

Teleskope und Experimente

(Beschränkung auf den optischen Wellenlängenbereich)

Werner Becker

Max-Planck Institut für extraterrestrische Physik

Garching

web@mpe.mpg.de

<http://www.xray.mpe.mpg.de/~web>

16. Februar 2004 / TUM

Übersicht der Vorlesung:

1. Informationsträger / messbare Größen
2. Elektromagnetisches Spektrum
3. Helligkeiten
4. Grenzen der Beobachtbarkeit
5. Auswirkungen der Erdatmosphäre
6. Astronomische Beobachtungen ausserhalb der Erdatmosphäre
7. Gegenwärtige Teleskope und Experimente
8. Zukünftige Teleskope

Informationsträger:

- Elektromagnetische Strahlung
- Elementarteilchen
- Atomkerne
- Festkörper (Staub; Materie, z.B. Meteoriten)
- Gravitationswellen
- Heute: Beschränkung auf elektromagnetische Strahlung!

Messbare Grössen:

im Wellenbild	im Teilchenbild
Energiestromdichte S	Photonenstrom Γ
Wellenlänge λ (Frequenz ν)	Teilchenenergie $E = h\nu = hc/\lambda$
Phase φ	Ankunftszeit t
Normale der Wellenfront \vec{S}/S	Bewegungsrichtung \vec{v}/v
Polarisation \vec{P}	Drehimpuls \vec{L}

Das elektromagnetische Spektrum:

Definition der Wellenlängenbereiche

Radio	$1 \text{ m} \gtrsim \lambda \gtrsim 1 \text{ cm}$	$(\nu \sim 10^9 \text{ Hz})$
Millimeter/Sub-mm	$5 \text{ mm} \gtrsim \lambda \gtrsim 0.5 \text{ mm}$	$(\nu \sim 10^{11} \text{ Hz})$
Fernes Infrarot (FIR)	$200 \mu\text{m} \gtrsim \lambda \gtrsim 20 \mu\text{m}$	$(\nu \sim 10^{12} \text{ Hz})$
Mittleres Infrarot	$20 \mu\text{m} \gtrsim \lambda \gtrsim 3 \mu\text{m}$	$(\nu \sim 10^{13} \text{ Hz})$
Nahes Infrarot (NIR)	$3 \mu\text{m} \gtrsim \lambda \gtrsim 1 \mu\text{m}$	$(\nu \sim 10^{14} \text{ Hz})$
Optischer Spektralbereich	$1000 \text{ nm} \gtrsim \lambda \gtrsim 300 \text{ nm}$	$(\nu \sim 10^{15} \text{ Hz})$
Ultraviolett	$300 \text{ nm} \gtrsim \lambda \gtrsim 100 \text{ nm}$	$(h\nu \sim 3\text{--}10 \text{ eV})$
Extremes Ultraviolett (EUV)	$100 \text{ nm} \gtrsim \lambda \gtrsim 10 \text{ nm}$	$(h\nu \sim 10\text{--}100 \text{ eV})$
Weiche Röntgenstrahlung	$0.1 \text{ keV} \lesssim h\nu \lesssim 2 \text{ keV}$	$(\lambda \sim 1 \text{ nm})$
Harte Röntgenstrahlung	$2 \text{ keV} \lesssim h\nu \lesssim 100 \text{ keV}$	$(\lambda \sim 0.1 \text{ nm})$
Gammabereich	$h\nu \gtrsim 100 \text{ keV}$	

Beachte: Die Bezeichnungen der Wellenlängenbereiche ist nicht unbedingt identisch mit Lehrbuchkategorien; Übergänge oft durch instrumentelle Bedingungen gegeben (Detektoren; Reflektivität und Transmissivität optischer Elemente, etc.).

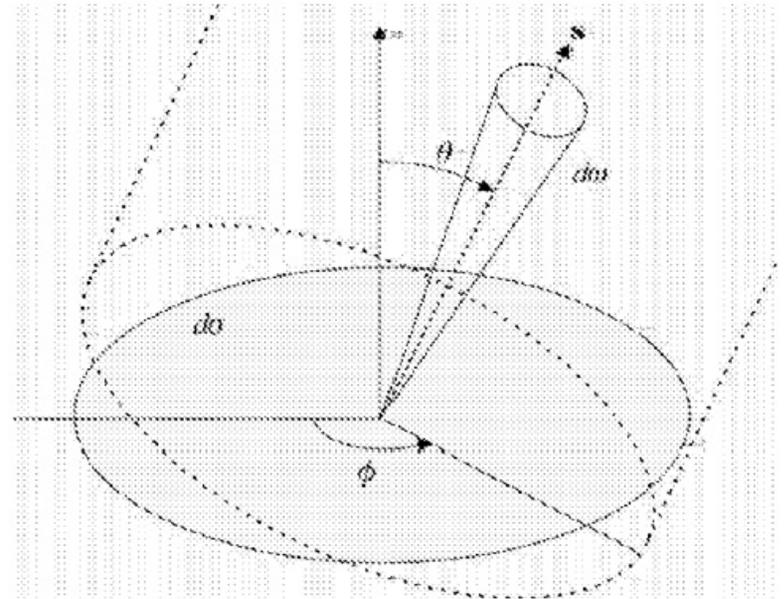
Beispiel: 780-1000nm früher Nahinfrarot, heute optisch.

Leuchtkraft und Strahlungsstrom:

Betrachte kugelsymmetrische Strahlungsquelle mit Radius R , z.B. Hohlraumstrahler (schwarzer Körper) mit Temperatur T . *Intensität* I :

$$I = B(T) = \int B_\nu(T) d\nu$$

ist Mass für die abgestrahlte Leistung pro Fläche und Raumwinkel. Für reale Objekte ist $I = I(\theta, \phi)$.



Leuchtkraft und Strahlungsstrom:

Durch Integration über θ, ϕ „nach aussen“ erhält man den *Strahlungsfluss*:

$$F^+ = \int_{\theta} \int_{\phi} I d\theta d\phi = \pi B(T).$$

Integration über die Oberfläche liefert die Gesamtstrahlungsleistung (*Leuchtkraft*):

$$L = 4\pi R^2 \times F^+$$

Leuchtkraft und Strahlungsstrom:

Ein Beobachter in Entfernung r misst den *Strahlungsstrom* S (engl. *flux*):

$$S = \frac{L}{4\pi r^2} = F^+ \left(\frac{R^2}{r^2} \right)$$

Obige Gleichungen genauso gültig für monochromatische Größen. Verknüpfung von S_ν und S_λ :

$$S_\nu d\nu = S_\lambda d\lambda \quad \text{und} \quad \lambda = \frac{c}{\nu}$$

Die astronomische Magnitudenskala:

Neben dem Strahlungsstrom ist ein zweites System gebräuchlich, vor allem in der optischen Astronomie. Dieses geht zurück auf Hipparch:

hellste Sterne = 1. Grösse (\Leftrightarrow Magnitude oder kurz „mag“);

schwächste Sterne = 6. Grösse.

Physiologische Rechtfertigung: *Auge hat „logarithmische Wahrnehmungsskala“.*

D.h. konstante Verhältnisse $S_1/S_2 \Rightarrow$ Differenzen $m_1 - m_2$.

Definition:

$$m_1 - m_2 = -2.5 \times \log_{10} \left(\frac{S_1}{S_2} \right)$$

$$\frac{S_1}{S_2} = 10^{-0.4(m_1 - m_2)}$$

Da mag definiert ist als Logarithmus eines Verhältnisses, handelt es sich um eine dimensionslose Grösse.

Die astronomische Magnitudenskala

Nullpunkt der Magnitudenskala per Konvention:

Für α Lyrae (Wega) gilt $m \equiv 0$.

D.h. $m = 25$ mag bedeutet, dass der Strahlungsstrom um den Faktor $10^{-0.4 \times 25} = 10^{-10}$ geringer ist als der von Wega.

Photonenzahl:

Umrechnung von Strahlungsstrom in Anzahl Quanten pro Fläche und Zeiteinheit (\Rightarrow *Photonenstrom* Γ):

$$\Gamma = \frac{S}{h\nu} = \frac{S\lambda}{hc}$$

Beispiel:

- ▣ Quelle mit $S_\lambda = 2 \times 10^{-20} \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$ im visuellen Spektralbereich (entspricht etwa $V = 23$ mag).
- ▣ Photonenenergie bei $\lambda = 500\text{nm}$: $h\nu \approx 2 \text{ eV} = 4 \times 10^{-19} \text{ J}$.

\Rightarrow Photonenstrom:

$$\Gamma_\lambda = 0.05 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$$

Grenzen der Beobachtbarkeit:

Die Genauigkeit von astronomischen Beobachtungen werden begrenzt durch:

Umgebungseinflüsse:

Absorption und Turbulenz in der Atmosphäre; Streustrahlung unerwünschter Quellen.

Technische Limits:

Z.B. Auflösungsvermögen der Apertur; Verfügbarkeit geeigneter Detektoren; begrenzte Genauigkeit in der Eichung instrumenteller Effekte (z.B. Flatfields); Verstärkung und Diskretisierung des Signals (z.B. Ausleserauschen eines CCDs).

Fundamentales Limit: Statistische Fluktuationen im Strahlungsfeld.

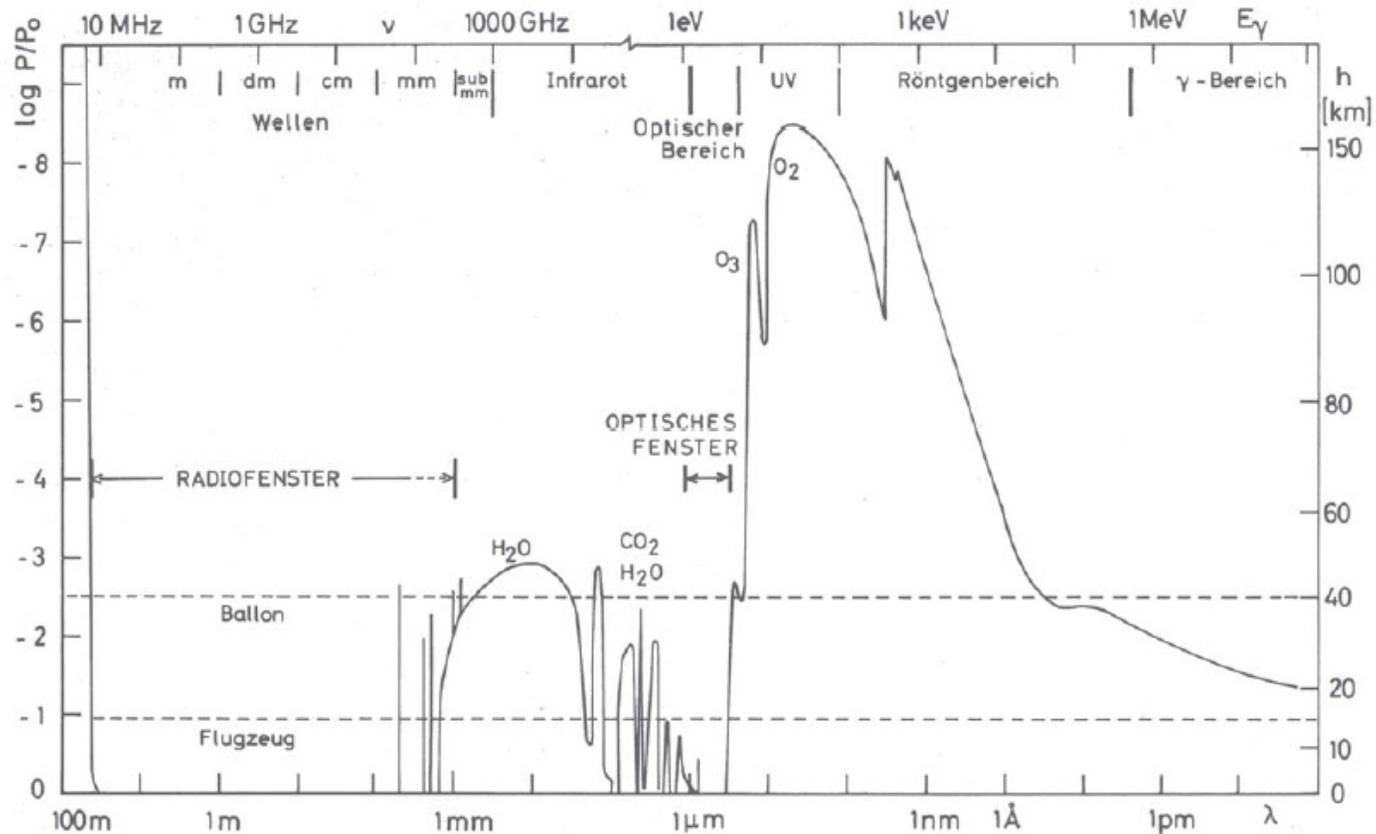
Auswirkungen der Erdatmosphäre:

- Absorption, Streuung
- Emission
- Refraktion
- Szintillation

Absorption und Streuung:

- **Streuung an Wasserdampf:** Für Tröpfchengröße $a \gg \lambda$ unabhängig von Wellenlänge => Wolken
- **Elektronische Übergänge und Ionisation von Luftmolekülen:** Relevant für $\lambda < 320 \text{ nm}$ => Atmosphäre völlig undurchsichtig für UV- und Röntgenstrahlung
- **Anregung von Rotations- und Schwingungsübergängen:** Vor allem H_2O , CO_2 . Relevant für IR-Bereich.
- **Streuung an Luftmolekülen:** Für simple 2-atomige Moleküle ist Streuquerschnitt $\sigma \propto \lambda^4$ (Rayleigh-Streuung); relevant für optischen Bereich. => Atmosphärische Extinktion, am stärksten in nahem UV (=> blauer Taghimmel, roter Sonnenuntergang).
- **Absorption durch freie Elektronen:** Für Wellenlängen $> 30 \text{ m}$ ($\nu < 10 \text{ MHz}$) ist Ionosphäre total reflektierend. Genaue Frequenzgrenze abhängig von Elektronendichte, d.h. variabel mit Tag/Nacht und Sonnenaktivität.

Absorption und Streuung:

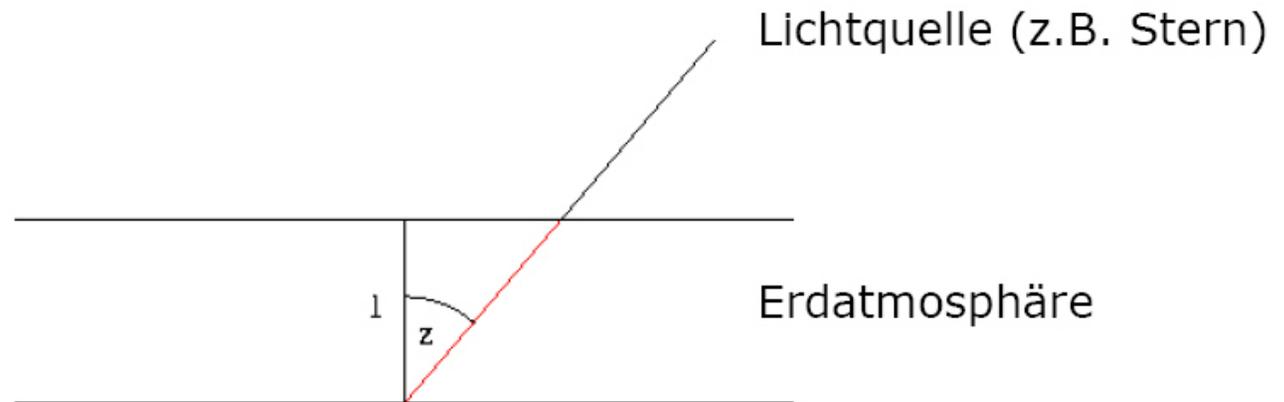


h : Höhe in der die Intensität der eintreffenden Strahlung um 50% geschwächt ist

Airmass:

Wegen Absorption durch Erdatmosphäre sind beobachtete Strahlungs- bzw. Photonenströme abhängig von der Weglänge durch die Erdatmosphäre => *airmass*.

Beobachtete Größen werden daher auf Zenitdistanz $z = 0^\circ$ normiert.



Näherung für kleine z :
$$\text{airmass} \approx \frac{1}{\cos z} = \sec z$$

Szintillation und Seeing:

Man unterscheidet:

- **Richtungs-Szintillation (oder Seeing):**

Ursache: Brechungsindex von Luft ist nicht räumlich konstant, wg. Turbulenzen in Erdatmosphäre.

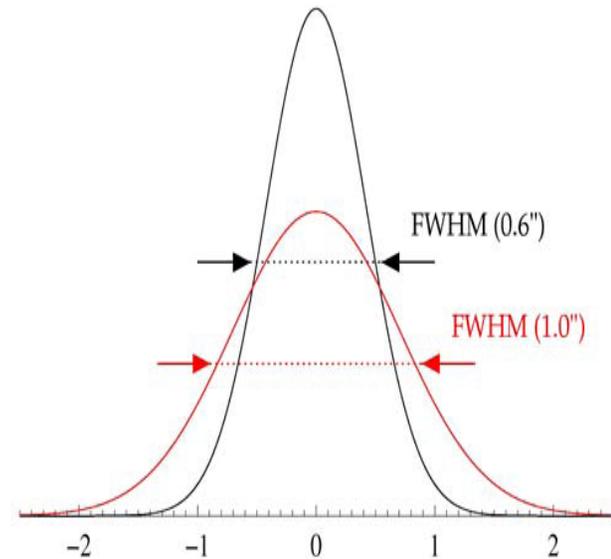
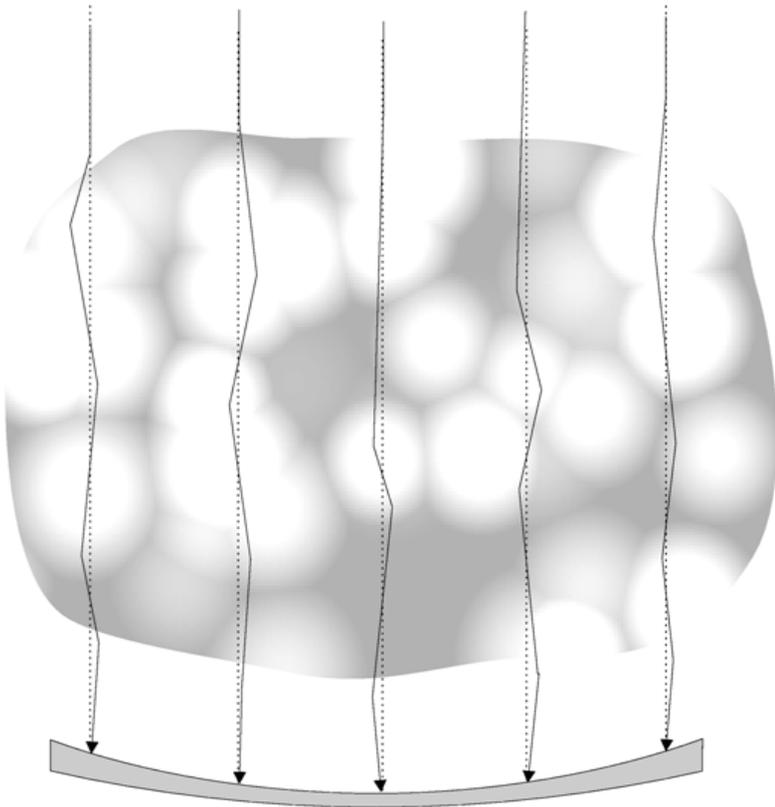
Folge: Ursprünglich planparallele Wellenfronten erreichen das Teleskop aus unterschiedlichen Richtungen.

- **Beispiel für ähnlichen Effekt:** Flimmernde Luft über heißem Asphalt.
- Kann nicht nur in hohen Luftschichten, sondern auch in Bodennähe oder sogar im Teleskopgebäude entstehen („Dome seeing“)

- **Intensitäts-Szintillation:** Entsteht durch Dichtefluktuationen.

Seeing:

Folge der Richtungs-Szintillation (\Leftrightarrow Seeing):
Punktquellen werden zu „Seeing-Scheibchen“ verschmiert.



Zentraler Bereich kann i.d.R. gut durch Gaussfunktion modelliert werden; Flügel aber breiter (\Rightarrow Moffat-Funktion)

Astronomische Beobachtungen ausserhalb der Erdatmosphäre

Wenn Erdatmosphäre so viele Probleme mit sich bringt, warum dann nicht vom Weltraum aus beobachten?

- Weltraumteleskope sind extrem teuer!

Beispiel: HST (d=2.4m, Fläche=4.5m²) hat 1.5 Milliarden US-\$ gekostet (ohne COSTAR), d.h. ca. 300 Mio. Euro pro m²

Spiegelfläche; ESO-VLT (d=4x8.2m, Fläche=211m²) „nur“ 0.5 Milliarden Euro, d.h. 2.4 Mio Euro pro m² Spiegelfläche!

- Wartung (in der Regel) nicht möglich

Astronomische Beobachtungen ausserhalb der Erdatmosphäre

Einige historische Meilensteine:

- 1949 Detektion solarer Röntgenstrahlung (V2-Rakete; Friedmann)
- 1962 Entdeckung von Scorpius X-1 ([Aerobee rocket](#); Giacconi)
- 1970 UHURU: Erster Röntgen-Satellit
- 1978 International Ultraviolet Explorer (IUE): UV-Spektroskopie
- 1990 [ROSAT](#): Erste vollständige Himmelsdurchmusterung im Röntgenbereich
- 1990 [Hubble Space Telescope](#) (HST)

Teleskope: Aufgabe

Erzeugung eines *realen* Bildes am Ort des Detektors, mit folgenden Eigenschaften:

- Möglichst große Strahlungssammelfläche (Lichtstärke)
- Möglichst gute Trennung feiner Strukturen (Winkelauflösung)
- Abbildung möglichst winkelgetreu, d.h. verzerrungsfrei.

Bildqualität:

Kriterium: Wie wird perfekte Punktquelle abgebildet?

=> Punktbild-Verbreiterungsfunktion
(*point spread function*; PSF)

Gründe für Abweichung der PSF von perfekter Punktform:

- Beugung an Teleskop und weiteren Aperturen
- Abbildungsfehler des optischen Systems
- Endliche Größe der Detektor-Bildelemente
- Seeing
- Differentielle Refraktion
- Nachführungsfehler bei längeren Belichtungen.

