierung von Wuchtgewichten wird unter Beachtung fertigungstechnischer Grenzen in optimaler Weise in die Rotorstruktur integriert.

Fig. 15 zeigt eine Simulation eines exemplarischen Rotors 11 mit einem an der Innenseite angebrachten Wucht-Ring 27 aus Epoxidharz. Die Linien mit gleichem Versagenskriterium bleiben annähernd unverändert, d.h. dass der Ring 27 an dieser Stelle vorteilhaft integriert werden kann.

Der Ring 27 kann verschiedene Ausführungsformen aufweisen (s. Fig. 12, 15 und 16) und auch erst nach der Fertigung des Rotors angebracht werden (z.B. Fig. 12 und 14).

Wenn die Erfindung vorstehend anhand von bevorzugten Ausführungsbeispielen erläutert wurde, so sind doch im Rahmen der Ansprüche weitere Modifikationen und Abwandlungen möglich. Insbesondere ist es auch denkbar, das vorliegende Schwungrad in Verbindung mit einem Außenläufer 11' (vgl. Fig. 17 in Verbindung

mit Fig. 4) vorzusehen, wobei es sogar denkbar wäre, das eigentliche Schwungrad, d.h. den Schwungradmasseteil 24, mit der Hohlwelle 12', an der die erforderlichen Komponenten der elektrischen Maschine und der Lagerung angebracht sind, zu einem einheitlichen Bauteil aus Verbundwerkstoff zu integrieren. Des Weiteren sind auch andere Materialien als CFK und GFK, wie z.B. Polyethylenfasern etc. möglich.

Patentansprüche:

1. Schwungrad (13) mit einem auf eine Drehachse (X-X) bezogenen Rotationskörper, der einen radial äußeren Schwungmasse­teil (24) aufweist, der, sich in radialer Richtung verjüngend, an einen inneren Wellen-Anbindungsteil (26) anschließt, wobei hohle auskragende Endteile (24') gebildet sind, dadurch gekennzeichnet, dass der äußere Schwungmasse­teil (24) an seiner Außenseite eine sich rundum erstreckende radiale Einbuchtung (25) aufweist.
2. Schwungrad nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der äußere Schwungmasse­teil (24), im Axialschnitt gesehen, sich vom Zentrum der Einbuchtung (25) weg zu entgegengesetzten Seiten allgemein schräg auswärts erstreckende Schenkel aufweist.
3. Schwungrad nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest ein Bereich der auskragenden Endteile (24', 24'') achsparallel verläuft und so einen Hohlzylinder definiert.
4. Schwungrad nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der äußere Schwungmasse­teil (24) im axialen Anschluss an die Einbuchtung (25) eine allgemein hohlzylindrische Form aufweist (Fig.7).
5. Schwungrad nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass der Wellen-Anbindungsteil (26) eine geringere axiale Erstreckung als der äußere Schwungmasse­teil (24) aufweist.
6. Schwungrad nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass der Schwungmasse­teil (24) außen und/oder innen eine Kontur mit einem oder mehreren geraden Segmenten (G) aufweist.
7. Schwungrad nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Schwungmasse­teil (24) außen und/oder innen eine Kontur mit einem oder mehreren Kurvensegmenten (K) aufweist.
8. Schwungrad nach Anspruch 7, gekennzeichnet durch wenigstens

ein kreisbogenförmiges Segment.

9. Schwungrad nach Anspruch 7 oder 8, gekennzeichnet durch wenigstens ein entsprechend einer Kurve höherer Ordnung, z.B. Ellipse oder Polynom, verlaufendes Segment.

10. Schwungrad nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Schwungmasseeteil (24) außen und/oder innen eine stufenförmige Kontur aufweist (Fig.13).

11. Schwungrad nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass der Schwungmasseeteil (24) mit aneinandergesetzten gesonderten Ringen (24A-24E) aufgebaut ist.

12. Schwungrad nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass der Schwungmasseeteil (24) zumindest einen Ring (27) mit Aufnahmen, Bohrungen oder dgl. zur Anbringung von Wuchtgewichten aufweist.

13. Schwungrad nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass der Schwungmassekörper (24) in axialer Richtung asymmetrisch ausgebildet ist (Fig.5).

