



19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

12 **Offenlegungsschrift**
10 **DE 196 47 273 A 1**

51 Int. Cl.⁶:
G 02 B 23/12

21 Aktenzeichen: 196 47 273.3
22 Anmeldetag: 15. 11. 96
43 Offenlegungstag: 20. 5. 98

DE 196 47 273 A 1

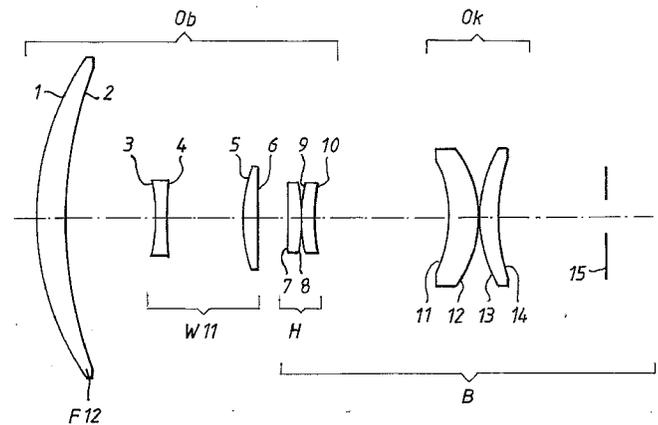
71 Anmelder:
Fa. Carl Zeiss, 89518 Heidenheim, DE

72 Erfinder:
Ulrich, Wilhelm, 73434 Aalen, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

54 **Modulares Infrarot-Kepler-Fernrohr**

57 Infrarot-taugliches Kepler-Fernrohr mit Objektiv (Ob) und Okular (Ok), wobei das Objektiv (Ob) aus einer positiven Frontgruppe (F11-F31) und einer negativen Hintergruppe (H) besteht und zwischen diesen eine Wechseloptik (W11, W21) als Vergrößerungswechsler eingesetzt werden kann, wobei Hintergruppe (H) und Okular (Ok) fest vorgegeben sind und Frontgruppe (F11-F31) und Wechseloptik (W11, W21) jeweils austauschbar sind, wobei bei jeder Frontgruppe (F11-F31) mit oder ohne Wechseloptik (W11, W21) die sphärische Aberration und die Koma vor der Hintergruppe (H) gleich unterkorrigiert sind. Es ist vorgesehen, daß jede Kombination außer der Verzeichnung insgesamt beugungsbegrenzte Korrektion aufweist; daß die Wechseloptik (W11, W21) ein zweites Sehfeld erzeugt, wobei das Fernrohr mit Wechseloptik (W11, W21) negative Verzeichnung aufweist, ohne diese eine positive Verzeichnung.



DE 196 47 273 A 1

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein infrarot-taugliches Kepler-Fernrohr, d. h. also ein afokales optisches System mit Zwischenabbildung bestehend aus einem Objektiv und einem Okular. Solche Optiken werden z. B. in Wärmebildgeräte eingebaut.

5 Aus A. Mann, Optical Engineering 31 (1992), 1064 ff. (Seite 1065, Abschnitt 2.2) ist ein modular aufgebauter Zoom-Reimager mit austauschbarer Kompensator/Okular-Einheit bekannt.

US 5,044,706 gibt ein Teleskop (Galilei, afokal) mit Brennweiten- (Sehfeld-) Wechsel durch einsetzbare Linsengruppen an. Diffraktive optische Elemente (DOE) und Asphären sind bei den Zusatzlinsen und beim Basisobjektiv vorgesehen.

10 US 5,214,532 beschreibt einen achromatischen zweilinsigen Vorsatz für Wärmebildgeräte zur Verdopplung der Reichweite. Asphären sind vorgesehen.

US 5,229,880 beschreibt einen Reimager, der für drei Sehfelder ausgelegt ist, und zwar durch Weglassen oder Einsetzen einer ersten oder zweiten zweilinsigen Gruppe hinter der Frontlinse des Objektivs. Diese Gruppe hat in den Beispielen mindestens ein DOE, Anspruch 9 umfaßt aber auch Varianten ohne DOE.

15 US 5,257,133 beschreibt einen Reimager mit DOE im Okular (claim 1) bzw. nirgendwo (claim 10) und/oder Asphären in Objektiv und Okular (claim 18) aus Silizium, also für 3–5 μm Wellenlänge. Eine Wechseloptik ist nicht vorgesehen.

US 5,363,235 beschreibt einen katadioptrischen Reimager mit wechselbaren Linsen zur Bildfeldschaltung.

Aufgabe der Erfindung ist es, die Konstruktion eines derartigen Fernrohres anzugeben, die an den Einsatz in Wärmebildgeräten angepaßt ist und bei kompakter Bauform mit möglichst wenig Linsen ein kostengünstig zu fertigendes System mit Wechselkomponenten für verschiedene Sehfelder ergibt.

20 Gelöst wird diese Aufgabe durch ein Kepler-Fernrohr nach Anspruch 1, oder, in alternativer Darstellung, das afokale System nach Anspruch 5.

Anspruch 16 gibt das entsprechende Verfahren zur Erzeugung eines bedarfsgerechten Sehfelds bei Kepler-Fernrohren an.

