

SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(11) CH 720 247 A2

(51) Int. Cl.: B64C 23/08 (2006.01)
B63H 9/02 (2006.01)

Patentanmeldung für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

(12) PATENTANMELDUNG

(21) Anmeldenummer: 001379/2022

(71) Anmelder:
Dr. Martin Ziegler, Weiherstr. 4
5035 Unterentfelden (CH)

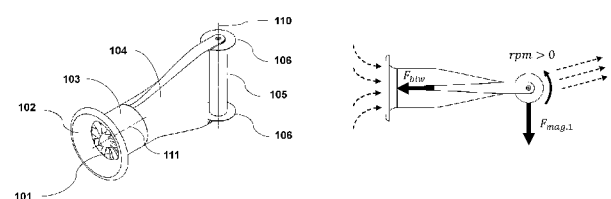
(22) Anmeldedatum: 21.11.2022

(43) Anmeldung veröffentlicht: 31.05.2024

(72) Erfinder:
Dr. Martin Ziegler, 5035 Unterentfelden (CH)

(54) Modulares Propulsionssystem

(57) Die Erfindung betrifft Verfahren und Vorrichtungen zum Antrieb von Fahrzeugen und Maschinen mit Hilfe von Strömungskräften, sowie deren Anwendung und Steuerung, dazu eine generische Systemarchitektur. Die Erfindung verwendet die Querkraft (Magnus-Effekt) aus aktiv angeströmten rotierenden Zylindern (105) als Antriebskraft für Fahrzeuge und entkoppelt die Anströmung der Zylinder (105) von der Aussenströmung des Fahrzeugs. Ein Gebläse oder eine Pumpe fördert Fluid aus der Umgebung als rechteckigen Strahl mittig auf einen rotierenden Zylinder (105). Dort entsteht eine Querkraft in Fahrtrichtung, die das Fahrzeug antreibt. Die Gebläse oder Pumpen und rotierenden Zylinder werden vorzugsweise unabhängig voneinander angetrieben und gesteuert, vorzugsweise elektrisch. Damit lassen sich strukturintegrierte elektrische Magnus-Effekt-Propulsionssysteme in Modulbauweise erschaffen, welche ihre Energie aus wiederaufladbaren Akkumulatoren beziehen, und diese um den Faktor ihrer Leistungszahl mit Sekundärenergie aus der Umgebung ergänzen. Dadurch sinkt der Bedarf an primärer Energie aus dem Akku und kommerzieller Langstreckenflug mit elektrischen Antrieben auf der Basis heutiger Akkutechnik wird möglich. Solche Antriebe fördern den Klimaschutz im Luftverkehr. Die Erfindung kann auch Schiffe und Fahrzeuge oder andere Maschinen antreiben.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft Verfahren und Vorrichtungen zum Antrieb von Fahrzeugen und Maschinen aller Art mit Hilfe von Strömungskräften, sowie Anwendungen dieser Verfahren und Vorrichtungen samt deren Steuerung, dazu eine generische Systemarchitektur für zukünftige durch die Erfindung angetriebene Fahrzeuge und Maschinen. Die Erfindung wird am Beispiel von Flugzeugantrieben erläutert. Sie kann aber allgemein auch für den Antrieb von Land- und Wasserfahrzeugen eingesetzt werden, oder auch andere Maschinen antreiben.

[0002] Motor- und Verkehrsflugzeuge werden mit Propeller- oder Strahltriebwerken angetrieben, welche Luft entgegen der Flugrichtung beschleunigen. Gemäss Newtons zweitem Gesetz entsteht dadurch eine Reaktionskraft, die als Schubkraft wirkt, und so das Flugzeug antreibt. Nach der Theorie von Froude und Rankine wird ein solches Triebwerk als Impulsbilanzraum modelliert, dem ein fluider Massenstrom $\dot{m}$ von vorne mit Reisegeschwindigkeit v_1 zuströmt. Im Bilanzraum wird er dann durch einen Propulsor beschleunigt. Anschliessend verlässt der Massenstrom den Impulsbilanzraum dann nach hinten als Strahl mit erhöhter Geschwindigkeit v_2 . Die dadurch entstehende Schubkraft F_p entspricht der Differenz der Strömungsimpulse an den Bilanzgrenzen (siehe Figur 21.1):

$$F_p = \dot{m}(v_2 - v_1)$$

[0003] Diese Kraft liefert die nutzbare Schubleistung P_s an das Flugzeug in Abhängigkeit von der Reisegeschwindigkeit: $P_s = F_p v_1$

[0004] Aus der Energiedifferenz von Zustrom und Abstrom erhält man die erforderliche Antriebsleistung P_p des Triebwerks:

$$P_p = \frac{\dot{m}}{2} (v_2^2 - v_1^2)$$

[0005] Das Verhältnis von Nutzleistung zu Antriebsleistung ist der Propulsionswirkungsgrad η_p , der nur vom Geschwindigkeitsverhältnis $x = \frac{v_2}{v_1}$ abhängt:

$$\eta_p = \frac{P_s}{P_p} = \frac{2}{x + 1}$$

[0006] Um einen hohen Wirkungsgrad zu erzielen, muss das Geschwindigkeitsverhältnis x möglichst klein sein. Dadurch sinkt aber die Geschwindigkeitsdifferenz $\Delta v = v_2 - v_1$, und für eine gegebene Schubkraft steigt der erforderliche Massenstrom des Triebwerks. Deshalb wählt man den Durchmesser des Propulsors möglichst gross. In der Folge sind Nebentriebwerke mit grossem Durchmesser entstanden (Turbo-Fan-Triebwerke), die unter den Tragflächen montiert sind und deshalb Gewicht und Luftwiderstand des Flugzeugs erhöhen. Noch grössere Durchmesser erfordern neue Flugzeug-Architekturen, weil die Triebwerke bei Start und Landung Bodenfreiheit brauchen und die Fahrwerkshöhe limitiert ist (Open Rotor).

[0007] Der Treibstoffbedarf für das Flugzeug, und damit dessen Betriebskosten, hängt von der spezifischen Leistung φ_p ab, das ist die erforderliche Antriebsleistung P_p pro Einheit an erzeugtem Schub F_p :

$$\varphi_p = \frac{P_p}{F_p} = \frac{v_1}{\eta_p} = v_1 \frac{x + 1}{2}$$

[0008] Die spezifische Leistung wächst linear mit der Reisegeschwindigkeit, also nimmt der Verbrauch an Treibstoff mit der Geschwindigkeit zu. Triebwerke moderner Verkehrsflugzeuge haben im Reiseflug bei Mach 0.85 einen spezifischen Kraftstoffverbrauch von etwa 15 Gramm pro Sekunde und Kilo-Newton. Kerosin hat einen Heizwert von 43.1 kJ/kg, und so braucht der Reiseflug heute knapp 650 Watt Leistung pro Newton Schub. Ein Newton entspricht der Gewichtskraft einer Tafel Schokolade.

[0009] Gegenwärtig werden im globalen Luftverkehr jährlich etwa 300 Mio. Tonnen Kerosin verbrannt, Tendenz steigend. Das ergibt Emissionen von einer Gigatonne CO_2 pro Jahr, das Meiste oberhalb des Wetters, wo die Verweildauer in Dekaden gemessen wird und das CO_2 Jahr für Jahr und über Jahrzehnte akkumuliert. Deshalb ist der Luftverkehr für das Klima besonders schädlich.

[0010] Um dem Klimawandel zu begegnen sind elektrische Flugantriebe vorteilhaft, die wegen der geringen Energiedichte von Akkumulatoren derzeit aber entweder

- nicht **weit** fliegen können, oder
- nicht **schnell** fliegen können

[0011] Daher sind elektrische Flugantriebe für lange Flugstrecken bis heute nicht möglich, und der Luftverkehr wird das Klima weiter nachhaltig schädigen.

[0012] Aufgabe der Erfindung ist es, ein neues Propulsionssystem zu erschaffen, das

- klimaschädliche Emissionen des Luftverkehrs vermindert,
- neue Freiheitsgrade im Flugzeugentwurf bietet,
- die spezifische Leistung des Strömungsantriebs vermindert,
- elektrische Antriebe für kommerzielle Langstreckenflüge ermöglicht,
- Betriebssicherheit durch Redundanz erhöht,
- bei bestehenden Flugzeugen nachgerüstet werden kann,
- auch bei anderen Fahrzeugen und Maschinen anwendbar ist.

[0013] Diese Aufgaben der Erfindung werden in Summe erfüllt durch:

- das Antriebsverfahren nach Anspruch 1 bis 3,
- den Propulsor nach Anspruch 4 bis 12,
- die Propulsionsmodule (Mono, Twin, Quad) nach Anspruch 13 bis 22,
- die modularen Propulsionssysteme (Linie, Fläche, Volumen, Bogen, Kreis, Zylinder, oder andere Geometrie) nach Anspruch 23 bis 24,
- die Steuerung für modulare Propulsionssysteme für vertikalen und horizontalen Flug nach Anspruch 25 und 26,
- die strukturintegrierten Propulsionssysteme nach Anspruch 27 bis 31,
- die nachrüstbaren modularen Propulsionssysteme für Flugzeuge nach Anspruch 32,
- die generische Systemarchitektur für Fahrzeuge und angetriebene Maschinen mit strukturintegrierten modularen Propulsionssystemen nach Anspruch 33 und 34.
- Fahrzeuge und Maschinen nach Anspruch 35.

[0014] Die Erfindung wird in neun Abschnitten A bis I anhand von 22 Figuren beschrieben, die Figuren 21 und 22 enthalten die Grundgleichungen der theoretischen Modelle zur Beschreibung der verschiedenen Antriebssysteme. Die Abschnitte sind:

- A. Theorie und Grundlagen
- B. Propulsor
- C. Propulsionsmodul
- D. Propulsionssystem
- E. Steuerung
- F. Strukturintegration
- G. Nachrüsten
- H. Systemarchitektur
- I. Anhang mit Liste der Bezugszeichen und Abkürzungen

ABSCHNITT A - Theorie und Grundlagen

[0015] Strömungskräfte für den Antrieb von Maschinen und Fahrzeugen sind nicht nur vom Propeller zum Antrieb von Schiffen, Flugzeugen, Windmühlen und Windkraftanlagen bekannt, sondern lange zuvor schon vom Segelboot. 1768 bis

1771 segelte James Cook von England bis nach Australien und zurück, ohne einen Tropfen Kerosin zu verbrennen (https://de.wikipedia.org/wiki/James_Cook).

[0016] Segelfahrzeuge können schneller fahren als der Wind. Ein Geschwindigkeitsrekord für Landsegler wurde am 26.03.2009 von Richard Jenkins mit „Greenbird“ erzielt. Bei 48 km/h Windgeschwindigkeit erreichte er 203 km/h, das ist über viermal schneller als der Wind (<https://en.wikipedia.org/wiki/Greenbird>).

[0017] Ein Geschwindigkeitsrekord für handgestartete Segelflugmodelle wurde am 09.06.2018 von Spencer Lisenby im dynamischen Segelflug aufgestellt. Sein Segelflugmodell erreichte 877 km/h bei 80 km/h Windgeschwindigkeit, das ist elf Mal schneller als der Wind (www.dskinet.com).

[0018] Ohne Zweifel können Segelfahrzeuge zu Lande, zu Wasser, und in der Luft ihre Antriebsenergie aus der Atmosphäre beziehen. Auf dem Mond geht das nicht, weil dort die Atmosphäre fehlt.

[0019] Für den Antrieb von Schiffen mit Hilfe von Windkraft ist neben starren und flexiblen Segeln auch das Rotorsegel bekannt, das von Anton Flettner erfunden wurde (Flettner-Rotor). Hier entsteht die Antriebskraft nicht aus der Umströmung eines aerodynamisch geformten Profils, sondern aus den Luftkräften an einem rotierenden Körper im Wind, bekannt als Magnus-Effekt, die im Fussball für die „Bananen-Flanke“ sorgen (<https://de.wikipedia.org/wiki/Magnus-Effekt>) (siehe Figur 21.2).

[0020] Flettner stattete das Frachtschiff „Buckau“ Anfang der 1920er Jahre mit Rotorsegeln aus ([https://de.wikipedia.org/wiki/Buckau_\(Schiff\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Buckau_(Schiff))) und überquerte 1926 damit den Atlantik. Heute erlebt der Flettner-Rotor als „Wind Assisted Ship Propulsion“ (WASP) in der Seefahrt eine Renaissance, als ergänzender „hybrider“ Schiffsantrieb. So berichtet <https://ecoflettner.de/> von einem hybriden Schiffsantrieb, dessen Hauptantrieb mit Schiffsschraube 3.3 Tonnen pro Kilowatt Antriebsleistung transportiert, während die beiden Flettner-Rotoren diesen Wert auf 26.7 Tonnen pro Kilowatt steigern können (<https://www.youtube.com/watch?v=aQXp75Qt99M>, Minute 2:41). Damit steigt die Transportleistung des hybriden Antriebs auf das 8.1-fache der Hauptmaschine ($26.7/3.3=8.1$). Die zusätzliche Energie gewinnt der Flettner-Rotor aus der Umgebung, d.h. je Anteil eingesetzter Energie aus dem Rotorantrieb kommen 8.1 Teile „ersegelte“ Antriebsenergie aus der Atmosphäre hinzu. Damit hat der Flettner-Rotor eine Leistungszahl von $\epsilon_{\text{cyl}} = 8.1$ (Coefficient of Performance), und der Bedarf an Treibstoff für den Antrieb sinkt auf 12.35%. Dieses enorme Einsparpotential trifft bei Reedern weltweit auf grosses Interesse: Kostenreduzierung dient dem Klimaschutz.

[0021] Durch Gewinnung von Zusatzenergie aus der Umgebung „hebelt“ der Flettner-Rotor den Einsatz von Treibstoff aus Bunkeröl über die Leistungszahl und ermöglicht erhebliche Einsparungen. Dieses Prinzip ist von Wärmepumpen bereits bekannt, deren nutzbare Heizleistung um den Faktor „Leistungszahl“ höher ist als deren eingesetzte Antriebsenergie. Die zusätzliche Energie der Wärmepumpe stammt stets aus der Umgebung. Wärmepumpen „hebeln“ den Einsatz elektrischer Energie um den Faktor „Leistungszahl“, weshalb sie die Heizkosten senken können, denn die Energie aus der Umgebung kostet nichts. Wärmepumpen und Flettner-Rotoren sind sich darin ähnlich.

[0022] Die Luftkräfte an Tragflächen, Segeln, und rotierenden Zylindern haben eine gemeinsame theoretische Grundlage: Die Auftriebtheorie von Kutta und Joukowski. Nach dieser Theorie entsteht der Auftrieb an Tragflächen und Segeln, und der Quertrieb an rotierenden Zylindern (Magnus-Effekt), aus der „Zirkulation“ der Strömung um das Profil oder den Zylinder. Nach Kutta und Joukowski sind Tragflächen, Segel, und Flettner-Rotoren ähnlich, ihr Auftrieb ermittelt sich aus der Dichte ρ des umgebenden Fluids (Luft oder Wasser), der Länge l der Tragfläche oder des rotierenden Zylinders, der Anströmgeschwindigkeit v , und der Zirkulation Γ nach derselben Gleichung, einer grundlegenden Gleichung für Aero- und Hydrodynamik:

$$F_{\text{a,Kutta}} = \rho l v \Gamma$$

[0023] Die Auftriebskraft wirkt stets senkrecht zur Anströmungsrichtung, wobei sie bei Tragflächen und Segeln in der Aerodynamik über einen Auftriebsbeiwert $C_{a,\text{wing}}$, den dynamischen Druck q der Anströmung, und die Flächengrösse A von Flügel oder Segel beschrieben wird:

$$F_{a,\text{wing}} = c_{a,\text{wing}} q A \text{ mit } q = \frac{\rho}{2} v^2$$

[0024] Wenn man die Fläche A als Länge l mal Breite b definiert, dann ergibt sich für den Auftriebsbeiwert und die Zirkulation bei Tragflächen und Segeln Γ_{wing} der einfache Zusammenhang:

$$\Gamma_{\text{wing}} = \frac{c_{a,\text{wing}}}{2} v b \text{ und } c_{a,\text{wing}} = \frac{2\Gamma_{\text{wing}}}{v b}$$

[0025] Bei Tragflächen und Segeln hängt der Auftriebsbeiwert c_a nicht nur von der Profilform und der Flügelgeometrie ab, sondern auch vom Anstellwinkel α des Profils gegenüber der Strömung. Hier ist der Zusammenhang zwischen Anstellwinkel α und Auftriebsbeiwert aus der Aerodynamik bekannt:

$$C_{a,\text{wing}} = 2\pi\alpha$$

[0026] Bei hohen Anstellwinkeln reißt die Strömung an der Tragfläche jedoch ab, und der Auftrieb bricht zusammen. Deshalb erreichen Tragflächen und Segel bei Anstellwinkel von 15° einen Auftriebsbeiwert im Bereich $c_{a,\text{wing}} = 1.5$, durch Wölbung und Auftriebshilfen kann man $c_{a,\text{wing}} = 2$ bis 4 erreichen, allerdings mit hohem technischem Aufwand.

[0027] Beim Flettner-Rotor ist das anders, denn hier hängt dessen Zirkulation Γ_{cyl} , und damit seine Querkraft, von der Oberflächengeschwindigkeit und dem Umfang des Zylinders mit Radius r ab:

$$\Gamma_{\text{cyl}} = 2\pi r u$$

[0028] Nach Kutta-Joukowski ist die Auftriebskraft dann eine Funktion der Dichte ρ des strömenden Fluids, der beiden Geschwindigkeiten von Anströmung v und Rotation $u = r\omega$ des Zylinders, und der Mantelfläche des Zylinders $A_m = 2\pi r l$. Wenn man das Verhältnis der beiden Geschwindigkeiten mit k_u als $u = k_u v$ parametrisiert, dann kann man den Auftrieb des Zylinders auch über den Staudruck q der Anströmung, das Verhältnis k_u der beiden Geschwindigkeiten, und die Zylindermantelfläche A_m darstellen:

$$F_{a,\text{cyl}} = \rho l v \Gamma = \rho l v 2\pi r u = \rho v^2 k_u A_m = 2q k_u A_m$$

[0029] Den Auftriebsbeiwert des Zylinders $c_{a,\text{cyl}}$ erhält man in Bezug auf seinen Mittenschnitt mit der Referenzfläche $A_r = 2rl$:

$$F_{a,\text{cyl}} = 2q k_u A_m = c_{a,\text{cyl}} q A_r$$

[0030] Daraus folgt der Auftriebsbeiwert des rotierenden Zylinders im Vergleich zu Tragfläche und Segel:

$$C_{a,\text{cyl}} = 2\pi k_u$$

$$C_{a,\text{wing}} = 2\pi\alpha$$

[0031] Im Unterschied zur Auftriebskraft an Tragfläche und Segel hängt die Querkraft des Flettner-Rotors also nicht vom Anstellwinkel der Fläche gegen die Strömung ab, sondern vom Verhältnis k_u zwischen Umfangsgeschwindigkeit und Anströmung, das sind **zwei** Geschwindigkeiten, von denen beim Flettner-Rotor **eine** frei gewählt werden kann: Drehzahl und Durchmesser des Zylinders bestimmen die Umfangsgeschwindigkeit, und beide sind konstruktiv wählbar.

[0032] Die Formel von Kutta-Joukowski gilt für ideale zweidimensionale Strömungen mit unendlicher Erstreckung der Zylinderachse. Die Umströmung endlicher Zylinder führt an dessen Enden zu dreidimensionalen Effekten, welche den idealen Auftriebswert mindern. Im Labor von Ludwig Prandtl wurden bereits 1923 Auftriebswerte an rotierenden Zylindern von $c_{a,\text{cyl}} = 12$ gemessen, mit $k_u = 4$. Das ist acht Mal so viel wie bei einem aerodynamisch geformten Profil, aber nur etwa 50% des theoretischen Idealwertes von 8π . Die real erzielbare Rotorkraft wird daher um einen Faktor ergänzt, den „Flettner-Wirkungsgrad“ mit $\eta_{FR} \approx 0.5$, und es gilt:

$$F_{a,\text{cyl}} = 2\eta_{FR} q k_u A_m = c_{a,\text{cyl}} q A_r \text{ folglich } c_{a,\text{cyl}} = 2\pi k_u \eta_{FR}$$

Mit einem realen Rotorauftriebsbeiwert von 12 gegenüber 1.5 für Tragflügel ergibt sich dann ein möglicher Hebeleffekt für den Einsatz von Flettner-Rotoren als Antrieb für Schiffe gegenüber Propellern, wenn man die Nutz- und Antriebsleistungen vergleicht.