Teleskope: Designe

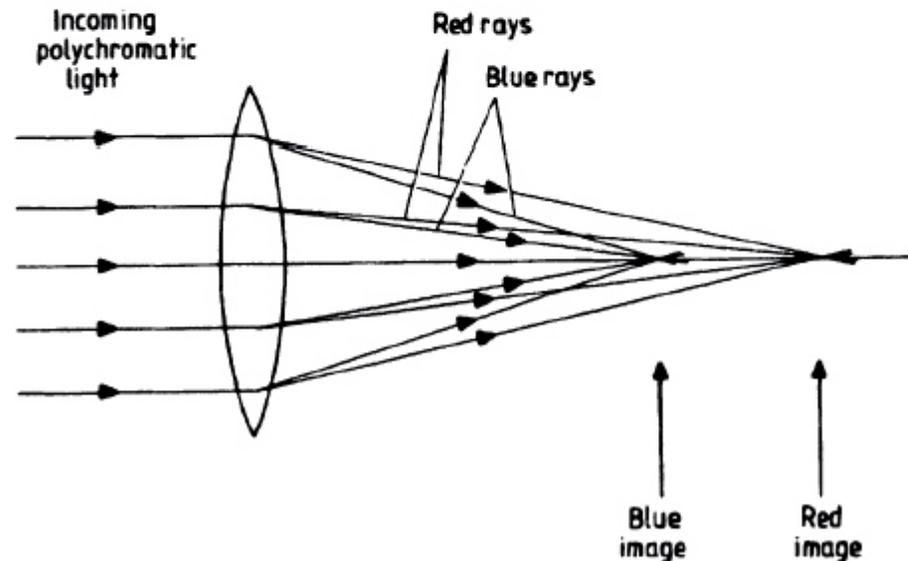
Relevante Eigenschaften und Parameter

- *Lichtsammelvermögen* : Im wesentlichen nur durch Apertur festgelegt.
- *Lichtstärke* oder *Öffnungsverhältnis (focal ratio)*:
Verhältnis von Brennweite zu Apertur, bestimmt z.B. Himmelselligkeit pro Pixel. Trend zu immer höheren Lichtstärken.
- *Gesichtsfeld*: Durch optisches Design und Detektortechnologie gegeben; bei adaptiver Optik: vor allem durch atmosphärische Eigenschaften.
- *Standort*

Refraktoren:

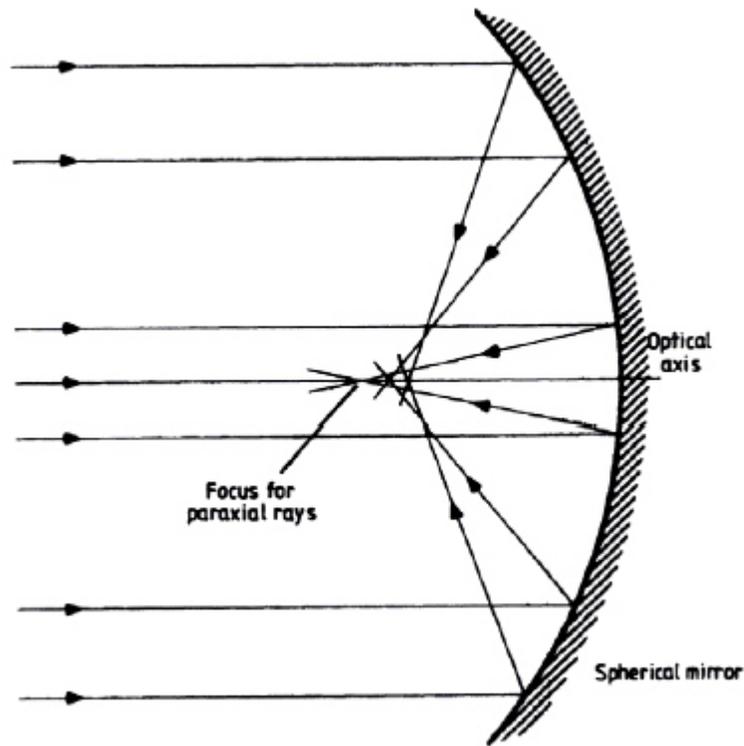
Probleme:

- ❑ Chromatische Aberration
- ❑ Begrenzte Aperturgröße wg. Verformung der Linse unter eigenem Gewicht



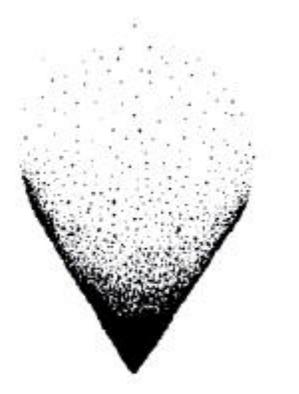
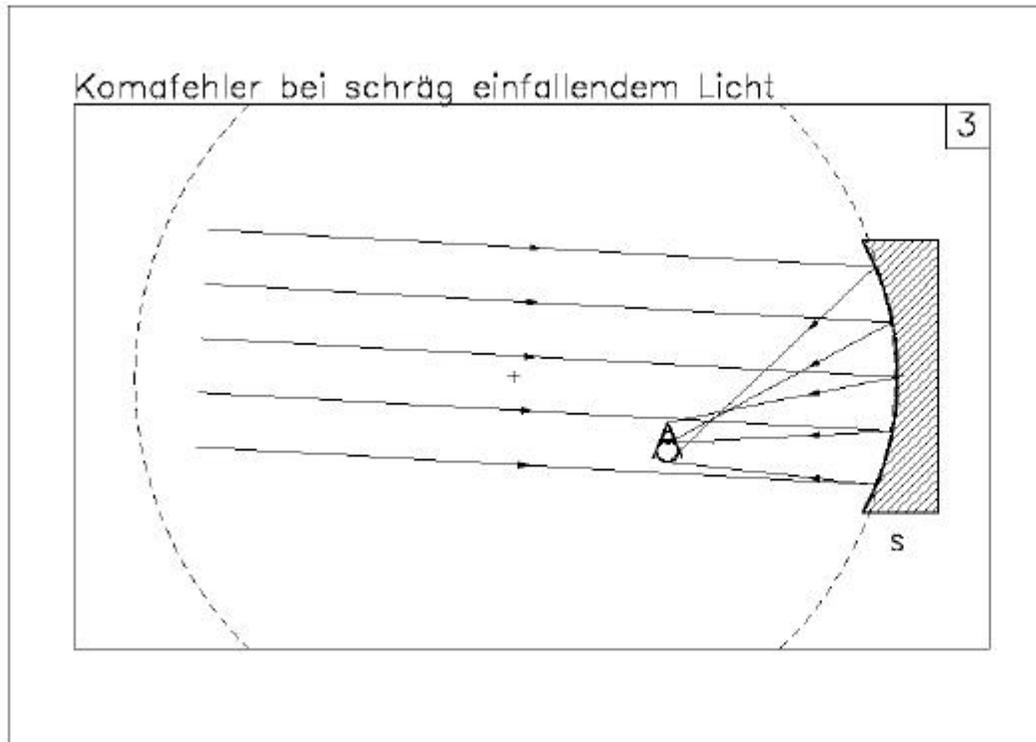
Reflektoren: Primärspiegelformen

Kugelspiegel => sphärische Aberration



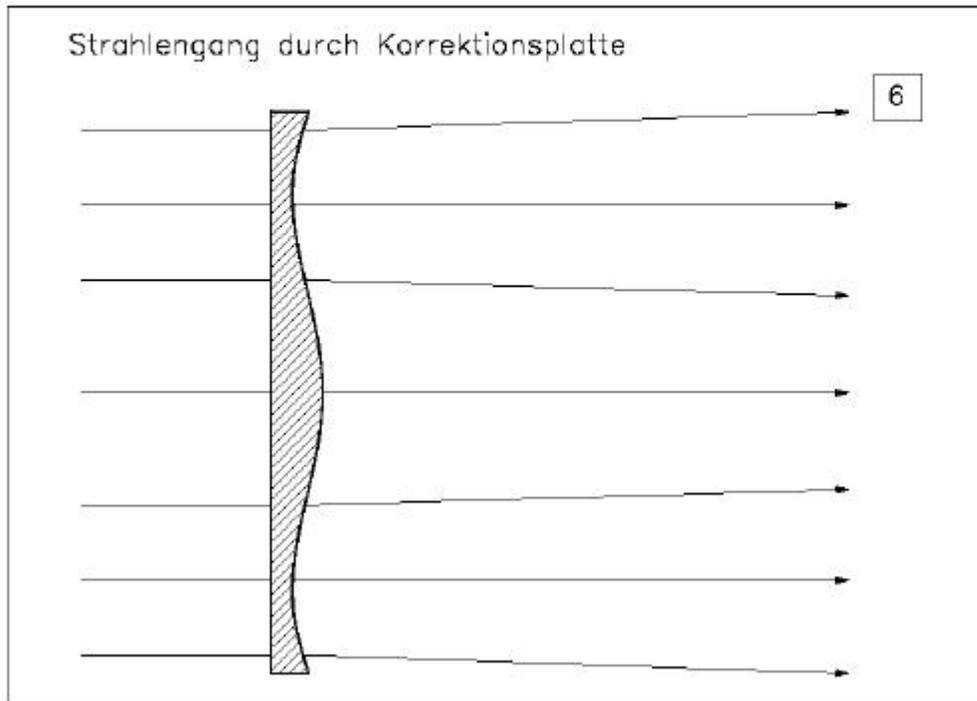
Reflektoren: Primärspiegelformen

Parabolspiegel: Keine sphärische Aberration,
aber *Koma* => begrenztes Gesichtsfeld



Koma-Korrektur:

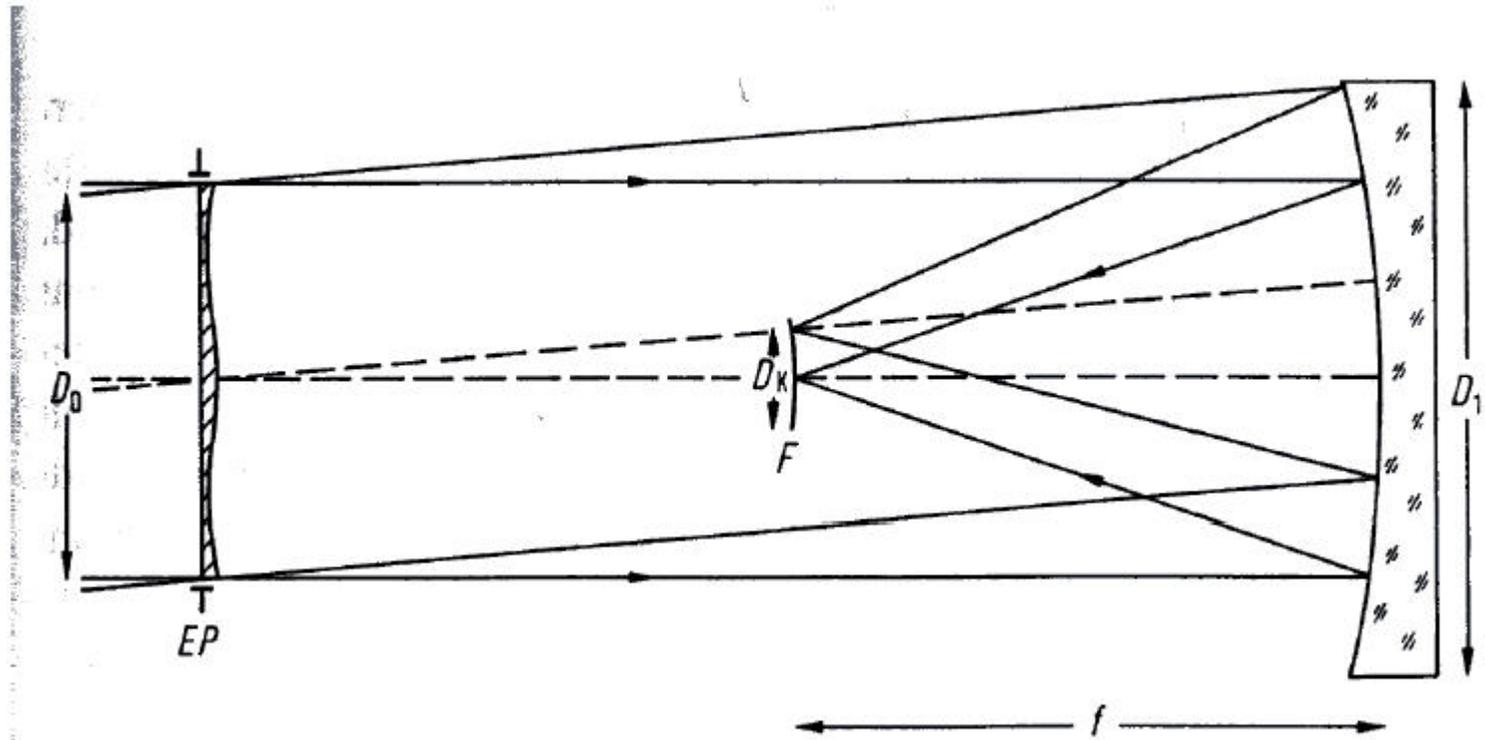
Mit Korrekturplatte kann Koma korrigiert werden
=> Schmidt-Teleskop