25 Erfindungsgemäß wird bei einer Satzoptik zur Darstellung von Kepler-Fernrohren die Schnittstelle zwischen fester Grundoptik und angepaßten Teilen vor die negative Hintergruppe des Objektivs gelegt und an dieser Stelle wird eine bestimmte Korrektur vorgesehen, insbesondere sind sphärische Aberration und Koma unterkorrigiert.

Vorteilhafte Ausführungsformen sind Gegenstand der Unteransprüche 2 bis 4, 6 bis 15 und 17.

Näher erläutert wird die Erfindung anhand der Ausführungsbeispiele, deren Linsenschnitte in den **Fig. 1 bis 6** der 30 Zeichnung dargestellt sind.

Das Beispiel der **Fig. 1** zeigt die Zusammensetzung des Kepler-Fernrohrs aus Objektiv Ob mit sammelnder Frontgruppe F12, optimaler Wechseloptik W11 und zerstreuernder Hintergruppe H, sowie aus dem Okular Ok. Okular Ok und Hintergruppe H bilden die festgelegte Basisoptik B. Die Frontgruppe F12 und die Wechseloptik W11 sind tauschbar, wobei vorgesehen ist, daß die Frontgruppe F12 einmal gewählt und fest mit der Basisoptik B verbunden wird, die Wechseloptik W11 aber, eventuell auch mehrere verschiedene, im Betrieb einschwenkbar ist mit einer geeigneten Mechanik.

Die Basisoptik B besteht aus der Hintergruppe H mit einer sphärischen Sammellinse **7, 8** aus ZnS und einer sphärischen Zerstreuungslinse **9, 10** aus Ge. Die Brennweite der Hintergruppe H liegt bei -18 mm und sie steht so im Strahlengang, daß sie eine zweifache Vergrößerung bewirkt. Das Zwischenbild zwischen Hintergruppe H und Okular Ok ist nicht korrigiert.

40 Das Okular Ok enthält zwei asphärische (**11, 12; 13, 14**) Sammellinsen aus Ge, ausgeführt als einander zugewandte Menisken. Seine Brennweite beträgt ca. $+22\text{ mm}$.

Die Frontgruppe F12 ist hier eine sammelnde Einzellinse **1, 2** aus Germanium mit diffraktiver Fläche **2**.

Die eingeschobene Wechseloptik W11 besteht aus einer sphärischen Zerstreuungslinse **3, 4** und einer Sammellinse **5, 6** mit asphärischer Fläche **6**, beide ebenfalls aus Germanium.

45 Die Tabelle 1a gibt für alle Teile des Fernrohrs die Konstruktionsdaten.

Die Austrittspupille **15** ist mit ihrem Durchmesser (10 mm) fest vorgegeben.

Die asphärischen und diffraktiven Flächen sind dabei folgendermaßen beschrieben:

Einer sphärischen Fläche mit dem Radius R wird eine rotationssymmetrische, asphärische Deformation überlagert. Diese wird als Pfeilhöhendifferenz pD der Asphäre zur sphärischen Fläche angegeben und ist eine Funktion des Abstandes h von der optischen Achse. Die Kegelschnittgrundform ist bei allen Beispielen eine Parabel, so daß sich mit den 50 asphärischen Konstanten c_1 bis c_n folgende Formel ergibt:

$$pD(h) = (1/2R) h^2 + c_1 h^4 + \dots + c_n h^{2n+2}.$$

55 Das gegebenenfalls überlagerte diffraktive Furchenprofil ist eine Funktion des Abstandes h von der optischen Achse und wiederholt sich periodisch immer bis zur maximalen Furchentiefe T.

Der diffraktive Abtrag pD(h) wird für die Ausführungsbeispiele folgendermaßen berechnet:

$$pD(h) = T \cdot (N(b) - \text{Integer } N(h)),$$

60

mit der maximalen Furchentiefe $T = WL/(n-1)$ und der Furchenzahl $N(h) = D_1 (h^2)/WL$.

Dabei bedeuten:

- WL = Blazewellenlänge: hier $WL = 9\ \mu\text{m}$
- n = Brechzahl der Linse
- D_1 = diffraktive Konstante.

65

Dafür sind die Konstanten in den Tabellen angegeben.

Tabelle 1a

Objektiv-Frontgruppe F12

Nr.	Radius	Dicke	Glas	C1	C2	C3	C4	D1
-----	--------	-------	------	----	----	----	----	----

1	96.450	8.0	Ge	-	-	-	-	-
2	140.827	27.6	Luft	0.60e-07	-0.72e-12	0.11e-14	-0.17e-18	-0.16e-04

Wechseloptik W11

3	-122.117	3.6	Ge	-	-	-	-	-
4	174.267	23.2	Luft	-	-	-	-	-
5	53.727	4.3	Ge	-0.10e-05	-0.16e-10	-	-	(Dehnungsfaktor 1 : 3,4)
6	1163.840	9.4	Luft	-	-	-	-	-

Objektiv-Hintergruppe H

7	-501.449	4.0	ZnSe	-	-	-	-	-
8	-210.068	0.2	Luft	-	-	-	-	-
9	110.868	3.5	Ge	-	-	-	-	-
10	40.794	42.0	Luft	-	-	-	-	-