[0033] Die mechanische Antriebsleistung P_{cyl} eines Rotorsegels muss die Wandreibung am rotierenden Zylindermantel mit der Fläche A_m überwinden, dafür liefert er die Antriebskraft F_{cyl} . Mit dem Reibungsbeiwert der Zylinderwand von c_f und einer Anströmung mit Geschwindigkeit v_0 wächst die erforderliche Antriebsleistung kubisch mit dem Geschwindigkeitsverhältnis k_u , und es gilt für die Antriebskraft F_{cyl} und die erforderliche Leistung P_{cyl} der Zusammenhang:

$$F_{\text{cyl}} = 2\eta_{FR} q_0 k_u A_m$$

$$P_{\text{cyl}} = c_f \frac{\rho}{2} u^3 A_m = c_f q_0 v_0 k_u^3 A_m$$

[0034] Im Idealfall wirkt die Zylinderkraft genau in Fahrtrichtung und hat dann die Richtung der Fahrtgeschwindigkeit v_1 . In diesem Fall liefert das Rotorsegel eine Nutzleistung $P_1 = F_{\text{cyl}} v_1$ an das Schiff. Das Verhältnis von Nutzleistung zu Antriebsleistung ist die Leistungszahl ε_{cyl} und es gilt:

$$\varepsilon_{\text{cyl}} = \frac{F_{\text{cyl}} v_1}{P_{\text{cyl}}} = \frac{2\eta_{FR}}{c_f k_u^2} \frac{v_1}{v_0}$$

[0035] Je schneller das Schiff fährt, desto mehr Nutzleistung liefert der Flettner-Rotor an das Schiff, und die Leistungszahl steigt. Das ist bemerkenswert. Bei 13 Knoten Fahrtgeschwindigkeit, 15 Knoten Wind schräg von achtern, einem Drehzahlverhältnis von 3.5, einer Reibungszahl von 0.007, und einem Flettner-Wirkungsgrad von 0.5 gilt für die Leistungsziffer:

$$\varepsilon_{cyl} = \frac{F_{cyl} v_1}{P_{cyl}} = \frac{2\eta_{FR}}{c_f k_u^2} \frac{v_1}{v_0} = \frac{2 * 0.5 * 13}{0.007 * 3.5 * 3.5 * 15} = 10.10$$

[0036] Unter diesen Bedingungen liefert der Flettner-Rotor mehr als das 10-fache seiner Antriebsleistung als Vortriebsleistung an das Schiff. Das spart Treibstoff. Antriebe nach dem Froude-Rankine-Modell können das nicht.

[0037] Die schubspezifische Leistung φ_{cyl} des Antriebs ist die Leistung pro Newton Schub, das ist P/F , und für den Flettner-Rotor gilt:

$$\varphi_{cyl} = \frac{P_{cyl}}{F_{cyl}} = \frac{c_f k_u^2}{2\eta_{FR}} v_0$$

[0038] Damit hängt der Wert nur von der Drehzahl, der Reibung, dem Flettner-Wirkungsgrad und der Anströmgeschwindigkeit ab, aber nicht von der Fahrtgeschwindigkeit.

[0039] Herkömmliche Flugantriebe sind anders. Bei Antrieben nach Froude-Rankine wächst die schubspezifische Leistung mit der Reisegeschwindigkeit, weil die Anströmung mit dem Fahrtwind erfolgt. Bei Flettner-Rotoren erfolgt die Anströmung mit dem scheinbaren Wind, das ist die vektorielle Addition von Fahrtwind und wahren Wind. Bei idealen Windbedingungen (schräg von achtern) weist die Rotor-Kraft in die Fahrtrichtung des Schiffes mit maximaler Leistungszahl und Ersparnis an Treibstoff.

[0040] Die folgende Tabelle zeigt einen Vergleich zwischen dem Froude-Rankine-Propulsor und dem Flettner-Rotor:

Propulsor	Parameter	Eigenschaft
Froude-Rankine	Spezifische Leistung $\varphi_p = \frac{P_p}{F_p} = \frac{v_1}{\eta_p}$	Anströmung = Fahrtwind Der Verbrauch steigt mit der Reisegeschwindigkeit v_1
	Wirkungsgrad $\eta_p = \frac{F_p v_1}{P_p} = \frac{2}{x + 1} = \frac{v_1}{v_m}$	v_m ist immer grösser als die Reisegeschwindigkeit v_1 , und der Wirkungsgrad ist kleiner als 100%
Flettner-Rotor	Spezifische Leistung $\varphi_{cyl} = \frac{P_{cyl}}{F_{cyl}} = \frac{c_f k_u^2}{2\eta_{FR}} v_0$	Anströmung $\neq$ Fahrtwind Der Verbrauch ist von der Reisegeschwindigkeit unabhängig
	Leistungszahl $\varepsilon_{cyl} = \frac{F_{cyl} v_1}{P_{cyl}} = \frac{2\eta_{FR}}{c_f k_u^2} \frac{v_1}{v_0}$	Leistungszahl steigt mit der Reisegeschwindigkeit v_1 , und die Leistungszahl ist 0 bis 10!

- Ein Froude-Rankine-Propulsor nutzt Newtons zweites Gesetz und erzeugt die Schubkraft als Reaktion auf die Beschleunigung des zufließenden Massenstroms. Er wird aus der Fahrtströmung direkt von vorne gespeist, und wegen Newtons „Actio = Reactio“ sind Strömungsrichtung und Schubrichtung immer parallel, aber entgegengesetzt. Deshalb wächst die schubspezifische Leistung des Froude-Rankine-Propulsors mit der Reisegeschwindigkeit: Je schneller das Fahrzeug fährt oder fliegt, desto mehr Treibstoff pro Einheit Schub wird gebraucht. Heute brauchen Flugzeuge im Reiseflug etwa 650 Watt thermische Leistung aus Kerosin für jedes Newton Schubkraft. Das ist zu viel.

- Ein Flettner-Rotor nutzt den Magnus-Effekt am angeströmten rotierenden Zylinder, und er wird vom Wind angeblasen. Das ist ein „passiver Magnus-Effekt Propulsor“, dessen Kraft quer zur Anströmung entsteht. Damit gewinnt er sekundäre Energie aus der Umgebung und „hebelt“ den Treibstoff um den Faktor seiner Leistungszahl. Sein Nutzen für das Schiff und seine Leistungszahl sind vom Wind und dessen Richtung in Bezug auf das Schiff abhängig. Der maximale Nutzen entsteht, wenn die Rotor-Kraft in Fahrtrichtung zeigt, dann kommt der Wind schräg von achtern. Je schneller das Schiff fährt, desto grösser ist die Leistungszahl des Flettner-Rotors, und die Ersparnis an Treibstoff nimmt zu. Flettner-Rotoren können Leistungszahlen von 8 bis 10 erreichen, mit Senkung des Treibstoffbedarfs auf 10% bis 12% der Hauptmaschine. Das findet weltweit Aufmerksamkeit bei Reedereien.

ABSCHNITT B - Propulsor

[0041] Die Erfindung verwendet die Querkraft aus angeströmten rotierenden Zylindern (Magnus-Effekt) als Antriebskraft für Fahrzeuge und entkoppelt die Anströmung der Zylinder von der Aussenströmung (Fahrtwind, Fahrströmung). Um eine Antriebskraft in Fahrtrichtung zu erzeugen, muss der Zylinder quer zur Fahrtrichtung angeströmt werden. Dazu wird der Propulsor in drei Komponenten getrennt:

- 1) Einen angetriebenen Ventilator oder eine Pumpe, welche Fluid aus der Umgebung ansaugt, vorzugsweise senkrecht zur Fahrströmung, und in die Strömungsführung pumpt,
- 2) eine Strömungsführung mit Strahlformer, welche das Fluid als Strahl mit vorzugsweise rechteckigem Querschnitt abgibt, der mittig auf einen rotierenden Zylinder gerichtet ist, und
- 3) einen angetriebenen rotierenden Zylinder (Flettner-Rotor), der mittels Magnus-Effekt eine Querkraft in Fahrtrichtung erzeugt und das Fahrzeug antreibt.

[0042] Damit wird ein „aktiver“ Magnus-Effekt Propulsor geschaffen, dessen Anströmung (anders als beim passiven Flettner-Rotor) durch einen Verdichter oder eine Pumpe erzeugt wird und von der Fahrströmung entkoppelt ist. Die Komponenten (1) und (3) werden unabhängig voneinander angetrieben, vorzugsweise mit einem Elektromotor. Damit lassen sich komplett elektrische Antriebe erschaffen, die den Treibstoff durch Nutzung von Umgebungsenergie um den Faktor ihrer Leistungszahl „hebeln“ können. Die dadurch entstehende Ersparnis an Treibstoff ermöglicht Langstreckenflug mit elektrischen Antrieben auf der Basis heutiger Akkutechnik.

[0043] Die weitere Erläuterung erfolgt am Beispiel des Flugzeugantriebs. Das Prinzip kann dann verallgemeinert und auf alle Arten von Fahrzeugen und Maschinen angewendet werden.

[0044] Zwei Beispiele von **aktiven** Magnus-Effekt Propulsoren (AMEP) sind in Figur 1 bis 4 beschrieben.

[0045] Figur 1 zeigt einen AMEP (100) mit einem elektrisch angetriebenem Axialgebläse (101) mit Motor (107), das Luft durch das Einlaufgehäuse (102) ansaugt, im Auslaufgehäuse (103) beschleunigt, und dem Strahlformer (104) zuführt, der den Strahl rechteckig formt, und diesen durch ein Strömungsgitter (108) mittig auf einen mit einem oder zwei Elektromotoren (109.1 und 109.2) angetriebenen Flettner-Rotor (105) mit Endscheiben (106) bläst. Die Drehachse (110) des Flettner-Rotors steht senkrecht auf der Drehachse (111) des Axialgebläses.

[0046] Die Motoren des Gebläses (107) und des Flettner-Rotors (109.1 und 109.2) werden unabhängig voneinander angesteuert:

- Der Motor des Gebläses (107) steuert den Massenstrom und damit die Anströmgeschwindigkeit des Flettner-Rotors (105).
- Der Motor des Flettner-Rotors (109.1 und 109.2) steuert dessen Drehzahl und damit die Zirkulation und die Querkraft des Rotors.

[0047] Weil beide Motoren unabhängig sind, kann der Propulsor (100) Strömungskräfte in **drei** Richtungen erzeugen:

- 1) In Figur 1.4 liefert das Gebläse (107) eine Schubkraft F_{blw} nach dem Froude-Rankine Modell („Actio = Reactio“). Der Flettnerrotor (105) dreht gegen den Uhrzeigersinn (mathematisch positiv) um seine Achse (110), und erzeugt aus dem Magnus-Effekt zusätzlich eine **abwärts** gerichtete Kraft $F_{mag,1}$, die auf das Gehäuse wirkt, weil der Rotor (105) im Propulsor (100) gelagert und deshalb fest mit ihm verbunden ist.
- 2) In Figur 1.5 dreht sich der Flettner-Rotor (105) nicht. Dann verbleibt nur die **seitlich** gerichtete Impulskraft F_{blw} des Gebläses (101) in Richtung der Achse (111).

- 3) In Figur 1.6 dreht sich der Flettner-Rotor (105) im Uhrzeigersinn (mathematisch negativ) um seine Achse (110), und erzeugt aus dem Magnus-Effekt zusätzlich eine **aufwärts** gerichtete Kraft $F_{\text{mag},2}$, die auf das Gehäuse wirkt, weil der Rotor (105) im Propulsor (100) gelagert und deshalb fest mit ihm verbunden ist.

[0048] Die Richtung der Magnus-Kraft F_{mag} hängt nur von der Drehrichtung des Rotors ab. Bei gleicher Drehzahl und gleichem Massenstrom sind die Kräfte $F_{\text{mag},1}$ und $F_{\text{mag},2}$ gleich gross, aber entgegengerichtet. Durch Umsteuern der Drehrichtung lässt sich die Kraftwirkung zu 100% umdrehen. Das ist mit bekannten Froude-Rankine-Propulsoren (FRAP) nicht möglich.

[0049] Figur 2 zeigt den AMEP (100) im Querschnitt (Figur 2.1), von vorne (Figur 2.2), und von hinten (Figur 2.3) mit den wichtigsten Abmessungen und Regeln:

- Der Durchmesser (D1) des Einlaufgehäuses (102) ist vorzugsweise grösser als der Durchmesser (D2).
- Die Länge der Strömungsführung ($L1 + L2 + L3$) ist vorzugsweise kleiner als die doppelte Höhe ($2 \cdot H3$) des Flettner-Rotors.
- Der Durchmesser (D3) der Endscheiben (106) ist vorzugsweise grösser als der Durchmesser (D4) des Rotorzylinders (105).
- Die Höhe der Düsenfläche A_0 ist vorzugsweise identisch mit der Höhe (H3) des Flettner-Rotors (105).
- Die Breite (B3) der Düsenfläche A_0 ist vorzugsweise kleiner als der doppelte Durchmesser ($2 \cdot D4$) des Flettner-Rotors (105)

[0050] Figur 3 zeigt eine Variante des AMEP (100) bei dem der Flettner-Rotor (105) mittig geteilt ist. Seine beiden Hälften (105.1 und 105.2) werden von den beiden Motoren (109.1 und 109.2) unabhängig angetrieben. Sie können beide gleichsinnig oder gegensinnig, links herum oder rechts herum rotieren. Damit lassen sich bei gleichem Massenstrom vier verschiedene Reaktionen gemäss Tabelle 3 erzielen:

- Figur 3.2.1 mit Translation Richtung Achse +Y
- Figur 3.2.2 mit Rotation um Achse -X
- Figur 3.2.3 mit Rotation um Achse +X
- Figur 3.2.4 mit Translation Richtung Achse -Y

[0051] Ein AMEP kann bei konstantem Massenstrom nur durch die Wahl der Drehrichtung beider Rotorhälften (105.1 und 105.2) lineare Kräfte und Drehmomente in zwei Richtungen erzeugen. Das ist mit einem FRAP nicht möglich.

[0052] Figur 4 zeigt als Beispiel einen AMEP mit vier parallelen Axialventilatoren (101), die gemeinsam einen geteilten Flettner-Rotor (105.1 und 105.2) anblasen. Mit einem solchen AMEP lassen sich kurzfristig grosse Kräfte erzeugen, die für senkrechte Starts und Landungen von Flugzeugen erforderlich sind (VTOL-Anwendung).

ABSCHNITT C - Propulsionsmodul

[0053] Die AMEP bilden die Grundlage zum Aufbau von modularen Propulsionssystemen, die aus einer Vielzahl gleich gebauter Magnus-Effekt-Propulsions-Module (MEPROM) zusammengesetzt sind („LEGO-Prinzip“).

[0054] Dieser Abschnitt beschreibt beispielhaft MEPROM in Mono-, Twin-, und Quad-Ausführung als elementare Bausteine für die Herstellung modularer Propulsionssysteme anhand der Figuren 5 bis 8.

[0055] Figur 5 zeigt ein Mono-MEPROM (500, 1.MEPROM) bestehend aus einem Propulsor (100), der in ein Gehäuse 501 montiert ist, welches (optional) über eine Schwenkeinrichtung (502) verfügt, mit dem der Propulsor um mindestens 90 Grad geschwenkt werden kann, so dass die Rotorachse in Richtung der Z-Achse (500.Z) oder der Y-Achse (500.Y) weist.

[0056] Länge, Breite und Höhe des Gehäuses (502) ergeben vorzugsweise die Abmessung zweier benachbarter Würfel mit den Regeln

- ($H.\text{box} = B.\text{box}$) und
- ($L.\text{box} = 2 \cdot H.\text{box}$)

[0057] Damit ist ein „Container“-Baustein geschaffen, mit dem Propulsionssysteme für unterschiedliche Schubklassen aus den immer gleichen Bausteinen konstruiert werden können, was die Produktionskosten senkt.

[0058] Mit einer schwenkbaren Achse und zwei Drehrichtungen kann das 1.MEPROM mit ungeteiltem Flettner-Rotor fünf verschiedene Translationen nach Figur 5.2 und Figur 5.3, sowie Tabelle 5 in Richtung der Achsen +X, +/-Y, und +/- Z ausführen. Das ist mit bekannten FRAP nicht möglich.

[0059] Figur 6 zeigt ein Twin-MEPROM (600, 2.MEPROM) bestehend aus zwei 1.MEPROM (601 = 500 und 602 = 500), die nebeneinander angeordnet sind, aber in entgegengesetzter Richtung. Mit der Anordnung wird die Impulskraft der beiden Axialventilatoren bei gleichem Massenstrom wechselseitig kompensiert, es bleibt aber ein Drehmoment um die Z-Achse, und die Luft kann zwischen den beiden 1.MEPROM zirkulieren, weil „Auspuff“ und „Ansaugöffnung“ beider Module unmittelbar benachbart sind. Anteile derselben Luftmenge können so mehrfach zur Erzeugung der Magnus-Kraft beitragen. Das ist mit einem einzelnen FRAP nicht möglich: FRAP werden von einer Luftmenge in der Regel nur einmal durchströmt.

[0060] Beide 1.MEPROM können Drehrichtung und Geschwindigkeit der Flettner-Rotoren unabhängig voneinander steuern und die Rotorachse um 90 Grad schwenken (600.Y und 600.Z). Damit kann ein einzelnes 2.MEPROM vier Rotationen (+/-Y und +/-Z) und sechs Translationen (+/-X, +/-Y, +/-Z) gemäss Tabelle 6 ausführen. Das ist mit einem FRAP nicht möglich.

[0061] Figur 7 zeigt zwei Quad-Module (710 und 720, 44.MEPROM) bestehend aus je zwei Twin-Modulen (701, 702 = 600) und (703, 704 = 600), in denen sich die Impulskräfte und die Drehmomente der Axialventilatoren bei gleichem Massenstrom wechselseitig kompensieren, so dass nur die Kräfte der Flettner-Rotoren nach aussen wirksam bleiben. Das System (710) besteht aus zwei Twin-Modulen (600), das untere ist um 180° um die X-Achse gedreht, und hat die Konfigurationen (710.Z, Figur 7.1) und (710.Y, Figur 7.2). Das System (720) besteht aus zwei Twin-Modulen (600), das untere ist um 180° um die X-Achse und um 90° um die Z-Achse gedreht, und hat die Konfigurationen (720.Z, Figur 7.3) und (720.Y, Figur 7.4). Das System (720) ist in der Lage, Translationen und Rotationen um **alle drei** Raumachsen in **beide** Richtungen mit einem einzigen Propulsionsmodul auszuführen. Das ist mit einem FRAP nicht möglich.

[0062] Figur 8 zeigt ein Quad-Modul (800, 41.MEPROM) in dem ein Propulsor (400) mit vier parallelen Axialgebläsen (101) und einem Schwenkantrieb (402) in einem Gehäuse (801) drehbar um eine Achse (802) montiert ist. Das Gehäuse (801) ist vorzugsweise kubisch mit der Regel ($H_{box.2} = B_{box.2} = L_{box.2}$) konstruiert. Mit einem geteilten Flettner-Rotor und schwenkbarer Rotorachse (800.Z und 800.Y) kann das 41.MEPROM zwei Rotationen (+/- X) und vier Translationen (+/-Y und +/-Z) ausführen. Das Quad-Modul mit vier Ventilatoren und nur einem Flettner-Rotor kann kurzzeitig hohe Magnus-Kräfte liefern, die für VTOL-Anwendungen geeignet sind (Vertical Take Off and Landing).

ABSCHNITT D - Propulsionssystem

[0063] Mit den Magnus-Effekt-Propulsionsmodulen (MEPROM) können modulare Antriebssysteme für sämtliche Schubklassen und Anwendungen geschaffen werden, indem man die erforderliche Schubkraft auf eine Vielzahl gleichartiger MEPROM aufteilt. Dadurch werden modulare Magnus-Effekt-Propulsionssysteme (MEPS) aus gleichartigen Modulen geschaffen, die für jede Propulsionsaufgabe gestaltet und konfiguriert werden können, ähnlich dem „LEGO-Prinzip“: Eine Anzahl von nur wenigen standardisierten Bausteinen ermöglicht die Erschaffung einer Vielzahl von Objekten und Strukturen. Dieses Prinzip wird auch in der Natur beispielsweise durch die DNA realisiert, in der nur vier Grundelemente (Basenpaare) die gesamte Erbinformation aller Pflanzen und Tiere kodieren, und alle Lebewesen sind aus wenigen Typen gleichartiger Einzelzellen aufgebaut. Bausteinsysteme sind offensichtlich sehr leistungsstark und anpassungsfähig.

[0064] Die Figuren 9 bis 12 enthalten Beispiele für verschiedene MEPS, die nach einfachen geometrischen Regeln gestaltet sind.

[0065] Figur 9 zeigt beispielhaft verschiedene MEPS aus Mono-Propulsoren (500, 1.MEPROM, in der Konfiguration 500.Y und 500.Z), indem dieser Propulsor (500) als Grundelement für lineare (Figur 9.2.1, Figur 9.2.2, Figur 9.2.3) oder flächenhafte (Figur 9.3.1, Figur 9.3.2, Figur 9.3.3) oder dreidimensionale Propulsionssysteme (Figur 9.4) eingesetzt wird.

[0066] Figur 10 zeigt beispielhaft verschiedene MEPS aus Mono-Propulsoren (500, 1.MEPROM, in der Konfiguration 500.Y und 500.Z), indem dieser Propulsor (500) als Grundelement für kreis- und bogenförmige (Figur 10.2.1, Figur 10.2.2, Figur 10.2.3, Figur 10.2.4) oder zylinder- und schalenförmige (Figur 10.3.1, Figur 10.3.2, Figur 9.3.3) oder doppelwandige Zylinderstrukturen (Figur 10.4) eingesetzt wird.

