

VII. Astronomische Instrumente VII. 1

- für elektromagnetische Wellen:

Bereich	λ	Vom Boden	Vom Weltraum
Gamma	$< 0.1 \text{ \AA}$		x
Röntgen	$0.1 \dots 10 \text{ \AA}$		x
XUV "weiche Röntgenstr."	$10 \dots 100 \text{ \AA}$		x
EUV (Extreme UV)	$100 \dots 912 \text{ \AA}$		x
UV	$912 \dots 3000 \text{ \AA}$		x

Teleskope

Grundlagen

- Ziel 1: Große Sammelfläche
d.h. grosser Durchmesser D (Öffnung, i.d.R. kreisförmig)

Beispiele

	D	Fläche/cm ²	... relativ zum Auge
Auge (dunkel-adaptiert)	6mm	0.28	1
Amateur-Teleskop (OST)	35cm	1000	3400
ESO-VLT (Very Large Tel.)	8m	$5 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^6$
E-ELT (geplant) (Extremely L.T.)	40m	$1 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^7$

klassisch neu: $\Rightarrow$	"optisches UV" sichtbares Licht nahes IR	$3000 \dots 10000 \text{ \AA}$	x
IR (Infrarot)	$1 \mu \dots 0.1 \text{ mm}$	(nur "Feuchte")	x
Sub-mm	$0.1 \text{ mm} \dots 1 \text{ mm}$	x (neu!)	
Radio	$1 \text{ cm} \dots$	x	

- für Neutrinos
- für Gravitationswellen (noch nicht nachgewiesen)
- für kosmische Teilchenstrahlung

Übungsteleskop OST

(Our Small Telescope oder Overwhelmingly Small Telescope)

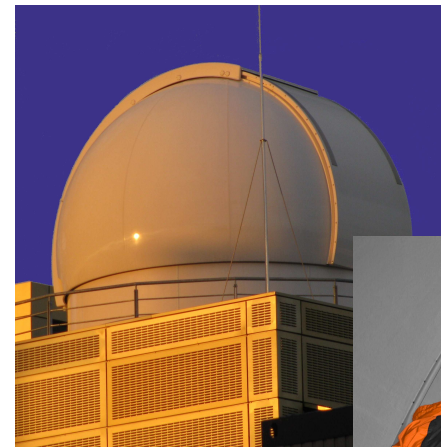


Bild links: Sternwartenkuppel mit 5m Durchmesser auf dem extra verstärkten Dach des Institutsgebäudes



Bild rechts: Teleskop (35cm Öffnung) mit seiner stabilen Montierung

European Southern Observatory (ESO)

7-05



European
Southern
Observatory

Neuer Standort:
Cerro Paranal,
(Atacama-Wüste)
4 gleiche Teleskope
Spiegeldurchmesser:
je 8m
Auxiliary Telescopes
(verschiebbar)

- Ziel 2: Abbildung mit gutem Auflösungsvermögen *

7-06a

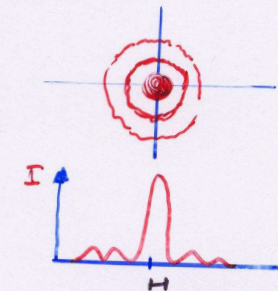
* d.h. Winkelabstand zweier Objekt-Punkte,
die gerade noch getrennt werden können