Okular Ok

11	-39.094	9.5	Ge	-0.13e-04	0.19e-07	-0.18e-10	-	-
12	-33.874	0.2	Luft	-	-	-	-	-
13	48.179	5.5	Ge	-	-	-	-	-
14	60.000	33.0	Luft	-0.59e-05	0.12e-07	-0.90e-11	-	-

Tabelle 1b

Variante	Aufbau	Gamma	EPD	f'	Figur	Tabelle
F11	asphärische Sammellinse aus Ge und sphärische Zerstreuungslinse aus ZnSe	9,0	90 mm	ca. 200 mm	4	4
F12	diffraktive Sammellinse aus Ge	9,0	90 mm	ca. 200 mm	1	1a
F21	asphärische Sammellinse aus Ge und sphärische Zerstreuungslinse aus ZnSe	11,7	117 mm	ca. 255 mm	5	5
F22	diffraktive Sammellinse aus Ge	11,7	117 mm	ca. 255 mm	2	2
F31	asphärische Sammellinse aus Ge und sphärische Zerstreuungslinse aus ZnSe	20,0	200 mm	ca. 435 mm	6	6
F23	diffraktive Sammellinse aus Ge	20,0	200 mm	ca. 435 mm	3	3

Tabelle 2

F22								
Nr.	Radius	Dicke	Glas	C1	C2	C3	C4	D1
21	125.139	10.3	Ge	-	-	-	-	-
22	183.377	52.0	Luft	0.27e-07	0.24e-12	0.71e-16	-0.73e-20	-0.13e-04
W21								
23	-84.054	3.6	Ge	-	-	-	-	-
24	343.579	35.0	Luft	-	-	-	-	-
25	49.380	4.3	Ge	-0.81e-06	-0.99e-10	-	-	-
26	392.240	9.4	Luft	-	-	-	-	-

Tabelle 3

F23								
Nr.	Radius	Dicke	Glas	C1	C2	C3	C4	D1
31	216.154	17.8	Ge	-	-	-	-	-
32	318.359	129.1	Luft	0.54e-08	0.46e-13	-0.14e-17	0.50e-22	-0.77e-05

Tabelle 4

F11

Nr.	Radius	Dicke	Glas	C1	C2	C3
41	98.296	9.0	Ge	+0.50e-07	-0.54e-12	+0.39e-15
42	150.469	2.5	Luft	-	-	-
43	183.265	6.0	ZnSe	-	-	-
44	155.888	20.2	Luft	-	-	-

Tabelle 5

F21

Nr.	Radius	Dicke	Glas	C1	C2	C3
51	124.154	11.5	Ge	-	-	-
52	189.838	23.7	Luft	0.25e-07	0.83e-13	0.35e-16
53	221.920	7.0	ZnSe	-	-	-
54	176.808	20.7	Luft	-	-	-

Tabelle 6

F31

Nr.	Radius	Dicke	Glas	C1	C2	C3
61	189.55	20.0	Ge	-	-	-
62	281.113	82.4	Luft	0.68e-08	0.40e-13	0.47e-19
63	509.879	9.0	ZnSe	-	-	-
64	257.738	21.7	Luft	-	-	-

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

In der Tabelle Ib sind die für ein Ausführungsbeispiel bereitgestellten Varianten von Frontgruppen F11 bis F31 beschrieben, welche auch in den Linsenschnitten **Fig. 1** bis 6 und in den zugehörigen Tabellen 1a, 2 bis 6 beschrieben sind. Alle Frontgruppen kommen mit zwei Linsen mit einer Asphäre oder gar mit einer Linse, dann mit diffraktiver Fläche, aus.

Gamma ist die Vergrößerung des gesamten Fernrohrs, EPD der Eintrittspupillendurchmesser, f' die Brennweite des Objektivs Ob mit den jeweiligen Frontgruppen F11 bis F31.

Zwei damit kombinierbare Wechseloptiken W11, W21 sind durch eine sphärische Zerstreuungslinse **3, 4** und eine asphärische Sammellinse **5, 6** aus Germanium gebildet. Bei einer Baulänge von ca. 30 mm hat W11 einen Dehnungsfaktor von 1 : 3,4, W21 bei einer Baulänge von ca. 45 mm einen von 1 : 5,4. W11 ist in **Fig. 1** und 5 abgebildet und in Tabelle Ia enthalten, W21 ist in **Fig. 2** und Tabelle 2 näher beschrieben.

Wichtig ist, daß in allen Kombinationen der Frontgruppen F11 bis F31 und Wechseloptiken W11, W21 die Korrektur des Gesamtsystems stabil gut ist und stets an der Übergabestelle zur Basisoptik B die sphärische Aberration und die Koma gleich unterkorrigiert sind.

In den Tabellen 2 bis 6 sind die Linsendaten der verschiedenen Frontgruppen F11 und F21 bis F31, sowie der alternativen Wechseloptik W21 angegeben. Sie sind alle beliebig mit der Hintergruppe H und dem Okular Ok kombinierbar, natürlich sind auch andere Ausführungen und Kombinationen möglich.

