



21 Aktenzeichen: P 38 37 845.0  
22 Anmeldetag: 8. 11. 88  
43 Offenlegungstag: 10. 5. 90

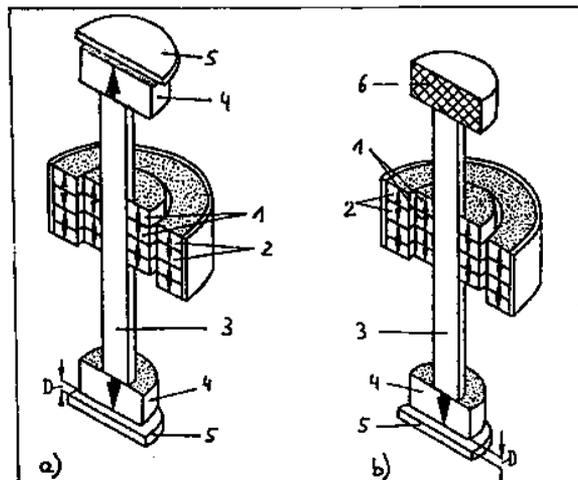
71 Anmelder:  
Vacuumschmelze GmbH, 6450 Hanau, DE

72 Erfinder:  
Marinescu, Marlene, Dr.; Marinescu, Nicolae, Dr.,  
6000 Frankfurt, DE; Tenbrink, Johannes, Dr., 8752  
Mömbriß, DE; Krauth, Helmut, Dr., 6450 Hanau, DE

54 Magnetlager

Es ist bekannt, Lager axial entweder mechanisch oder mit Hilfe eines elektromagnetischen Regelkreises zu stabilisieren. Bei den erfindungsgemäßen Magnetlagern wird eine axiale Stabilisierung durch Magnetkräfte dadurch erreicht, daß an zumindest einem Ende der Welle (3) ein Dauermagnet (4) und ein diamagnetischer, insbesondere ein supraleitender Körper (5) axial nebeneinander angeordnet sind.

Fig. 2



Die Erfindung betrifft ein Magnetlager nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

Neben mechanischen Radiallagern sind magnetische Radiallager bekannt, die aus zwei Magnetringen bestehen. Die Magnetringe sind so magnetisiert und angeordnet, daß bei radialer Auslenkung des einen Magneten eine rückstellende Kraft auf diesen wirkt. Eine entsprechende Anordnung ist zum Beispiel aus der DE-OS 29 51 010 bekannt. Weitere grundsätzlich mögliche geometrische Anordnungen der Magnetringe in einem Radiallager sind aus zwei Veröffentlichungen von Jean-Paul Yonnet bekannt (IEEE Transactions on Magnetics, MAG-17 (1981), Seiten 1169–1173 und IEEE Transactions on Magnetics, MAG-14 (1978), Seiten 803–805). Am häufigsten angewendet wird die konzentrische Anordnung der beiden Magnetringe, bei welcher der Außendurchmesser des einen Magnetringes kleiner ist als der Innendurchmesser des zweiten und die beiden Magnetringe in einer Ebene angeordnet sind. Bei dieser Anordnung können die beiden Magnetringe entweder gleichsinnig axial oder gegensinnig radial magnetisiert sein. Ein solches Radiallager wirkt nun allerdings lediglich radial stabilisierend. Für eine axiale Stabilisierung müssen weitere Maßnahmen getroffen werden.

Aus einem Artikel von W. Braunbek in "Zeitschrift für Physik", 112 (1939) Seiten 753–769 ist es bekannt, daß mit Permanentmagneten allein keine stabile Lagerung möglich ist. Rotierende Systeme mit magnetischen Radiallagern werden daher in axialer Richtung entweder mechanisch gelagert oder es erfolgt eine axiale Stabilisierung mit Hilfe eines elektromagnetischen Regelsystems.

Weiterhin ist aus dem Artikel von Braunbek bekannt, daß ein stabiles Schweben eines Systems 1 in einem Feld eines Systems 2 möglich ist, wenn eines der beiden Systeme diamagnetische Materie enthält. Es wird dort festgestellt, daß das Schweben eines diamagnetischen Körpers stabil sein kann, aber nicht stabil sein muß. Den diamagnetischen Stoffen werden in diesem Zusammenhang Stoffe im supraleitenden Zustand gleichgestellt.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Magnetlager anzugeben, bei dem auch die axiale Stabilisierung durch Dauermagnetkräfte erzielt wird.

Diese Aufgabe wird durch die kennzeichnenden Merkmale des Patentanspruchs 1 gelöst.

Bei dem erfindungsgemäßen Magnetlager erfolgt die Stabilisierung in radialer Richtung in bekannter Weise vorzugsweise durch Magnetringe. In axialer Richtung erfolgt die Stabilisierung durch eine abstoßende Kraft zwischen einem Dauermagneten und einem diamagnetischen Körper. Die relative Permeabilität  $\mu_R$  des diamagnetischen Körpers sollte vorteilhafterweise deutlich kleiner sein als 1. Es kommen somit insbesondere supraleitende Materialien zum Einsatz. Sowohl aus technologischen als auch aus Kostengründen werden hierbei die neuen Hochtemperatur-Supraleiter bevorzugt, die eine Sprungtemperatur aufweisen, welche höher liegt als die Temperatur des flüssigen Stickstoffs.

Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in den Zeichnungen dargestellt und werden im folgenden näher beschrieben. Es zeigen:

Fig. 1 verschiedene Anordnungen und Magnetisierungen der Magnetringe für die radiale Stabilisierung.

Fig. 2 zwei Ausführungsbeispiele mit mehreren Magnetpaaren zur radialen Stabilisierung und einem (b) bzw. zwei (a) Dauermagneten, mit zugehörigem diama-

gnetischem Körper zur axialen Stabilisierung.

Fig. 3 die Abhängigkeit der Axialkraft von der relativen Permeabilität des diamagnetischen Körpers.

Fig. 4 die Abhängigkeit der Axialkraft vom Durchmesser des plattenförmigen diamagnetischen Körpers.

Fig. 5 die Abhängigkeit der Axialkraft von dem Abstand  $D$  zwischen dem Dauermagneten und dem diamagnetischen Körper.

Fig. 6 ein Ausführungsbeispiel mit versetzter Anordnung der Magnetringe eines Magnetpaares sowie die Größe der hierdurch erzeugten destabilisierenden Axialkraft.

Fig. 7 ein Ausführungsbeispiel mit waagerechter Lage der Welle.

Zur Konstruktion eines Radiallagers mit zwei Dauermagnetringen gibt es mehrere mögliche konstruktive Anordnungen.

In Fig. 1 sind mehrere Beispiele schematisch dargestellt: Die Konfigurationen  $b$  sind aus der jeweiligen Anordnung  $a$  durch einfache Umkehrung der axialen in die radiale Magnetisierung entstanden. Die gezeigten beispielhaften Anordnungen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit sowie auch hinsichtlich ihrer Steifigkeit. So ist z. B. ein Magnetring mit axialer Magnetisierung in der Regel preiswerter als ein Magnetring mit radialer Magnetisierung. Die folgenden Ausführungsbeispiele zeigen stets Magnetringe mit der Anordnung 1a aus Fig. 1. Dies ist jedoch als beispielhaft anzusehen.

In der Fig. 2 sind zwei Ausführungsbeispiele mit einem bzw. mit zwei Axiallagern dargestellt. Zur Radiallagerung sind bei diesen Ausführungsbeispielen mehrere Magnetringpaare bestehend aus jeweils einem inneren Magnetring 1 und einem äußeren Magnetring 2 axial nebeneinander angeordnet. Die Innenringe sind fest mit der Welle 3 verbunden. Die Magnetringe sind axial magnetisiert. Der innere Magnetring 1 und der äußere Magnetring 2 eines jeden Magnetpaares weisen gleiche Magnetisierungsrichtung auf. Nebeneinander liegende innere Magnetringe 1 bzw. äußere Magnetringe 2 weisen dagegen eine entgegengesetzte Magnetisierung auf. Zur axialen Stabilisierung sind an zumindest einem Ende der Welle 3 in axialer Richtung nebeneinander ein zylinderförmiger Dauermagnet 4 und ein diamagnetischer, vorzugsweise supraleitender Körper 5 angeordnet. Im Ausführungsbeispiel ist der Dauermagnet 4 mit der Welle verbunden. Der diamagnetische Körper ist feststehend angeordnet. Prinzipiell ist diese Anordnung auch umkehrbar, jedoch ist die gezeigte Anordnung aufgrund der einfacheren Möglichkeiten zur Kühlung des diamagnetischen, supraleitenden Materials vorzuziehen. Das Ausführungsbeispiel für ein erfindungsgemäßes Radiallager zeigt eine senkrechte Anordnung der Welle 3. In diesem Falle ist es grundsätzlich ausreichend, wenn eine axiale Stabilisierung mit Hilfe eines Dauermagneten und eines diamagnetischen Körpers am unteren Ende der Welle erfolgt (Fig. 2b). Am oberen Ende der Welle befindet sich dann ein Gewicht 6.

Durchgeführte Berechnungen haben gezeigt, daß die Steifigkeit der Ausführungsform nach Fig. 2a, d. h. mit einer axialen Stabilisierung an beiden Enden der Welle, wesentlich günstiger ist als im Ausführungsbeispiel nach Fig. 2b mit nur einer axialen Stabilisierung am unteren Ende der Welle.