[0067] Figur 11 zeigt beispielhaft verschiedene MEPS aus Twin-Propulsoren (600, 2.MEPROM, in der Konfiguration 600.Y und 600.Z), indem dieser Propulsor (600) als Grundelement für lineare (Figur 11.2.1, Figur 11.2.2, Figur 11.2.3) oder flächenhafte (Figur 11.3) Propulsionssysteme eingesetzt wird.

[0068] Figur 12 zeigt beispielhaft verschiedene MEPS aus Twin-Propulsoren (600, 2.MEPROM, in der Konfiguration 600.Y und 600.Z), indem dieser Propulsor (600) als Grundelement für bogen- und kreisförmige (Figur 12.2.1, Figur 12.2.2) oder schalen- und zylinderförmige Propulsionssysteme (Figur 12.3.1, Figur 12.3.2) eingesetzt wird.

[0069] So kann eine Vielzahl von MEPROM nebeneinander, übereinander, oder hintereinander in einem frei gestaltbaren geometrischen Raster aus Linien, Flächen, Volumen, Kreisen, Bogen, Schalen, Zylindern, oder jeder beliebigen anderen Leitgeometrie, angeordnet und kombiniert werden, wobei sich die jeweiligen Propulsor-Kräfte vektoriell addieren. Die Ei-

enschaften der einzelnen MEPROM addieren sich im Raster und werden räumlich verteilt. So entsteht ein MEPS aus immer gleichen Bausteinen, das für jede Antriebsaufgabe konfiguriert werden kann.

[0070] MEPS können in die Struktur von Fahrzeugen integriert werden, so dass die Funktion „Fahrzeug“ und „Triebwerk“ miteinander vereinigt wird. Bei modernen Verkehrsflugzeugen hängen nur noch zwei Turbo-Fan-Triebwerke in Gondeln unter den Flügeln, was die Struktur punktuell hoch belastet.

ABSCHNITT E - Steuerung

[0071] Mit MEPS können die Antriebskräfte in der Struktur räumlich verteilt werden, weshalb sie auch Kräfte für die Fahrzeugsteuerung liefern können. Beispielhaft sind linien- oder flächenhafte MEPS für den Einbau in Tragflächen von Flugzeugen geeignet (Figur 11.3), kreis- und zylinderförmige MEPS für Rumpfstrukturen (Figur 12).

[0072] Wenn die einzelnen MEPROM unabhängig voneinander angesteuert werden, dann können **strukturintegrierte** MEPS (SIMEPS) entsprechen der Figuren 13 bis 16 auch Steuerungsaufgaben für die angetriebenen Fahrzeuge übernehmen. Antrieb und Steuerung von Fahrzeugen sind mit demselben SIMEPS darstellbar.

[0073] Figur 13 zeigt beispielhaft eine lineares MEPS aus 10 Twin-Modulen (600 in der Konfiguration 600.Y und 600.Z), in der die Module in Gruppen unterschiedlich angesteuert werden. Alleine durch Änderung der Drehrichtung und Schwenken der Achsen der Flettner-Rotoren, kann dieses MEPS vier Translationen (Figur 13.1 bis 13.4) und vier Rotationen (Figur 13.5 bis 13.8) ausführen. Eingebaut in die Tragflügel eines Flugzeugs kann dieses MEPS

1. beim Start Auftrieb und Schub unterstützen,
2. bei der Landung Auftrieb liefern und das Flugzeug bremsen,
3. im Reiseflug Gier- und Rollbewegungen ausführen, und
4. das Flugzeug am Boden vorwärts und rückwärts bewegen.

[0074] Das alles ist mit nur einem einzigen SIMEPS möglich. Heutige Flugzeuge brauchen dafür mehrere separate Systeme:

1. beim Start ausfahrbare Klappen im Flügel für den Hochauftrieb.
2. bei der Landung ausfahrbare Klappen im Flügel für den Hochauftrieb, Bremsklappen in den Tragflächen für mehr Widerstand, Umkehrschub in den Triebwerken, und Bremsen in den Rädern des Fahrwerks.
3. im Reiseflug Querruder in den Tragflächen, und Seitenruder im Leitwerk.
4. am Boden ein Hilfsfahrzeug für die Rückwärtsfahrt, und Triebwerke für die Vorwärtsfahrt, oder Zusatzantriebe in den Rädern.

[0075] Figur 14 und 15 zeigen beispielhaft ein kreisförmiges MEPS aus 24 Twin-Modulen (600 in der Konfiguration 600.Y und 600.Z), in der die Module in Gruppen unterschiedlich angesteuert werden. Alleine durch Ein- und Ausschalten der Axialventilatoren und Flettner-Rotoren, Änderung der Drehrichtung und Schwenken der Achse der Flettner-Rotoren, kann dieses MEPS sechs Translationen (Figur 13) und sechs Rotationen (Figur 14) ausführen. Eingebaut in die Rumpfstruktur eines Flugzeugs kann dieses MEPS das Luftfahrzeug in allen sechs Freiheitsgraden steuern.

[0076] Figur 16 zeigt beispielhaft eine Kombination aus zweimal 10 Quad-Modulen (800, in der Konfiguration 800.Y und 800.Z), die für VTOL-Anwendungen geeignet sind. Der Übergang vom Schwebeflug in den Horizontalflug ist für alle Fluggeräte eine Herausforderung:

- Die erforderliche Auftriebskraft für den Schwebeflug ist stets höher als für den Reiseflug, weil dann aerodynamische Kräfte aus der horizontalen Bewegung fehlen.
- Hubschrauber brauchen eine komplizierte Mechanik im Rotorkopf, um die Blattverstellung je nach Flugzustand zu steuern. Der Rotor muss einen grossen Durchmesser haben, um die Last zu tragen, deshalb können Hubschrauber nicht schnell fliegen.
- Flächenflugzeuge brauchen schwenkbare Tragflächen oder schwenkbare Propeller, oder zwei verschiedene Antriebssysteme, eines für vertikalen Start und Landung, und eines für den Reiseflug.

[0077] Das MEPS nach Figur 16 kann diese Aufgaben mit nur einem System lösen:

1. Für senkrechten Start wird die Leistung der Axialventilatoren und die Drehzahl der Flettner-Rotoren kurzzeitig erhöht, der Massenstrom steigt, und es entsteht die maximale Hubkraft (Figur 16.1)
2. Für die Transition in den Horizontalflug werden die einzelnen Module durch Schwenken der Flettner-Rotoren von Konfiguration 800.Y auf 800.Z von der Mitte bis zu beiden Enden umgesteuert. Im Beispiel erfolgt der Vorgang in vier zeitlich aufeinander folgenden Schritten (Figur 16.2.1 bis 16.2.4). Dabei nimmt die Hubkraft für den Schwebeflug ab und die Schubkraft für den Reiseflug zu.
3. Bei Erreichen des Reisefluges stammt der Auftrieb aus Tragflächen, der Massenstrom der Axialventilatoren und die Drehzahl der Flettner-Rotoren wird gesenkt. Damit sinkt die erforderliche Motorleistung, und die VTOL-Transition ist beendet (Figur 16.3)

[0078] Für die vertikale Landung läuft dieser Vorgang gleich ab, nur rückwärts.

[0079] Weil die Anströmgeschwindigkeit der Flettner-Rotoren durch die Axialventilatoren gesteuert wird, ist sie von Reisesgeschwindigkeit und Rotordrehzahl entkoppelt. Dadurch kann Massenstrom, Kraft, und Leistung auf das Flugmanöver abgestimmt werden. Die Flächenbelastung der Flettner-Rotoren ist von Anströmgeschwindigkeit und Drehzahl abhängig, sie wächst mit deren Produkt $F \sim uv$. Wenn man diese Geschwindigkeiten um Faktor 4 erhöht, dann wächst die Kraft um Faktor 16. Bei einer Gleitzahl von 16 braucht ein Flugzeug eine Einheit Schub im Reiseflug und 16 Einheiten Hubkraft für vertikalen Start. Ein MEPS nach Figur 16 kann das leisten, ohne grosse Rotoren. Damit kann es wie ein Hubschrauber senkrecht starten, aber im Reiseflug schneller fliegen, denn es sind keine Kompromisse wie beim Hubschrauber nötig. Ein grosser Rotor mit komplizierter Mechanik wird obsolet.

[0080] Der modulare Aufbau von Fahrzeugenantrieb und -steuerung mit MEPS hat eine hohe Redundanz, was die Betriebssicherheit der Systeme steigert. Elektrische Motoren sind einfach aufgebaut und haben eine hohe Ausfallsicherheit. Thermische Probleme von Brennkammer und Hochtemperaturturbinen entfallen. Geometrievariationen von Kompressor- und Turbinenschaufeln entfallen, weil MEPROM standardisiert werden können. Senkrechter Start braucht keine grossen Rotoren mehr, Flugmanöver keine komplizierte Mechanik. Die Systemkomplexität von Flugantrieben wird durch das Baukastenprinzip reduziert, Produktions- und Betriebskosten sinken.

ABSCHNITT F - Strukturintegration

[0081] Die MEPROM können in Fahrzeugstrukturen eingebaut und integriert werden. Figur 17 und 18 zeigen beispielhaft den Einbau von MEPROM in eine Rohrstruktur und den möglichen Aufbau eines elektrischen Triebwerks für den Einsatz bei modernen Flugzeugen zur Reduktion von CO₂-Emissionen. Damit entstehen hybride Antriebe, die den Klimaschutz im Luftverkehr unterstützen können.

[0082] In Figur 17 wurden 10 Quad-Module (710.Z) hintereinander in eine Rohrstruktur (1701) eingebaut und sind darin mit einer Tragstruktur (1702) verbunden, so dass die Rotorkräfte auf das Rohr übertragen werden. Insgesamt sind 40 einzelne Rotoren wirksam. Die Tragstruktur (1702) bildet mit dem Rohr zwei Paare an Strömungskanälen (1703) und (1704), wobei die Einlässe und Auslässe der Quad-Module mit den beiden Strömungskanälen (1703) oben und unten verbunden sind, aber nicht mit den beiden an der Seite (1704) (Figur 17.1). Alle Achsen der rotierenden Teile stehen senkrecht auf der Rohrachse. Die Achsen (111) der Axialventilatoren sind waagrecht, die Achsen (110) der Flettner-Rotoren sind senkrecht (Figur 17.2). So entsteht ein strukturintegriertes Magnus-Effekt-Propulsionssystem (1700, SIMEPS) dessen Kräfte entlang der Rohrachse (+/-X) oder quer dazu wirken (+/-Y).

[0083] Wenn man die Flettner-Rotoren nach der Theorie von Kutta und Joukowski mathematisch als Tragflächen mit Auftriebskräften deutet, so entspricht die Anordnung der 40 Module innerhalb der Rohrstruktur in ihrer Wirkung den Schaufelsätzen in einer mit Kerosin betriebenen Gasturbine. Nach der Theorie von Kutta und Joukowski sind die Schaufelsätze einer Gasturbine und die Anordnung der Flettner-Rotoren in (1700) nach der Zirkulationstheorie einander äquivalent.

[0084] In einer Gasturbine erfolgt die Kraftübertragung von der Strömung an das Flugzeug über die Schaufelkräfte an den feststehenden und rotierenden Schaufelprofilen im Inneren der Gasturbine. Man kann das gedanklich leicht überprüfen: Wenn man die Schaufeln aus der Gasturbine entfernt, dann liefert sie keinen Schub an das Flugzeug. Und wenn man die Gasturbine auf dem Mond betreiben möchte, dann liefert sie ebenfalls keinen Schub, weil die Luft fehlt. Die Kraftübertragung von der Strömung an das Flugzeug erfolgt stets in Wechselwirkung zwischen Strömung und Schaufel. Gleiches gilt für die Flettnerrotoren im Rohr (1700).

[0085] Mit dem Rohr entsteht eine Grenze zwischen „ausser“ und „innen“, deshalb kann man die Strömung im Rohr von der Aussenströmung entkoppeln: Man kann die Innenströmung beeinflussen, sie abbremmen und ihren Druck erhöhen, und damit ihre Dichte. Weil die Rotorkraft mit der Dichte steigt, braucht man für eine gewünschte Kraft weniger oder kleinere Rotoren. Weil die Luftdichte mit der Flughöhe sinkt, ist es für Fluganwendungen vorteilhaft, den Innendruck des Rohres und damit die Rotorkräfte zu steigern. Weil die Axialventilatoren die Luft quer zur Strömungsrichtung ansaugen müssen, ist es vorteilhaft, die Strömungsgeschwindigkeit im Rohr zu senken.

[0086] Figur 18 zeigt hierzu beispielhaft ein rein elektrisches Flugzeugtriebwerk (1800) mit einem Einlaufdiffusor (1801), der die Strömungsgeschwindigkeit verringert und den Druck erhöht, genau wie bei bekannten Turbo-Fan-Triebwerken.

Darauf folgt ein Verdichter (1802) angetrieben von einem Elektromotor (1803), der den Druck weiter erhöht. Darauf folgt die Rohrstruktur (1700) mit dem MEPS aus 10 Quad-Modulen (720.Z). Den Abschluss bildet eine Turbine (1804), die den Gegendruck zum Verdichter liefert um den Innendruck zu erhöhen. Die Turbine entspannt das Gas aus dem Rohr und treibt einen Generator (1805) an, um einen Teil der aufgewendeten Energie zurück zu gewinnen. Abschliessend verlässt das Gas das Triebwerk als Strahl durch die Düse (1806).

[0087] Damit ist dieses rein elektrische Triebwerk ähnlich aufgebaut wie eine bekannte Flugzeug-Gasturbine mit den folgenden Unterschieden:

- 1) Es hat keine Brennkammer und produziert keine Emissionen.
- 2) Verdichter, Turbine und Propulsoren sind unabhängig voneinander.
- 3) Alle Antriebe sind elektrisch.
- 4) Ausfall eines Teilsystems reduziert nur die Leistung, aber nicht die Funktion.
- 5) Die Energie für den Verdichter wird teilweise zurückgewonnen.
- 6) Die Leistungszahl der Flettner-Rotoren steigt mit der Reisegeschwindigkeit.
- 7) Die Energie aus Batterien an Bord wird „gehebelt“ und hält länger.

[0088] Mit dem „Hebeleffekt“ der Flettner-Rotoren braucht man weniger elektrische Energie und gewinnt Reichweite. Damit ergibt sich eine neue Lösung für elektrische Flugantriebe, die auch kommerziell rentablen Langstreckenflug ermöglichen.

ABSCHNITT G - Nachrüsten

[0089] Weil Flugzeuge langlebige Investitionsgüter sind, ist es sinnvoll, sie lange zu nutzen und dennoch einen Weg zu finden, ihre Emissionen zu senken. Es genügt hier zunächst den Reiseflug zu betrachten, weil er über dem Wetter stattfindet, wo der Vertikaltransport der Luftmassen fehlt. Start und Landung finden unterhalb der Wolken statt, da wird CO₂ zum Teil durch den Regen ausgewaschen.

[0090] Im stationären Reiseflug muss der Schub nur den Luftwiderstand überwinden, das ist „Gewicht geteilt durch Gleitzahl“, und moderne Flugzeuge haben Gleitzahlen von 16 bis 20. Also ist es sinnvoll, Flugzeuge mit einem elektrischen „Hilfsantrieb“ auszustatten, der einen Teil des Schubes im Reiseflug liefert. Hierzu sind in Figur 19 beispielhaft zwei Lösungen beschrieben, wie man einen solchen Hilfsantrieb mit Hilfe der Erfindung gestalten und existierende Verkehrsflugzeuge nachrüsten kann.

[0091] Figur 19.1 und 19.2 zeigen beispielhaft ein Verkehrsflugzeug, auf dessen Rumpf ein schalenförmiges Raster von 5 x 40 Twin-Modulen (600) aufgebracht ist. Das sind 400 einzelne Propulsoren deren Axialventilatoren die Luft quer zur Aussenströmung ansaugen. Bei 900 km/h entstehen dabei zusätzliche Widerstände aus Staupunkten, welche die Wirksamkeit der Flettner-Rotoren mindern.

[0092] Um diesen Nachteil zu überwinden zeigen Figur 19.3 und 19.4 eine Lösung mit fünf elektrischen Triebwerken (1800), bei denen die Innenströmung von der Aussenströmung entkoppelt ist, und die Propulsoren mit höherem Innendruck und verzögerter Strömung arbeiten. Damit kann man die Anzahl der Propulsoren auf die Hälfte der ersten Lösung senken.

ABSCHNITT H - Systemarchitektur

[0093] Die Erfindung basiert auf wenigen Schlüsselerkenntnissen:

- 1) Froude-Rankine-Propulsoren erzeugen ihre Schubkraft nach Newtons zweitem Gesetz aus der Beschleunigung eines Massenstroms, der einem Impulsbilanzraum von vorne zuströmt und ihn beschleunigt nach hinten verlässt. Durch das physikalische Prinzip „Actio = Reactio“ sind Strömungsrichtung und Kraftwirkung zwingend miteinander gekoppelt, folglich sind die Reisegeschwindigkeit und die Geschwindigkeit des Eingangsimpulses in den Bilanzraum gleich gross, aber entgegengesetzt: Alle Froude-Rankine-Propulsoren „atmen“ den Fahrtwind. Dadurch steigt der spezifische Verbrauch P/F dieser Triebwerke mit der Geschwindigkeit, ihr Wirkungsgrad ist immer kleiner als 100%, und ihr Treibstoffbedarf wächst mit der Reisegeschwindigkeit. Wegen der geringen Energiedichte heutiger Akkumulatoren sind kommerzielle Langstreckenflüge mit elektrischen angetriebenen FRAP nicht möglich.
- 2) Magnus-Effekt-Propulsoren nutzen den Magnus-Effekt am rotierenden Zylinder. Das Prinzip ist seit fast 100 Jahren mit dem Flettner-Rotor bekannt, der als „passiver“ Magnus-Effekt-Propulsor schon in den 1920er Jahren er-

probt wurde, heute eine Renaissance erfährt, und in der Schifffahrt als „Rotor-Segel“ neu erfolgreich eingesetzt wird. Flettner-Rotoren brauchen eine geringe Antriebsenergie, und liefern ein Mehrfaches davon zurück an das Schiff. Damit wirken sie ähnlich wie Wärmepumpen, die zusätzliche Energie aus der Umgebung auf Heiztemperatur transformieren und die eingesetzte elektrische Energie mit dem Faktor ihrer Leistungszahl „hebeln“. Die Magnus-Kraft wächst mit der Umfangsgeschwindigkeit und der Anströmgeschwindigkeit des rotierenden Zylinders und ist quer zu seiner Anströmung gerichtet. Der Flettner-Rotor wird „passiv“ vom Wind angeströmt, aber seine Drehzahl ist frei wählbar. Damit ist die Zirkulation der Strömung von der Reisegeschwindigkeit entkoppelt, und die Wirkung des Flettner-Rotors auf das Schiff ändert sich mit der relativen Windrichtung und -geschwindigkeit zum Schiff. Bei günstigem Wind wächst die vom Rotor an das Schiff übertragene Leistung mit der Geschwindigkeit des Schiffes, und die Leistungszahl des Rotors steigt. Damit kann der Flettner-Rotor die Antriebsenergie für den rotierenden Zylinder um den Faktor der Leistungszahl „hebeln“, mit erheblicher Einsparung von Treibstoff. Die Differenz stammt aus der Atmosphäre, sie wird zur Quelle von Sekundärenergie, wie bei einer Wärmepumpe.

- 3) Um den Vorteil des Flettner-Rotors auf Flugzeuge zu übertragen muss der Magnus-Effekt als Mittel der Schuberzeugung eingesetzt werden. Weil der Auftrieb am rotierenden Zylinder immer quer zur Anströmrichtung entsteht, muss der rotierende Zylinder **aktiv** angeblasen werden, quer zum Fahrtwind. Damit entsteht ein „aktiver“ Magnus-Effekt-Propulsor, dessen Leistungszahl mit der Reisegeschwindigkeit steigt, weil Anströmung und Umfangsgeschwindigkeit des Zylinders vom Fahrtwind entkoppelt sind. Sein spezifischer Verbrauch P/F wird von der Reisegeschwindigkeit unabhängig. Deshalb kann der aktive Magnus-Effekt-Propulsor die Antriebsenergie seines Zylinders um den Faktor seiner Leistungszahl „hebeln“, und ein Mehrfaches davon an Vortriebsleistung an das Flugzeug liefern. Die Differenz stammt aus der Umgebung, und die Atmosphäre liefert Sekundärenergie, wie bei einer Wärmepumpe. Damit sinkt der Bedarf von Antriebsenergie aus dem Energiespeicher des Flugzeugs, und kommerzielle Langstreckenflüge mit elektrischen Antrieben werden möglich. Das hilft dem Klimaschutz.
- 4) Bei aktiven Flettner-Rotoren sind Anströmung und Drehzahl frei wählbar, aber die Rotoren dürfen **nicht** dem Fahrtwind ausgesetzt werden. Deshalb werden sie in die Struktur der Fahrzeuge integriert. Mit modularem Aufbau entstehen strukturintegrierte Magnus-Effekt-Propulsionssysteme (SIMEPS), mit denen Antrieb und Steuerung der Fahrzeuge vereint werden können. Dadurch sinkt die Systemkomplexität der Antriebe und Steuerungen, durch den einfachen modularen Aufbau sinken die Kosten, und durch Redundanz steigt die Ausfallsicherheit. Die Propulsoren können in Strukturen von Rumpf, Boden und Flügel von Flugzeugen, oder in Boden, Schotten, Decks, und Wände von Schiffen eingebaut werden, dort auch unter Wasser.