Aussen:
Verlängerung der
Brennweite

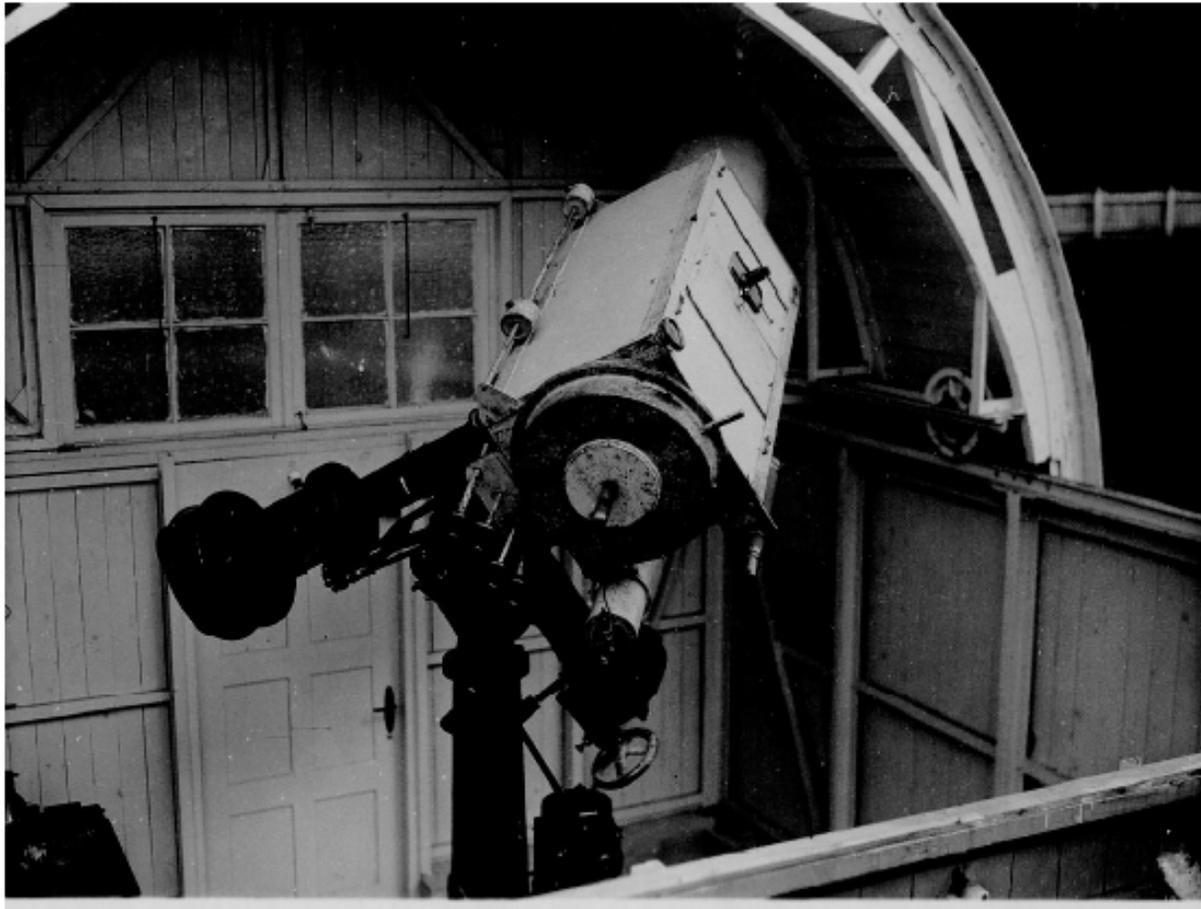
Innen:
Verkürzung der
Brennweite

Schmidt-Teleskop:



Schmidt-Teleskop:

Erstes Schmidt-Teleskop (1930)



Schmidt-Teleskop:

Vorteile:

- Sehr grosses Gesichtsfeld; typischer Weise $> 5^\circ \times 5^\circ$

Nachteile:

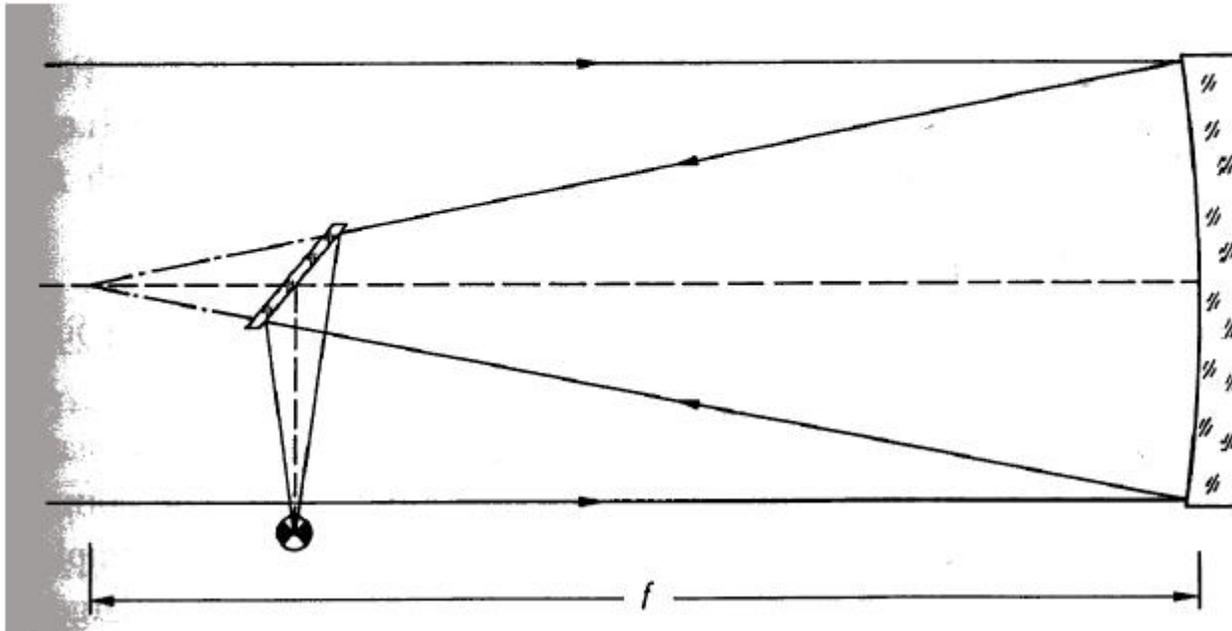
- Max. Apertur begrenzt durch Korrektionsplatte (siehe Refraktoren...)
- Fokalebene gekrümmt \rightarrow Abschattung (*Vignettierung*)
- Grosse Fläche der Fokalebene (typisch $> 25 \times 25\text{cm}$).

Lösungen: Fotoplatte; Glasfasern

Newtonsche Teleskope:

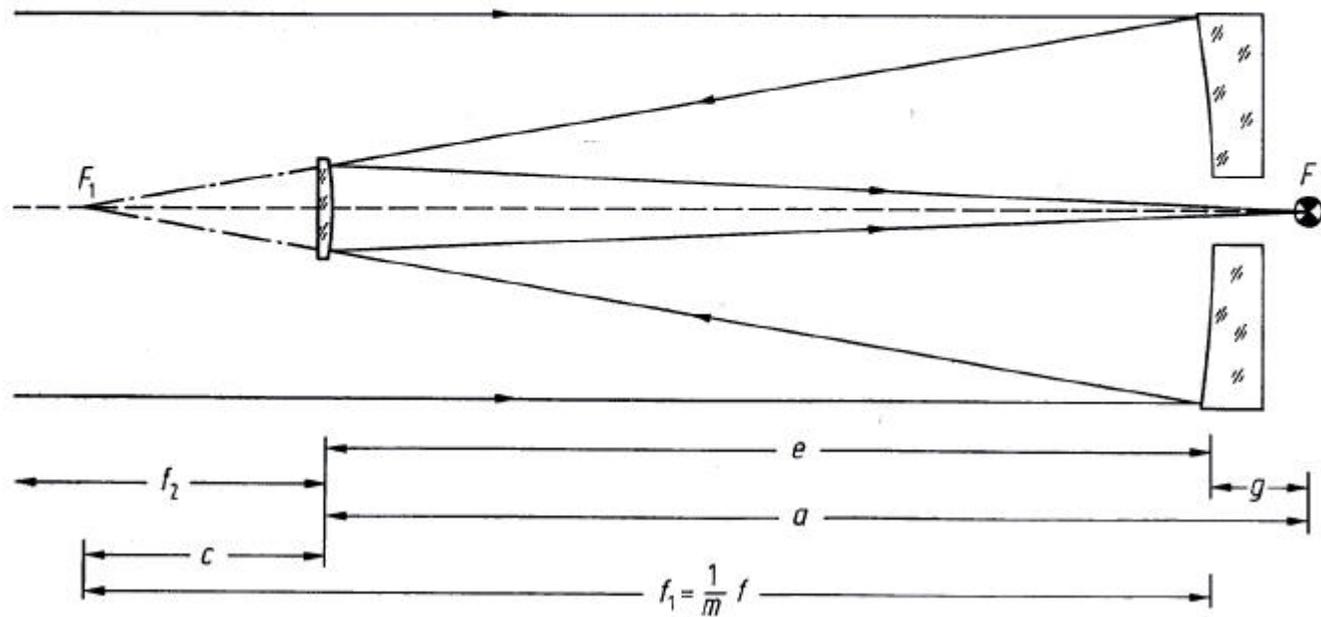
Nachteile:

- Tubus kaum kleiner als Brennweite f
- Asymmetrische Bauweise ungünstig für grosse Instrumente



Cassegrain-Teleskop:

- Konkaver Primärspiegel (parabolisch)
- Konvexer Sekundärspiegel
- Bohrung in Primärspiegel => Fokalebene ausserhalb



Ritchey-Chretien (RC)-Teleskop:

- Jedes optische Element (Spiegel, Linse) kann genau *eine* Aberration korrigieren
- Ausnutzung bei Ritchey-Chretien-System: Durch Abstimmung der Formen von Primär- und Sekundärspiegel Korrektur für spärische Aberration *und* Koma.
- Typische Gesichtsfeldgröße: $d \approx 0.5^\circ$

Nachteile:

- Bei Beobachtungen im Primärfokus Korrektur erforderlich
- Astigmatismus und Feldkrümmung stärker als bei Cassegrain

Die meisten modernen Teleskope sind in RC-Bauweise.