Neben dem in Fig. 2 gezeigten Ausführungsbeispiel des diamagnetischen Körpers 5 als Platte wurden auch Ausführungen des diamagnetischen Körpers in die Berechnungen einbezogen, bei denen die Ränder der Plat-

te umgebogen sind, so daß der diamagnetische Körper eine Topfform aufweist. In Tabelle 1 sind die Ergebnisse hinsichtlich der Axialkraft  $F_z$  aufgelistet. Bei der mit "Topf" bezeichneten Geometrie ist die offene Seite des Topfes dem Dauermagneten zugewendet und der Dauermagnet taucht teilweise in diesen ein. Bei der mit "Anti-Topf" bezeichneten Geometrie ist gegenüber der Geometrie "Topf" der diamagnetische Körper um 180° gedreht, so daß die offene Seite des Topfes von dem Dauermagneten abgewendet ist. Als Abstand zwischen diamagnetischem Körper (Topfboden) und Dauermagnet wurden die Werte 0,5 mm, 1 mm und 1,5 mm zugrunde gelegt. Der Durchmesser des Topfes beträgt hierbei 43 mm, seine Höhe 1 mm bzw. 1,5 mm. Die zum Vergleich herangezogene Platte hatte einen Durchmesser von 48 mm. Die Berechnungen zeigten, daß überraschenderweise das System mit der Platte die größte Steifigkeit aufweist. Als Maß für die Steifigkeit wurde dabei die Ableitung der Kraft nach der axialen Richtung, d. h. die Änderung der stabilisierenden Kraft bei sehr kleinen Auslenkungen aus der Gleichgewichtslage, zugrunde gelegt.

Tabelle 1

Geometrie	Kraft $F_z$ in (N)		
	0,5 mm	1 mm	1,5 mm
Topf 1,5 mm hoch	419	386	354
Topf 1 mm hoch	417	373	334
Anti-Topf 1,5 mm hoch	418		308
Platte $\varnothing$ 48 mm	423	356	310

Zur Erhöhung der kritischen Stromdichte kann die Platte auch mit einer Dünnschicht aus Hochtemperatur-Supraleitermaterial beschichtet sein, die eine wesentlich höhere kritische Stromstärke aufweist.

Weiterhin wurde die Ausführung des diamagnetischen Körpers in Form einer kurzgeschlossenen supraleitenden Spule untersucht. Es hat sich hierbei gezeigt, daß eine Stromdichte von etwa  $10^5$  A/cm<sup>2</sup> erforderlich ist, um die gleichen Magnetkräfte zu erhalten, wie mit einem guten diamagnetischen Material mit der relativen Permeabilität von  $10^{-3}$ .

Die Magnetkraft zwischen dem diamagnetischen Körper und dem Dauermagneten zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der relativen Permeabilität. In Fig. 3 ist die Abhängigkeit der Axialkraft  $F_z$  von der relativen Permeabilität aufgetragen, wobei der Magnet einen Durchmesser von 40 mm und eine Höhe von 20 mm aufweist. Der Durchmesser der diamagnetischen Platte beträgt 48 mm, der Abstand zwischen Platte und Magnet 1 mm, die Magnetisierung des Dauermagneten beträgt 1,2 T. Aus diesen Berechnungen ist ersichtlich, daß zur Erzielung von ausreichend großen axialen Kräften  $F_z$  ein möglichst niedriger Wert der relativen Permeabilität angestrebt werden muß. Diese Forderung wird insbesondere von Supraleitermaterialien sehr gut erfüllt, weshalb diese als die bevorzugten diamagnetischen Materialien für die erfindungsgemäßen Magnetlager anzusehen sind.

Des weiteren wurde auch die Abhängigkeit der Axialkraft vom Durchmesser der diamagnetischen Platte untersucht. Die Ergebnisse sind in Fig. 4 dargestellt für ein System bestehend aus Magneten mit einem Durchmesser von 40 mm, einer Höhe von 20 mm, einer Magneti-

sierung von 1,2 T sowie einer relativen Permeabilität der diamagnetischen Platte von  $\mu_r = 10^4$  sowie einem Abstand des Magneten von der Platte von 1 mm. Aus Fig. 4 ist ersichtlich, daß die maximale Axialkraft dann erreicht wird, wenn der Dauermagnet und die Platte den gleichen Durchmesser aufweisen. Die Kraft fällt mit kleiner werdendem Durchmesser dann sehr schnell ab, während sie mit größer werdendem Durchmesser nur relativ langsam abnimmt. Es weisen daher insbesondere solche Systeme große Axialkräfte auf, bei denen der Durchmesser der diamagnetischen Platte gleich oder größer ist als der Durchmesser des Dauermagneten.

Fig. 5 zeigt die Abhängigkeit der Axialkraft  $F_z$  vom Abstand  $D$  zwischen der diamagnetischen Platte und dem Dauermagneten. Für die Berechnung wurden folgende Werte zugrunde gelegt:

Magnetdurchmesser 40 mm,  
Magnethöhe 20 mm,  
Magnetisierung 1,2 T,  
Plattendurchmesser 48 mm,  
relative Permeabilität  $\mu_r = 10^4$ .