[0094] Das Prinzip lässt sich auf den Antrieb jeglicher Fahrzeuge zu Lande, zu Wasser, und in der Luft übertragen, die mit Hilfe von Strömungskraft angetrieben werden. Herkömmliche Propeller werden obsolet, es sei denn man nutzt sie als Turbine, wie folgende Überlegung zeigt:

- Jedes Verkehrsflugzeug verfügt über eine Staudruckturbine (SDT oder RAT = Ram Air Turbine), die im Notfall ausgeklappt wird und aus dem Fahrtwind Energie gewinnt, die an Bord für Steuerungsaufgaben gebraucht wird. Die RAT ist das „Notstromaggregat“ von Flugzeugen und ist gesetzlich zwingend einzubauen.
- Jede heutige Staudruckturbine ist eine Froude-Rankine-Maschine. Sie arbeitet nach dem Impulsprinzip durch Verzögerung der Strömung, wie eine Windkraftanlage. Für sie gelten dieselben Gleichungen wie für einen Propeller, aber sie verzögert die Strömung, liefert Energie, und erzeugt zusätzlichen Luftwiderstand.
- Die spezifische Leistung P/F einer Staudruckturbine wächst mit der Reisegeschwindigkeit, genau wie bei einem Froude-Rankine-Antrieb, nur mit umgekehrtem Vorzeichen: Je schneller das Flugzeug fliegt, desto grösser ist die gewonnene Leistung der Turbine pro Widerstand. Das wird nun zum Vorteil: Je schneller das Flugzeug fliegt, desto grösser ist der „Gewinn“, bei sinkenden „Kosten“.
- SIMEPS sind in die Struktur des Fahrzeugs integriert und befinden sich im Unterschied zu Staudruckturbinen **nicht** in der Aussenströmung. Weil die spezifische Leistung der SIMEPS von der Reisegeschwindigkeit unabhängig ist, die spezifische Leistung einer Staudruckturbine mit der Reisegeschwindigkeit aber zunimmt, kann man einen Teil der Antriebsenergie für das MEPS mit Hilfe einer Staudruckturbine aus der Aussenströmung gewinnen, was den Bedarf an Akkukapazität an Bord weiter senkt.

[0095] Aus dieser Überlegung ergeben sich zwei generische Systemarchitekturen für effiziente Fahrzeugantriebe nach Figur 20.

[0096] Figur 20.1 zeigt ein generische Systemarchitektur für ein Fahrzeug oder eine Maschine (2000), die einen wieder-aufladbaren Akkumulator (2001) als Speicher für elektrische Energie beinhaltet. Aus dem Akku (2001) stammt die Energie für den Antrieb der Elektromotoren (2002), welche die Axialventilatoren und Flettner-Rotoren des strukturintegrierten Magnus-Effekt Propulsionssystems (2003, SIMEPS) nach dieser Erfindung antreiben. Das SIMEPS (2003) wird von einer

Steuerung (2004) kontrolliert und liefert die Schubkraft (2007), die das Fahrzeug oder die Maschine (2000) bewegt. Wegen der Bewegung entsteht relativ zum Fahrzeug eine Aussenströmung (2008), der „Fahrtwind“.

[0097] Figur 20.2 zeigt eine generische Systemarchitektur für ein Fahrzeug oder eine Maschine (2000) wie in Figur 20.1, allerdings ergänzt durch einen Stromgenerator (2005), der von einer Staudruckturbine (2006) in der Aussenströmung (2008) angetrieben wird. Dieser Generator (2005) kann Strom an den Akkuspeicher (2001) liefern, oder an die Motoren (2002) des SIMEPS (2003), das von der Steuerung (2004) kontrolliert wird. Die Motoren (2002) erhalten ihre elektrische Energie entweder aus dem Akku (2001) oder aus dem Generator (2005) oder gleichzeitig anteilig aus beiden Quellen. Das SIMEPS (2003) liefert die Schubkraft (2007), die das Fahrzeug oder die Maschine (2000) antreibt, woraus die Aussenströmung (2008) relativ zum Fahrzeug entsteht, welche die Staudruckturbine (2006) antreibt. Mit der Staudruckturbine (2006) und dem Generator (2005) sinkt die vom Akku (2001) an die Motoren (2004) zu liefernde Energie, und die Reichweite nimmt zu.

[0098] Mit dem erfindungsgemässen modularen Propulsionssystem sind elektrische Antriebe für Schiffe und Flugzeuge oder andere Fahrzeuge und Maschinen möglich, auch für Langstrecke und VTOL-Anwendungen, Emissionen können vermieden werden, und das Klima wird geschützt. Mit der generischen Systemarchitektur in Verbindung mit einer Staudruckturbine nach Figur 20.2 kann der Speicherbedarf für Akkus an Bord weiter gesenkt werden, und die Reichweite der Fahrzeuge pro Akkuspeichereinheit nimmt zu.

ANHANG - Liste der Bezugszeichen und Abkürzungen

[0099] Die Bezugszeichennummer ist FFNN, mit FF = Figur und NN = Bauelement

100	Propulsor 1 mit einem Axialgebläse
101	Propeller eines Axialgebläses
102	Zustromgehäuse eines Axialgebläses
103	Abstromgehäuse eines Axialgebläses
104	Strahlformer mit Abstromdüse
105	Flettnerrotor
105.1	Flettnerrotor, obere Hälfte
105.2	Flettnerrotor, untere Hälfte
106	Endscheibe eines Flettnerrotors
107	Motorgondel eines Axialgebläses
108	Ausströmgitter des Strahlformers
109	Antrieb des Flettnerrotors
109.1	Antrieb Flettnerrotor, obere Hälfte
109.1	Antrieb Flettnerrotor, untere Hälfte
110	Rotationsachse des Flettnerrotors
111	Schwenkachse von Flettnerrotor und Strahlformer
400	Propulsor 2 mit vier Axialgebläsen
402	Schwenkantrieb
500	Mono-Modul mit einem Axialgebläse (Z) und (Y)
501	Modulgehäuse für Mono-Modul
502	Schwenkantrieb für Mono-Modul
600	Twin-Modul aus zwei Mono-Modulen 500, Konfiguration (Z) und (Y)
601	Rechtes Mono-Modul 500
602	Linkes Mono-Modul 500
700	Quad-Modul aus zwei Twin-Modulen 600, Konfiguration (Z) und (Y)
701	Oberes Twin-Modul 600 für 710
702	Unteres Twin-Modul 600 für 710
703	Oberes Twin-Modul 600 für 720
704	Unteres Twin-Modul 600 für 720
710	Quad-Modul aus 600 und 600 mit 180° Drehung, Konfiguration (Z) und (Y)
720	Quad-Modul aus 600 und 180° plus 90° Drehung, Konfiguration (Z) und (Y)
800	Quad-Modul mit Propulsor 2 (400), Konfiguration (Z) und (Y)
801	Modulgehäuse für Quad-Modul 800
802	Schwenkachse für Propulsor 400
1700	Strukturintegriertes Propulsionssystem in einem Rohr
1701	Triebwerksgehäuse / Rohr
1702	Modulhalterung im Rohrgehäuse
1703	Strömungskanal mit Verbindung zu Propulsionsmodulen
1704	Strömungskanal ohne Verbindung zu Propulsionsmodulen
1800	Elektrisches Triebwerk mit erhöhtem Innendruck
1801	Einlaufdiffusor

1802	Verdichter
1803	Elektrischer Antriebsmotor für Verdichter
1804	Turbine
1805	Stromgenerator durch Turbine angetrieben
1806	Düse
2000	Generische Systemarchitektur für Fahrzeuge und Maschinen
2001	Wiederaufladbarer Akkumulator
2002	Antriebsmotor(en)
2003	Strukturintegriertes Magnus-Effekt Propulsionssystem
2004	Steuerung für 2003
2005	Stromgenerator
2006	Staudruckturbine (SDT)
2007	Schubkraft
2008	Aussenströmung

AMEP	Aktiver Magnus-Effekt Propulsor
FRAP	Froude-Rankine Propulsor
MEPS	Magnus-Effekt Propulsionssystem
MEPROM	Magnus Effekt Propulsionsmodul
1.MEPROM	Mono MEPROM
2.MEPROM	Twin MEPROM
41.MEPROM	Quad MEPROM mit einem Propulsor
44.MEPROM	Quad MEPROM mit vier Propulsoren
SIMEPS	Strukturintegriertes Magnus-Effekt Propulsionssystem

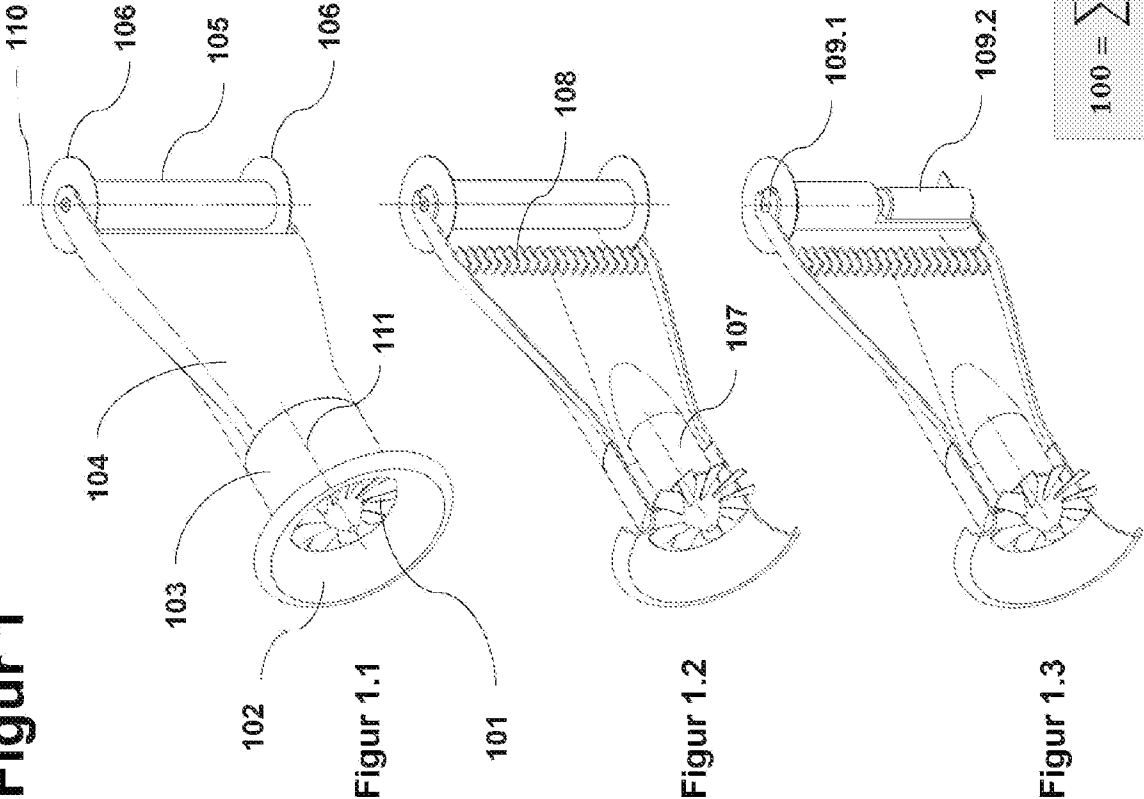
Patentansprüche

1. Verfahren für den Antrieb von Fahrzeugen oder Maschinen mit Hilfe von Strömungskräften, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Antriebskraft durch den Magnus-Effekt eines angetriebenen rotierenden Zylinders (105) entsteht, dessen Anströmung **aktiv** durch ein angetriebenes Gebläse (101) oder eine angetriebene Pumpe erzeugt wird, welche einen fluiden Massenstrom ansaugen und diesen Massenstrom mit Hilfe eines Strahlformers (104) als Strahl wieder abgeben, der den rotierenden Zylinder (105) senkrecht zu dessen Rotorachse (110) anströmt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der rotierende Zylinder und das Gebläse oder die Pumpe unabhängig voneinander angetrieben werden.
3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Strömungskräfte von Luft oder Wasser genutzt werden.
4. Propulsor (100 oder 400) für den Antrieb von Fahrzeugen oder Maschinen mit Hilfe von Strömungskräften aus dem Magnus-Effekt, **dadurch gekennzeichnet**, dass er über ein oder mehrere Gebläse oder Pumpen (101) verfügt, die einen fluiden Massenstrom durch ein Zustromgehäuse (102) ansaugen und ihn durch ihr Abstromgehäuse (103) in einen Strahlformer (104) mit vorzugsweise rechteckiger Ausgangsdüse fördern, der das Fluid über ein Ausströmgitter (108) vorzugsweise mittig auf den rotierenden Zylinder (105) richtet, wobei die Richtung der Zylinder-Anströmung senkrecht zur Rotorachse (110) des Zylinders steht.
5. Propulsor nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass das die Gebläse oder die Pumpen (101) und der Zylinder (105) unabhängig voneinander antreibbar sind.
6. Propulsor nach einem der Ansprüche 4 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Gebläse oder die Pumpen (101) und der Zylinder (105) durch elektrische Motoren (105, 109) antreibbar sind.
7. Propulsor nach einem der Ansprüche 4 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass der rotierende Zylinder (105) mittig in zwei Hälften (105.1 und 105.2) geteilt ist, wobei die beiden Hälften unabhängig voneinander antreibbar sind.
8. Propulsor nach einem der Ansprüche 4 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die rotierenden Zylinder (105, 105.1, 105.2) über zwei dünne Endscheiben (106) verfügen, deren Durchmesser (D3) grösser ist als der Rotordurchmesser (D4).
9. Propulsor nach einem der Ansprüche 4 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Einlaufdurchmesser (D1) grösser ist als der Durchmesser (D2) der Gebläse oder Pumpen.
10. Propulsor nach einem der Ansprüche 4 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Länge von Zustromgehäuse (102, L1), Abstromgehäuse (103, L2) und Strahlformer (104, L3) kleiner ist als die doppelte Höhe (H3) des Zylinders (105) mit der Regel $(L1 + L2 + L3 < 2 * H3)$
11. Propulsor nach einem der Ansprüche 4 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass die rechteckige Ausgangsfläche A_0 des Strahlformers (104) genauso hoch ist wie die Höhe (H3) des rotierenden Zylinders (105).

12. Propulsor nach einem der Ansprüche 4 bis 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass die rechteckige Ausgangsfläche A_0 des Strahlformers (104) höchstens doppelt so breit ist wie der Durchmesser (D_4) des rotierenden Zylinders (105), mit der Regel ($B_3 < 2 * D_4$).
13. Mono-Propulsionsmodul (500) bestehend aus einem Propulsor (100) und einem Gehäuse (501), **dadurch gekennzeichnet**, dass der Propulsor (100) im Inneren des Gehäuses (501) eingebaut und mit diesem so verbunden ist, dass die Strömungskräfte des Propulsors (100) an das Gehäuse (501) übertragbar sind, wobei der Propulsor (100) das Fluid auf einer Seite des Gehäuses (501) ansaugt, und auf der gegenüberliegenden Seite wieder abgibt.
14. Mono-Propulsionsmodul (500) nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Propulsor (100) im Gehäuse (501) mittels einer Schwenkvorrichtung (502) um mindestens 90 Grad schwenkbar ist, wobei die Anströmungsrichtung auf den Zylinder stets senkrecht zur Rotorachse bleibt, sodass durch Schwenken der Rotorachse (110) mindestens zwei Konfigurationen des Propulsionsmoduls (500.Y) und (500.Z) einstellbar sind.
15. Mono-Propulsionsmodul nach einem der Ansprüche 13 bis 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Gehäuse (501), vorzugsweise kastenförmig gestaltet ist, mit den Abmessungen zweier nebeneinanderliegender Würfel ($H_{box} = B_{box}$, und $L_{box} = 2 * H_{box}$), wobei der Propulsor mittig eingebaut ist, und Zustrom und Abstrom durch die beiden quadratischen Stirnflächen des Gehäuses erfolgen.
16. Twin-Propulsionsmodul (600) bestehend aus zwei Mono-Propulsionsmodulen (500, 601 = 500 und 602=500) nach einem der Ansprüche 13 bis 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass die beiden Gehäuse (501) nebeneinander und entgegengesetzt angeordnet sind, so dass die jeweiligen Öffnungen für Zustrom und Abstrom der beiden Module unmittelbar benachbart sind (Figur 6).
17. Quad-Propulsionsmodul (710 und 720) bestehend aus zwei Twin-Propulsionsmodulen nach Anspruch 16 (600, 701 = 600, 702=600, 703=600, 704=600), **dadurch gekennzeichnet**, dass ihre jeweiligen Gehäuse unmittelbar nebeneinander so angeordnet sind, dass die Drehmomente aus den Impulskräften der Gebläse oder Pumpen (101) der beiden Twin-Module wechselseitig entgegengesetzt wirken (Figur 7.1 bis 7.4).
18. Quad-Propulsionsmodul (710) nach Anspruch 17, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Öffnungen für Zustrom und Abstrom der beiden Module (701) und (702) in der gleichen Ebene liegen (Figur 7.1 und 7.2).
19. Quad-Propulsionsmodul (720) nach Anspruch 17, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Öffnungen für Zustrom und Abstrom der beiden Module (703) und (704) in zwei Ebenen liegen, die um 90° gegeneinander verdreht sind (Figur 7.3 und 7.4).
20. Quad-Propulsionsmodul (800) bestehend aus einem Propulsor (400) und einem Gehäuse (801), **dadurch gekennzeichnet**, dass der Propulsor (400) im Inneren des Gehäuses (801) eingebaut und mit diesem so verbunden ist, dass die Strömungskräfte des Propulsors (400) auf das Gehäuse (801) übertragbar sind, wobei der Propulsor (400) das Fluid auf einer Seite des Gehäuses (801) ansaugt, und auf der gegenüberliegenden Seite wieder abgibt.
21. Quad-Propulsionsmodul nach Anspruch 20, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Propulsor (400) mittels einer Schwenkvorrichtung (402) um mindestens 90 Grad um eine Schwenkachse (802) in der Mitte des Gehäuses (801) schwenkbar ist, wobei die Anströmungsrichtung auf den Zylinder stets senkrecht zur Rotorachse bleibt, sodass durch Schwenken der Rotorachse (110) mindestens zwei Konfigurationen des Propulsionsmodul (800.Y) und (800.Z) einstellbar sind (Figur 8).
22. Quad-Propulsionsmodul nach Anspruch 21, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Gehäuse (801), vorzugsweise würfelförmig gestaltet ist, mit den Abmessungen ($H_{box.2} = B_{box.2} = L_{box.2}$), wobei der Propulsor (400) mittig eingebaut ist, und Zustrom und Abstrom durch zwei gegenüberliegende quadratische Flächen des Gehäuses (801) erfolgen.
23. Modulares Propulsionssystem bestehend aus mehreren Propulsionsmodulen nach einem der Ansprüche 13 (500) und/oder 16 (600) und/oder 17 (710, 720) und/oder 20 (800), **dadurch gekennzeichnet**, dass die einzelnen Module (500) und/oder (600) und/oder (710, 720) und/oder (800) in einem gleichmässigen oder ungleichmässigen Raster angeordnet sind.
24. Modulares Propulsionssystem nach Anspruch 23, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Raster zur Organisation der Propulsionsmodule (500, 600, 710/720, oder 800) linienhaft, flächenhaft, volumenförmig, bogenförmig, kreisförmig, als Schale, als Zylinder, oder nach einer anderen Leitgeometrie angeordnet ist (Figur 9 bis 12).
25. Steuerung für ein modulares Propulsionssystem nach einem der Ansprüche 23 bis 24, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Massenstrom der einzelnen Gebläse oder Pumpen (101), und die Drehzahl und Drehrichtung der einzelnen rotierenden Zylinder (105), und die Orientierung des Achsen (110) der einzelnen rotierenden Zylinder (105) jedes einzelnen Propulsors (100) und/oder (400) des modularen Propulsionssystems einzeln oder in Gruppen zeitlich und räumlich versetzt unterschiedlich angesteuert werden können, so dass die Summe der entstehenden Kräfte jeweils Translationen und Rotationen um mehrere Freiheitsgrade des Propulsionssystems bewirken kann (Figur 13 bis 15).
26. Verfahren für den Übergang vom Vertikal- zum Horizontalflug, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Module eines modularen Propulsionssystems nach Anspruch 23 oder 24 zeitlich nacheinander und synchronisiert einzeln oder in Gruppen so umgesteuert werden, dass ihre Antriebskraft von der Vertikalen in die Horizontale weist, oder umgekehrt (Figur 16), und keine zusätzlichen Drehmomente auftreten.