14. Schwungrad nach einem der Ansprüche 1 bis 13, gekennzeichnet durch eine Ausbildung aus einem Faser-Verbundwerkstoff.

15. Schwungrad nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass der Verbundwerkstoff ein CFK-Werkstoff ist.

Fig. 1A

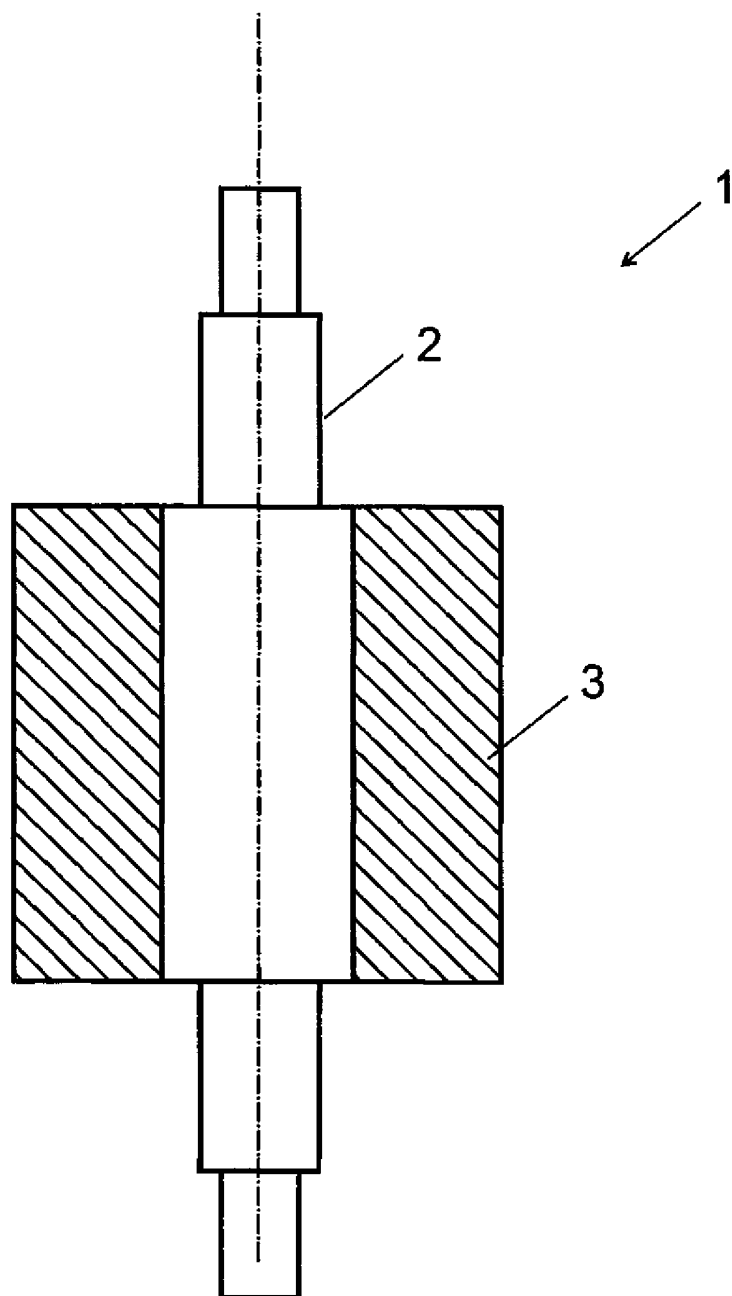


Fig. 1B

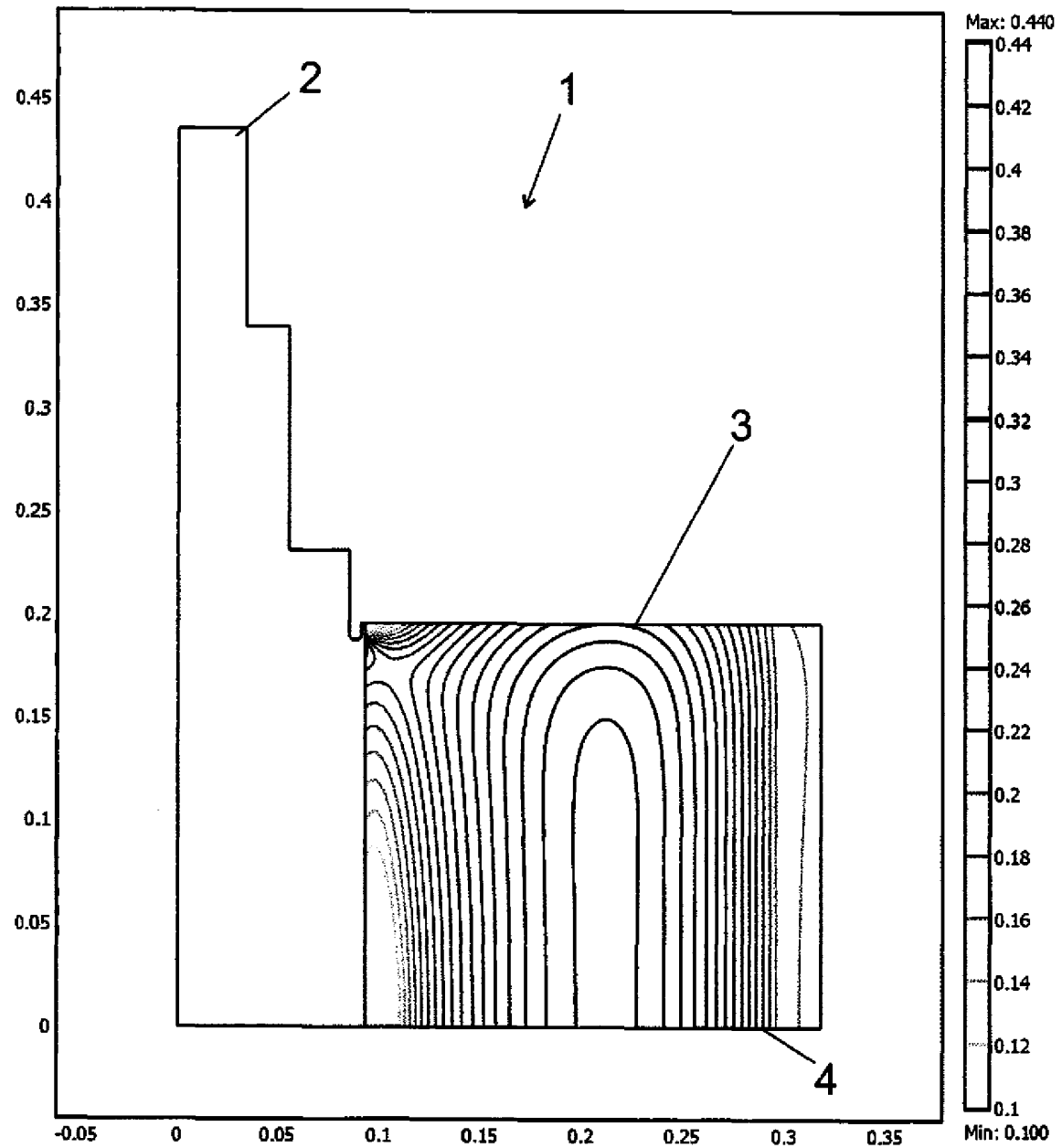