Bei der Ausführung des Lagers mit senkrecht angeordneter Welle hat es sich insbesondere als vorteilhaft herausgestellt, wenn die inneren Magnetringe 1 gegenüber ihren zugehörigen äußeren Magnetringen 2 geringfügig axial nach oben versetzt sind. Aus Fig. 6 ist ersichtlich, daß das Radiallager eine maximale Axialkraft  $F_z$  aufweist, wenn die Magnetringe um die Hälfte der Magnethöhe versetzt sind. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß man eine günstige axiale Stabilisierung insbesondere dann erreicht, wenn im System supraleitende Lager vorhanden sind, deren Gesamtsteifigkeit groß ist, wobei die Steifigkeit definiert sei als die Ableitung der Axialkräfte nach der axialen Richtung. Die besten Ergebnisse werden erzielt mit zwei supraleitenden Lagern an den beiden Enden einer rotierenden Welle.

In Fig. 7 ist eine Anordnung mit waagerechter Welle 3 dargestellt. Die radiale Lagerung erfolgt wiederum durch innere und äußere Magnetringe 1, 2, die axiale Stabilisierung durch Dauermagnete 4 und diamagnetische, vorzugsweise supraleitende Körper 5. Bei dieser Konfiguration arbeitet das dauermagnetische Radiallager unausgelenkt. Soll ein solches System beispielsweise eine in radialer und axialer Richtung gleich große Steifigkeit aufweisen, so muß die Axialsteifigkeit der im System vorhandenen supraleitenden Lager um einen Faktor 3 größer sein, als die angestrebte Axialsteifigkeit des Gesamtsystems.

Mit den erfindungsgemäßen Magnetlagern wird sowohl in axialer als auch in radialer Richtung eine sehr gute Steifigkeit erreicht. Die erfindungsgemäßen Magnetlager benötigen insbesondere keine zusätzliche aktive oder auch mechanische Stabilisierung. Sie sind für eine Vielzahl von Anwendungen z. B. in der Luft- und Raumfahrt, in Turbomolekularpumpen, Spinnurbinen, Ultrazentrifugen, Schwungrädern zur Energiespeicherung, schnellen Plattenlaufwerken u. v. a. geeignet.

#### Patentansprüche

1. Magnetlager mit mindestens einem feststehenden und mindestens einem mit einer Welle verbundenen Magnetring (1, 2), dadurch gekennzeichnet, daß zur axialen Stabilisierung zumindest ein Dauermagnet (4) und ein diamagnetischer Körper (5) in axialer Richtung nebeneinander angeordnet sind, von denen ebenfalls einer mit der Welle (3) verbun-

den und der andere feststehend angeordnet ist.

2. Magnetlager nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Dauermagnet (4) und/oder der diamagnetische Körper (5) rotationssymmetrisch ausgebildet und so angeordnet sind, daß deren Rotationsachse mit der Achse der Welle zusammenfällt. 5

3. Magnetlager nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Magnetringe (1, 2) so zueinander magnetisiert sind, daß sie sich in der Einbaulage gegenseitig abstoßen. 10

4. Magnetlager nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der diamagnetische Körper aus einem supraleitenden Material besteht.

5. Magnetlager nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß es sich bei dem supraleitenden Material um einen Hochtemperatur-Supraleiter handelt. 15

6. Magnetlager nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der diamagnetische Körper (5) zusätzlich eine Dünnschicht aus einem Hochtemperatur-Supraleitermaterial aufweist. 20

7. Magnetlager nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zur axialen Stabilisierung an beiden Enden der Welle (3) jeweils ein Dauermagnet (4) mit jeweils einem zugehörigen diamagnetischen Körper (5) angeordnet sind. 25

8. Magnetlager nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der diamagnetische Körper (5) die Form einer runden Platte aufweist.

9. Magnetlager nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der diamagnetische Körper (5) aus einer runden Platte mit zu einem Hohlzylinder abgebogenen Enden besteht. 30

10. Magnetlager nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß es sich bei dem diamagnetischen Körper (5) um eine kurzgeschlossene supraleitende Spule handelt. 35

11. Magnetlager nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der zylindrische diamagnetische Körper (5) den gleichen oder einen größeren Durchmesser aufweist als der zugehörige Dauermagnet (4). 40

12. Magnetlager nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zur radialen Stabilisierung mehrere Magnetpaare axial nebeneinander angeordnet sind. 45

13. Magnetlager nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß der innere Magnetring (1) und der äußere Magnetring (2) eines jeden Paares gleiche Höhe aufweisen und in einer Ebene angeordnet sind. 50

14. Magnetlager nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß bei senkrechter Anordnung der Welle (3) der innere Magnetring (1) und der äußere Magnetring (2) eines jeden Paares gleiche Höhe aufweisen und der innere Magnetring (1) um höchstens die halbe Magnethöhe axial nach oben versetzt ist. 55