Begrenzung durch Beugung am Rand des Objektivs

Beugungstheorie: punktförmiges Objekt
erzeugt Beugungs-Scheibchen

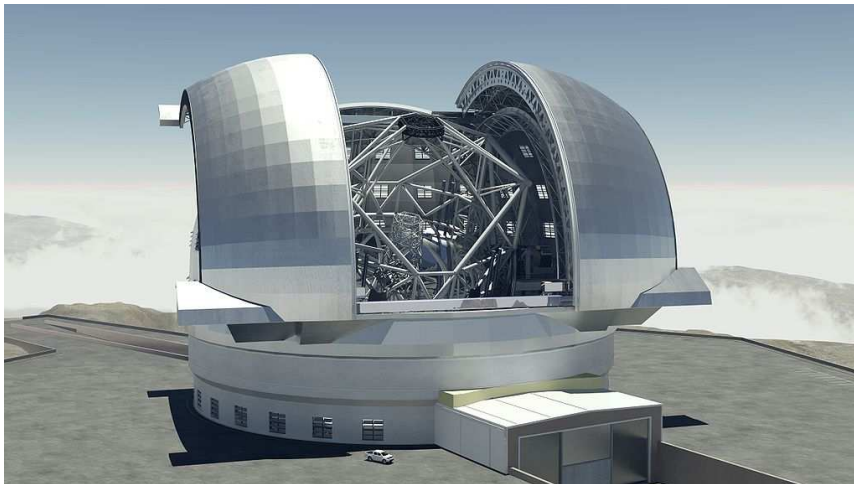
mit einem Halbmesser $\alpha_{\min}$

$$\tan \alpha_{\min} = 1.22 \cdot \frac{\lambda}{D}$$



European Extremely Large Telescope (E-ELT)

7-06



Bau beschlossen (2012) - Fertigstellung in ca. 10 Jahren ?
Standort: Cerro Armazones (Atacama-Wüste, Chile)
Spiegeldurchmesser: 40m (aus 800 hexagonalen Segmenten)
Kosten ca. 10^9 Euro

Beispiele:

VII.3 7-06b

	D	λ	$\tan \alpha_{\min}$
Auge (dunkel-adaptiert)	0.6 cm	$\approx 5500 \text{ \AA}$	$0.4''$ (Bogen min.)
Amateur- Teleskop	25 cm	$\approx 5500 \text{ \AA}$	$0.6''^*$ (Bogen sek.)
Hubble Space Telescope	250 cm	z.B. $4000 \text{ \AA}$ (Blau-Filter)	$0.04''$!
Mt. Palomar	500 cm	"	$0.02''^*$
Effelsberg Radio-Teleskop	100 m	z.B. 21 cm	$9'$

* Auflösung durch das atmosphärische "seeing" begrenzt !

Abbildungsmaßstab

7-07

α = Winkelabstand zweier Punkte des Objekts

α = linearer Abstand auf dem Bild in der Bildebene

$$\alpha = f \cdot \tan \alpha \quad f = \text{"Brennweite"}$$

Beispiele:

- Für $\alpha \approx 0.5^\circ$ (ϕ von Sonne, Mond!) ergibt sich:

$$\alpha \approx f / 100$$

z.B.: typisches Amateur-Teleskop: $f = 2.00 \text{ m}$ (RC-Focus)

$\Rightarrow$ Sonne, Mond passen gut auf Kleinbildfilm $24 \times 36 \text{ mm}$

- Das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges beträgt bestenfalls $1'$ (ist also nicht beugungs-begrenzt!).

Mit $f = 25 \text{ mm}$ folgt, daß die Sehzellen auf der Retina nicht größer sind als

$$\alpha = 25 \text{ mm} \cdot \tan\left(\frac{1}{60}^\circ\right) \approx \underline{7 \mu\text{m}}$$

7-09

Problem: Linsen-Größe aus Gewichtsgründen beschränkt auf $D \approx 1 \text{ m}$

"Klassische" Refraktoren

a) lange Brennweiten, kleines Gesichtsfeld, zweilinsige Achromaten

z.B. Yerkes : $D = 1 \text{ m}$, $f = 19.4 \text{ m}$

b) kurze Brennweiten, großes Gesichtsfeld, mehrlinsige Achromaten

$\Rightarrow$ "Astographen"; typisch $D = 50 \text{ cm}$, $f = 3.50 \text{ m}$

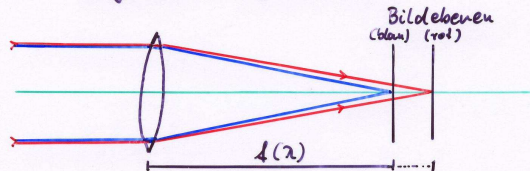
Refraktoren für wissenschaftliche Zwecke werden heute nicht mehr gebaut.