Fig. 2

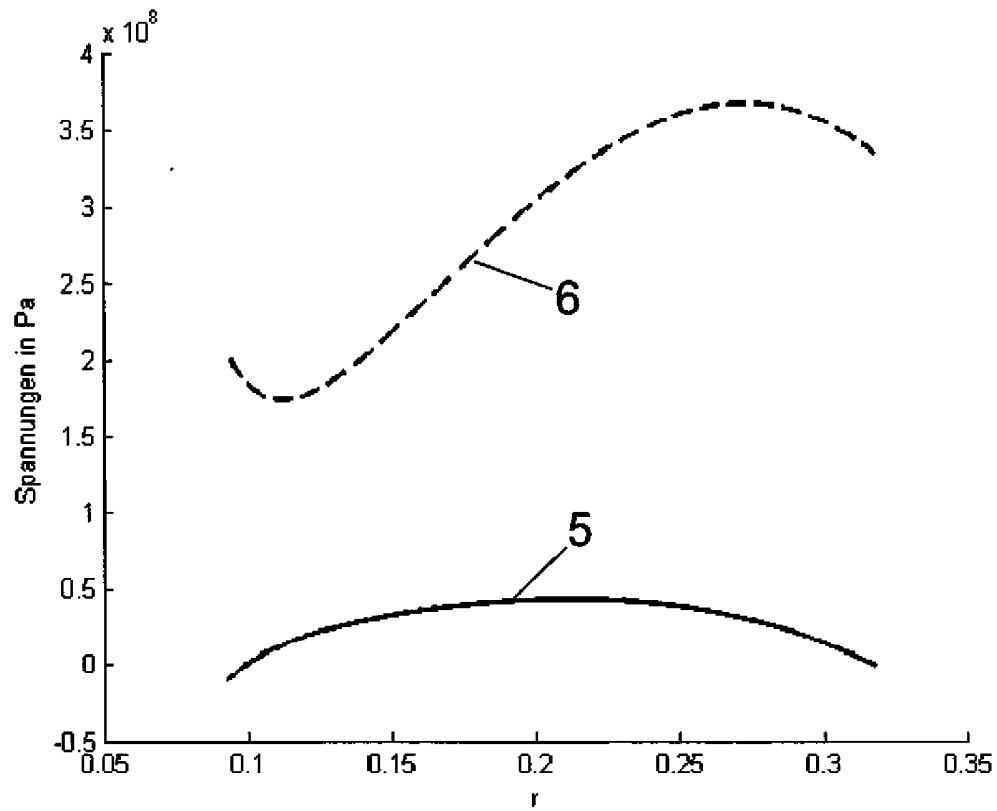


Fig. 3A

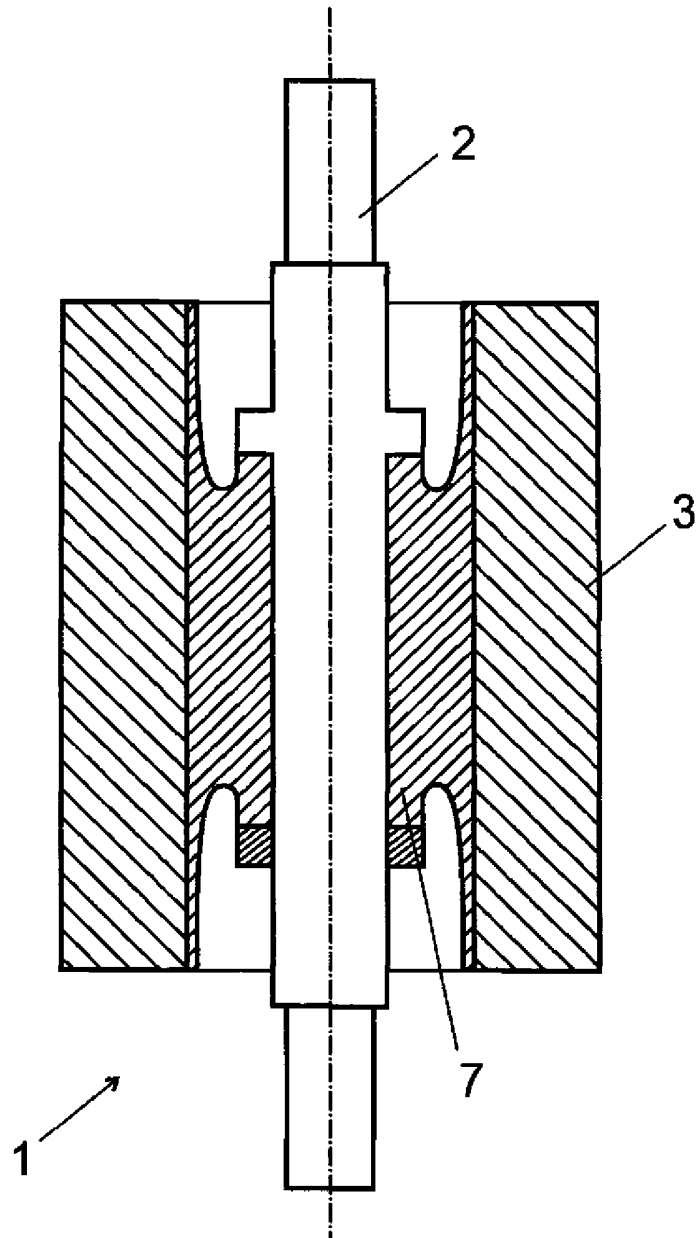


Fig. 3B

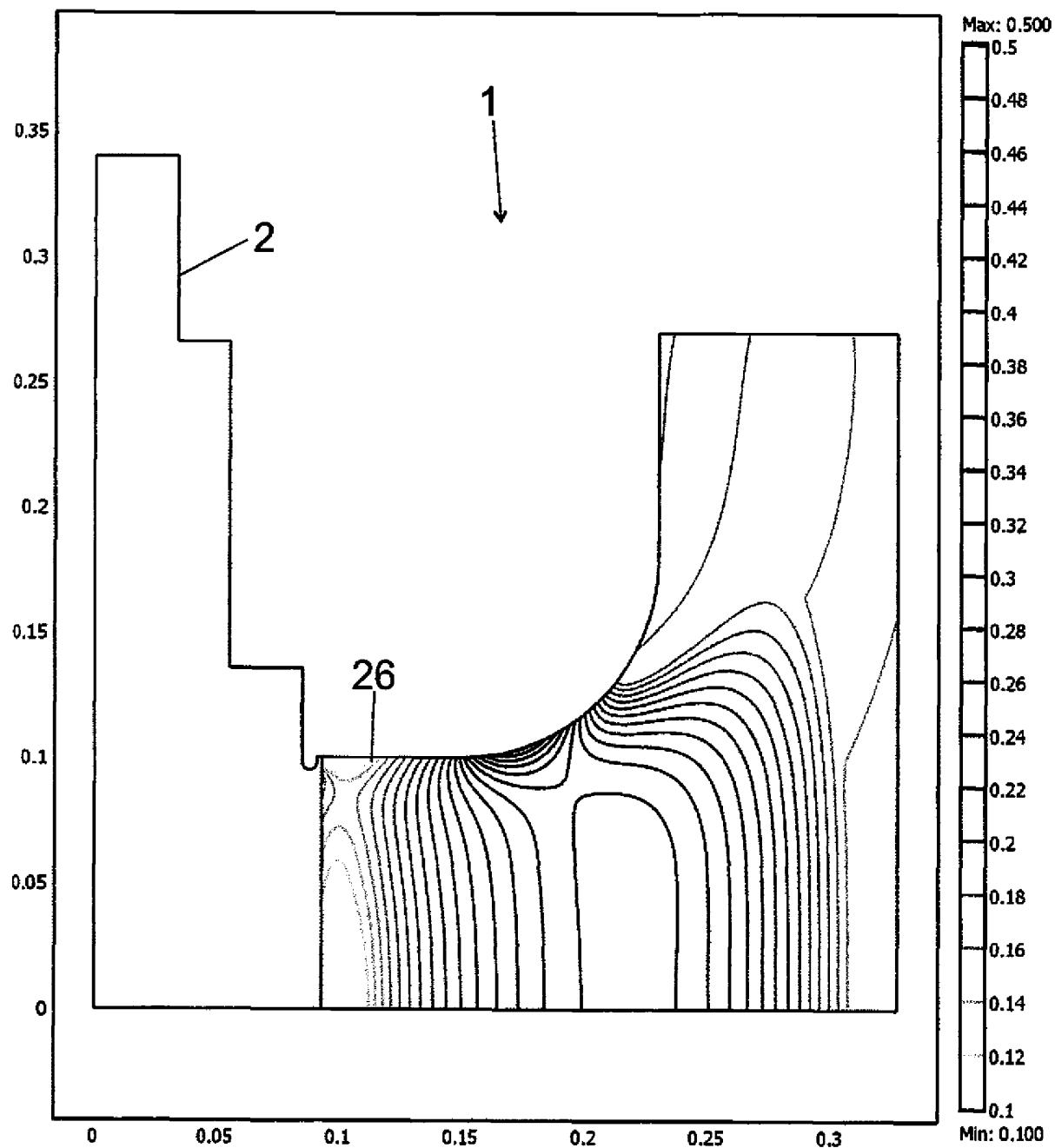