---

Hierzu 7 Seite(n) Zeichnungen

60

65

– Leerseite –

Fig. 1

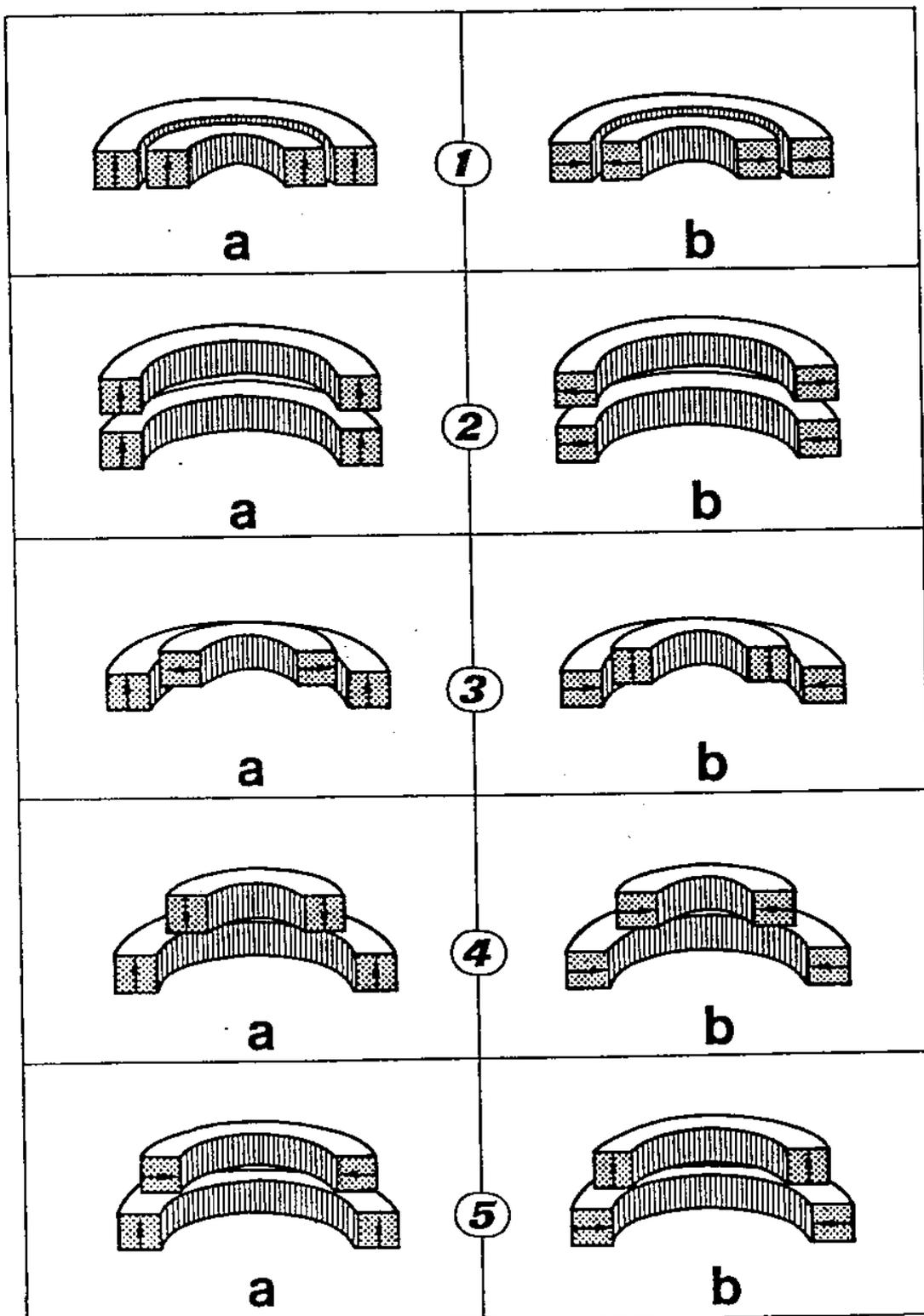