Montierungen:

Grundtypen:

- Äquatorial oder parallaktisch
 - Eine Achse (Polarachse) parallel zur Rotationsachse der Erde, d.h. zeigt zum Himmelspol
 - Zweite Achse: Deklination
 - Für Nachführung muss Teleskop nur um Polarachse gedreht werden

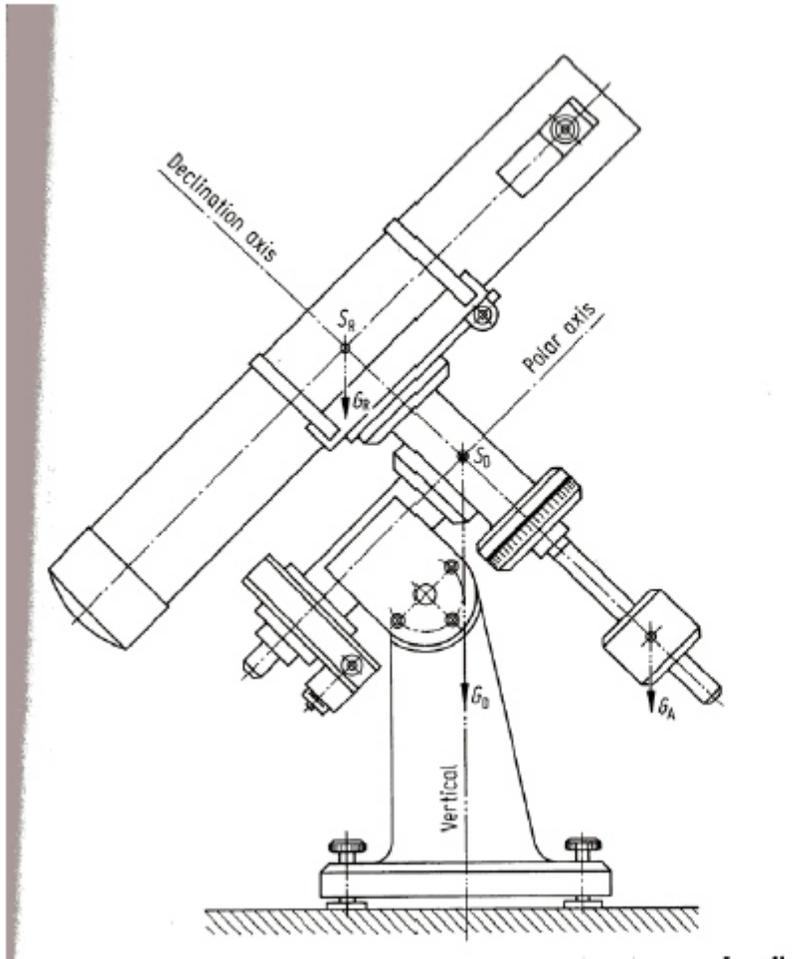
- Alt-azimuthal oder horizontal
 - Zenitachse, Horizontachse
 - Komplexe Nachführbewegung: Drei nichtlineare Bewegungen (alt, az, Feldrotation)
 - Realisierung erst durch moderne Steuerungstechnik bzw. Computertechnik möglich geworden

Wahl der Montierungen:

Gesichtspunkte:

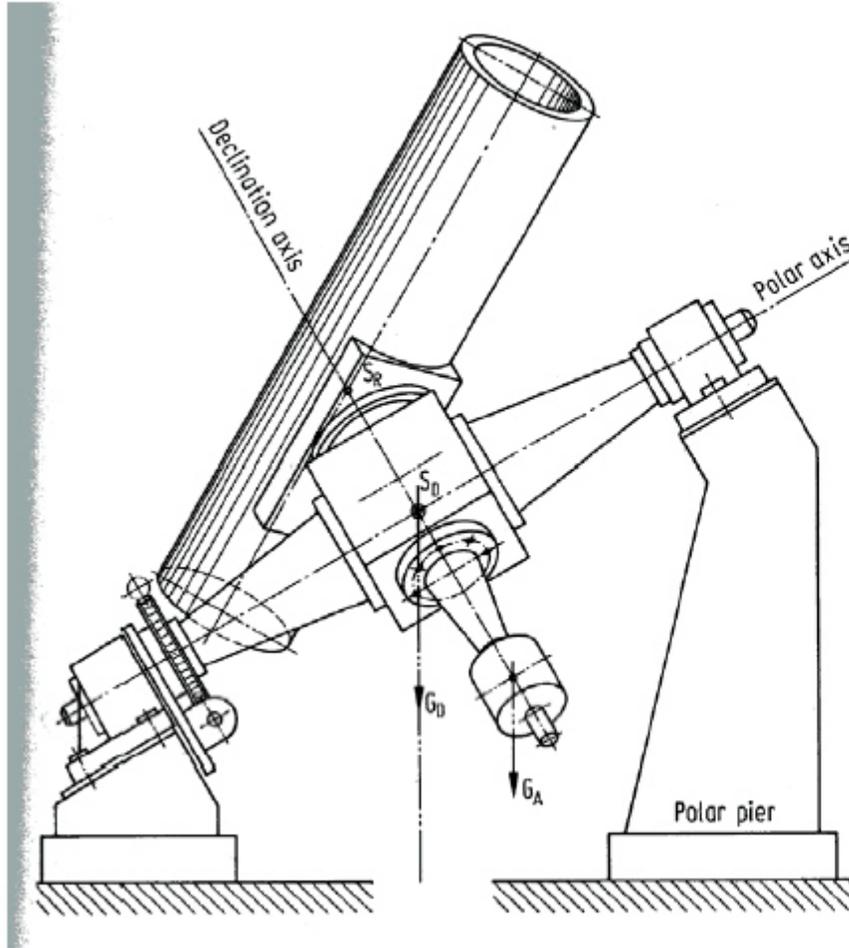
- ❑ Geografische Breite (wg. Statik)
- ❑ Brennweite bzw. Länge des Tubus
- ❑ Gewicht (Gegengewicht nötig, oder nicht?)
- ❑ Grösse und Gewicht der Instrumente, die montiert werden sollen
- ❑ Beobachtbarer Himmelsbereich

Deutsche Montierung:



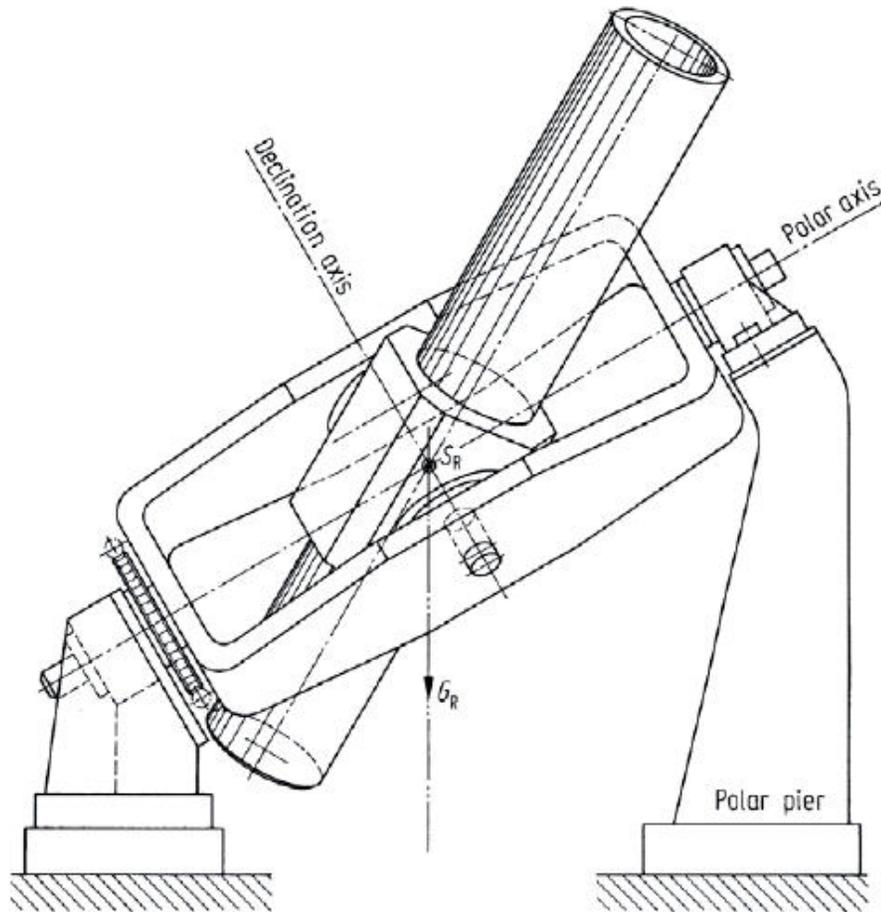
Lick 36" (= 91cm)

Englische Montierung:



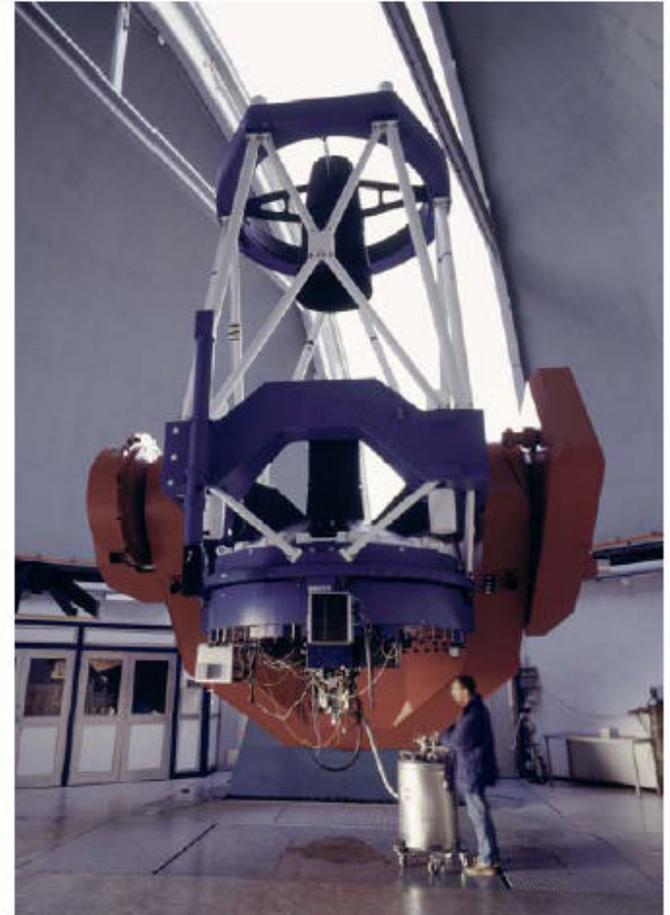
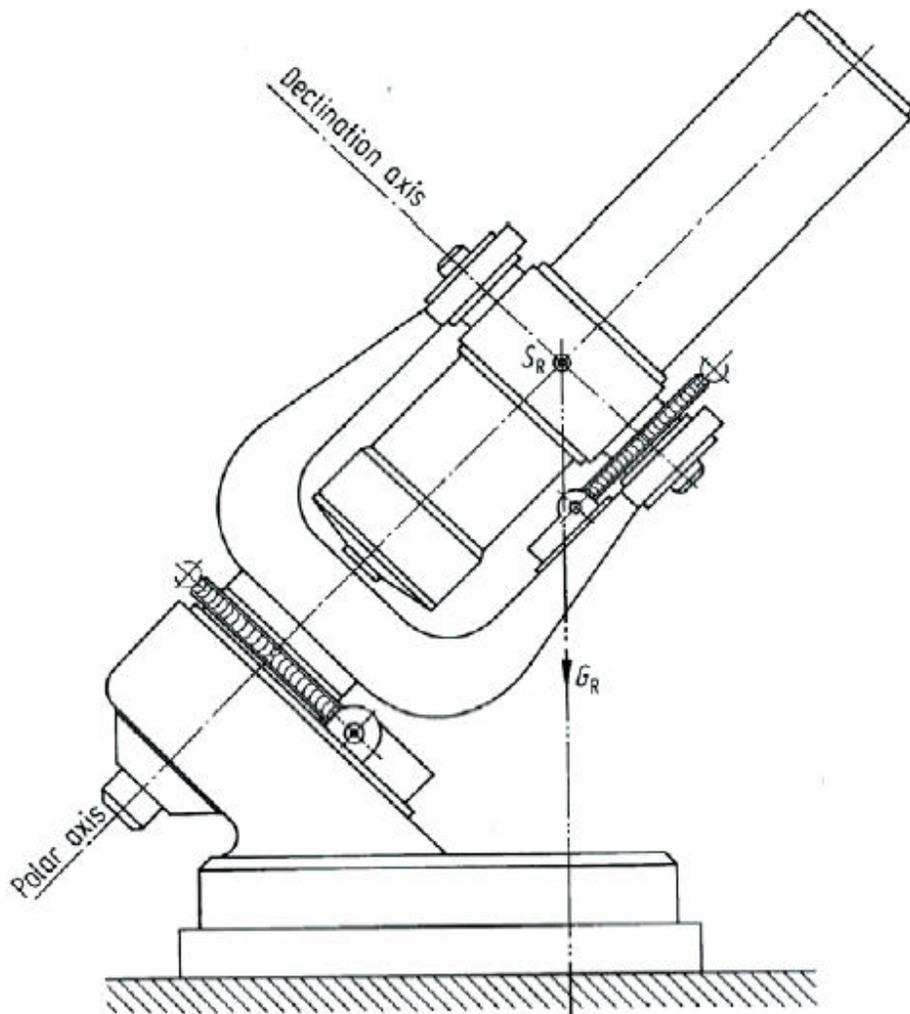
ESO 1.52m (La Silla)

