

# WORKSHOP

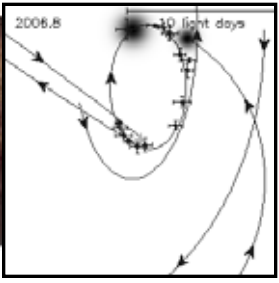
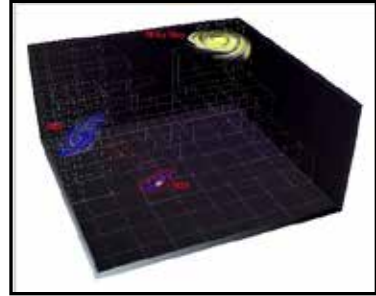
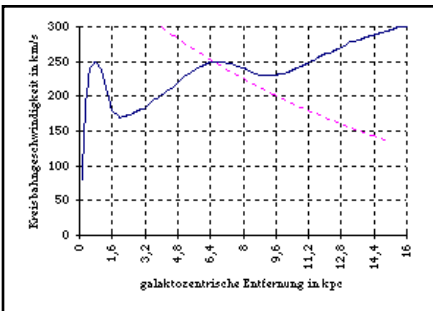
Das schwarze Loch im Zentrum des MSS

Dr. Olaf Fischer

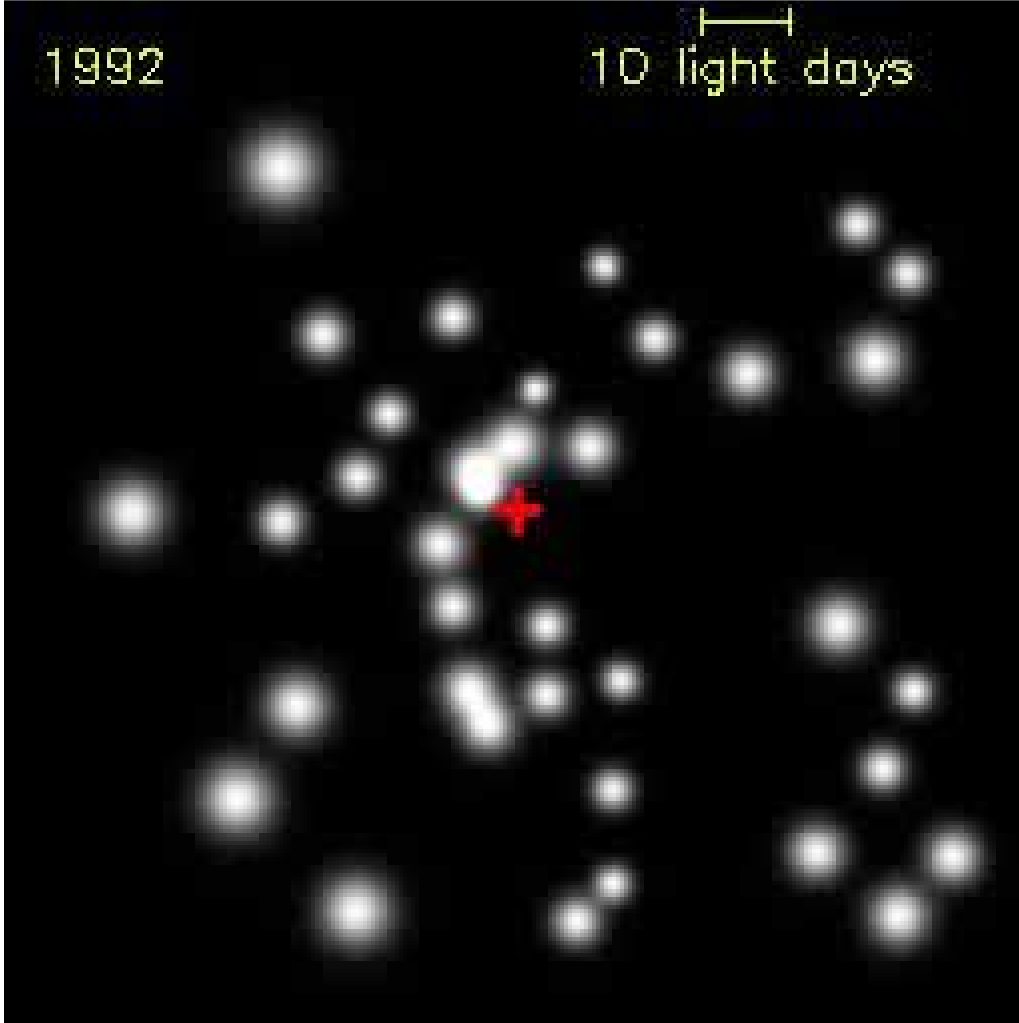
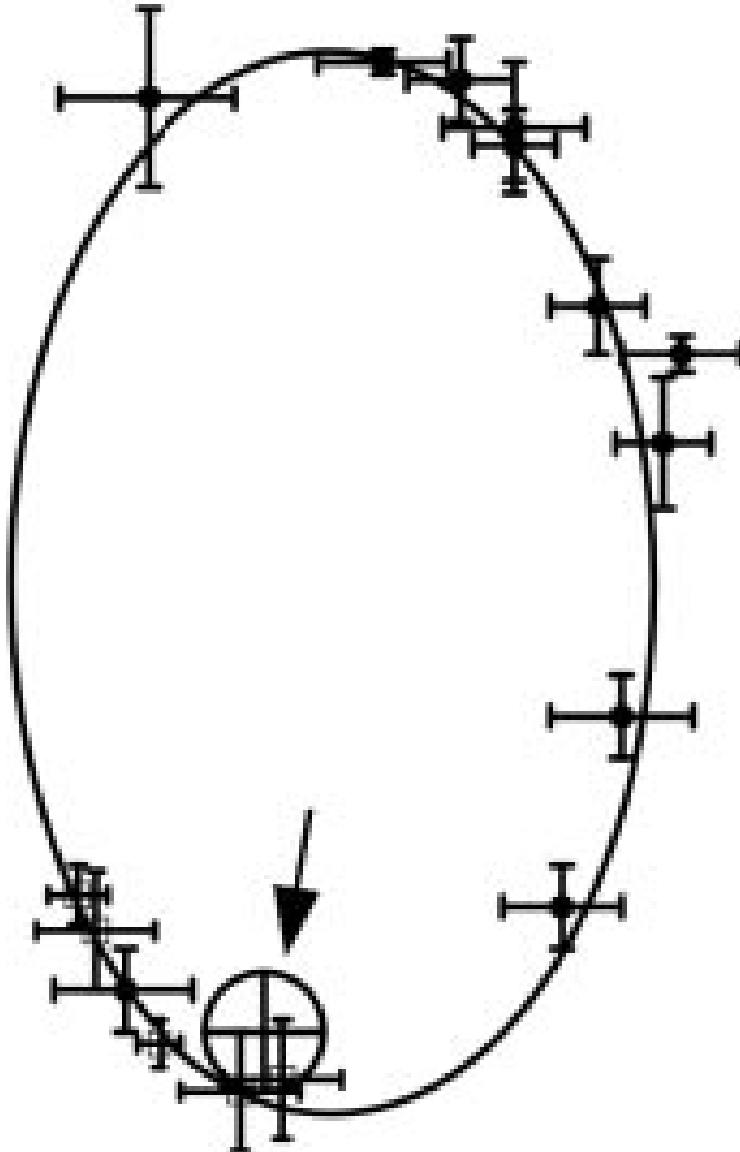
Haus der Astronomie Heidelberg