Fig. 2

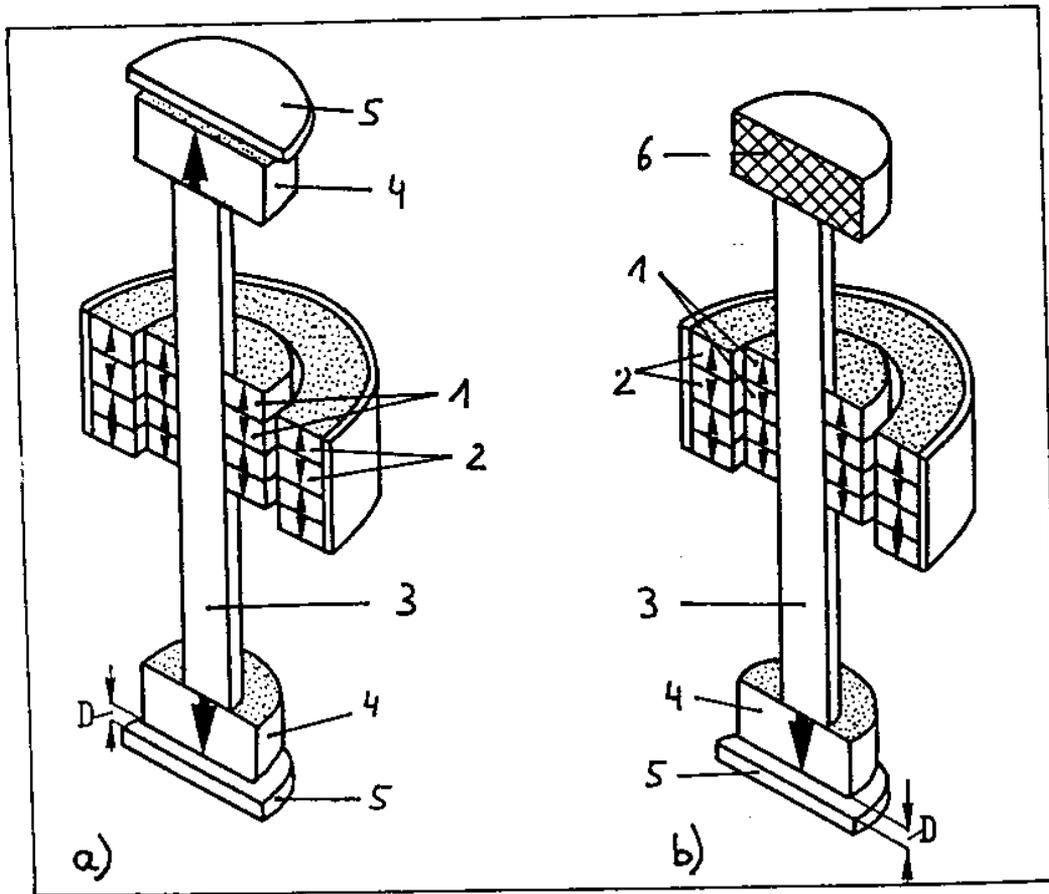


Fig. 3

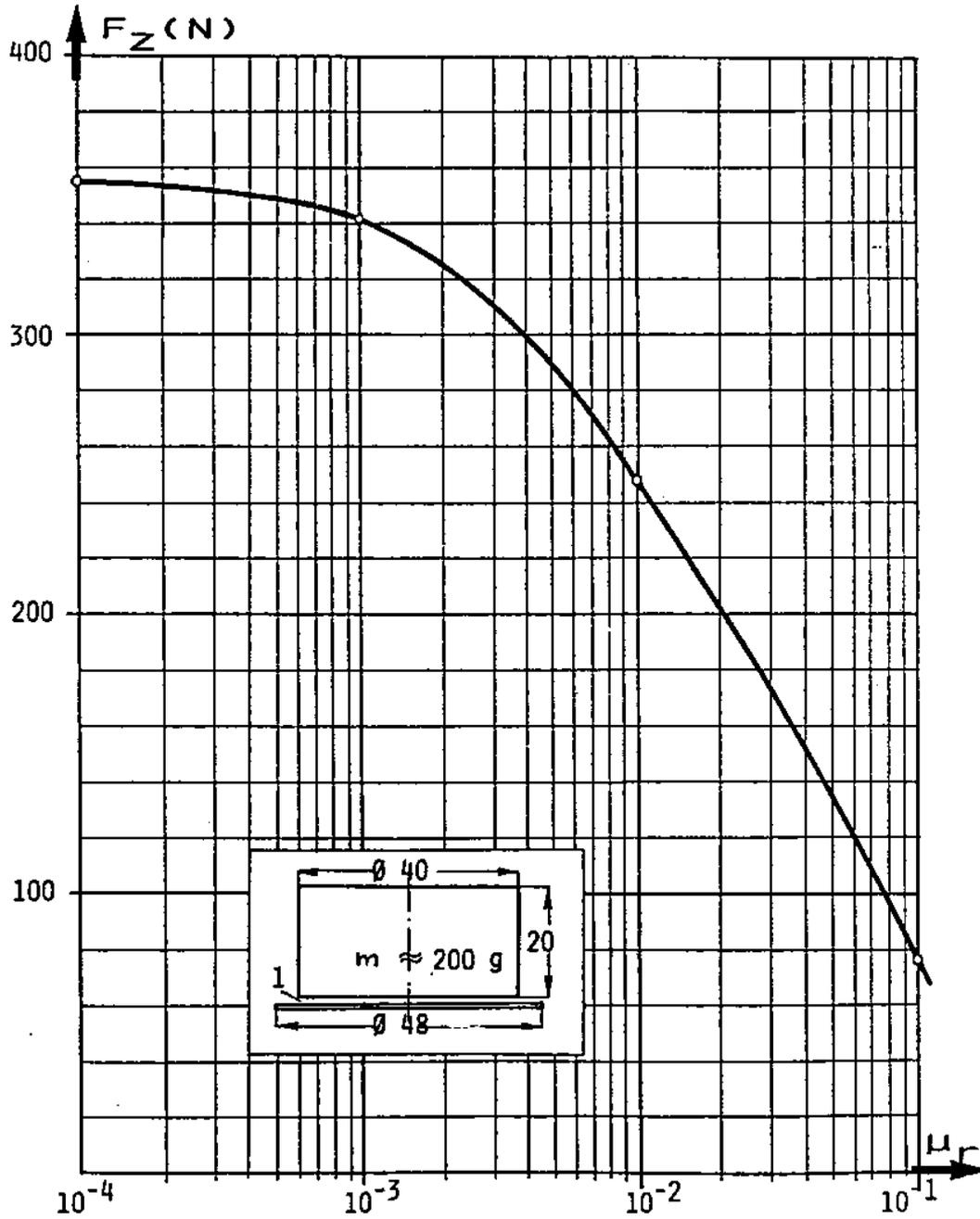