Durch die Einführung der Wechseloptiken W11, W21 zur Sehfeldreduzierung wird die Verzeichnung beeinflusst. Beispielsweise ist in **Fig. 1** die Verzeichnung mit W11 negativ, ohne diese Gruppe aber schwach positiv.

Das Zwischenbild nach dem Objektiv Ob wird bewußt nicht vollständig korrigiert, einzelne Bildfehler werden vielmehr mit dem Okular Ok kompensiert.

Öffnungsfehler und Koma sind vorzugsweise nahezu beugungsbegrenzt korrigiert, die Hintergruppe H kompensiert hier die Unterkorrektur der Frontgruppe F11 bis F31. Der Astigmatismus ist negativ, das heißt, der tangentielle Fokus liegt weiter vor der Zwischenbildebene als der sagittale Fokus. Die Bildfeldwölbung ist leicht positiv und viel kleiner als der Astigmatismus. Die Pupillenaberration ist durch die Kompensation der Frontgruppe F11 bis F31 durch die Hintergruppe H korrigiert.

Beim Okular Ok dienen die zwei Menisken **11, 12; 13, 14** dazu, die Bildfeldwölbung klein zu halten. Der Petzvalradius des Okulars Ok kann damit deutlich (hier ca. siebenmal) größer als die Brennweite des Okulars Ok gemacht werden. Die Außenflächen sind konkav. Damit kann das Okular Ok die Bildfehler des Objektivs Ob kompensieren und das System verhält sich unempfindlich gegenüber Fertigungstoleranzen. Mindestens eine asphärische Fläche ist zur Korrektur der Pupillenaberration erforderlich. Ausgewählt sind hier als Asphären die dem Zwischenbild zugewandte konkave Fläche **11** und die der Austrittspupille **15** zugewandte Fläche **14**. Diese Korrektur der Pupillenaberration verhindert Vignettierungen bzw. vermeidet Überaperturen der großen Frontlinsen.

Die Konstruktion hat eine insgesamt geringe Empfindlichkeit gegen Fertigungstoleranzen, da die Korrektur entspannt ist. Sie ist kostengünstig, da fast ausschließlich Germanium verwendet wird, sowohl die Linsenzahl als auch die Zahl der Asphären minimal ist, und keine asphärischen Flächen auf toxischen Materialien (ZnSe, Chalkogenidgläser) zu fertigen sind.

Außer Germanium werden im Einzelfall wegen der höheren Dispersion auch ZnS oder ZnSe, sowie Chalkogenidgläser eingesetzt. Die Hintergruppe H bewirkt eine Vergrößerung von mindestens 1,6-fach und hat genügend Luftraum, so daß sie sowohl zur Fokussierung auf nahe Objekte als Innenfokussierung, wie auch zur aktiven Athermalisierung im üblichen Temperaturbereich von -40°C bis $+70^{\circ}\text{C}$ längs verschoben werden kann. Sie kann auch aus nur einer Linse bestehen.

Die beschriebenen Ausführungen sind für den Spektralbereich $7,5\ \mu\text{m}$ bis $10,5\ \mu\text{m}$ vorgesehen und dafür achromatisiert.

Die Erfindung kann jedoch auch im Spektralbereich $3\ \mu\text{m}$ bis $5\ \mu\text{m}$ angewendet werden und basiert dann auf Silizium als Linsenmaterial.

Patentansprüche

1. Infrarot-taugliches Kepler-Fernrohr mit Objektiv (Ob) und Okular (Ok),
 - wobei das Objektiv (Ob) aus einer positiven Frontgruppe (F11–F31) und einer negativen Hintergruppe (H) besteht und zwischen diesen eine Wechseloptik (W11, W21) als Vergrößerungswechsler eingesetzt werden kann,
 - wobei Hintergruppe (H) und Okular (Ok) fest vorgegeben sind und Frontgruppe (F11–F31) und Wechseloptik (W11, W21) jeweils austauschbar sind,
 - wobei bei jeder Frontgruppe (F11–F31) mit oder ohne Wechseloptik (W11, W21) die sphärische Aberration und die Koma vor der Hintergruppe (H) gleich unterkorrigiert sind.
2. Fernrohr nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß jede Kombination außer der Verzeichnung insgesamt beugungsbegrenzte Korrektur aufweist.
3. Fernrohr nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Wechseloptik (W11, W21) ein zweites Sehfeld (WFOV) erzeugt.
4. Fernrohr nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß es mit Wechseloptik (W11, W21) negative Verzeichnung aufweist, ohne diese eine positive Verzeichnung.
5. Afokales optisches System mit Zwischenabbildung bestehend aus einem Objektiv (Ob) und einem Okular (Ok), dadurch gekennzeichnet, daß das Objektiv (Ob) als Telesystem bestehend aus einer positiven Frontgruppe (F11–F31) und einer negativen Hintergruppe (H) ausgebildet ist, dessen Telefaktor Baulänge zu Brennweite (TF) kleiner als 0,7 ist, und daß das Okular (Ok) aus mindestens zwei Linsen (**11, 12; 13, 14**) besteht und der Abstand der reellen Austrittspupille (**15**) von der Bildebene (**16**) mindestens 1,3 mal, vorzugsweise über 1,4 mal, größer als die Brennweite des Okulars (Ok) ist und daß zum Vergrößerungswechsel wahlweise die Frontgruppe (F11–F31) des Objektivs (Ob) gewechselt werden kann oder zwischen Frontgruppe (F11–F31) und Hintergruppe (H) des Objektivs

(Ob) eine mindestens zweilinsige Wechseloptik (W12, W21) eingeschwenkt werden kann.