27. Strukturintegriertes modulares Propulsionssystem, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein oder mehrere modulare Propulsionssysteme nach einem der Ansprüche 23 bis 24 in die Struktur eines Fahrzeugs oder einer Maschine eingebaut oder angebaut und mit diesem so verbunden sind, dass die Strömungskräfte der einzelnen Propulsoren auf die Struktur übertragbar sind, wobei die Struktur mindestens eine Wand aufweist, welche die Aussenströmung des Fahrzeugs von einer Strömung im Inneren der Struktur trennt.
28. Strukturintegriertes modulares Propulsionssystem nach Anspruch 27, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Druck im Inneren der Struktur höher ist als ausserhalb.
29. Strukturintegriertes modulares Propulsionssystem nach einem der Ansprüche 27 bis 28, **dadurch gekennzeichnet**, dass die relative Strömungsgeschwindigkeit im Inneren der Struktur geringer ist, als die Reisegeschwindigkeit.
30. Strukturintegriertes modulares Propulsionssystem nach einem der Ansprüche 27 bis 29, **dadurch gekennzeichnet**, dass Fluid von der Aussenströmung über eine Vorrichtung zur Druckerhöhung und/oder Geschwindigkeitssenkung in das Innere der Struktur gelangt, vorzugsweise über einen Einlaufdiffusor (1801) und/oder eine angetriebene Pumpe oder einen Verdichter (1802 mit 1803).
31. Strukturintegriertes modulares Propulsionssystem nach einem der Ansprüche 27 bis 30, **dadurch gekennzeichnet**, dass Fluid aus der Innenströmung über eine Vorrichtung zur Drucksenkung und/oder Geschwindigkeitserhöhung zurück an die Aussenströmung gegeben wird, vorzugsweise über eine Turbine mit Energiegewinnung (1804 mit 1805) und/oder eine Düse (1806).
32. Nachrüstbares strukturintegriertes modulares Propulsionssystem für Flugzeuge, **dadurch gekennzeichnet**, dass mehrere strukturintegrierte Propulsionssysteme nach einem der Ansprüche 27 bis 31, vorzugsweise mit erhöhtem Innendruck, auf, im, oder am Rumpf oder Tragflächen von Verkehrsflugzeugen montiert sind und ihr Schubkraftanteil mindestens 10% der Schubkraft für den Reiseflug erreicht.
33. Generische Systemarchitektur für Fahrzeuge und Maschinen (2000), die mit strukturintegrierten modularen Propulsionssystemen nach einem der Ansprüche 27 bis 32 angetrieben werden, **dadurch gekennzeichnet**, dass sie einen wiederaufladbaren elektrischen Akkumulator (2001) enthält, der Energie an die Elektromotoren (2002) der strukturintegrierten Propulsionssysteme (2003) liefert, die von der Steuerung (2004) kontrolliert werden und den Schub (2007) für den Antrieb des Fahrzeugs oder der Maschine (2000) liefern, aus deren Bewegung die relative Aussenströmung (2008) entsteht (Figur 20.1).
34. Generische Systemarchitektur nach Anspruch 33, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Fahrzeug oder die Maschine eine Staudruckturbine (2006) in der Aussenströmung (2008) enthält, die einen Generator (2005) antreibt, der elektrische Energie an die Elektromotoren (2002) und/oder die Akkumulatoren (2001) abgeben kann, und die Elektromotoren (2002) ihre Energie vom Generator (2005) und/oder aus den Akkumulatoren (2001) beziehen (Figur 20.2).
35. Fahrzeuge und Maschinen, die von einem oder mehreren strukturintegrierten modularen Propulsionssystemen nach einem der Ansprüche 27 bis 31 angetrieben werden, **dadurch gekennzeichnet**, dass die einzelnen Module der Propulsionssysteme in die Fahrzeug- oder Maschinenstruktur eingebaut oder angebaut sind, beispielsweise in Rumpf, Boden, Zwischenboden, Dach, Wand, Schott, oder Flügel von Flugzeugen, oder in Rumpf, Boden, Seitenwand, Deck, Zwischendeck, Schott, oder Doppelboden von Schiffen, hier auch unter Wasser, oder in Boden, Dach, Seitenwand, Rückwand, Zwischenwand, oder Chassis von Kraftfahrzeugen, oder in Tragstrukturen von sonstigen Maschinen.

Figure 1



$$100 = \sum 101..109$$

Figure 1.4

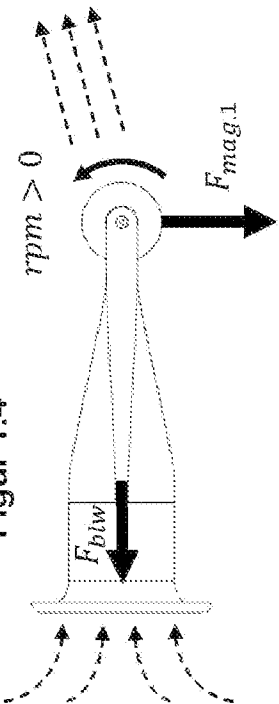


Figure 1.5

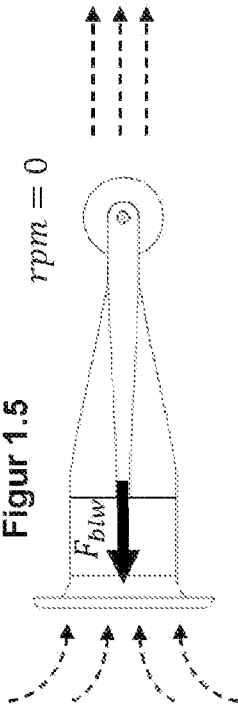
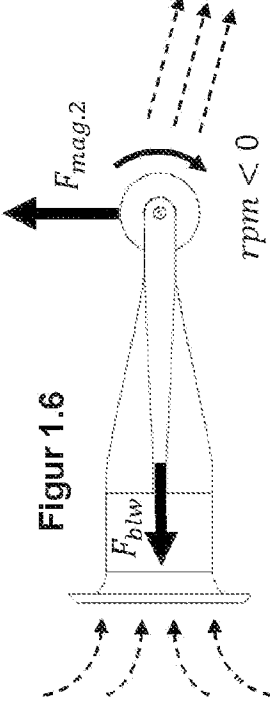
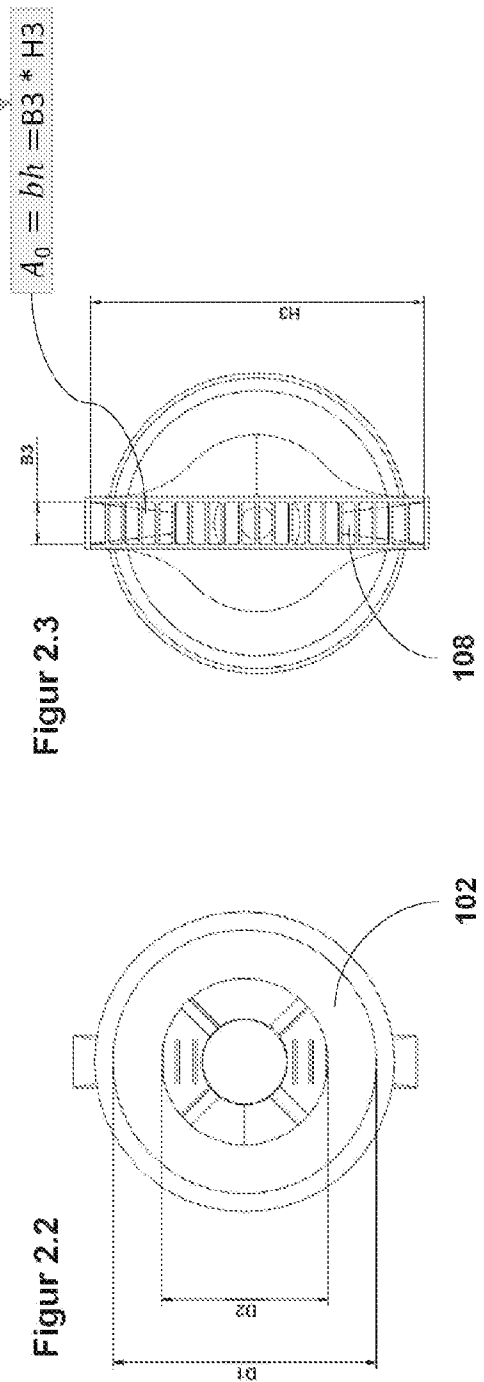
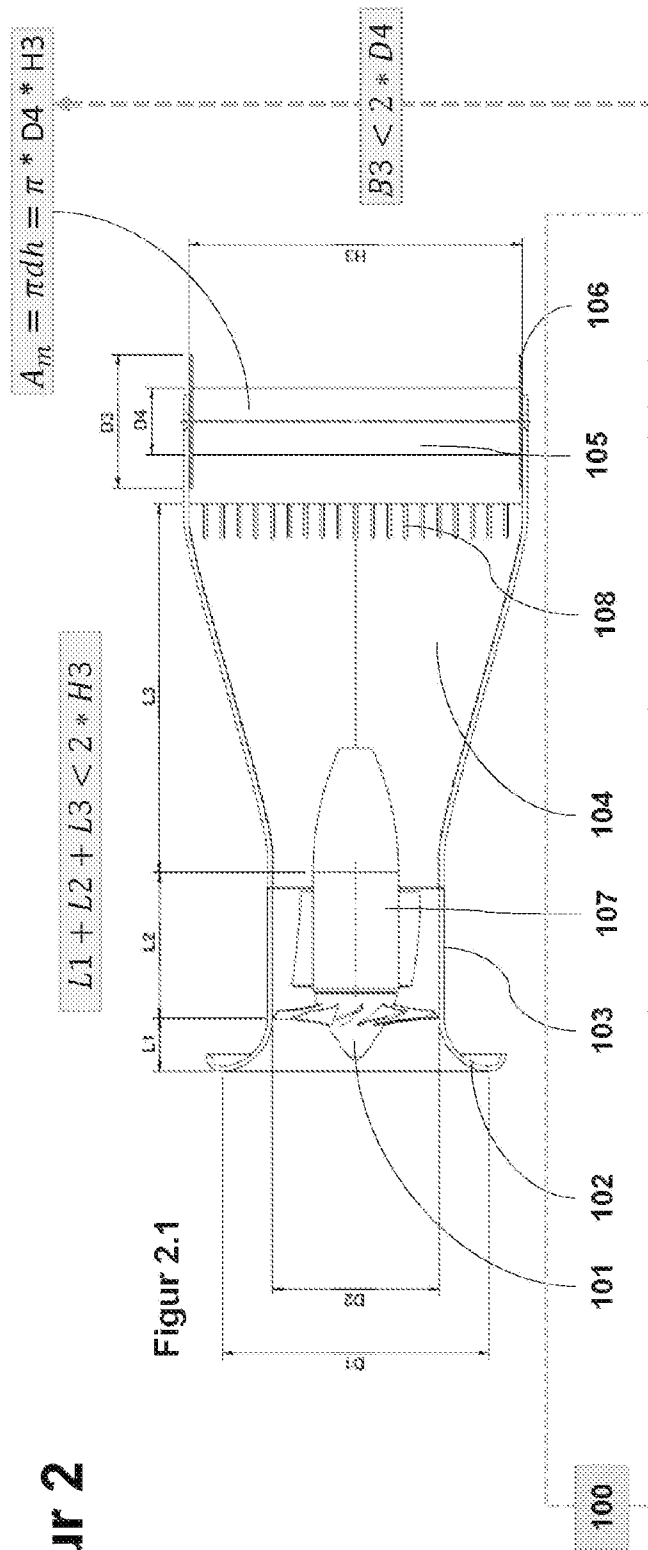


Figure 1.6

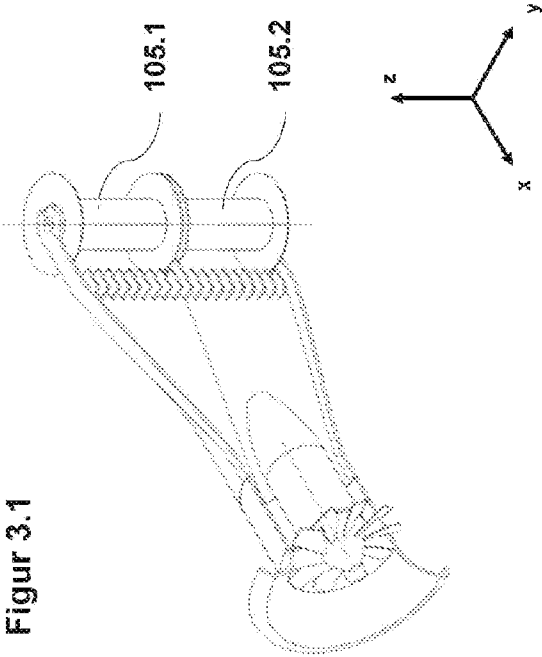


Figur 2

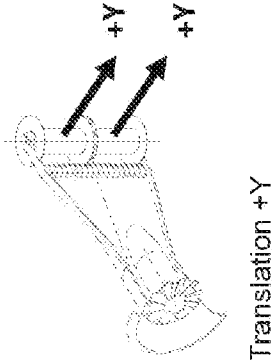


Figur 3

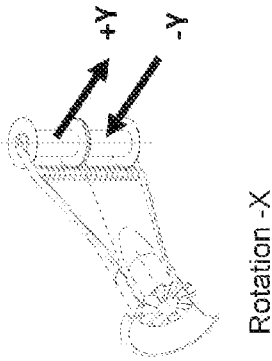
Figur 3.1



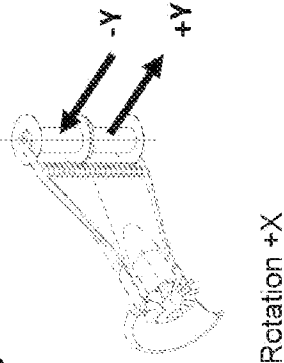
Figur 3.2.1



Figur 3.2.2



Figur 3.2.3



Figur 3.2.4

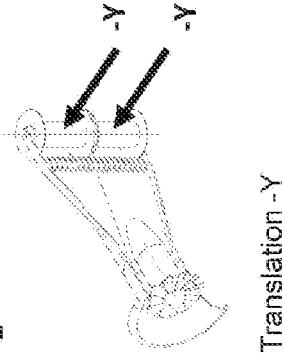
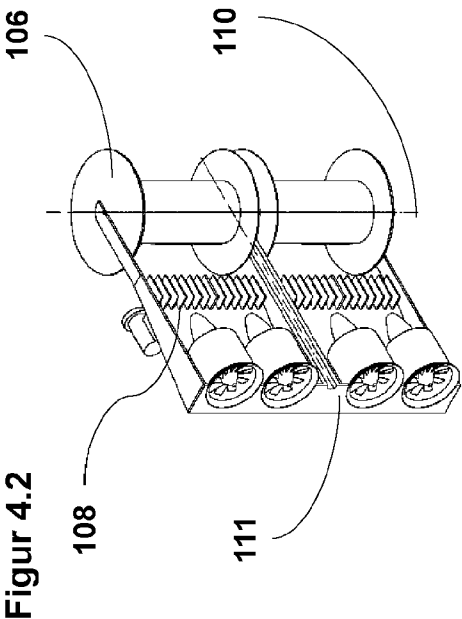
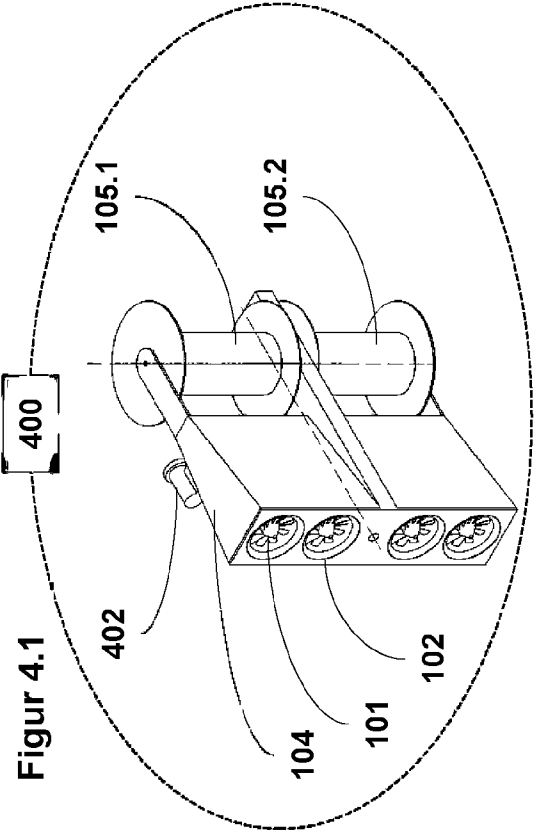


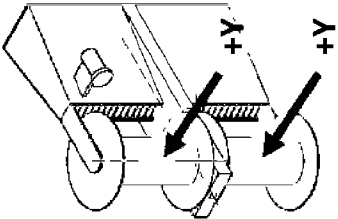
Tabelle 3

Figur	Rotation 1	Rotation 2	Reaktion
3.2.1	+Z	+Z	Translation +Y
3.2.2	+Z	-Z	Rotation -X
3.2.3	-Z	+Z	Rotation +X
3.2.4	-Z	-Z	Translation -Y

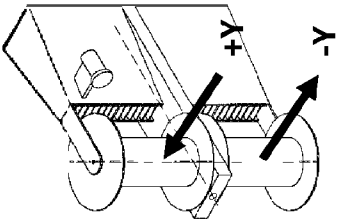
Figur 4



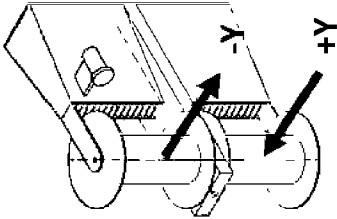
Figur 4.3.1



Figur 4.3.2



Figur 4.3.3



Figur 4.3.4

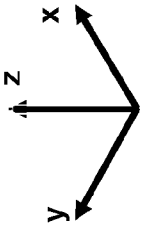
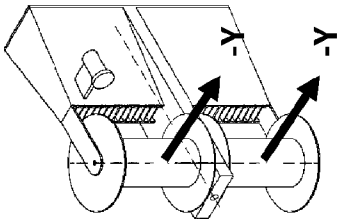
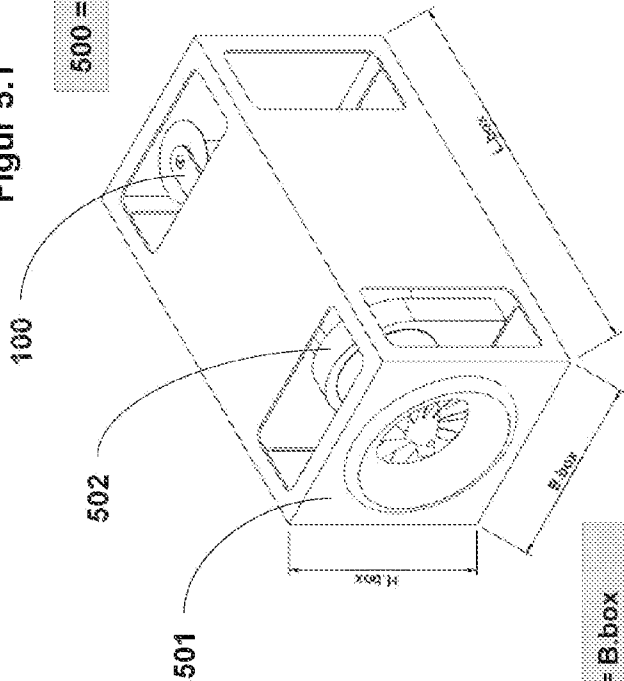


Tabelle 4

Figur	Rotation 1	Rotation 2	Reaktion
4.3.1	+Z	+Z	Translation +Y
4.3.2	+Z	-Z	Rotation -X
4.3.3	-Z	+Z	Rotation +X
4.3.4	-Z	-Z	Translation -Y