Refraktoren (Linsen-Fernrohre)

VII.4

7-08

Objektiv = Glas-Linse

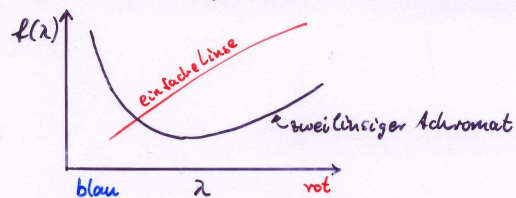


Problem: Farbfehler (chromatische Aberration)

Brechungsindex nimmt mit wachsender Wellenlänge ab

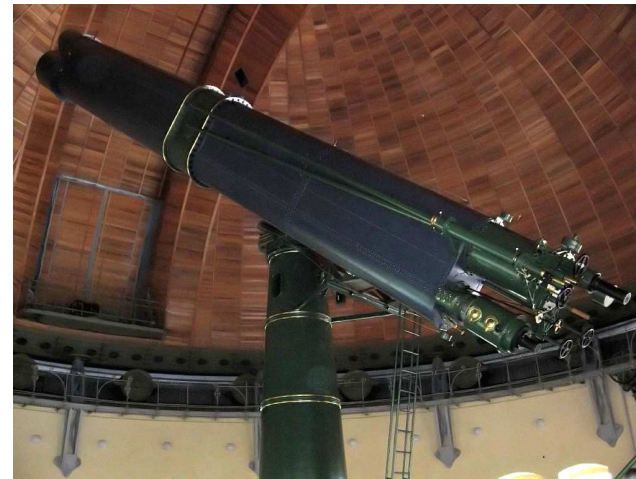
$\Rightarrow$ Brennweite $f(\lambda)$ wächst mit λ

Abhilfe: mehrlinsige Objektive aus verschiedenen Glassorten



Der Große Refraktor in Potsdam (Telegrafenberg)

7-10



Einweihung 1899

Doppelfernrohr mit 2 Objektiven:

- 80 cm Durchmesser, photographisch

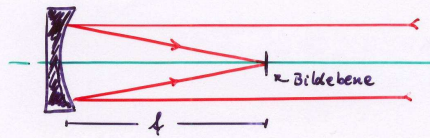
- 50 cm Durchmesser, visuell

Brennweite ca. 12 m

Spiegel - Teleskope

VII. 5-11

a) Parabol - Spiegel



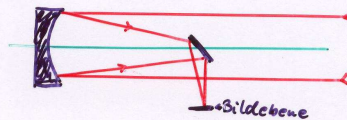
Spiegelfläche =
Rotations-Paraboloid

- ⊕ kein Abbildungsfehler bei achsenparallelen Strahlen
- ⊖ starkes "Koma" außerhalb der Bildmitte → nutzbares Gesichtsfeld ist sehr klein

Mithilfe eines Sekundärspiegels: Verlegung des Fokus

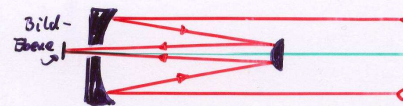
1. Newton - System

Flusspiegel unter 45°



2. Cassegrain - System

hyperbolischer Konvex-Spiegel
(Verlängerung der Brennweite!)
Fokus hinter Bohrung im Hauptspiegel

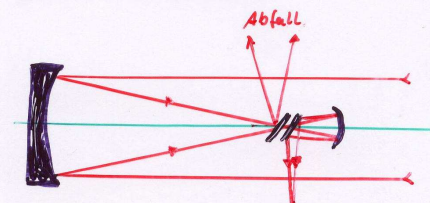


Abwandlung: Ritchey - Chrétien - System:

hyperbolische Form von Primär- u. Sekundärspiegel
→ Korrektur des "Koma" → größeres Gesichtsfeld