Fig. 4

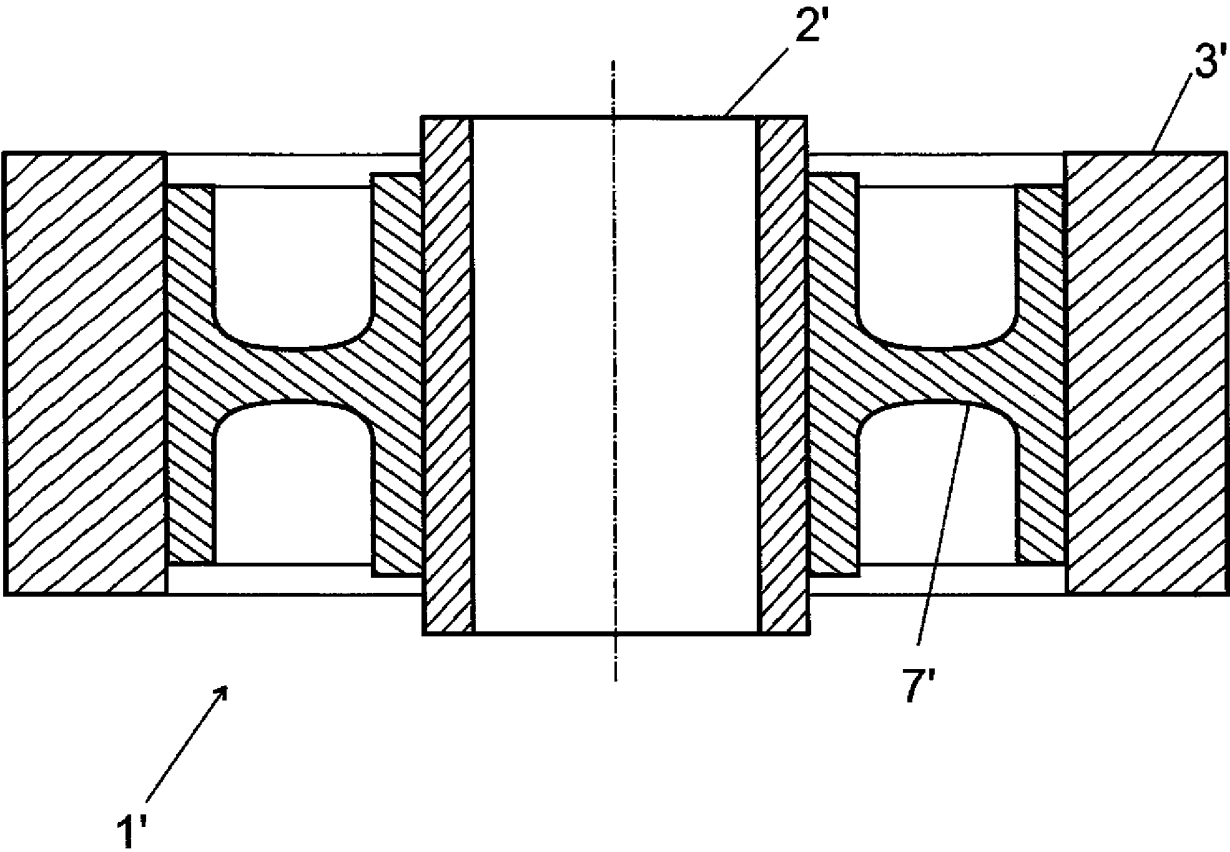


Fig. 5

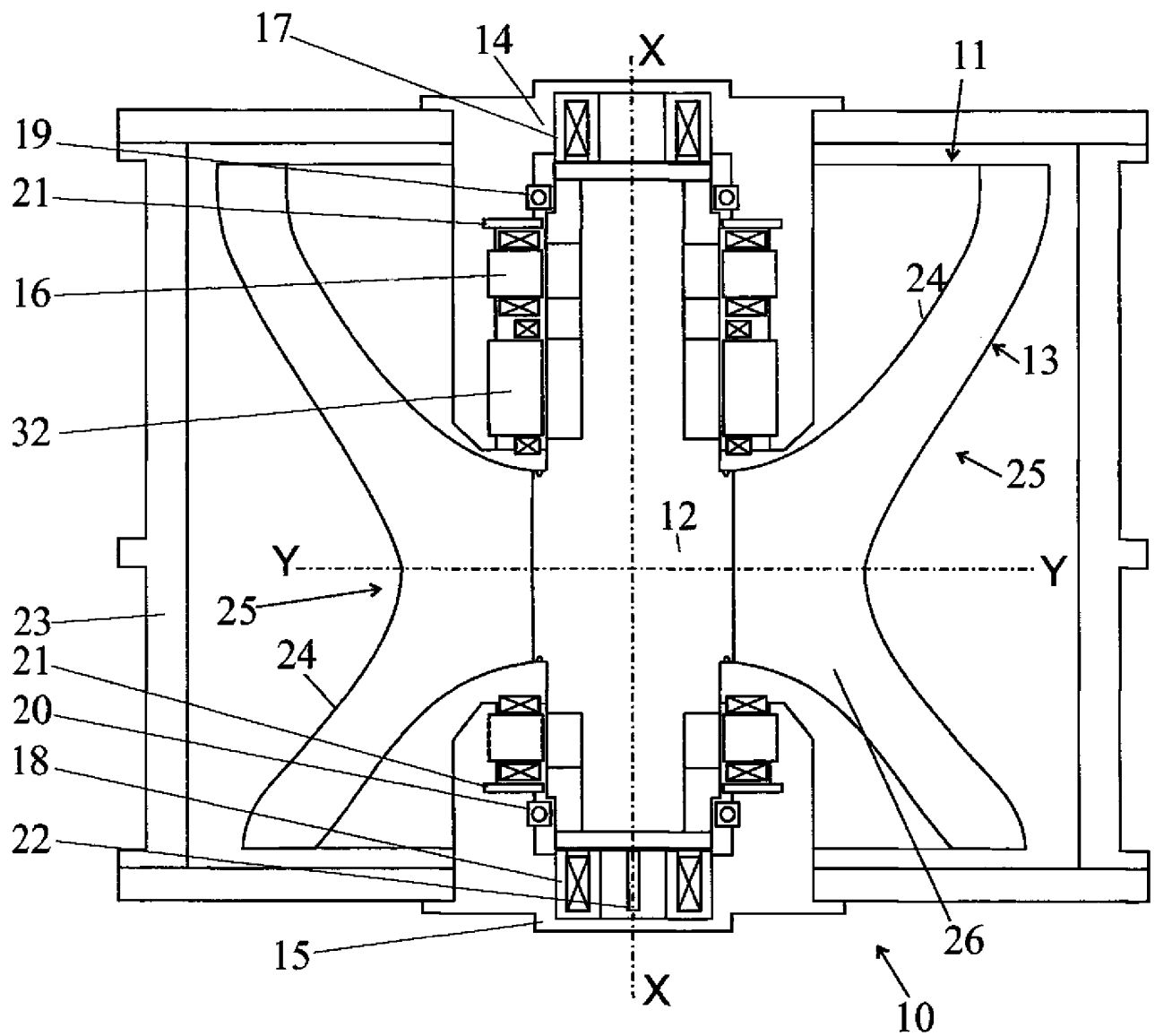


Fig. 7

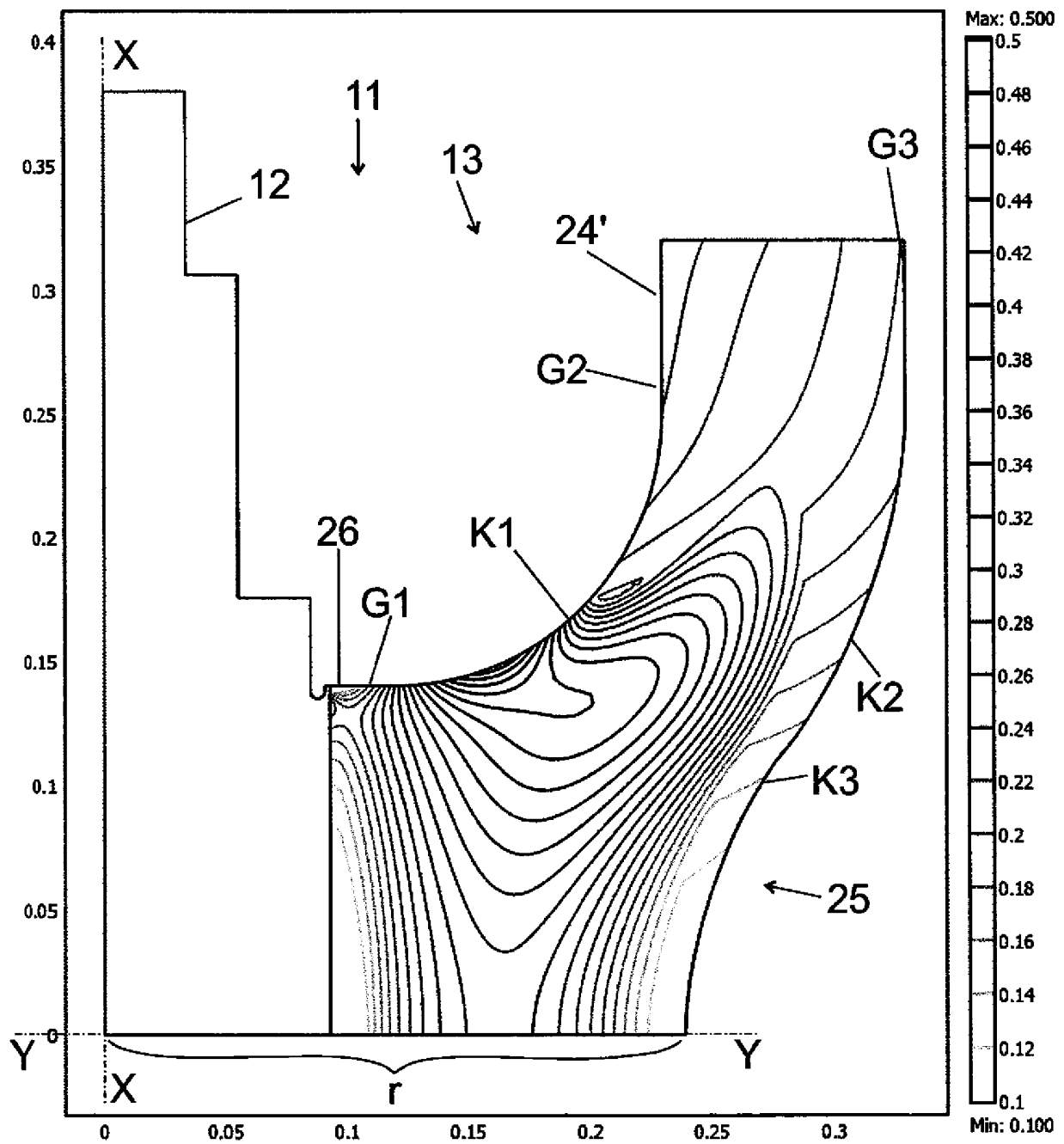


Fig. 8