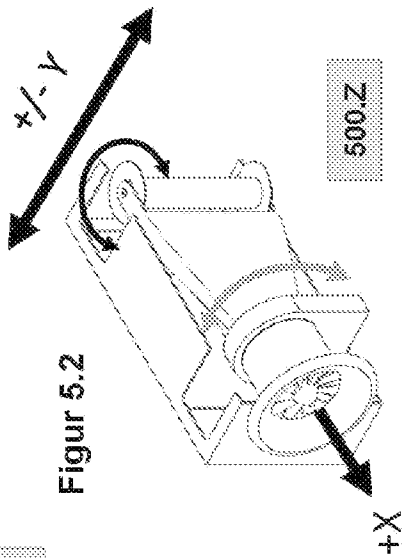
Figur 5

Figur 5.1



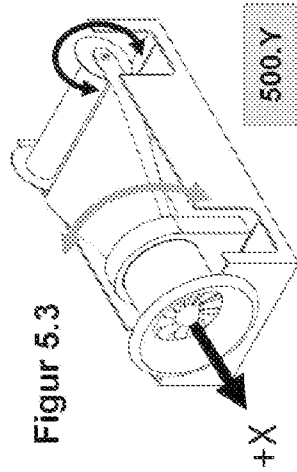
$500 = 100 + 501 + 502$

Figur 5.2



$H.\text{box} = B.\text{box}$
 $L.\text{box} = 2 \cdot H.\text{box}$

Figur 5.3

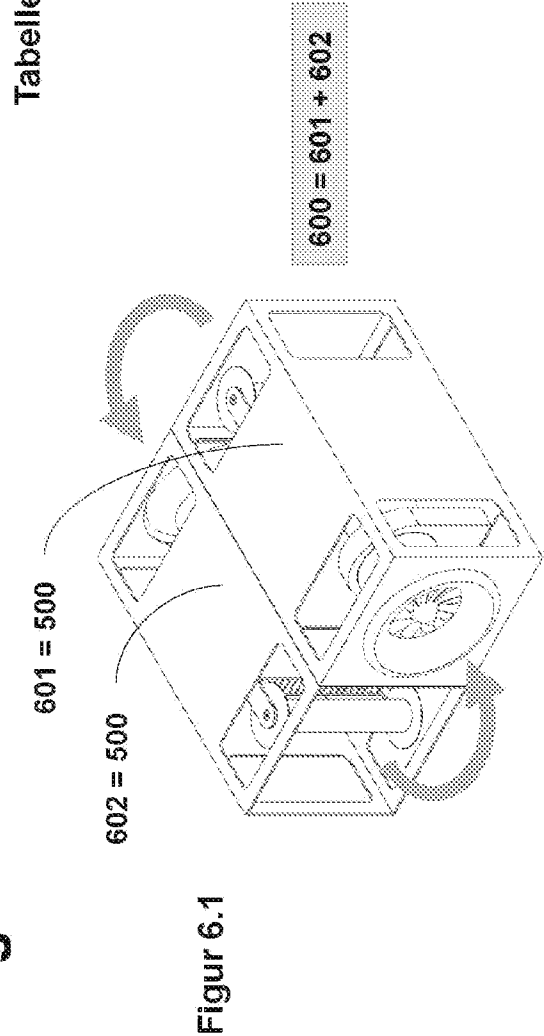


$+/- Z$

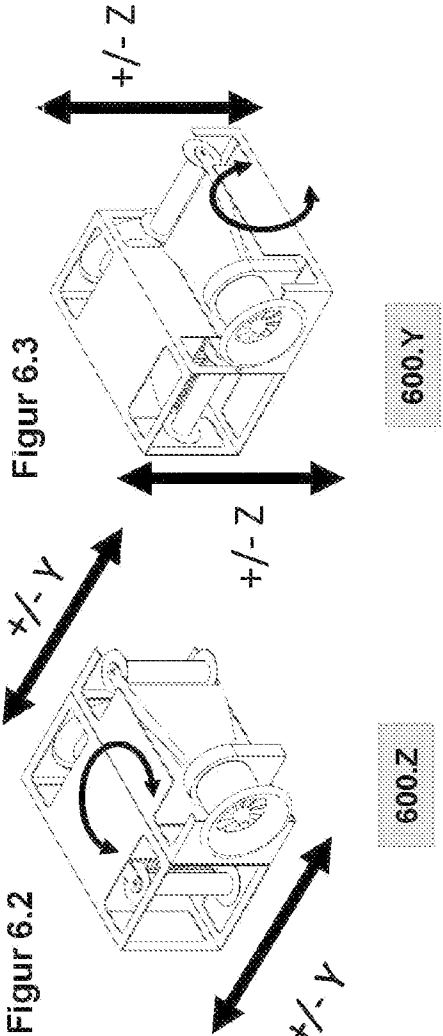
Tabelle 5

Gebälse	Achse	Rotation	Reaktion
0	$Y \text{ oder } Z$	$-0 +$	0
+X	$Y \text{ oder } Z$	0	+X
+X	Z	-Z	+X + Y
+X	Z	+Z	+X - Y
+X	Y	-Y	+X + Z
+X	Y	+Y	+X - Z

Figur 6



Figur 6.1

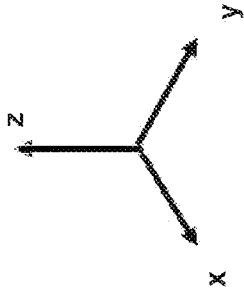


Figur 6.3

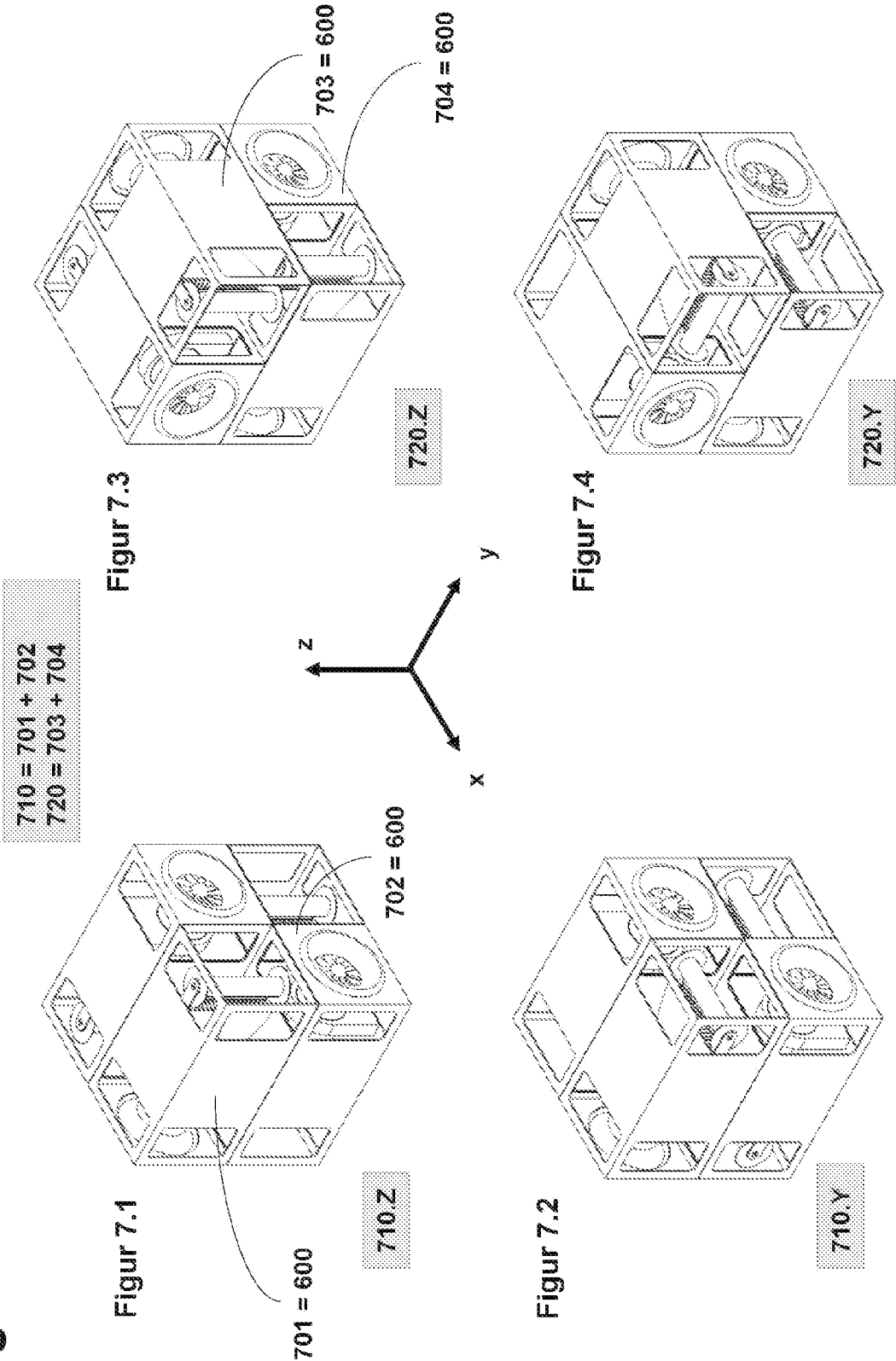
Figur 6.2

Tabelle 6

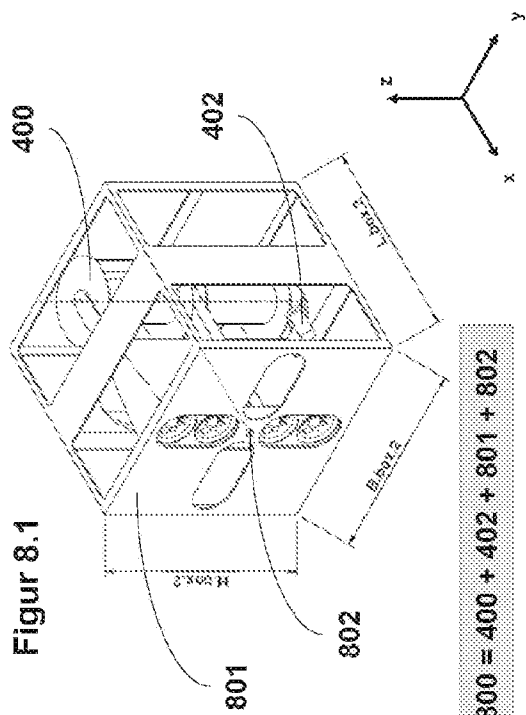
Kraft.601	Kraft.602	Reaktion
$+X$	0	Translation + X
0	-X	Translation - X
$X - Y$	$-X - Y$	Translation - Y
$X - Y$	$-X + Y$	Rotation - Z
$X + Y$	$-X - Y$	Rotation + Z
$X + Y$	$-X + Y$	Translation + Y
$X - Z$	$-X - Z$	Translation - Z
$X - Z$	$-X + Z$	Rotation - Y
$X + Z$	$-X - Z$	Rotation + Y
$X + Z$	$-X + Z$	Translation + Z



Figur 7



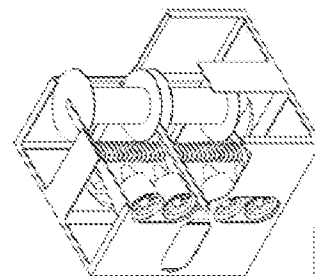
Figur 8



$$800 = 400 + 402 + 801 + 802$$

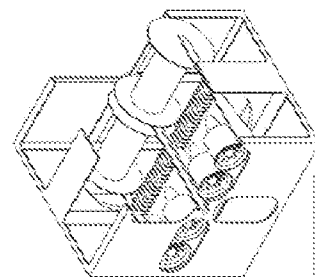
$$H \text{ box } 2 = B \text{ box } 2 = L \text{ box } 2$$

Figur 8.2



800.Z

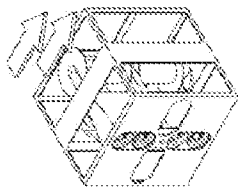
Figur 8.3



800.Y

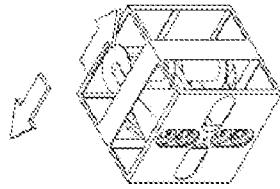
Figur 8.4.1

Translation +Y



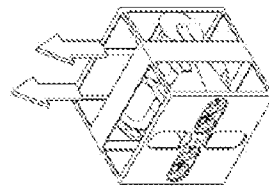
Figur 8.4.3

Rotation +X



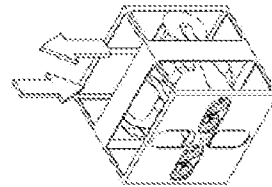
Figur 8.4.5

Translation +Z



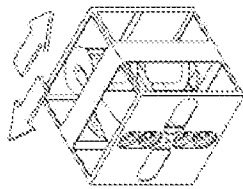
Figur 8.4.7

Rotation +X



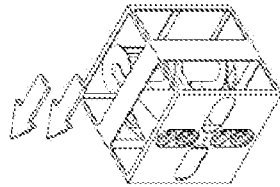
Figur 8.4.2

Rotation -X



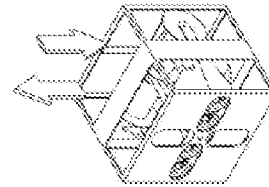
Figur 8.4.4

Translation -Y



Figur 8.4.6

Rotation -X



Figur 8.4.8

Translation -Z

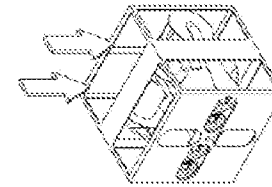
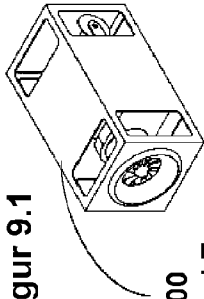


Figure 9

Figure 9.1



500
Y und Z

Figure 9.2.1



Figure 9.2.2

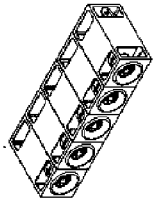


Figure 9.2.3

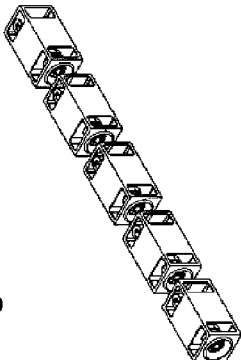


Figure 9.3.1

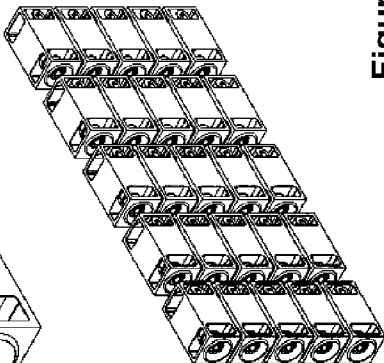


Figure 9.3.2

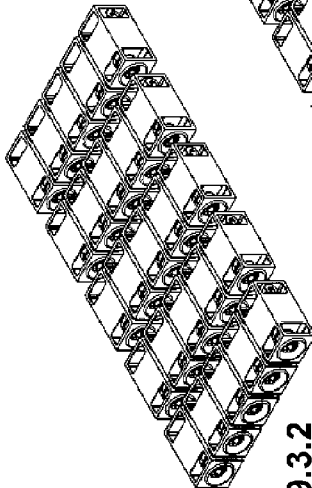


Figure 9.3.3

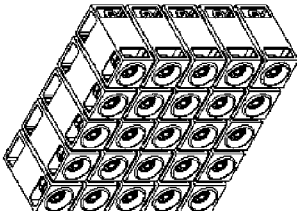
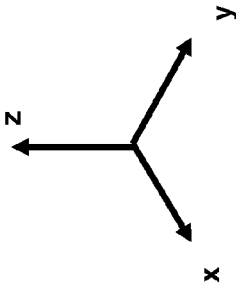
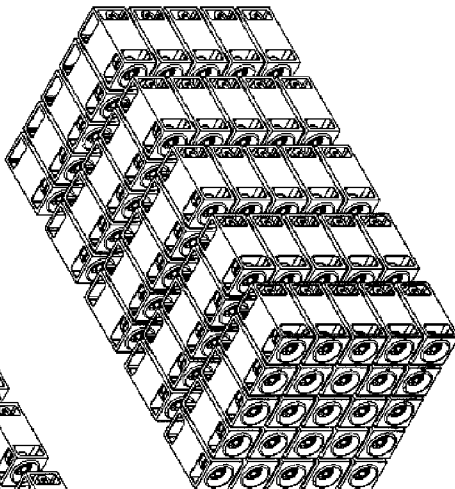
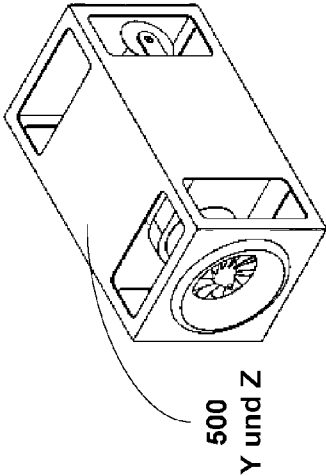


Figure 9.4

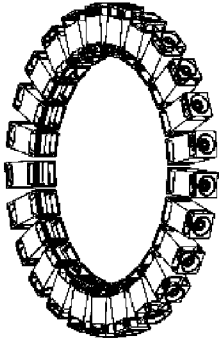


Figur 10

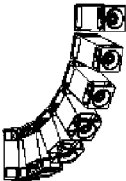
Figur 10.1



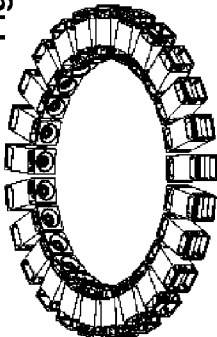
Figur 10.2.1



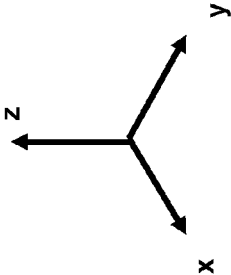
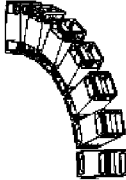
Figur 10.2.2



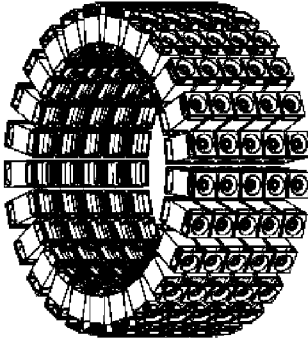
Figur 10.2.3



Figur 10.2.4



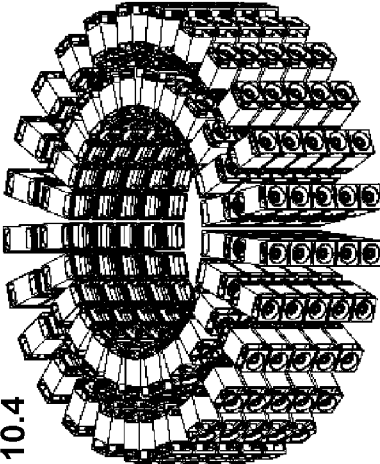
Figur 10.3.1



Figur 10.3.2

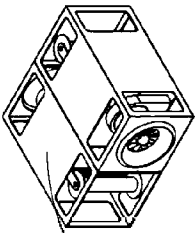


Figur 10.4



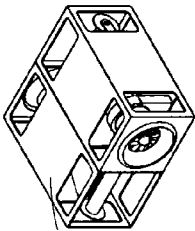
Figur 11

Figur 11.1.1



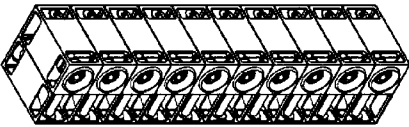
600.Z

Figur 11.1.2

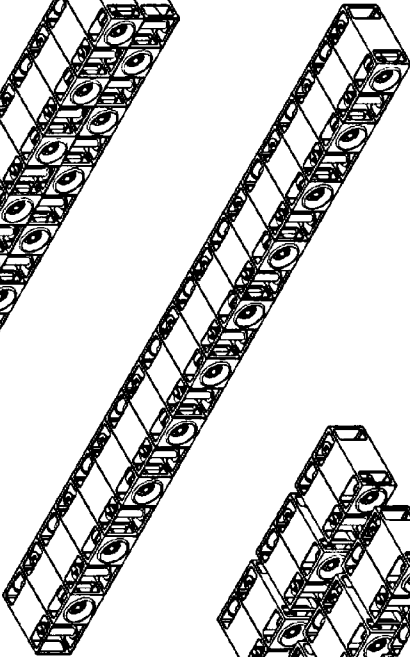
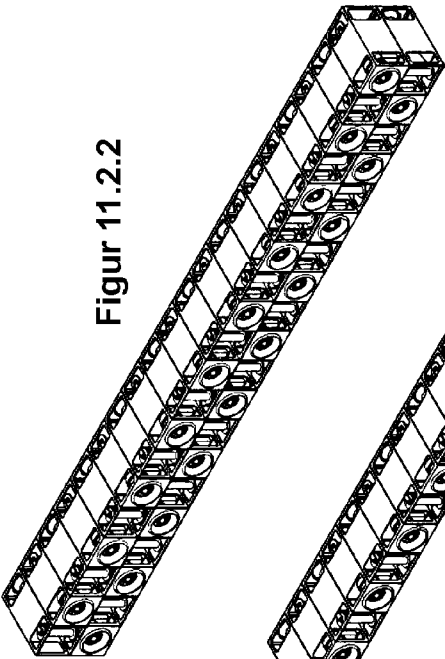