6. System nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die beiden Okularlinsen (**11, 12; 13, 14**) so durchgebo-
gen sind, daß der Petzvalradius des Okulars (Ok) mindestens sechsmal so groß ist wie die Okularbrennweite.

7. System nach Anspruch 5 oder 6, dadurch gekennzeichnet, daß die positive Frontgruppe (F11–F31) des Objektivs
(Ob) zur Korrektur der chromatischen Längsabweichung (CHL) als zweilinsiges System aus Germanium und einem
anderen Material größerer Dispersion, z. B. ZnSe, ZnS oder Chalkogenidgläser, ausgebildet ist-.

8. System nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Frontgruppe (F23) aus einer einzelnen Linse (**31, 32**),
insbesondere aus Germanium, mit einer diffraktiven Fläche (**31**) besteht.

9. System nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die negative Hintergruppe (H) des Objektivs (Ob) aus ei-
ner einzelnen Linse, insbesondere aus Germanium, besteht.

10. System nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die negative Hintergruppe (H) des Objektivs (Ob) zur
Korrektur der chromatischen Vergrößerungsdifferenz (CHV) aus einer negativen Ge-Linse und einer positiven
Linse aus einem Material größerer Dispersion, insbesondere ZnSe, ZnS, Chalkogenidgläser, besteht.

11. System nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die negative Hintergruppe (H) nur sphärische Flächen
aufweist.

12. System nach mindestens einem der Ansprüche 5–10, dadurch gekennzeichnet, daß für die negative Hinter-
gruppe (H) genügend Luftraum zur Verfügung steht, um mit dieser eine Innenfokussierung zur Einstellung auf nahe
Objekte und zur aktiven Athermalisierung in einem Temperaturbereich zwischen -40°C und $+70^{\circ}\text{C}$ vorzunehmen.

13. System nach mindestens einem der Ansprüche 5–11, dadurch gekennzeichnet, daß die negative Hintergruppe
(H) derart im Strahlengang steht, daß sie eine Vergrößerung von mindestens 1,6 mal bewirkt.

14. System nach mindestens einem der Ansprüche 5–12, dadurch gekennzeichnet, daß die Frontgruppe (F11–F31)
des Objektivs (Ob) aus einer diffraktiven Zerstreulinse aus Germanium und einer positiven Linse aus einem
Material mit geringerer temperaturabhängiger Brechzahlvariation, insbesondere ZnSe, ZnS, Chalkogenidgläser be-
steht, so daß durch die Materialauswahl das System athermalisiert und durch die diffraktive Fläche gleichzeitig
achromatisiert wird.

15. System nach mindestens einem der Ansprüche 5–13, dadurch gekennzeichnet, daß zur Verwendung im $3\text{--}5\ \mu\text{m}$
Spektralbereich als Grundmaterial Silizium statt Germanium verwendet wird.

16. Verfahren zur Erzeugung von infrarot-tauglichen Kepler-Fernrohren mit bedarfsgerechtem Sehfeld, bei dem
eine negative Objektiv-Hintergruppe (H) und ein Okular (Ok) mit Überkorrektur von sphärischer Aberration und
Koma fest vorgegeben wird, und eine positive Objektiv-Frontgruppe (F11–F31) dem benötigten Sehfeld entspre-
chend konstruiert wird.

17. Verfahren nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß eine Wechseloptik (W11, W21) zwischen Front-
gruppe (F11–F31) und Hintergruppe (H) einrückbar vorgesehen ist, welche das Sehfeld schaltbar erweitert und die
Korrektur mit Ausnahme der Verzeichnung nicht beeinflußt.