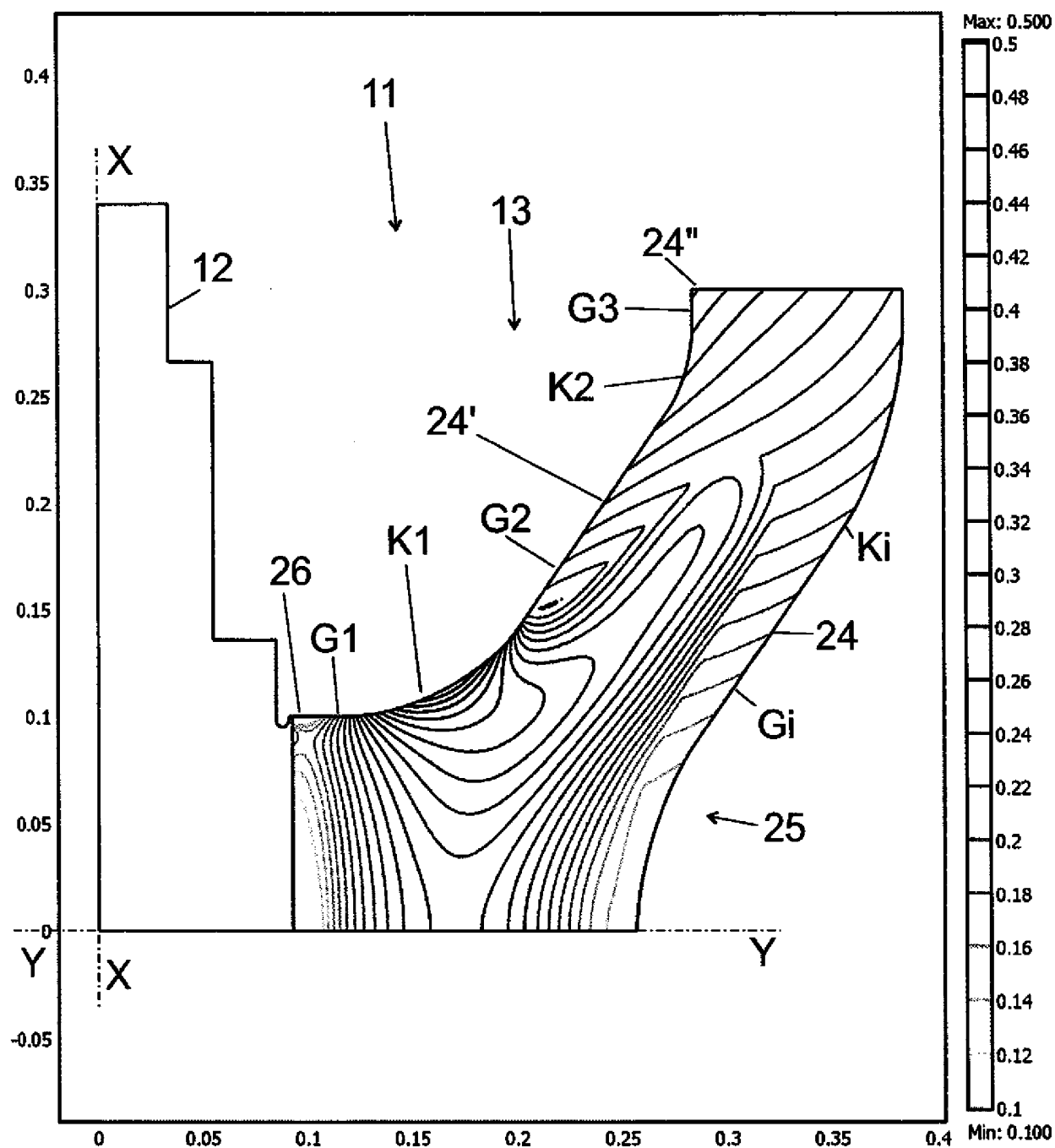


Fig. 9

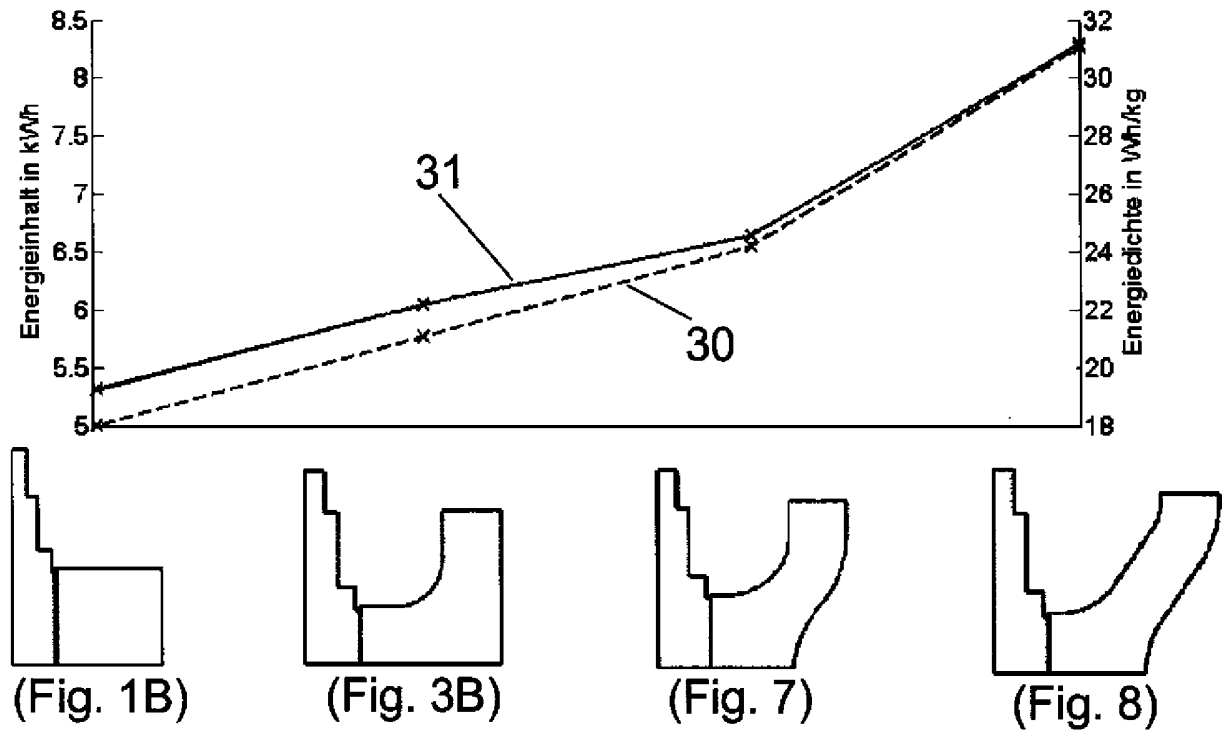


Fig. 10

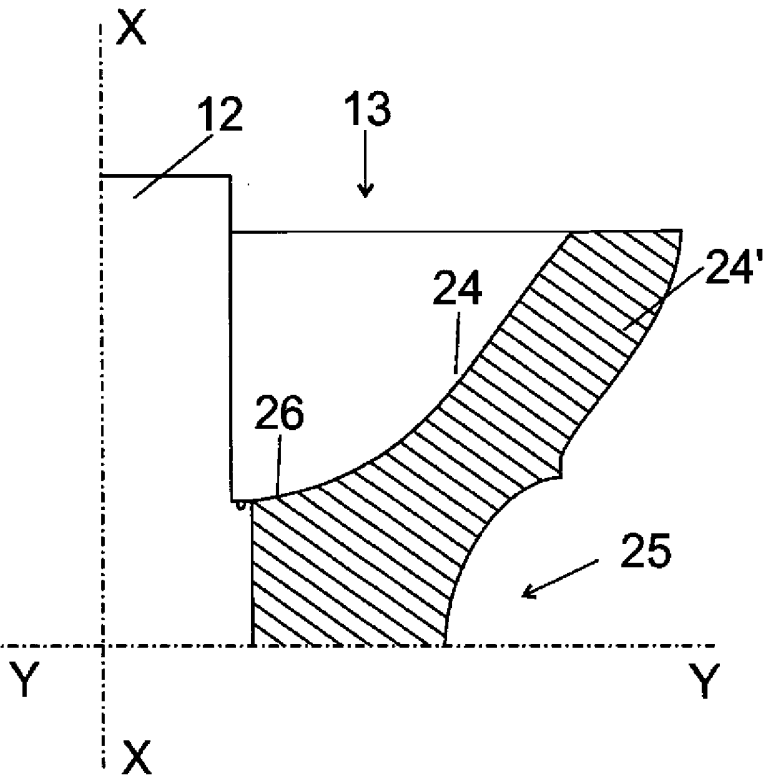


Fig. 11