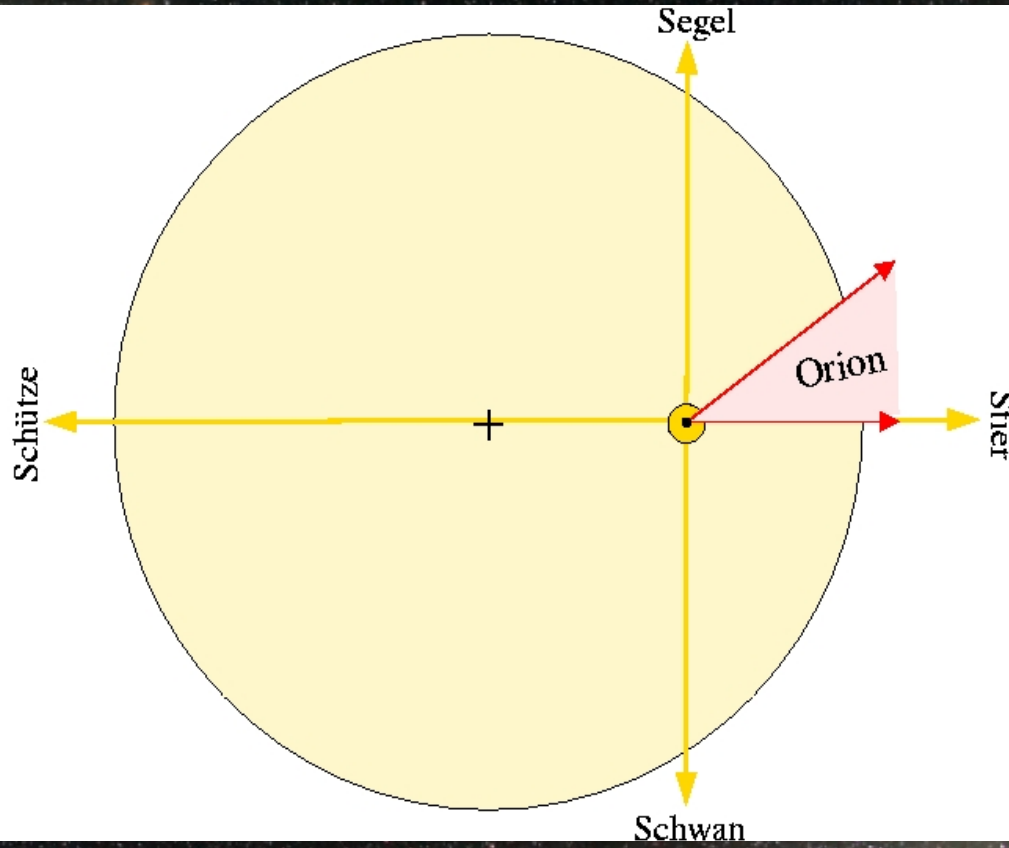
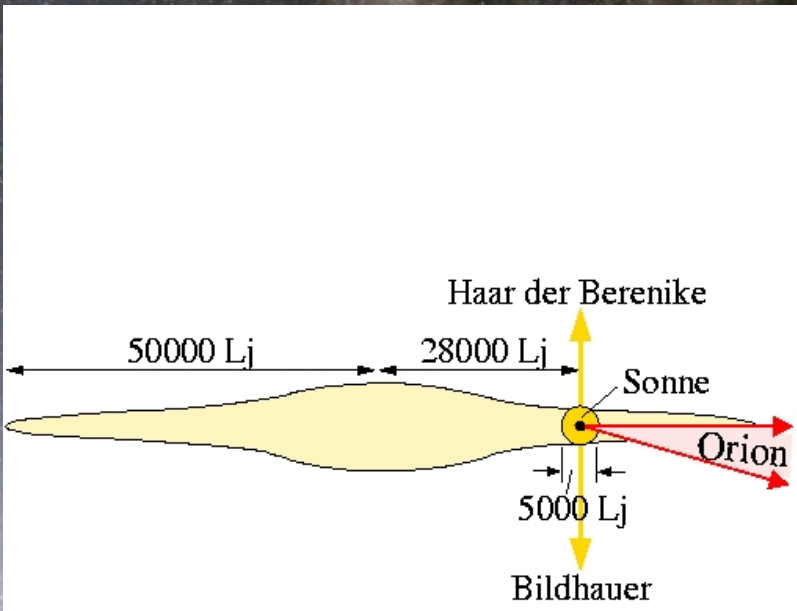
# Der Milchstraßenkoffer Sek. II Astrophysikkurs