Fig. 4

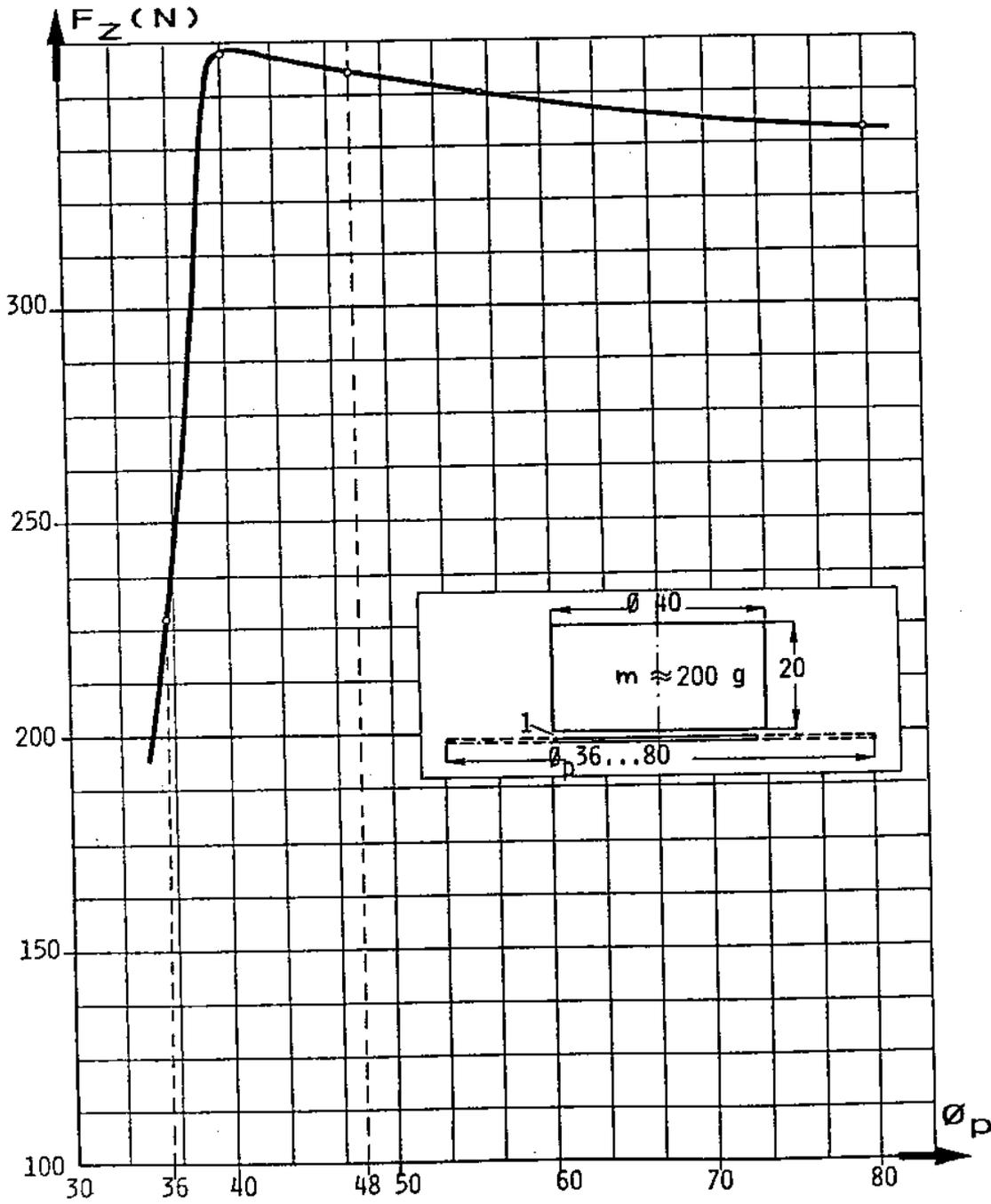


Fig. 5

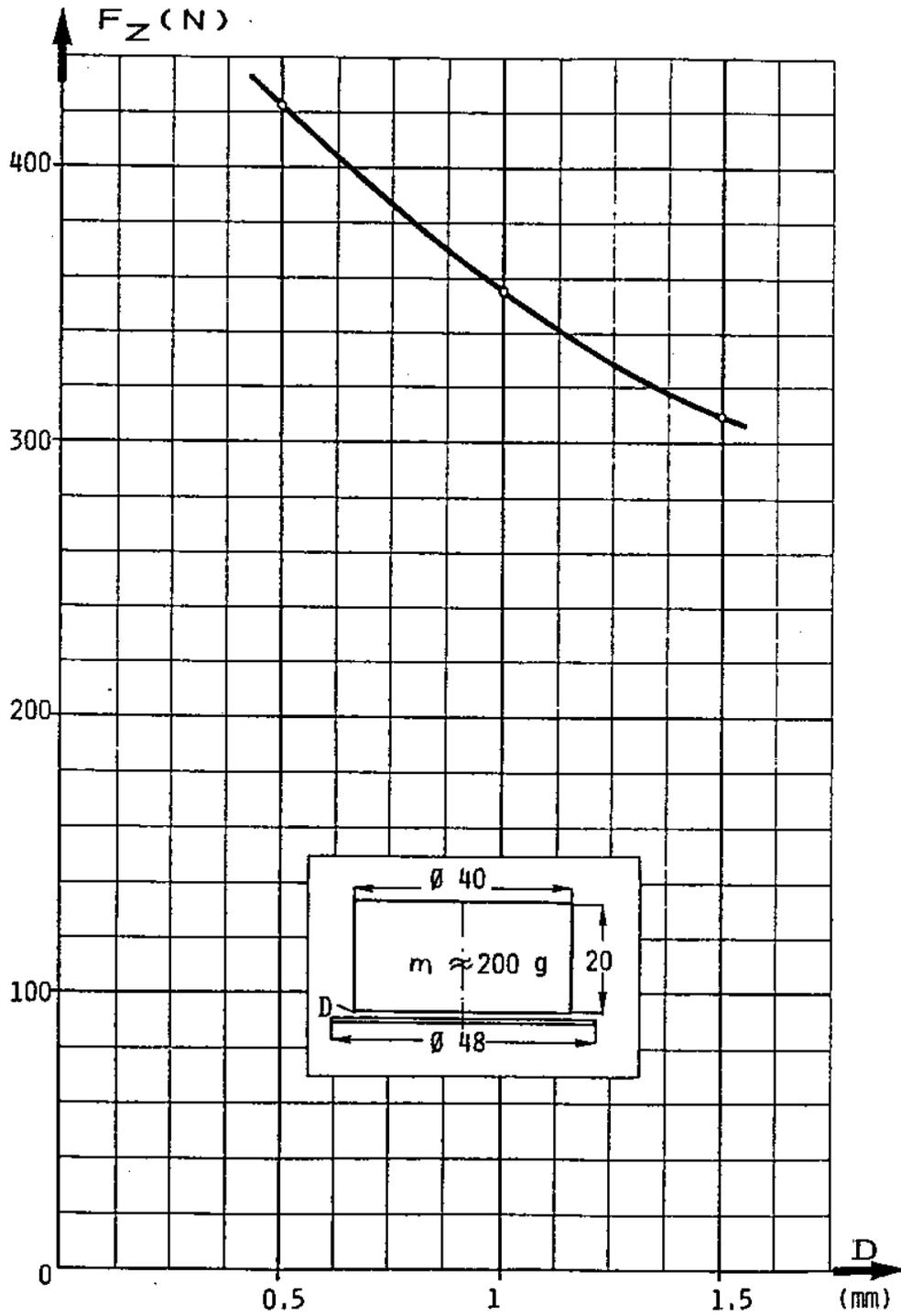


Fig. 6a)