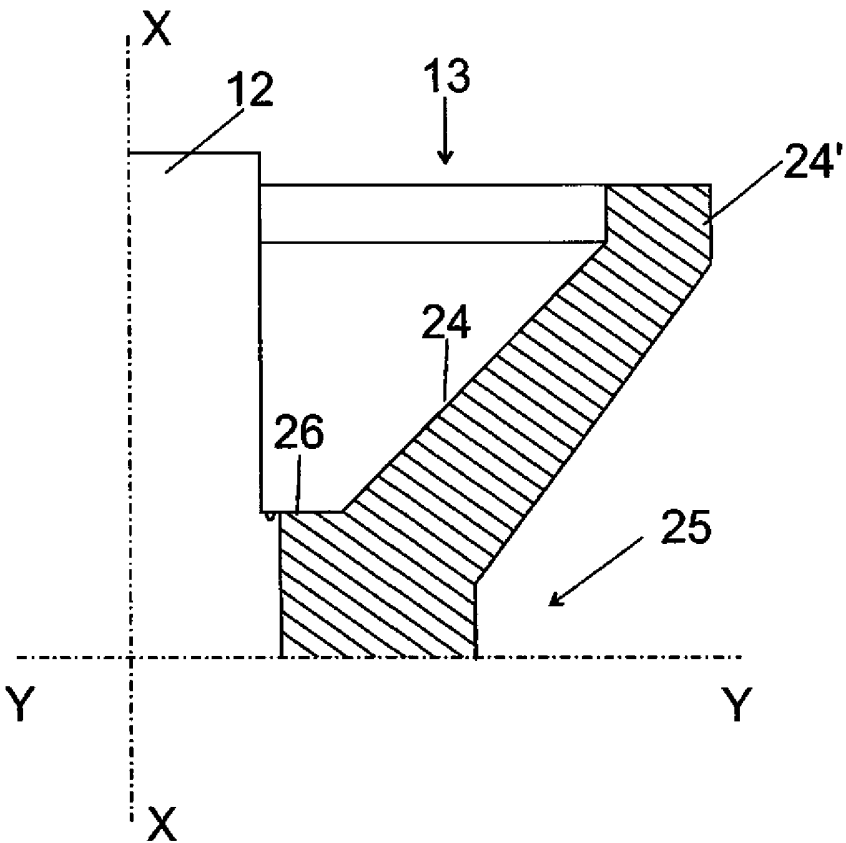


Fig. 12

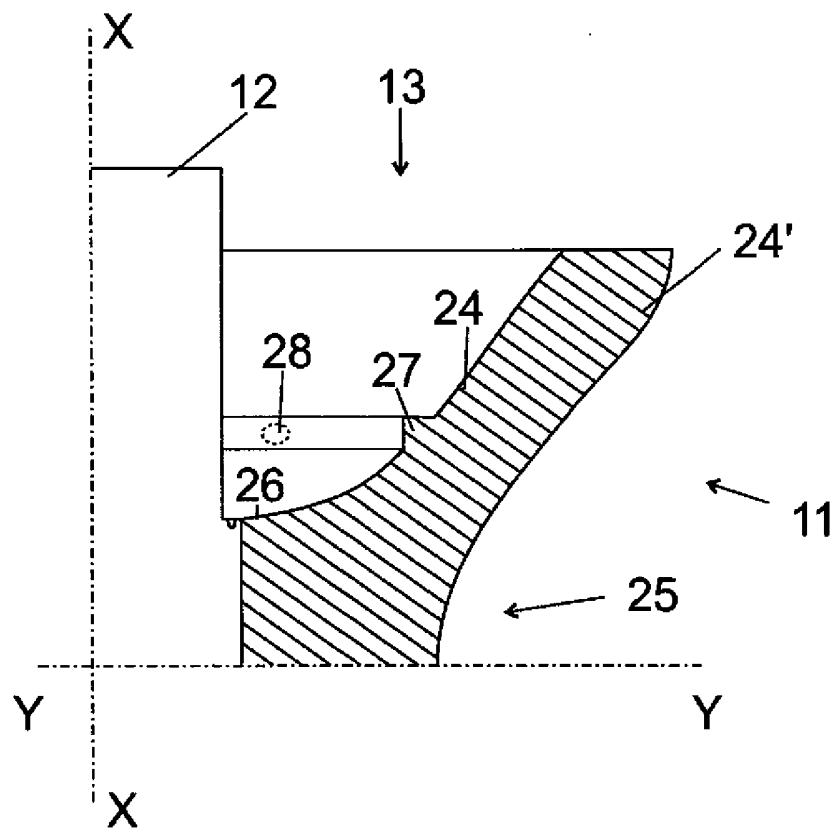


Fig. 13

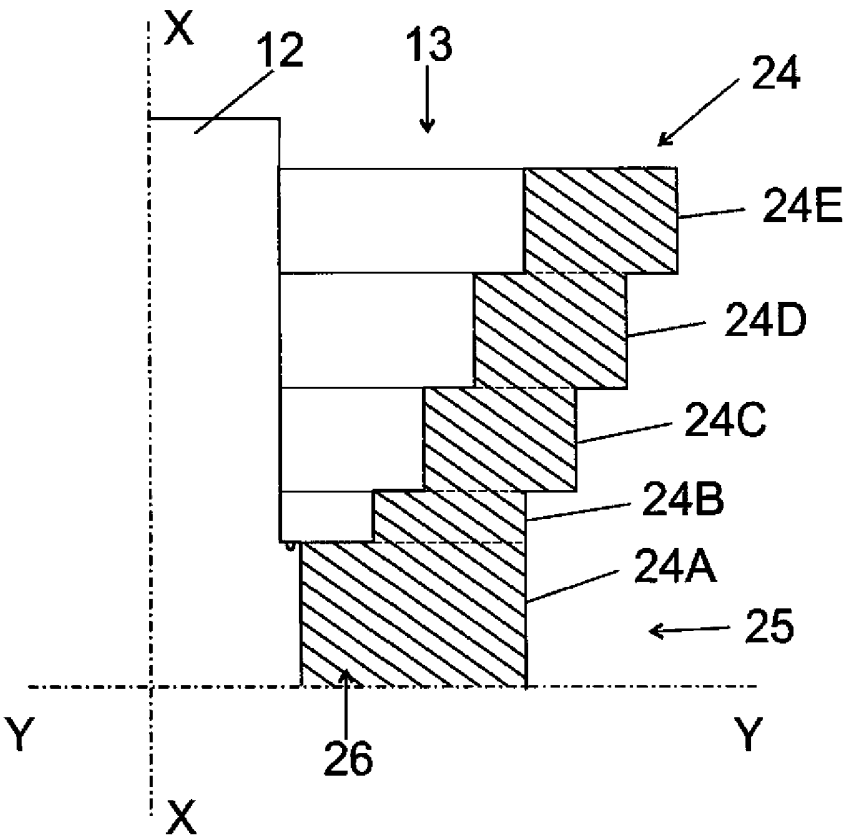
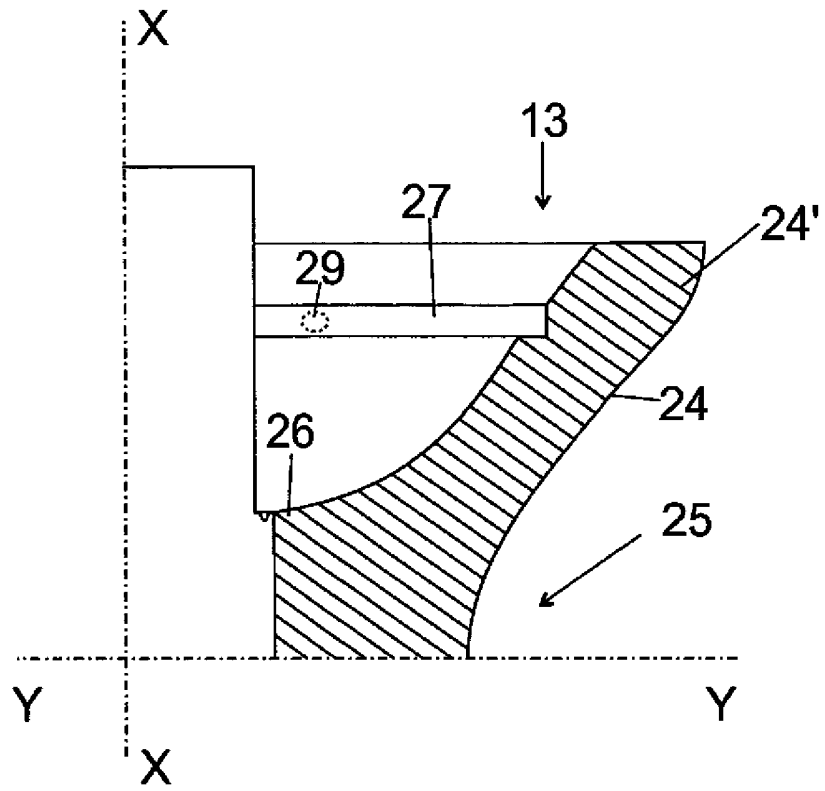