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

FIG. 1

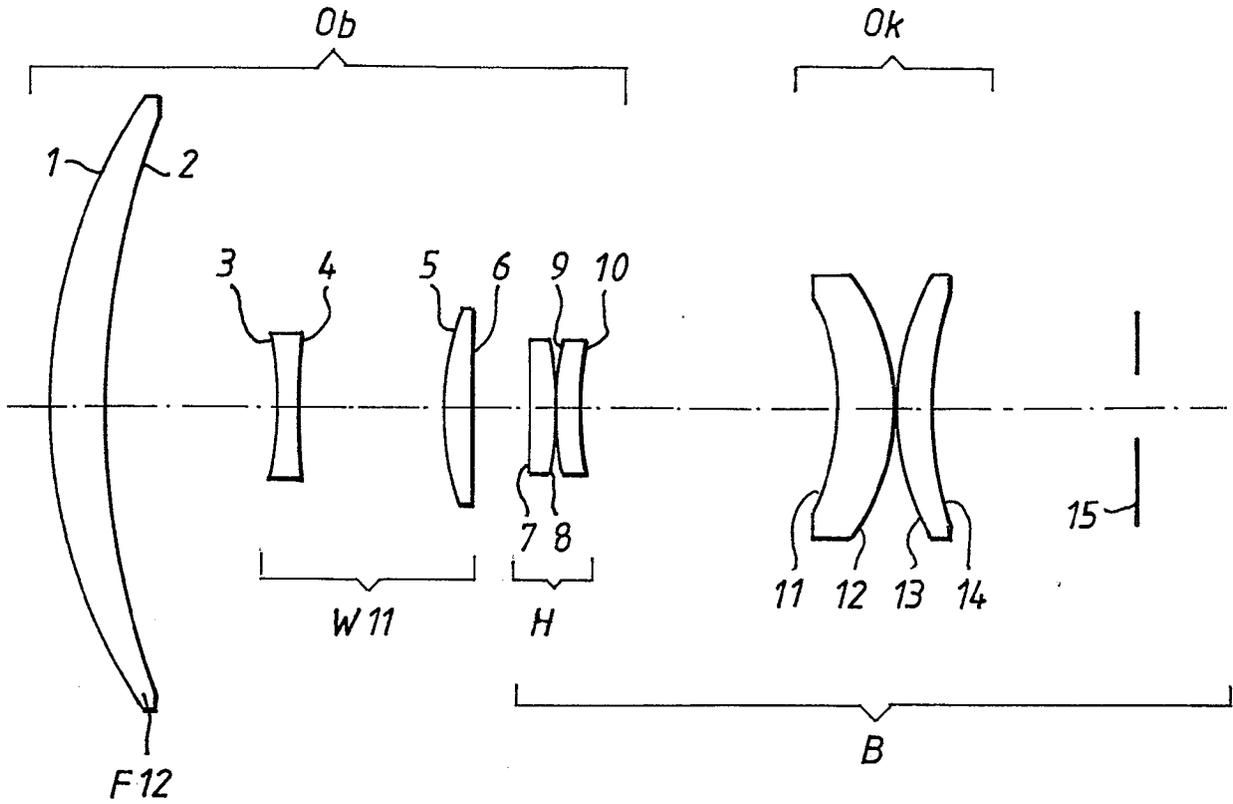