600.Y

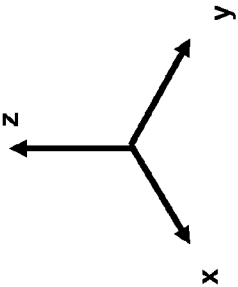
Figur 11.2.1



Figur 11.2.2



Figur 11.2.3



Figur 11.3

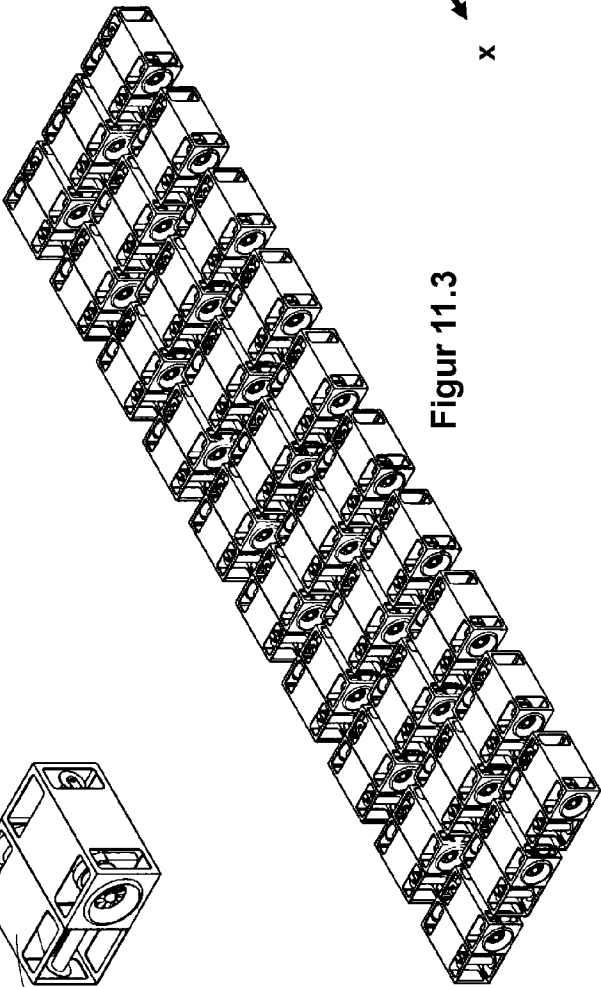


Figure 12

Figure 12.1.1

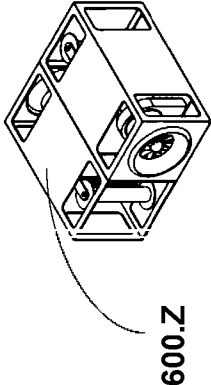


Figure 12.1.2

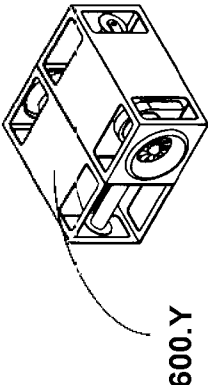


Figure 12.2.1

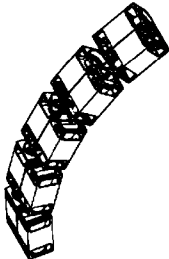


Figure 12.2.2

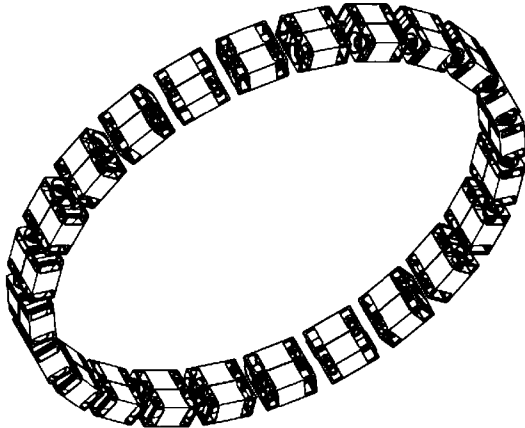


Figure 12.3.1

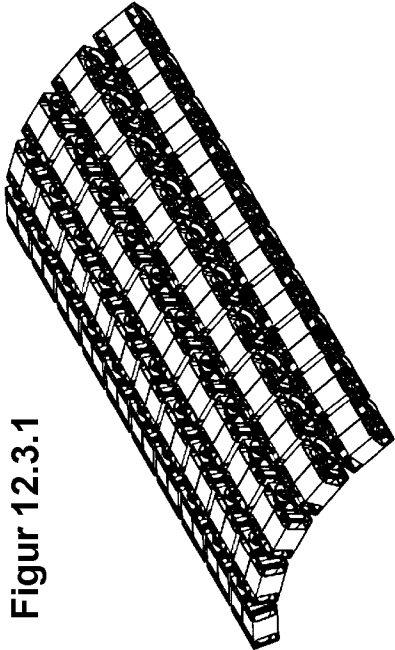
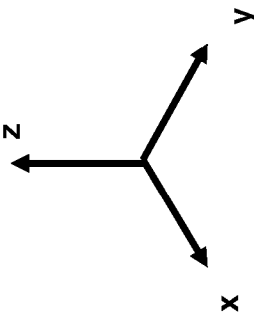
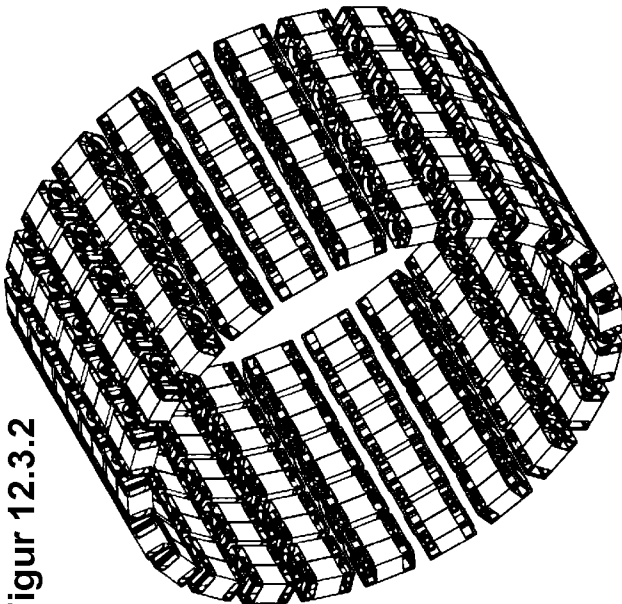
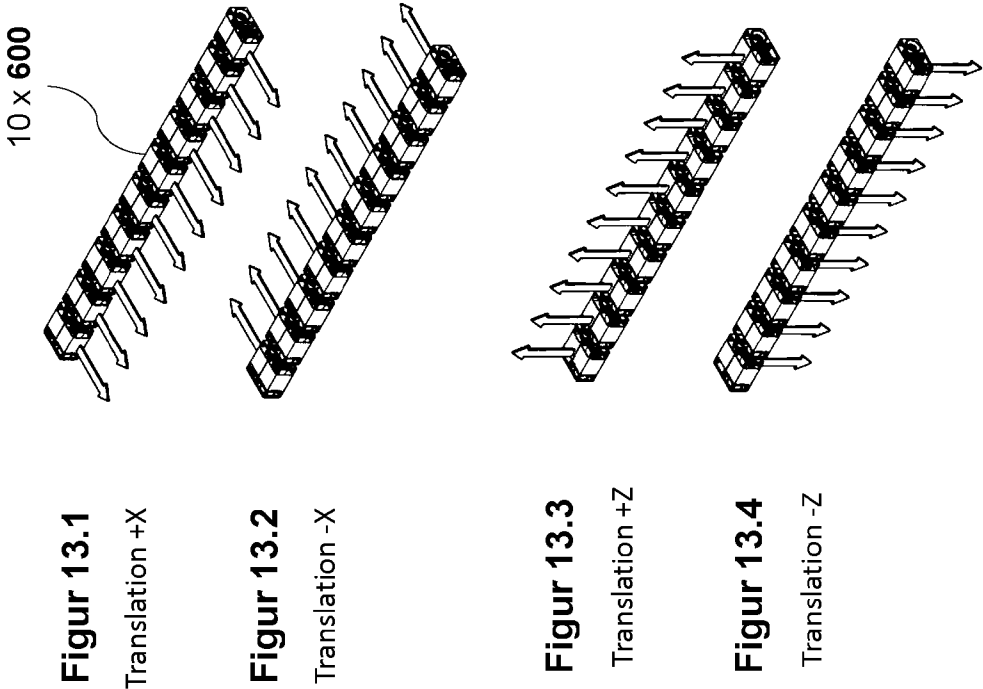


Figure 12.3.2



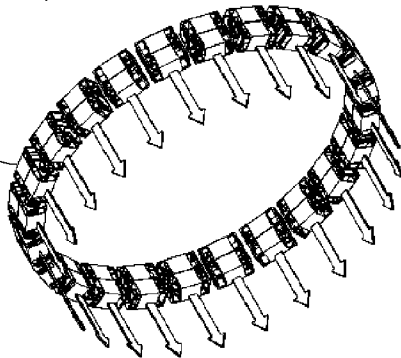
Figur 13



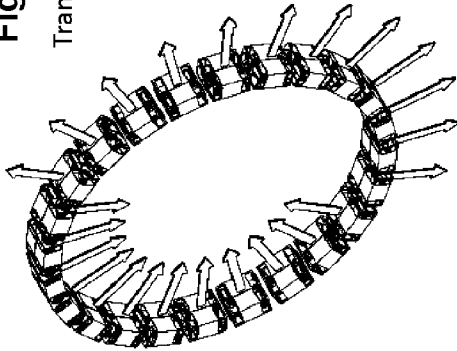
Figur 14

24 x 600

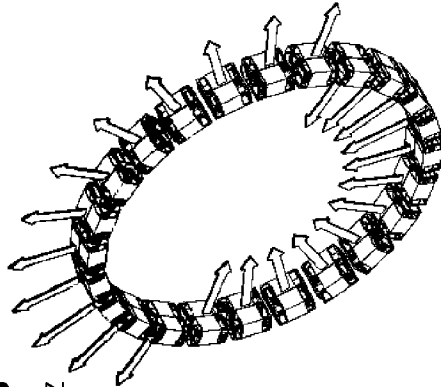
Figur 14.1
Translation +X



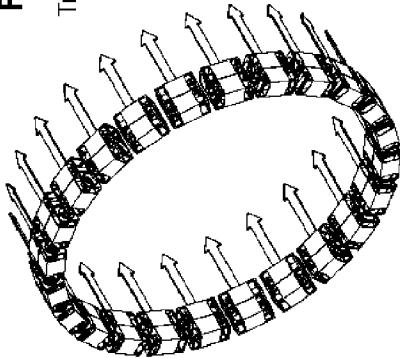
Figur 14.2
Translation +Y



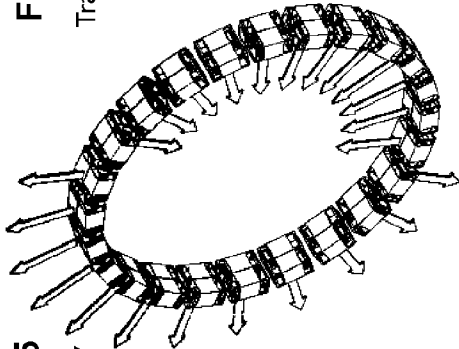
Figur 14.3
Translation +Z



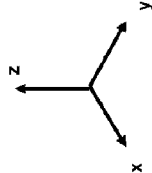
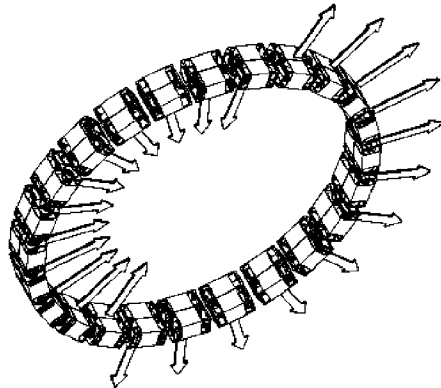
Figur 14.4
Translation -X



Figur 14.5
Translation -Y



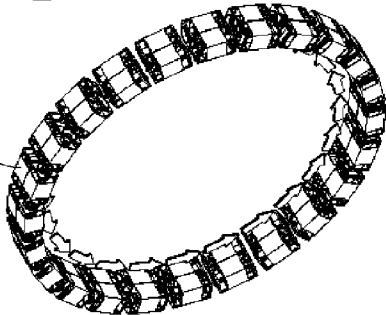
Figur 14.6
Translation -Z



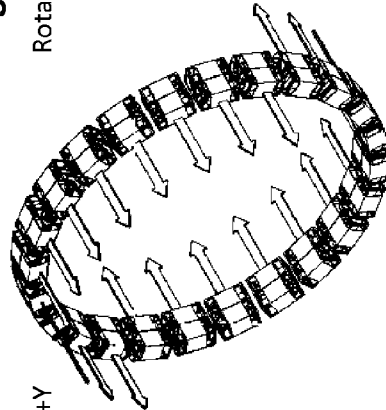
Figur 15

24 x 600

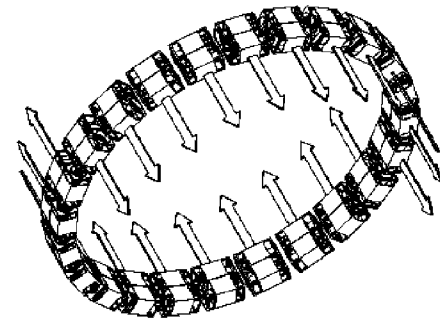
Figur 15.1
Rotation +X



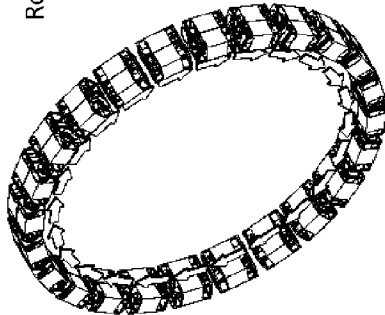
Figur 15.2
Rotation +Y



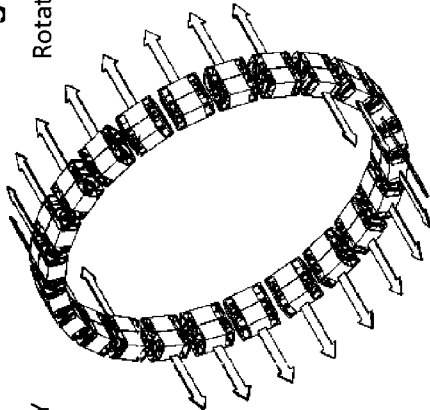
Figur 15.3
Rotation +Z



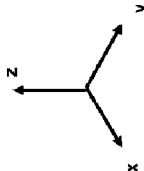
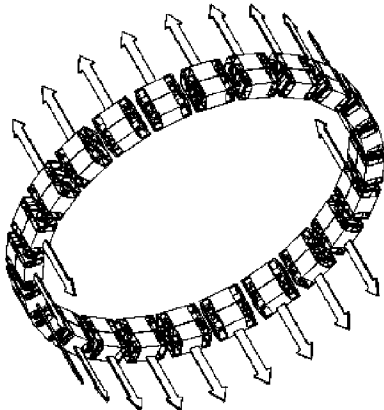
Figur 15.4
Rotation -X