Hufeisen-Montierung:



Palomar 200" (= 5.08m)

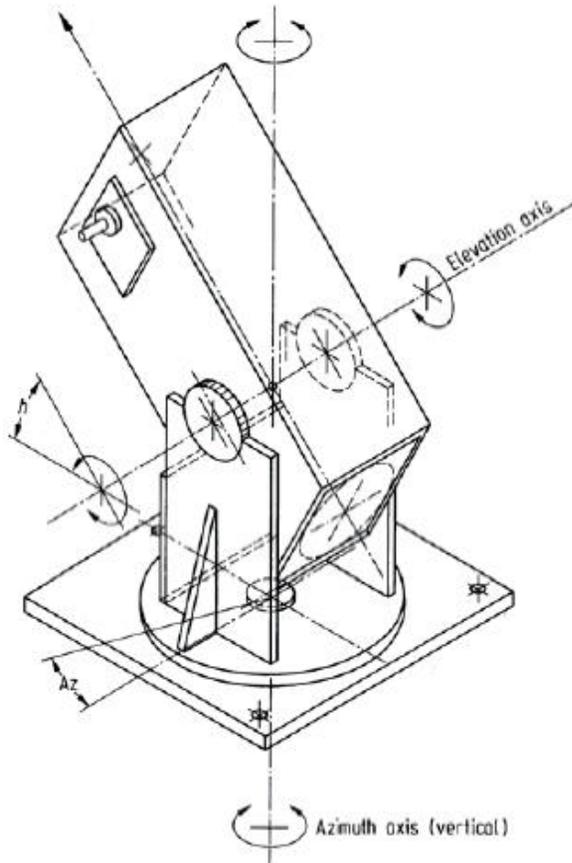
Gabel-Montierungen:



ESO-MPIA 2.2m (La Silla)

Alt-azimuthale Montierung:

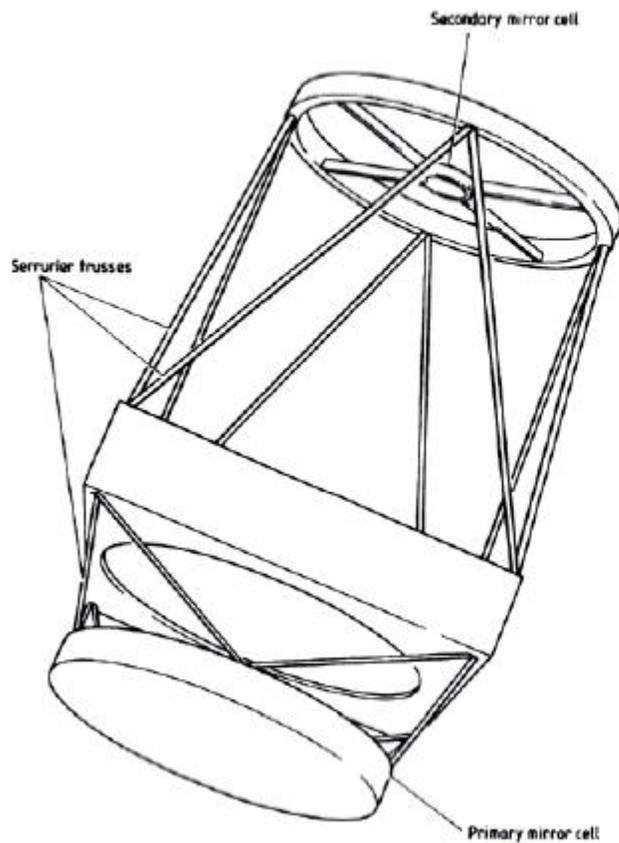
Variante der Gabelmontierung



Subaru 8.3m

Serrurier trusses:

- Konstruktionsart, bei der Primär- und Sekundärspiegel unter mechanischer Belastung parallel bleiben



Anforderungen an die Standorte:

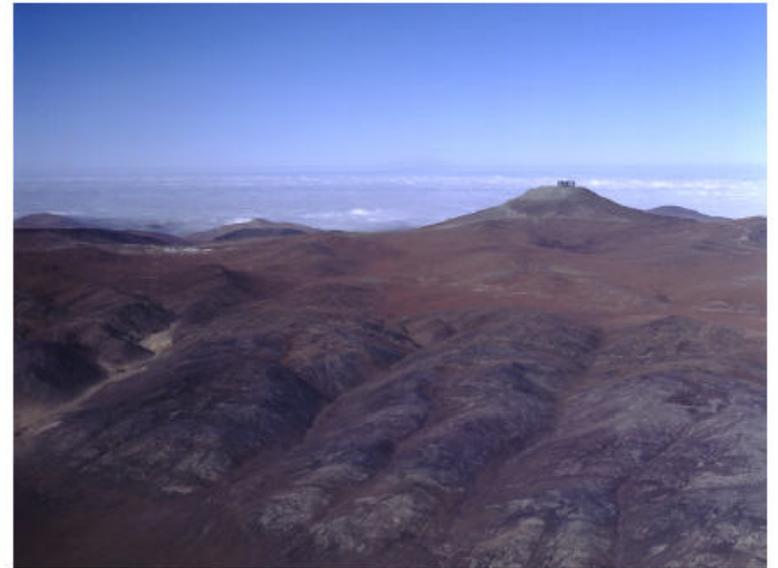
Idealer Standort:

- ❑ dunkel
- ❑ möglichst hohe Zahl klarer bzw. photometrischer Nächte
- ❑ gutes Seeing
- ❑ hoch, aber nicht zu hoch (wg. Arbeitsbedingungen)
- ❑ nicht zu windig (=> Nachführung)
- ❑ langfristig stabiles Klima
- ❑ trocken
- ❑ gut zugänglich
- ❑ niedrige seismische Aktivität
- ❑ Land politisch stabil (Lehre aus Paranal!)

Standorte:



Mauna Kea



Paranal



Das Very Large Telescope (Paranal / Chile)

Internet-Ressourcen: www.eso.org

Top News

- ▶ [ESO Press Release 02/04: Finland to Join ESO. \(9/February/2004\).](#)
- ▶ [ESO Press Release 01/04: First Auxiliary Telescope for the VLT Interferometer Installed at Paranal. \(30/January/2004\).](#)
- ▶ [ESO Press Photos 01/04: ESO PR Highlights in 2003. \(07/January/2004\).](#)



[Observing Facilities and Operations](#)

- ▶ [Instrumentation at ESO](#)
- ▶ [Observing with ESO Telescopes](#)
- ▶ [Data Management and Science Archive Facility](#)
- ▶ [Paranal Observatory Home Page](#)
- ▶ [La Silla Observatory Home Page](#)
- ▶ [Space Telescope-European Coordinating Facility](#)



[Projects & Developments](#)

- ▶ [VLT Interferometer \(VLTi\)](#)
- ▶ [Atacama Large Millimeter Array \(ALMA\)](#)
- ▶ [Overwhelmingly Large Telescope \(OWL\)](#)
- ▶ [Astrophysical Virtual Observatory](#)



[Science Activities](#)

- ▶ [ESO Imaging Survey \(EIS\)](#)
- ▶ [Scisoft](#)
- ▶ [GOODS Project](#)
- ▶ [Science Verification of VLT Instruments](#)
- ▶ [Research facilities in Santiago](#)
- ▶ [Scientific & Technical Meetings](#)



[General Information and Services](#)

- ▶ [ESO Headquarters and ESO Chile](#)
- ▶ [Personnel Dept., Vacancy Announcements](#)
- ▶ [ESO Staff and Contact Information](#)
- ▶ [Safety at ESO](#)
- ▶ [ESO Libraries](#)
- ▶ [ESO Publications and Reports](#)



[Outreach Activities](#)

- ▶ [ESO Press Releases and Photos](#)
- ▶ [VLT Information](#)
- ▶ [Posters, Videos, CD-ROMs etc.](#)
- ▶ [Astronomical Photos](#)
- ▶ [The ESO Educational Office](#)



[Information Technology](#)

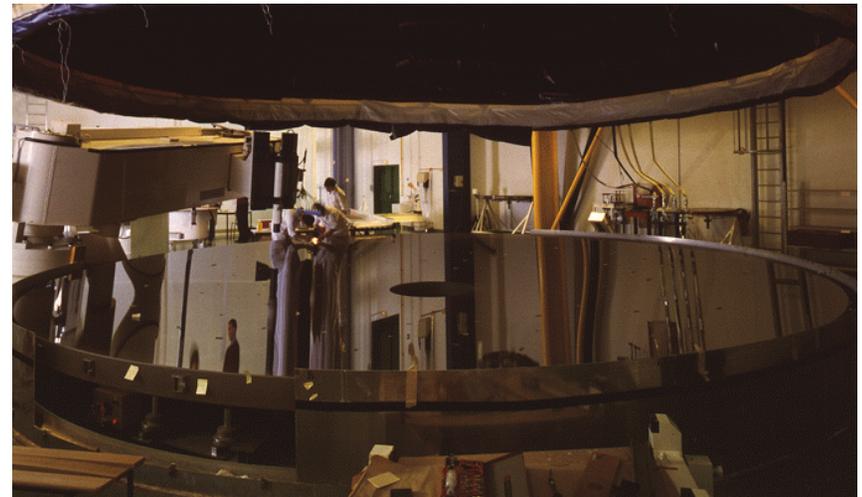
- ▶ [Information Technology \(IT\)](#)
- ▶ [Science Software](#)

Das VLT:

- befindet sich auf dem Cerro Paranal
- 120 km südlich von Antofagasta
- Atakama Wüste
- Höhe: 2635 m



- 8.2 m Teleskope
- 1.8 m „Ausleger“ für Interferometry
- 2.5 m Hilfsteleskop (VST)
- 4m Teleskop (VISTA, UK, 2004)