FIG. 2

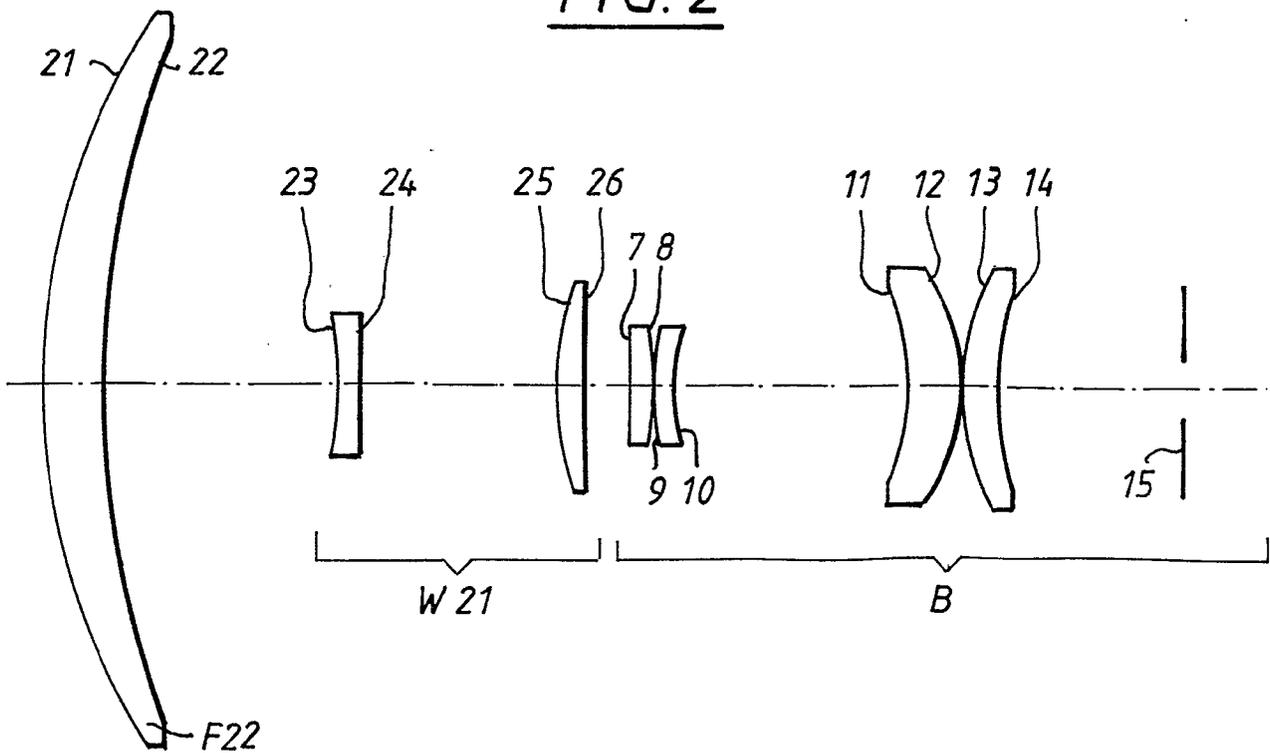


FIG. 3

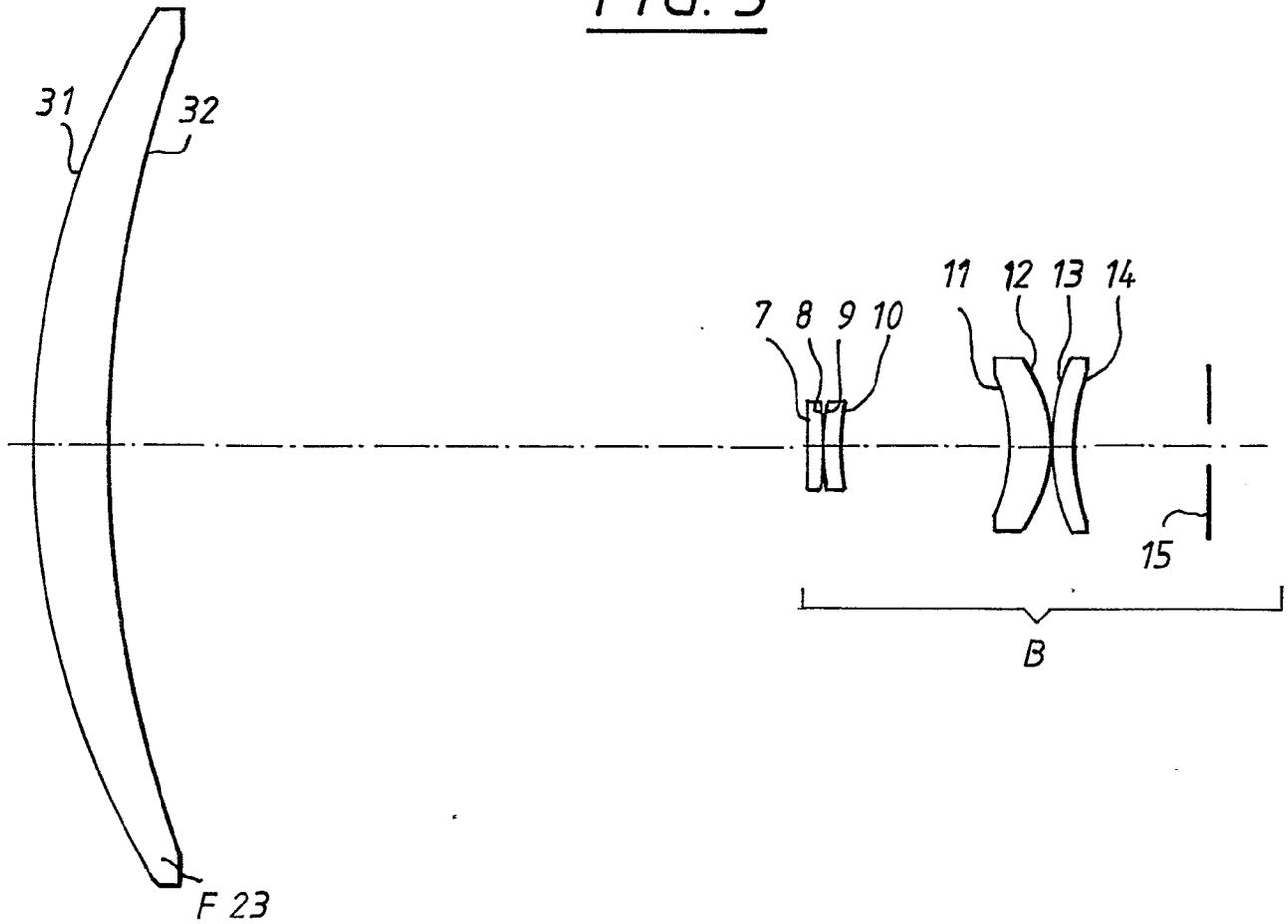