3. Gregory - System (bei Sonnen-Teleskopen!)

elliptische Konkav-Sekundärspiegel hinter dem Fokus
→ erlaubt Herausspielen des Lichtabfalls durch halbdurchlässigen Spiegel im Fokus



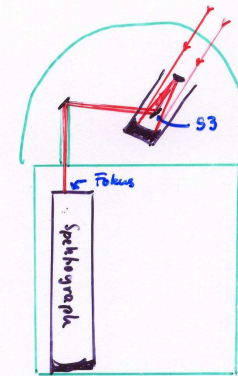
7-12

4. Coudé - System

mehrere Umlenkspiegel:
(bewegliches) Teleskop

→ ortsfester Fokus

- a) durch die Bewegungsachsen oder
- b) mit einem nachgeführten Spiegel (Abb. → S3)



Strahlengang zum Coudé-Fokus des 2.2m-Teleskops am DSA3, Calar Alto

VII. 6 7-13

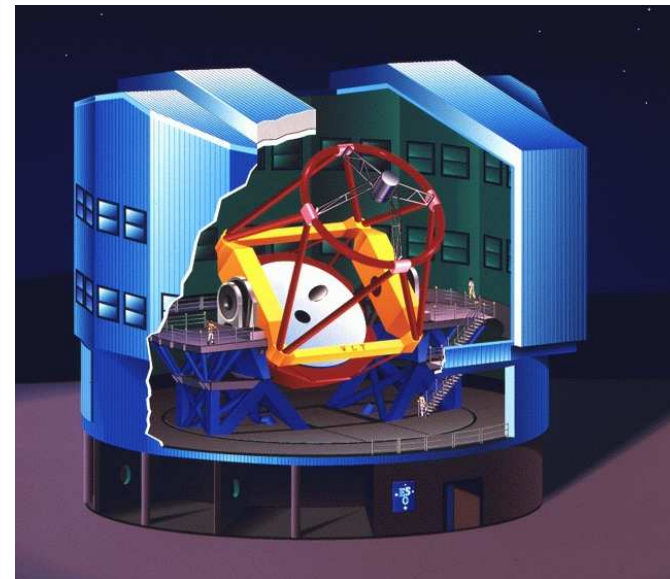
5. Nasmyth-Fokus

Ortsfester Brennpunkt bei Alt-Azimuth-Montierungen durch die Elevationsachse
zwei Plattformen (auf beiden Seiten), die sich in Azimuth mitbewegen
z.B. VLT (siehe Abb. nächste Seite)

Very Large Telescope (VLT) der ESO:

7-14

Eine der vier Teleskop-Einheiten (*Unit Telescope*, UT)



- Azimutale Montierung
- Plattform und Kuppel drehen sich mit
- 2 Nasmyth-Foci auf der Elevations-Achse
- Dünne Spiegel, aktive Optik

Praktische Probleme bei großen Spiegeln

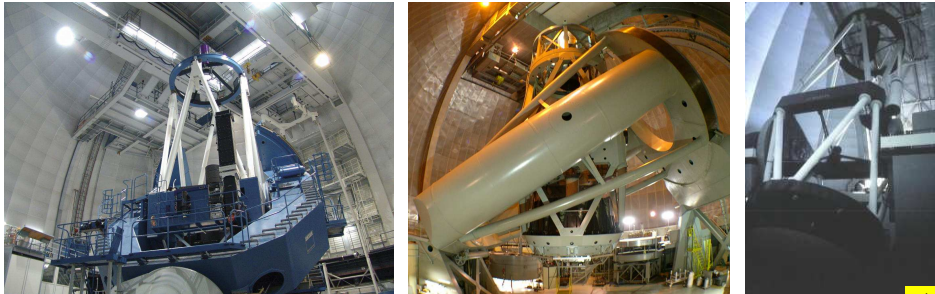
7-15

Mechanische Stabilität erfordert *dicke* Spiegel

- großes Gewicht, aufwendige Montierung
- schwierige Herstellung der Rohlinge: riesige Öfen, jahrelange Abkühlung der Schmelze
- nur langsamer Temperatúrausgleich → thermischer Verzug (minimiert durch Verwendung von Glaskeramik mit geringem Ausdehnungskoeffizienten, *Zerodur*)