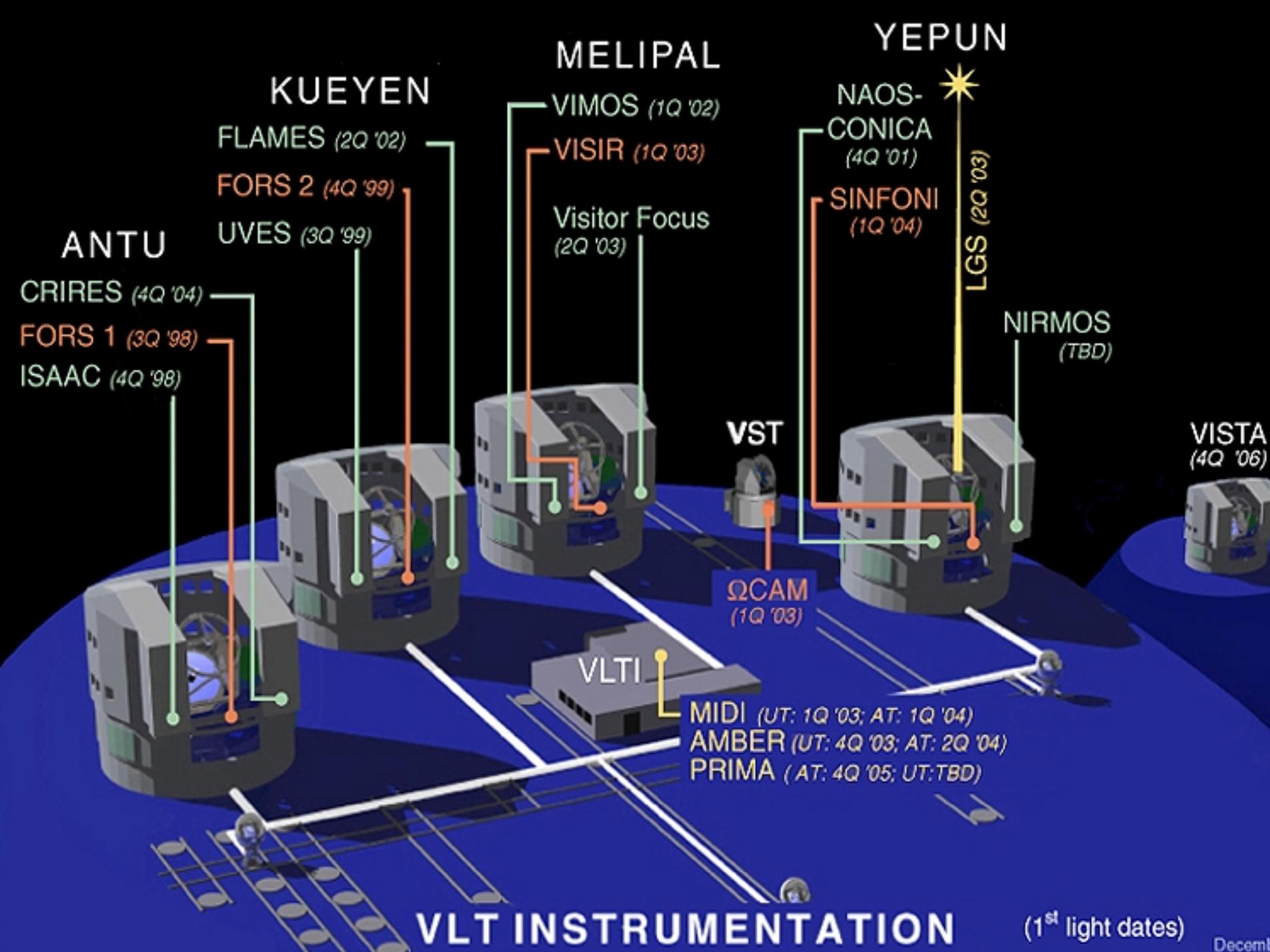


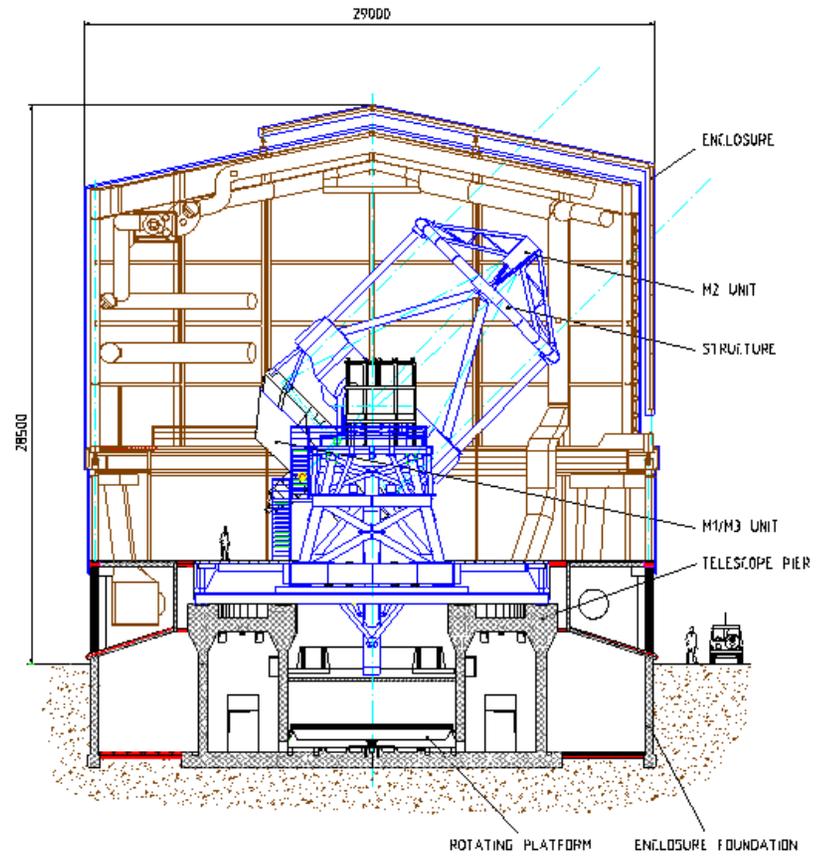
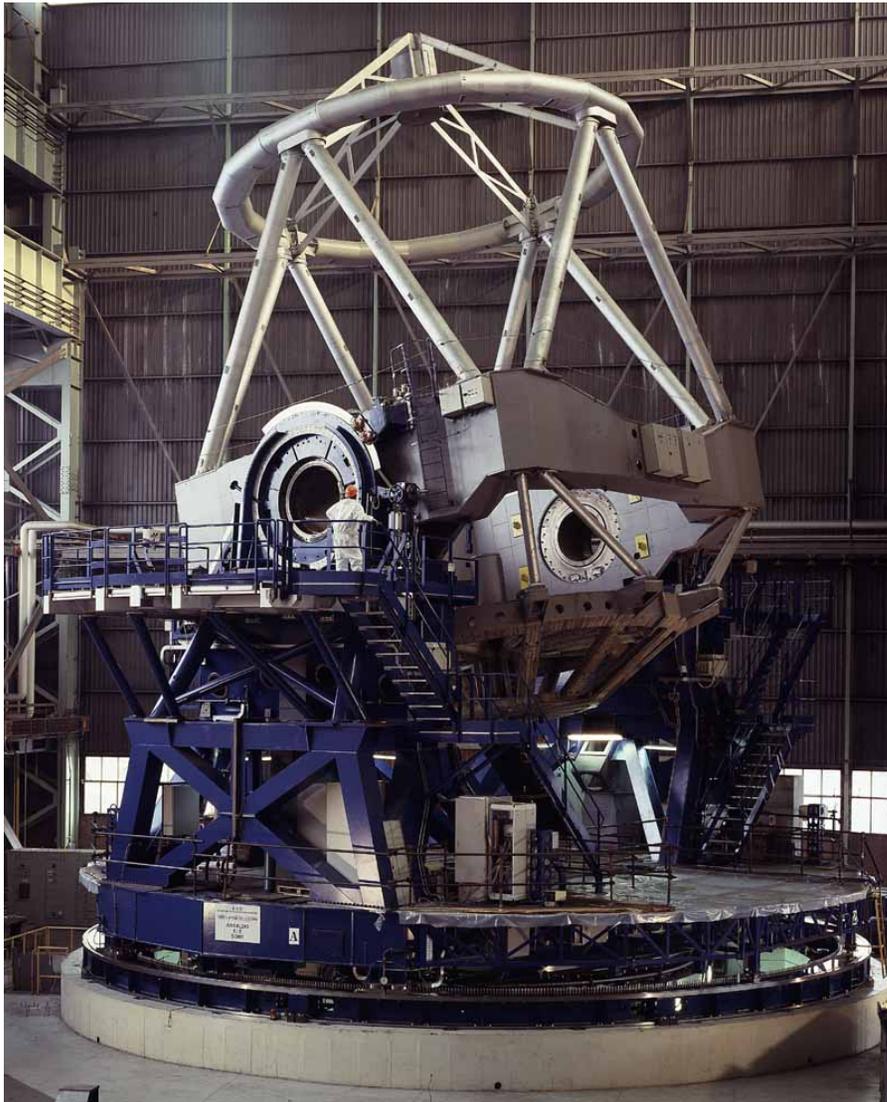
Antu- Sun

Kueyen- Moon

Melipal- Southern Cross

Yepun- Venus
(as evening star)





SIDE VIEW (Section)

Zukünftige optische Teleskope

Der Weg zu den heutigen Teleskopen

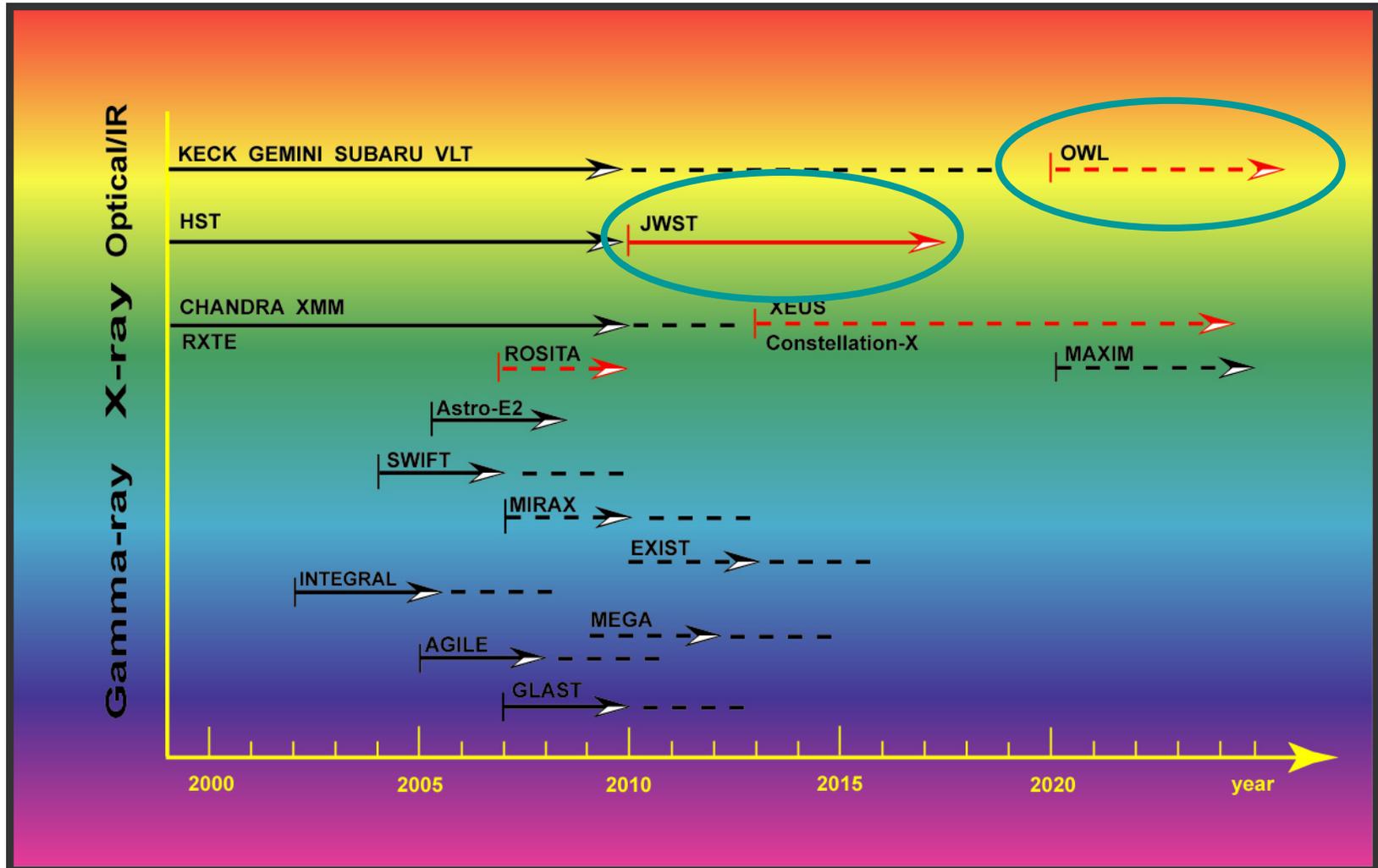
- Teleskopkonzeptkonzepte am Anfang der 80er Jahre:
 - Single-Mounted Arrays (z.B. MMT)
viele kleine Spiegel auf die selbe Struktur montiert
 - Segmented mirrors (z.B. Keck):
Primärspiegel aus kleineren Spiegelmodulen zusammengesetzt
 - Adaptive Optics (z.B. VLT):
Aktive Spiegel erlauben dünnere und leichtere monolithische Spiegel
 - Arrays of Telescopes (z.B. VLTI):
Interferometry-based Array von mehreren Teleskopen
- Aufkommen der (>) 8m Teleskope:
z.B. VLT (8m), GEMINI (8m), KECK (10m), SUBARU (8m) , VLTI (16m) ...