FIG. 4

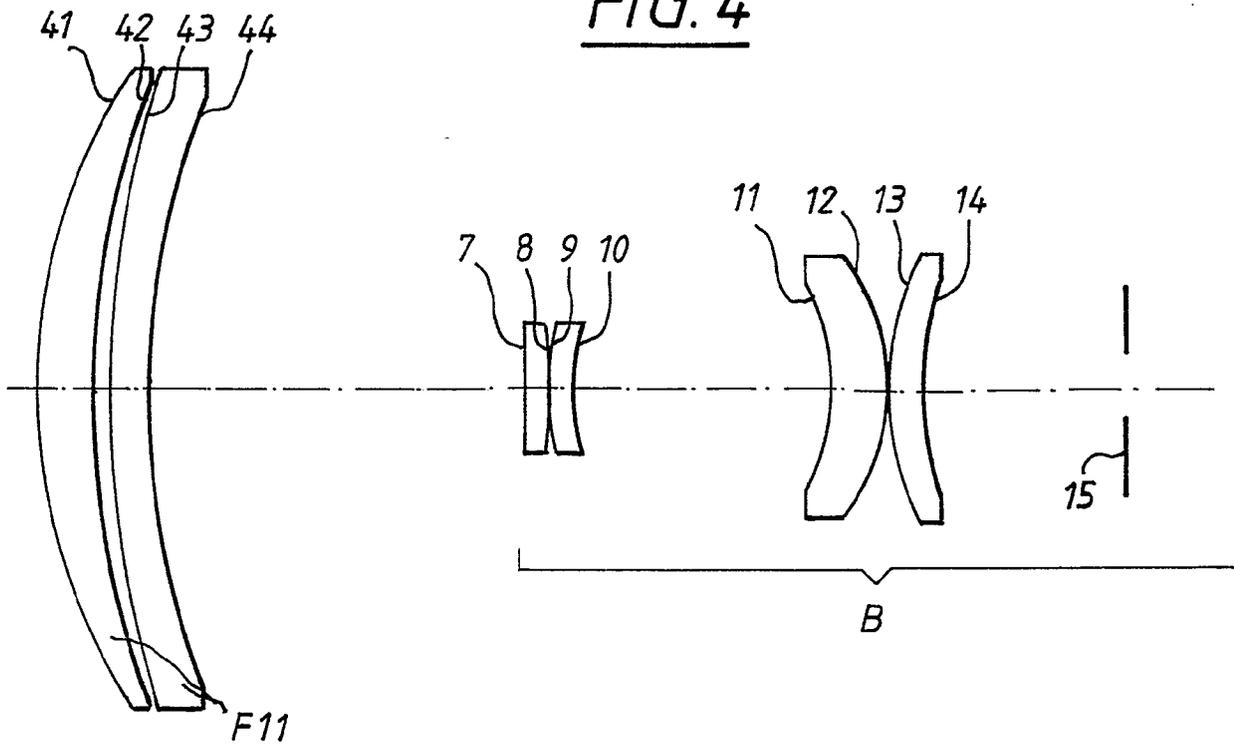


FIG. 5

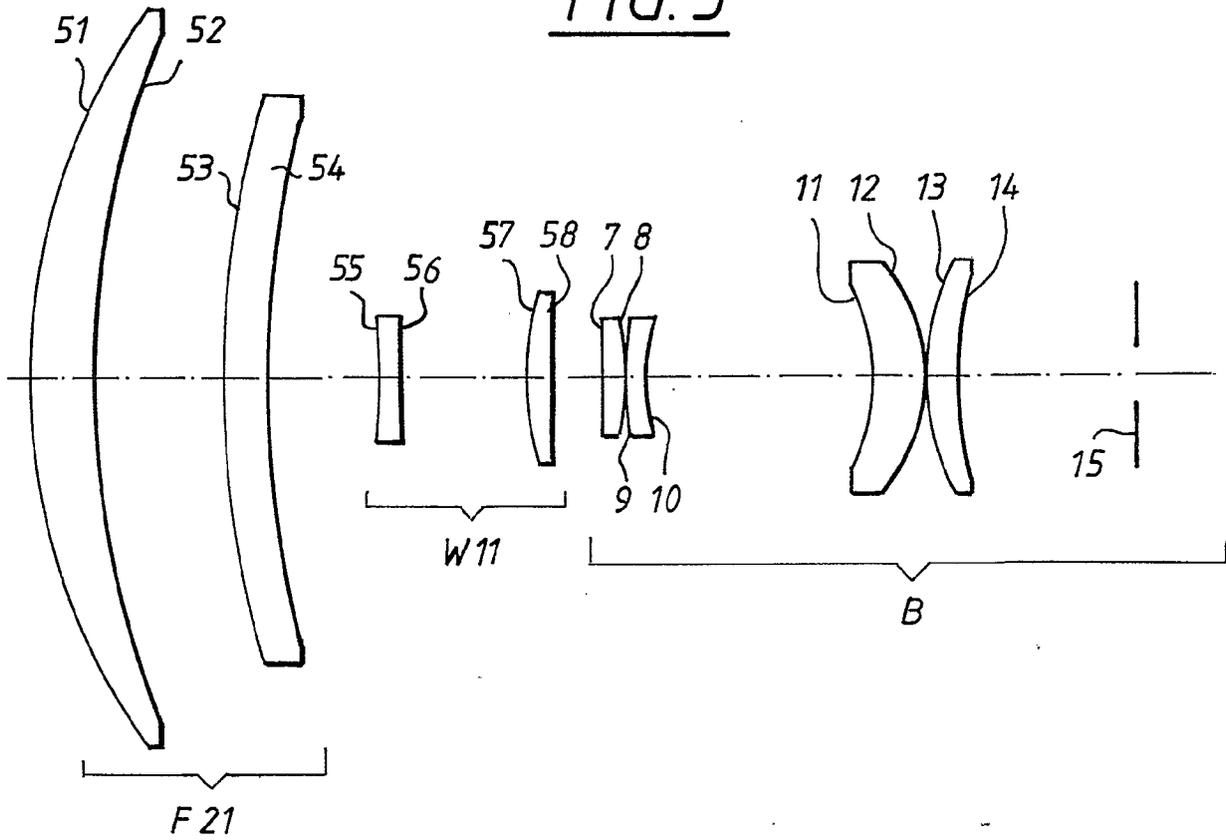


FIG. 6