Figur 15.5
Rotation -Y



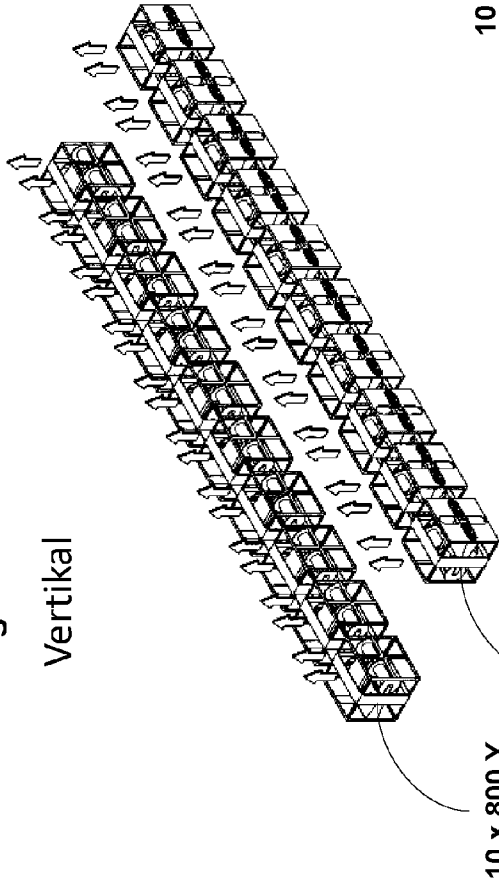
Figur 15.6
Rotation -Z



Figur 16

Figur 16.1

Vertikal

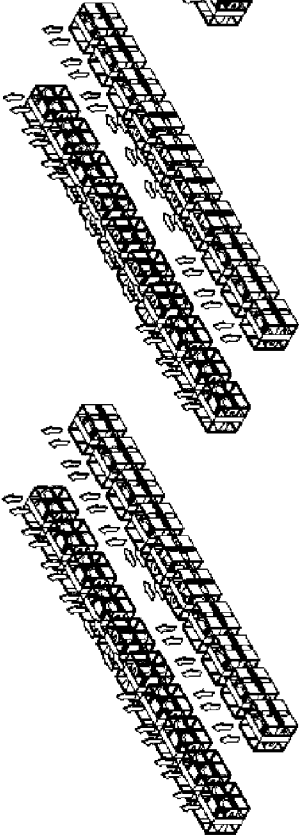


10 x 800.Y

10 x 800.Y

Figur 16.2

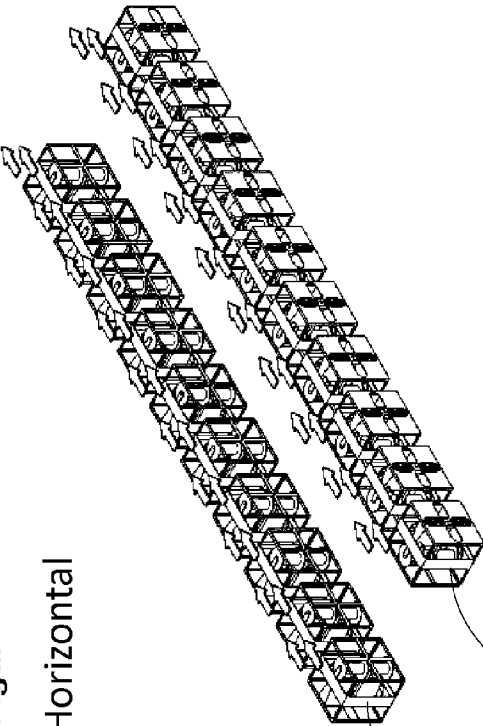
VTOL - Transition



Figur 16.2.1

Figur 16.3

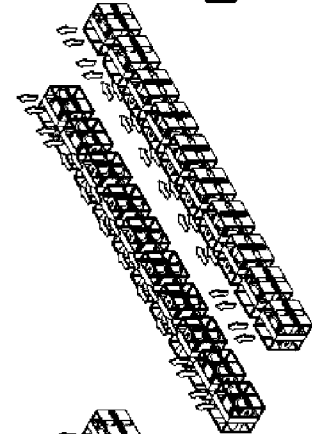
Horizontal



10 x 800.Z

10 x 800.Z

Figur 16.2.3



Figur 16.2.4

Figure 17

Figure 17.1

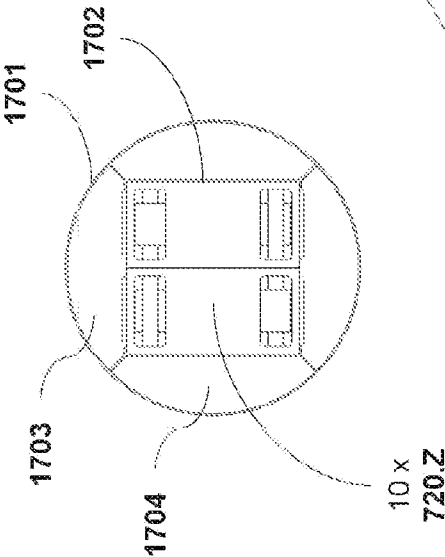


Figure 17.2

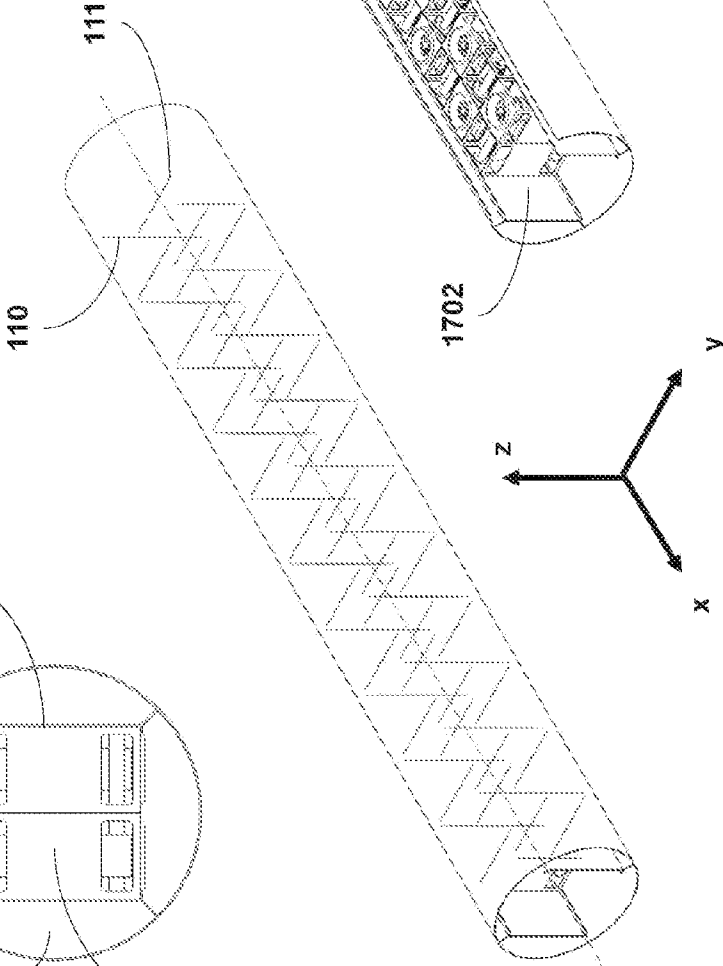
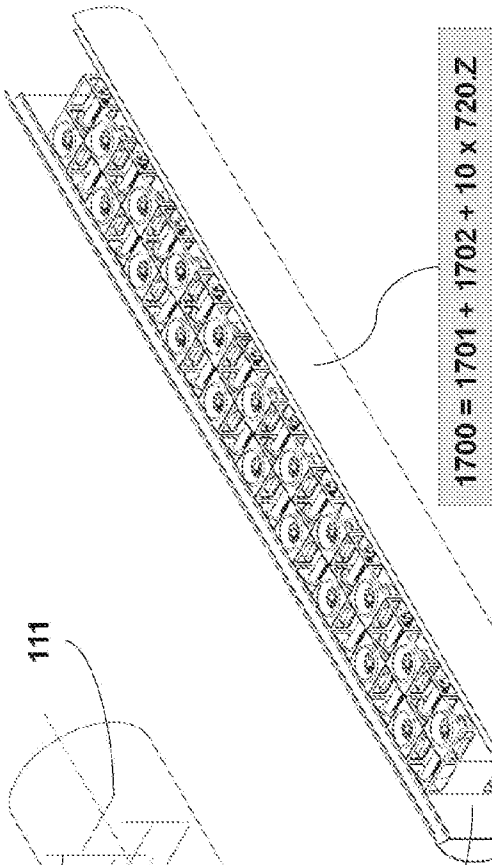
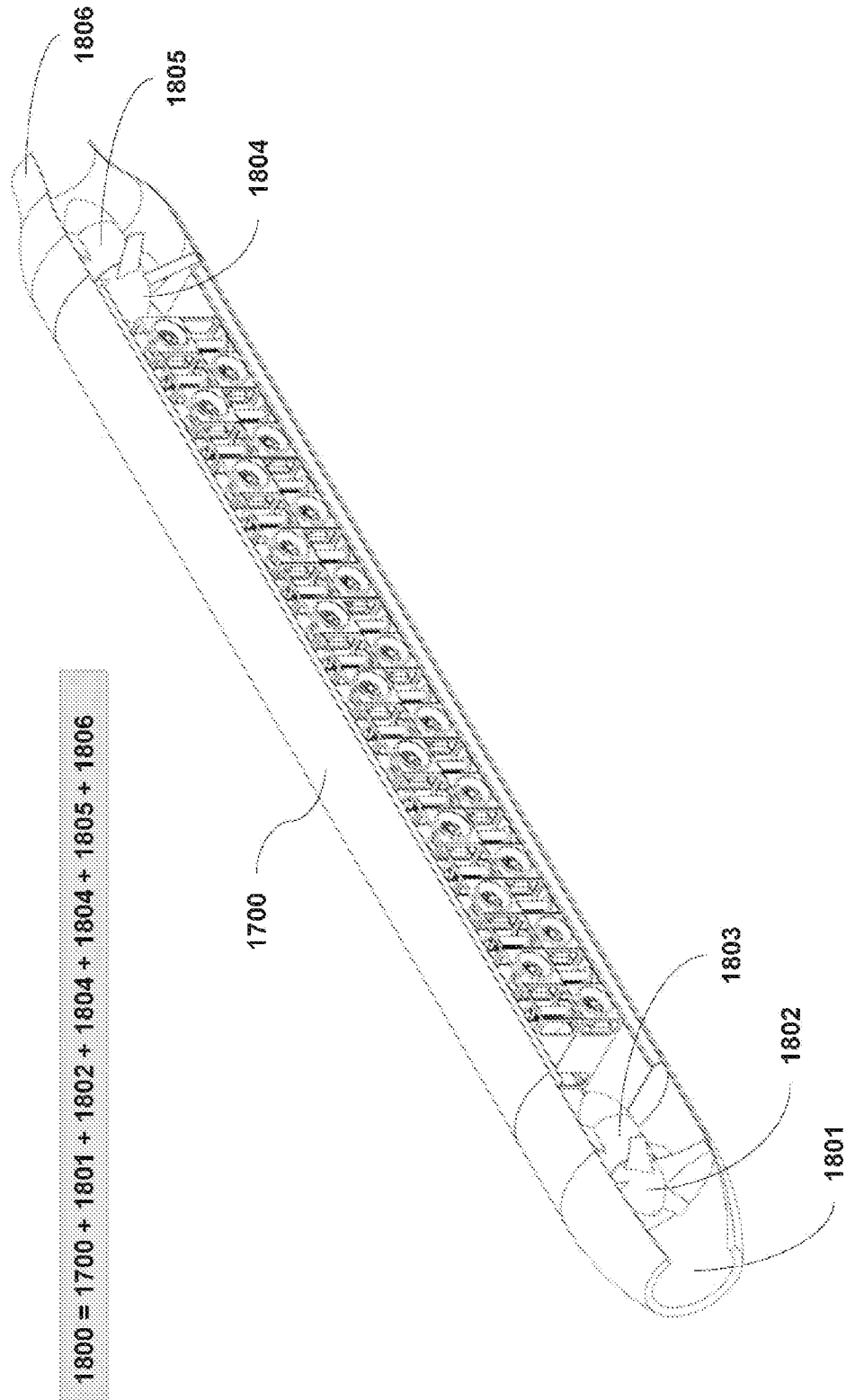


Figure 17.3

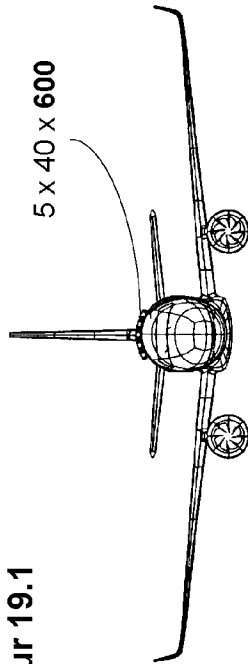


Figur 18

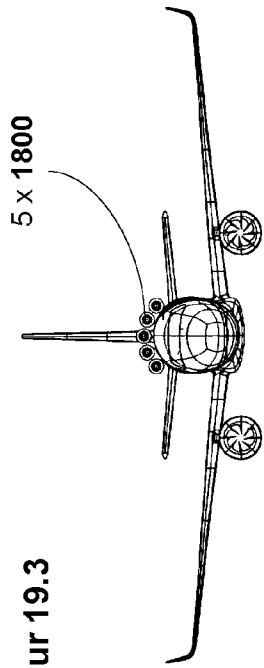


Figur 19

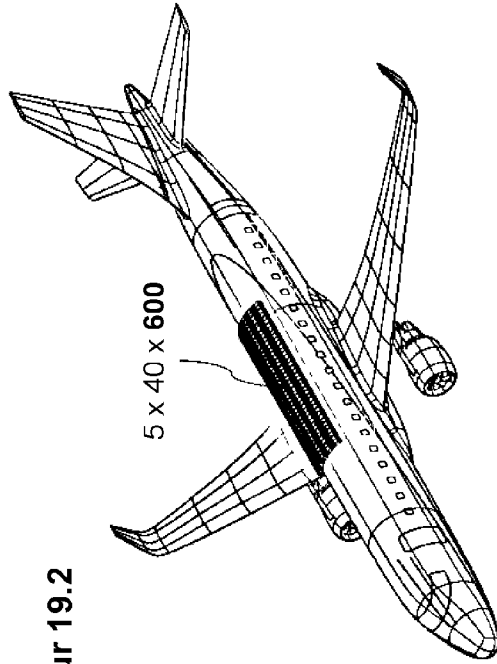
Figur 19.1



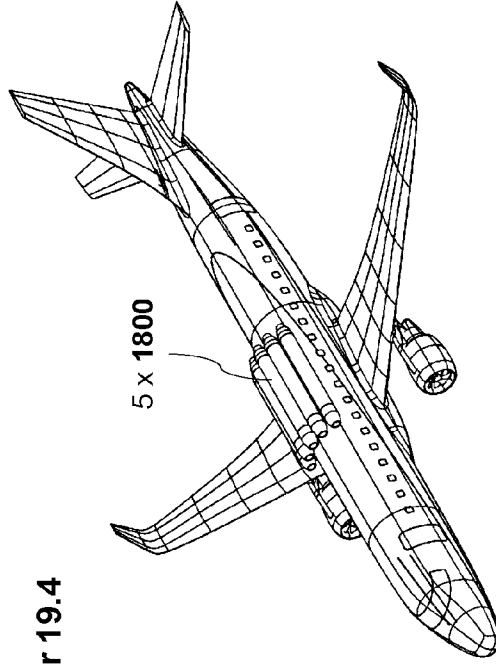
Figur 19.3



Figur 19.2

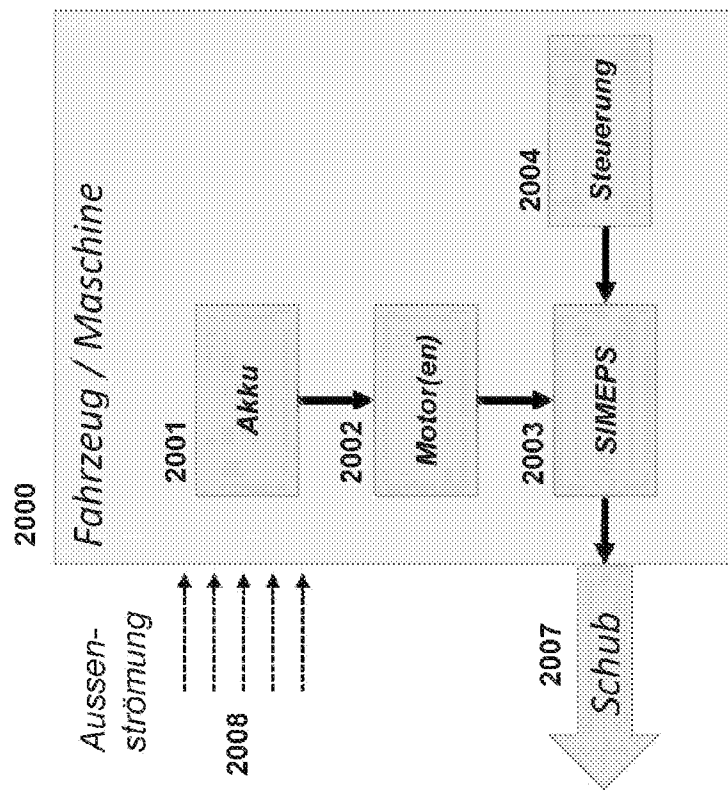


Figur 19.4

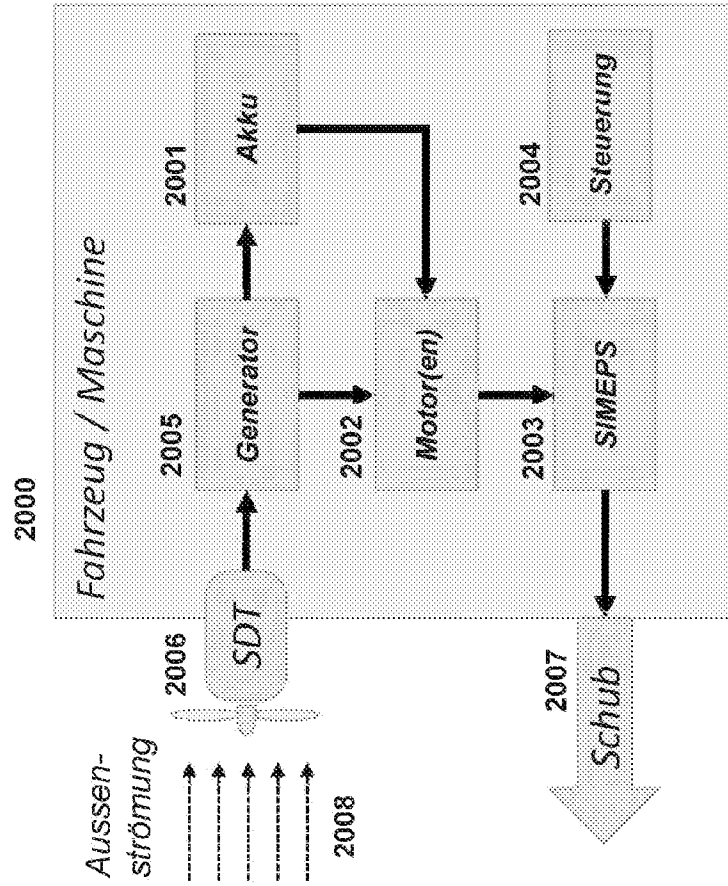


Figur 20

Figur 20.1

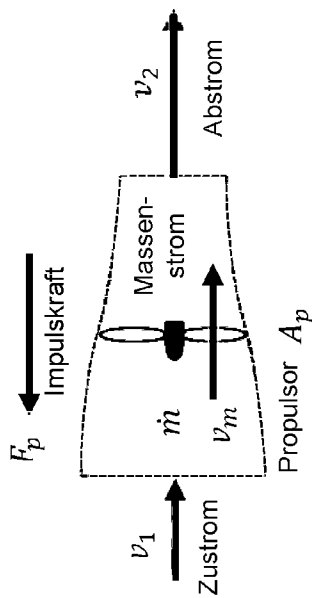


Figur 20.2



Figur 21

Figur 21.1



Figur 21.2

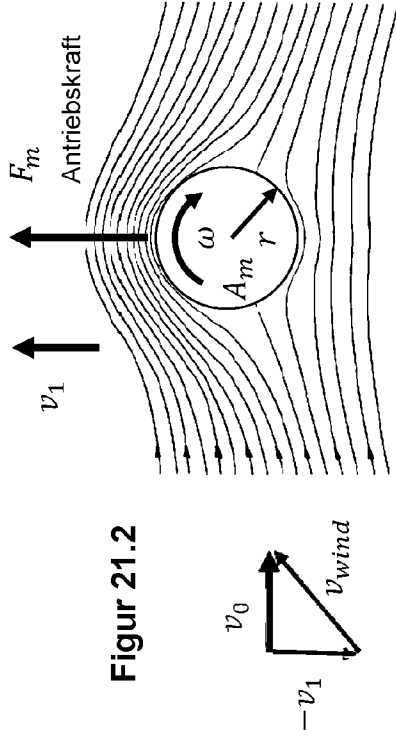


Tabelle 21.1

Nr.	Grundgleichungen für Froude-Rankine-Propulsor			
1	Parameter mit Geschwindigkeit	$v_m = \frac{v_1 + v_2}{2}$	$q_1 = \frac{\rho}{2} v_1^2$	$x = \frac{v_2}{v_1} > 1$
2	Massenstrom	$\dot{m} = \rho A_p v_m = \rho \pi r_p^2 v_m$		
3	Impulskraft	$F_p = \dot{m}(v_2 - v_1) = q_1 A_p (x^2 - 1)$		
4	Erforderliche Antriebsleistung	$P_p = \frac{1}{2} \dot{m}(v_2^2 - v_1^2) = q_1 A_p v_1 \frac{(x+1)(x^2-1)}{2}$		
5	Wirkungsgrad	$\eta_p = \frac{F_p v_1}{P_p} = \frac{2}{x+1} = \frac{v_1}{v_m}$		
6	Schubspezifische Leistung	$\phi_p = \frac{P_p}{F_p} = v_m = \frac{v_1}{\eta_p} = \frac{x+1}{2} v_1$		
7	Schubbeiwert	$c_{T,prop} = \frac{F_p}{q_1 A_p} = x^2 - 1$		
8	Leistungsbeiwert	$c_{P,prop} = \frac{P_p}{q_1 A_p v_1} = \frac{(x+1)(x^2-1)}{2}$		

Tabelle 21.2

Nr.	Grundgleichungen für passiven Flettner-Rotor		
9	Zylinderflächen	$A_m = 2\pi r l = \pi A_r$	$A_r = 2r l = dl$
10	Parameter mit Geschwindigkeit	$u = r\omega = 2\pi r n$ $u = k_u v_0$	$q_0 = \frac{\rho}{2} v_0^2$
11	Zirkulation und Hebel	$\Gamma = 2\pi r u$	$k_v = \frac{v_1}{v_0}$
12	Antriebskraft (Flettner)	$F_{cyl} = \eta_{FR} \rho l v_0 \Gamma = \eta_{FR} 2 q_0 k_u A_m$	
13	Erforderliche Antriebsleistung	$P_{cyl} = c_f \frac{\rho}{2} u^3 A_m = c_f q_0 v_0 k_u^4 A_m$	
14	Leistungszahl	$\varepsilon_{cyl} = \frac{F_{cyl} v_1}{P_{cyl}} = \frac{2\eta_{FR}}{c_f k_u^2} \frac{v_1}{v_0} = \frac{2\eta_{FR} k_v}{c_f k_u^2}$	
15	Schubspezifische Leistung	$\phi_{cyl} = \frac{P_{cyl}}{F_{cyl}} = \frac{c_f k_u^2}{2\eta_{FR}} v_0$	
16	Schubbeiwert	$c_{T,cyl} = \frac{F_{cyl}}{q_0 A_r} = \eta_{FR} 2\pi k_u \text{ mit } \eta_T < 1$	
17	Leistungsbeiwert	$c_{P,cyl} = \frac{P_{cyl}}{q_0 A_r v_0} = \pi c_f k_u^3$	

Figur 22

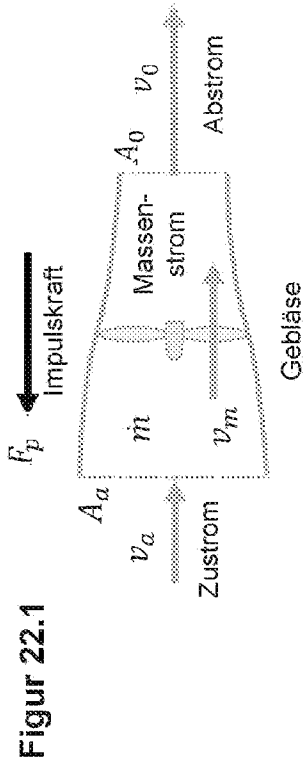


Tabelle 22.1

Grundgleichungen für Axialgebläse			
Nr.	Parameter mit Geschwindigkeit	$q_0 = \frac{\rho}{2} v_0^2$	$y = \frac{v_a}{v_0} < 1$
18	Parameter mit Geschwindigkeit		
19	Massenstrom	$\dot{m} = \rho_a A_a v_a = \rho_0 A_0 v_0$	
20	Impulskraft	$F_{btw} = \dot{m}(v_0 - v_a) = 2q_0 A_0 (1 - y)$	
21	Erforderliche Antriebsleistung Gebläse	$P_{btw} = \frac{1}{2} \frac{\dot{m}(v_0^2 - v_a^2)}{\eta_{btw}}$	
		$P_{bbw} = \dot{q}_0 A_0 v_0 \frac{1 - y^2}{\eta_{btw}}$	
22	Nutzbare Windleistung	$P_{wind} = \frac{1}{2} \dot{m} v_0^2 = q_0 A_0 v_0$	
23	Leistungszahl Gebläse	$\varepsilon_{btw} = \frac{P_{wind}}{P_{btw}} = \frac{\eta_{btw}}{1 - y^2}$	
24	Flächenverhältnis	$k_A = \frac{A_0}{A_m} \leq \frac{2}{\pi}$	

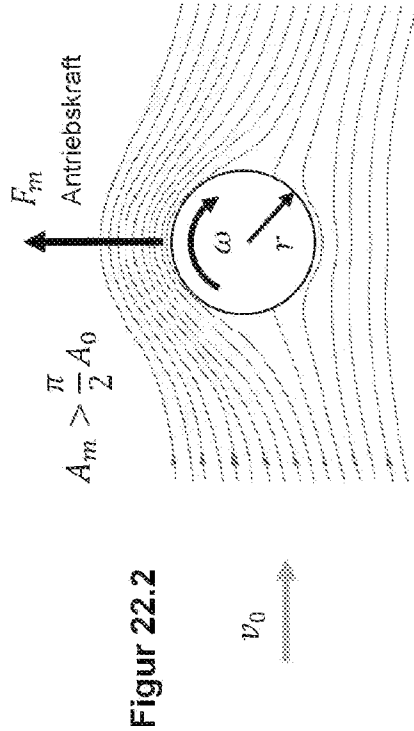


Tabelle 22.2

Grundgleichungen für aktiven Magnus-Effekt Propulsor			
Nr.			
25	Antriebskraft (Flettner)	$F_m = \eta_{FR} \rho l v_0 \Gamma = \eta_{FR} \rho v_0^2 k_u A_m = 2\eta_{FR} q_0 k_u A_m$	
26	Antriebsleistung Flettner-Rotor	$P_{FR} = c_f \frac{\rho}{2} v_0^3 A_m = c_f q_0 v_0 k_u^3 A_m$	
27	Gesamte Antriebsleistung	$P_m = P_{btw} + P_{FR} = q_0 A_0 v_0 \left(\frac{1 - y^2}{\eta_{btw}} + \frac{c_f k_u^3}{k_A} \right)$	
28	Leistungszahl	$\varepsilon_m = \frac{F_m v_1}{P_m} = \frac{2\eta_{FR} \eta_{btw} k_u k_v}{k_A (1 - y^2) + c_f \eta_{btw} k_u^3}$	
29	Schubspezifische Leistung	$\phi_m = \frac{P_m}{F_m} = \frac{1}{2\eta_{FR}} \left(\frac{k_A (1 - y^2)}{\eta_{btw} k_u} + c_f k_u^2 \right) v_0$	
30	Schubbeiwert	$c_{T,m} = \frac{F_m}{q_0 A_r} = \eta_{FR} 2\pi k_u$	
31	Leistungsbeiwert	$c_{P,m} = \frac{P_m}{q_0 A_r v_0} = \pi \left(\frac{1 - y^2}{\eta_{btw}} + \frac{c_f k_u^3}{k_A} \right)$	