Der Weg zu zukünftigen XL-Teleskopen

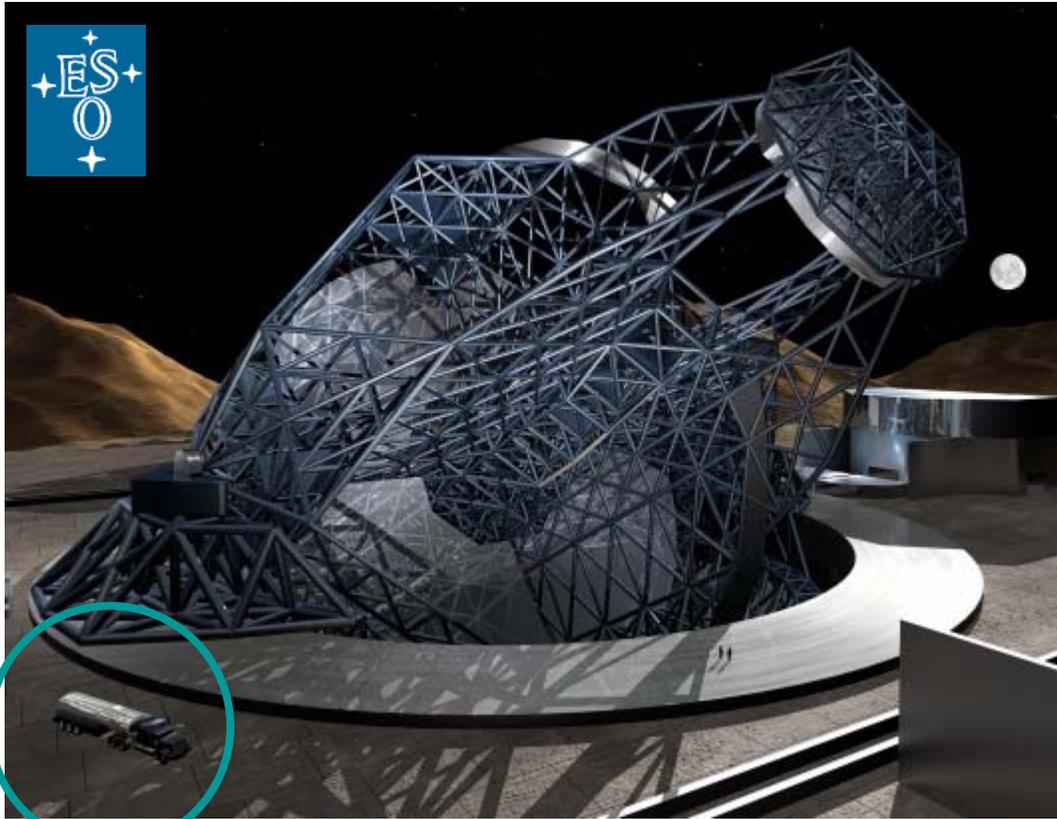
- Paradigma der Gewichtsreduzierung: kleine + dünne Spiegel
 - Vom KEKC:  Segmentierte Spiegel
 - Vom VLT:  Adaptive Optik

- Zur Zeit viele Konzeptstudien in Entwicklung , z.B.:
 - California Extremely Large Telescope - CELT (30m, Univ. California/CIT)
 - Maximum Apertur Telescop - MAXAT (30-50m, AURA)
 - EURO50 (50m, Europe)
 - Giant Segmented Mirror Telescope - GSMT (30m, AURA, NOAO, GEMINI)

Aktuelle und zukünftige Observatorien



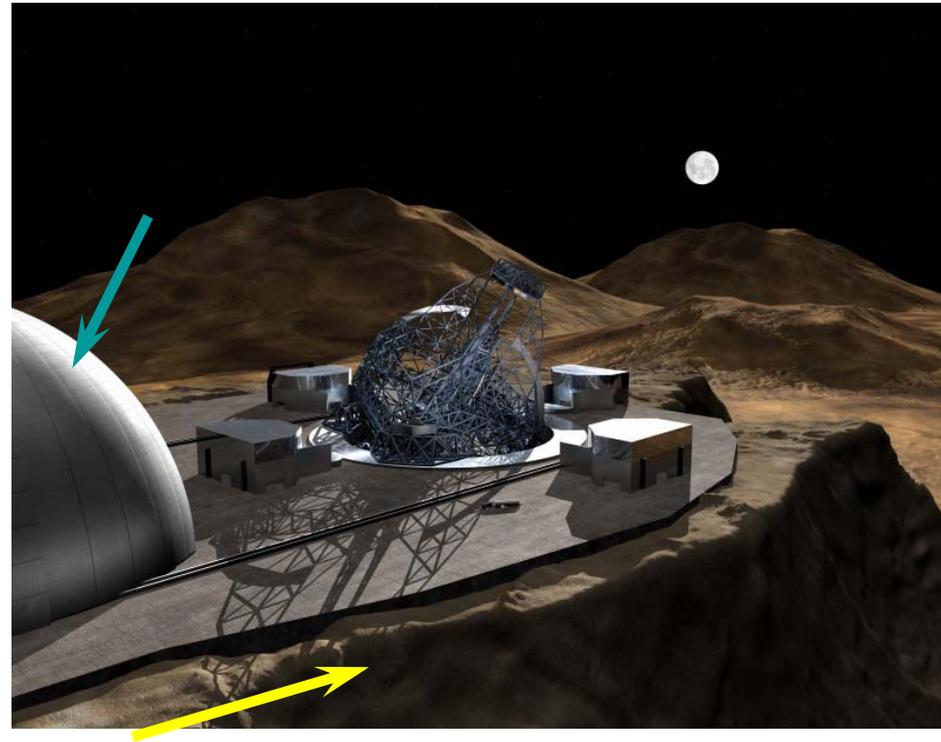
Das **OW**erwhelming **L**arge **T**elescope



- Anfangsziel: **100m** Apertur
- Gesichtsfeld: **10 arcmin**
- Auflösung: **.065"** über das FOV
- Grenzümpfindlichkeit: **V=38** in 10 h
- Standort und endgültige Instrumentierung noch nicht festgelegt
- Fertigstellung geplant für ~ 2020
- Gesamtkosten: **1,000 Mill. Euros ... vergleichbar mit dem HST (2.4m)**

Teleskopkonzept

- Segmentierter Primärspiegel (4 Kacheln) mit 2m Spiegelsegmenten
- Jedes Segment mit **Aktiver Optik**
- Sphärischer Primärspiegel
 - alle Segmente identisch
 - leichtere (und schnellere) Herstellung
 - bessere Segmentredundanz
- Optisches System ausgerüstet mit **Adaptiver Optik**
- Gesamtgewicht: **12,500 Tonnen**
- Höhe : **170m** d.h. ½ Eiffel-Turm
- Elevationsbereich: **30-89 Grad**



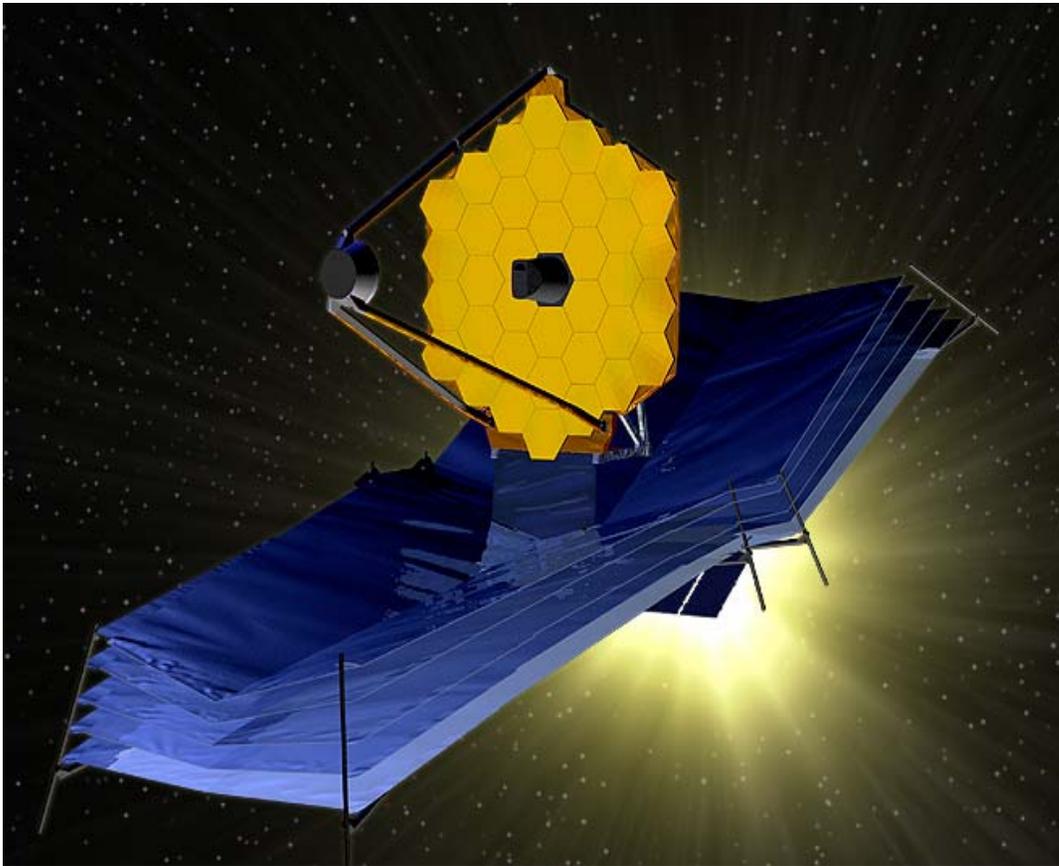
OWL Teleskopkonzeptstudie

Der an dieser Stelle gezeigte Film des OWL wurde zugunsten eines kleineren PDF-Files nicht eingebunden. Man findet ihn aber auf der Website der ESO: www.eso.org

Was kommt nach dem HST ?



James-Webb Space Telescope



- Apertur: 6.5 m – Segmentierter Spiegel
- Orbit: L2, 1.5 Mill. km Apogee
- Startdatum: ~2011
- Erwartete Missionsdauer: 4-5 Jahre

- **NIRCAM: Near-IR and Visible Camera**
6000 - 50,000 Å
2.3 x 2.3 arcmin FOV
- **NIRSPEC: Multi-Object Spectrograph**
10,000 -- 50,000 Å
3 x 3 arcmin FOV

- **MIRI: Mid-IR Camera and LSS Spectr.**
5,000 -- 28,000 Å
2 x 2 arcmin FOV