Größte „dicke“ Spiegel:

Calar Alto (3.5m), ESO La Silla (3.6m), Mt. Palomar (5m), BTA (6m)

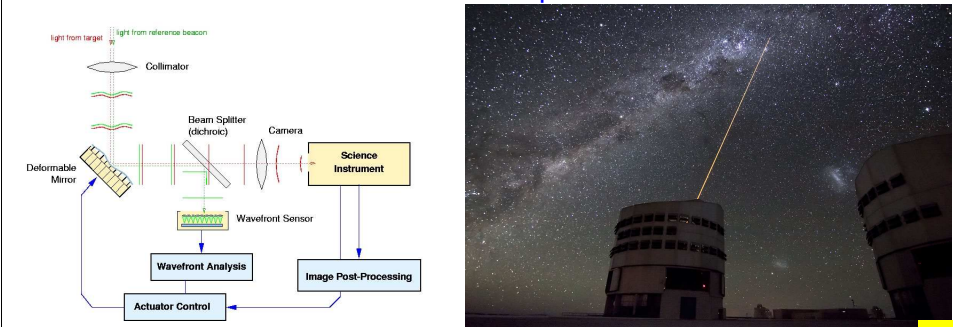


Adaptive Optik

7-17

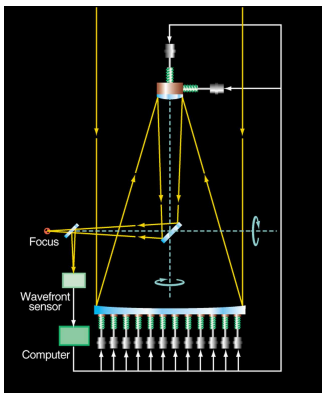
Schnelle Korrekturen zur Eliminierung der atmosphärischen Szintillation („Seeing“) → Bildschärfe im Idealfall beugungsbegrenzt wie vom Weltraum aus!

- Ständige *schnelle* Analyse der Wellenfront eines hellen Referenzsterns im Gesichtsfeld
- Korrektur durch Deformation eines Hilfsspiegels mit piezoelektrischen Aktuatoren
- Da oft kein Referenzstern im Feld: *Laser Guide Star* (LGS) durch Na-Fluoreszenz in der oberen Atmosphäre



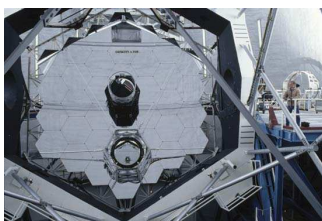
Aktive Optik - der einzige Weg zu Spiegeln > 6m

7-16



Prinzip:

- relativ dünne, mechanisch nicht stabile Spiegel
- Lagerung auf vielen, elektrisch schnell verstellbaren Stempeln (*Aktuatoren*)
- Regelkreis: Fortlaufende Analyse des Bildes → Korrigieren der Spiegelform auf optimale Abbildungsschärfe
- Auch Korrektur der Sekundärspiegel-Position möglich



Zusätzlich bei Durchmessern ab ca. 10m:

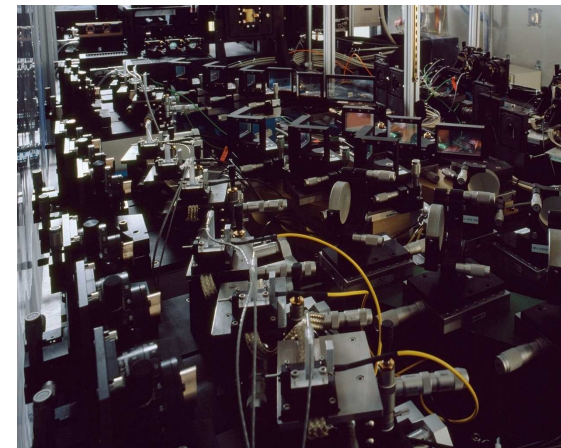
- Spiegel aus hexagonalen Segmenten
- Aktive Optik korrigiert ständig die Ausrichtung der Segmente

Beispiel: Keck-Teleskope (10m) auf Hawaii

Interferometrisch gekoppelte Teleskope

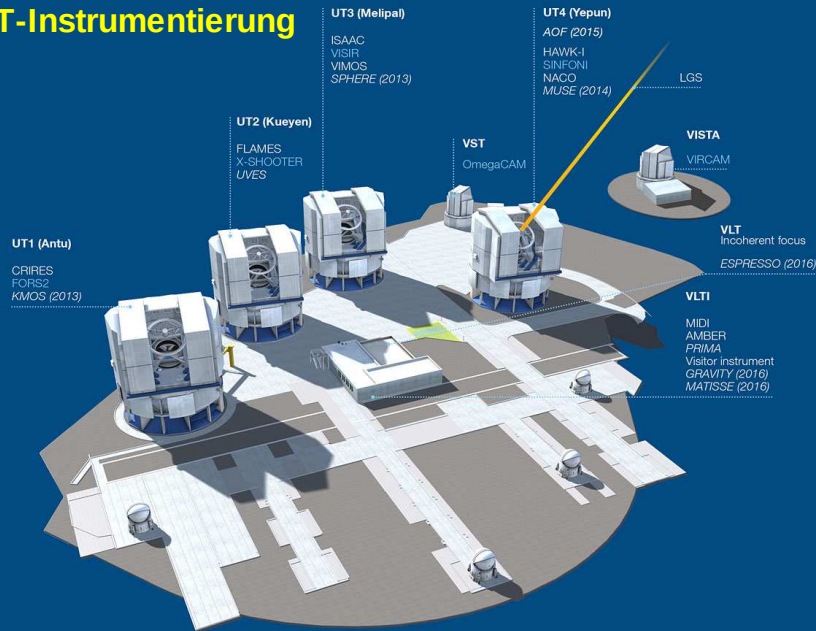
7-18

- Keck-Teleskope (10m) - Hawaii
- *Large Binocular Telescope* (LBT) - zwei 8m-Spiegel auf derselben Montierung (mit Beteiligung des AIP) - Mount Graham, USA
- *VLT Interferometer* (VLTI) mit den UTs und Hilfsteleskopen (1.8m) in verschiedenen Kombinationen



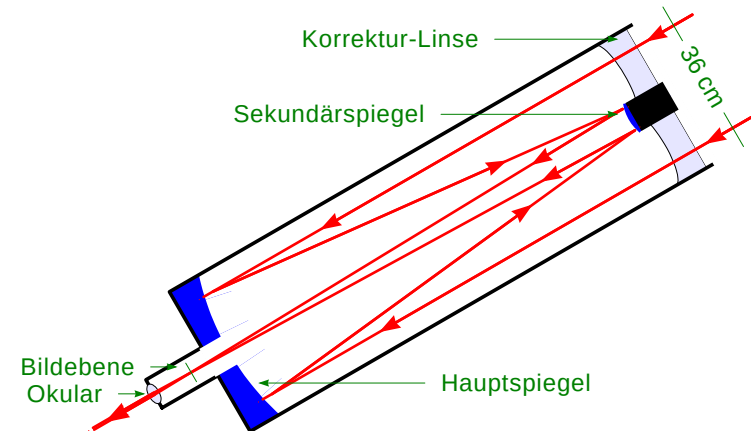
VLT-Instrumentierung

7-19



Our Small Telescope (OST): - Schmidt-Cassegrain-Optik ⁷⁻²¹

- Hauptspiegel *sphärisch* (nicht parabolisch) → großes nutzbares Gesichtsfeld
- Korrektur-Linse (*Schmidt-Platte*) gegen sphärische Aberration
- Konvexer Zweitspiegel → lange effektive Brennweite (4m)
- Brennpunkt hinter Durchlass im Hauptspiegel (*Cassegrain-Fokus*)