Fig. 14



17/19

Fig. 15

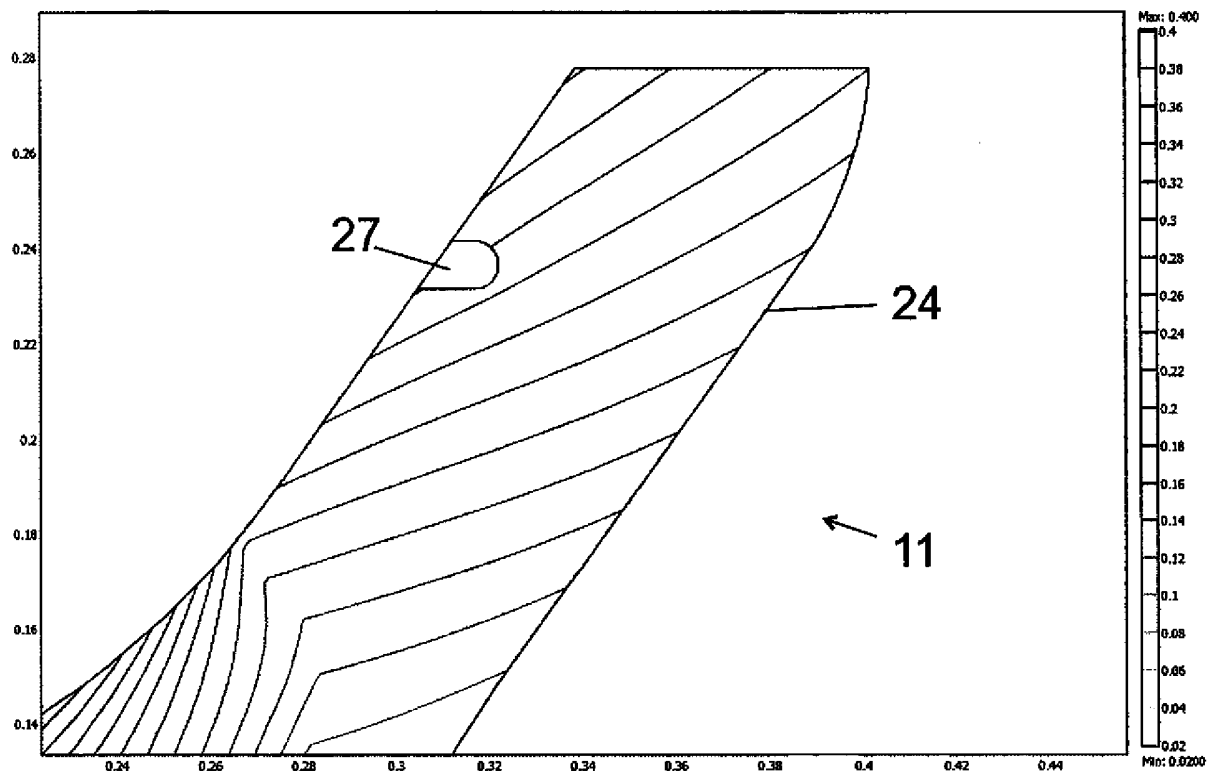


Fig. 16

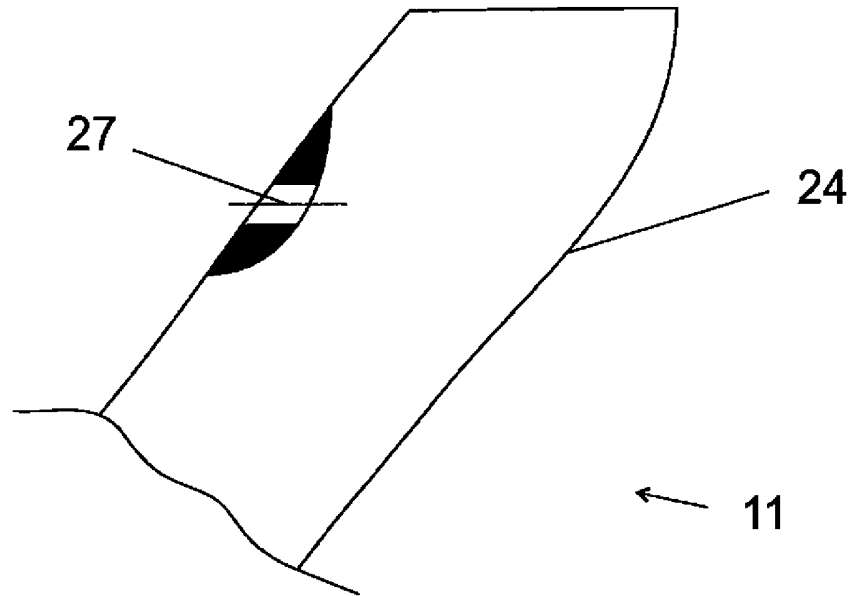
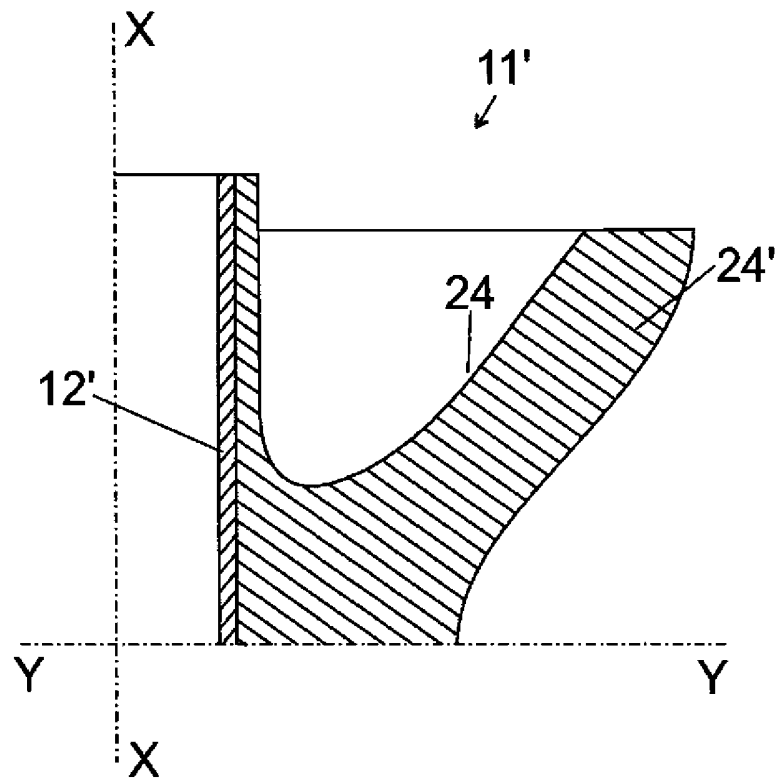
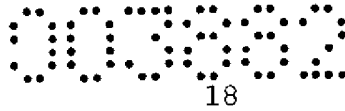


Fig. 17



Patentansprüche:

1. Schwungrad (13) mit einem auf eine Drehachse (X-X) bezogenen Rotationskörper, der einen radial äußeren Schwungmasse­teil (24) aufweist, der, sich in radialer Richtung verjüngend, an einen inneren Wellen-Anbindungsteil (26) anschließt, wobei hohle auskragende Endteile (24') gebildet sind, dadurch gekennzeichnet, dass der äußere Schwungmasse­teil (24) an seiner Außenseite eine sich rundum erstreckende radiale Einbuchtung (25) aufweist.
2. Schwungrad nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der äußere Schwungmasse­teil (24), im Axialschnitt gesehen, sich vom Zentrum der Einbuchtung (25) weg zu entgegengesetzten Seiten allgemein schräg auswärts erstreckende Schenkel aufweist.
3. Schwungrad nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest ein Bereich der auskragenden Endteile (24', 24'') achsparallel verläuft und so einen Hohlzylinder definiert.
4. Schwungrad nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der äußere Schwungmasse­teil (24) im axialen Anschluss an die Einbuchtung (25) eine allgemein hohlzylindrische Form aufweist (Fig.7).
5. Schwungrad nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass der Wellen-Anbindungsteil (26) eine geringere axiale Erstreckung als der äußere Schwungmasse­teil (24) aufweist.
6. Schwungrad nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass der Schwungmasse­teil (24) außen und/oder innen eine Kontur mit einem oder mehreren geraden Segmenten (G) aufweist.
7. Schwungrad nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Schwungmasse­teil (24) außen und/oder innen eine Kontur mit einem oder mehreren Kurvensegmenten (K) aufweist.
8. Schwungrad nach Anspruch 7, gekennzeichnet durch wenigstens



ein kreisbogenförmiges Segment.

9. Schwungrad nach Anspruch 7 oder 8, gekennzeichnet durch wenigstens ein entsprechend einer Kurve höherer Ordnung, z.B. Ellipse oder Polynom, verlaufendes Segment.

10. Schwungrad nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Schwungmasseeteil (24) außen und/oder innen eine stufenförmige Kontur aufweist (Fig.13).

11. Schwungrad nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass der Schwungmasseeteil (24) mit aneinandergesetzten gesonderten Ringen (24A-24E) aufgebaut ist.

12. Schwungrad nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass der Schwungmasseeteil (24) zumindest einen Ring (27) mit Aufnahmen, z.B. Bohrungen, zur Anbringung von Wuchtgewichten aufweist.

13. Schwungrad nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass der Schwungmassekörper (24) in axialer Richtung asymmetrisch ausgebildet ist (Fig.5).

14. Schwungrad nach einem der Ansprüche 1 bis 13, gekennzeichnet durch eine Ausbildung aus einem Faser-Verbundwerkstoff.

15. Schwungrad nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass der Verbundwerkstoff ein CFK-Werkstoff ist.