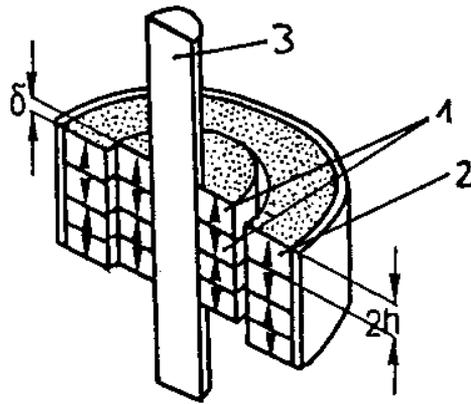


Fig. 6b)

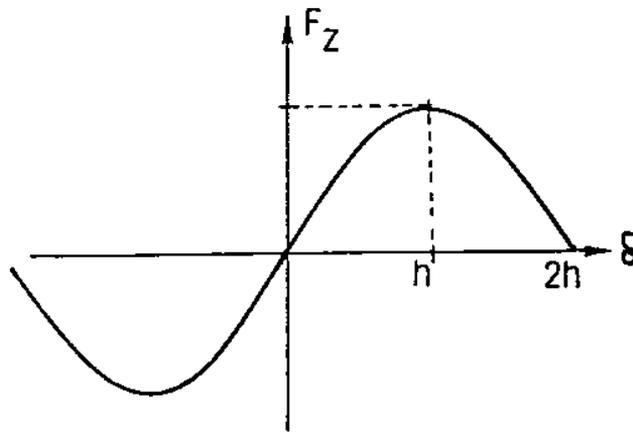


Fig. 7