b) Schmidt -Spiegel

nach Bernhard Schmidt, Hamburg 1930/31

7-20

VII. 7

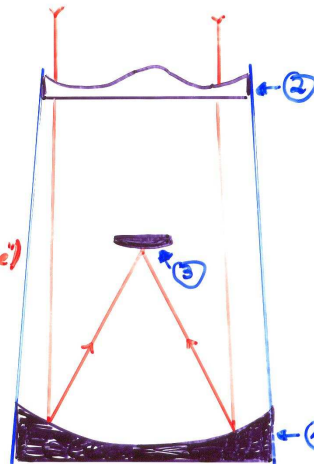
① sphärischer Hauptspiegel

- keine ausgezeichnete Achse
→ kein Koma, großes Bildfeld
- aber: "sphärische Aberration":
kein Brennpunkt!

deshalb: ② Korrektur-Platte ("Schmidt-Platte")

= spezielle Linse, entsprechend der Differenz
Kugel - Paraboloid

③ sphärisch gekrümmte Bildebene



Fokal- Instrumentierung

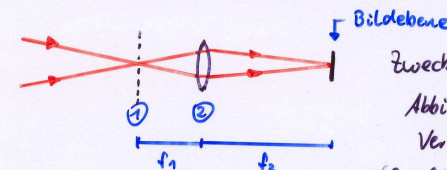
VII. 8 ⁷⁻²²

viele Alternativen:

1) Detektor direkt in der Fokalebene (z.B. Fotoplatte)

2) "Okular - Projektion"

Abbildung des reellen Bildes in der Fokalebene ①
durch eine weitere Linse ("Okular") ② mit Brennweite f



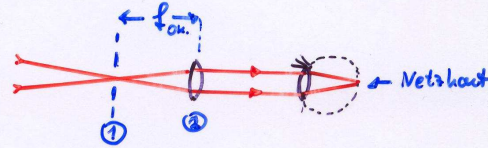
Zweck: Vergrößerung des
Abbildungsmaßstabs im
Verhältnis f_2/f_1
(Beachte: $\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{f}$)

Auch Okular-Linsen haben Abbildungsfehler!

wg. chromatische Aberration → mehrlinsige Okulare!

3) Okular + Augea) Keplersches Fernrohr:

Okular = Sammellinse ②



Vorteil: in der Fokalebene ① angebrachten Fadentrennz,
Fadenmikrometer etc. wird scharf abgebildet.

- das Bild erscheint auf dem Kopf stehend!

Vergrößerung:

(des Winkels, unter dem zwei Punkte des Objekts
erscheinen, verglichen mit dem "unbewaffneten" Auge)

$$V = \frac{f_{\text{Objektiv}}}{f_{\text{Okular}}}$$

"Nützliche Vergrößerung"

abgestimmt auf das Auflösungsvermögen von Auge und Teleskop

z.B.: Teleskop: 1" (Seeing - begrenzt)

Auge : 1'

⇒ nützliche Vergrößerung: 60-fach.

"Normalvergrößerung"

Austrittsbündel auf Pupillendurchmesser (6mm) abgestimmt
(wenn größer ⇒ Lichtverschwendung)

Ø Austrittsbündel = Objektdurchmesser D / Vergrößerung

$$\Rightarrow \text{Normalvergrößerung} = \frac{D}{6 \text{ mm}}$$