# Umlaufbahn des Sterns S2

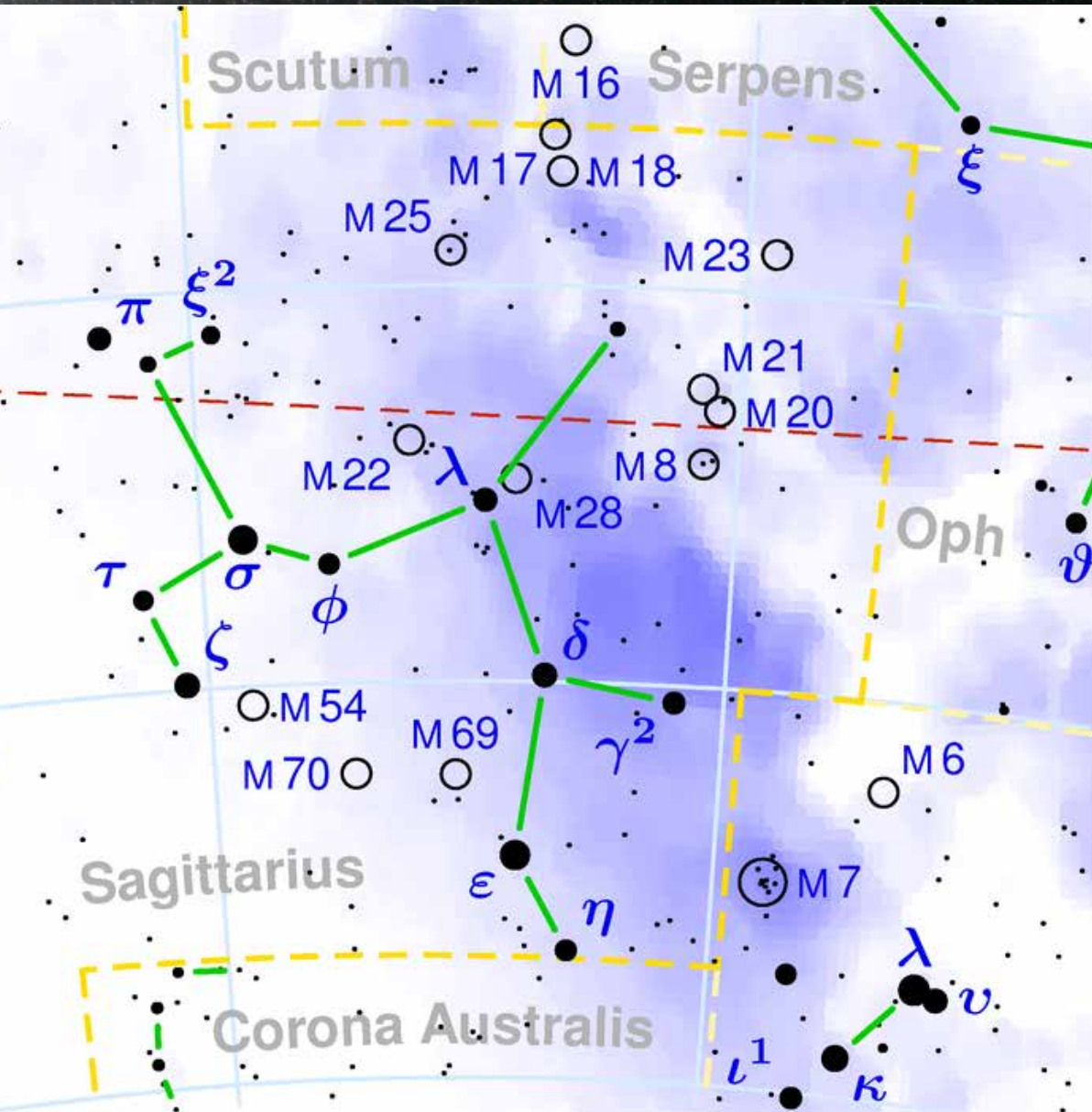


# Das Zentrum des MSS aus unserer Sicht





# Das Zentrum des MSS am Nachthimmel



The "Teapot"



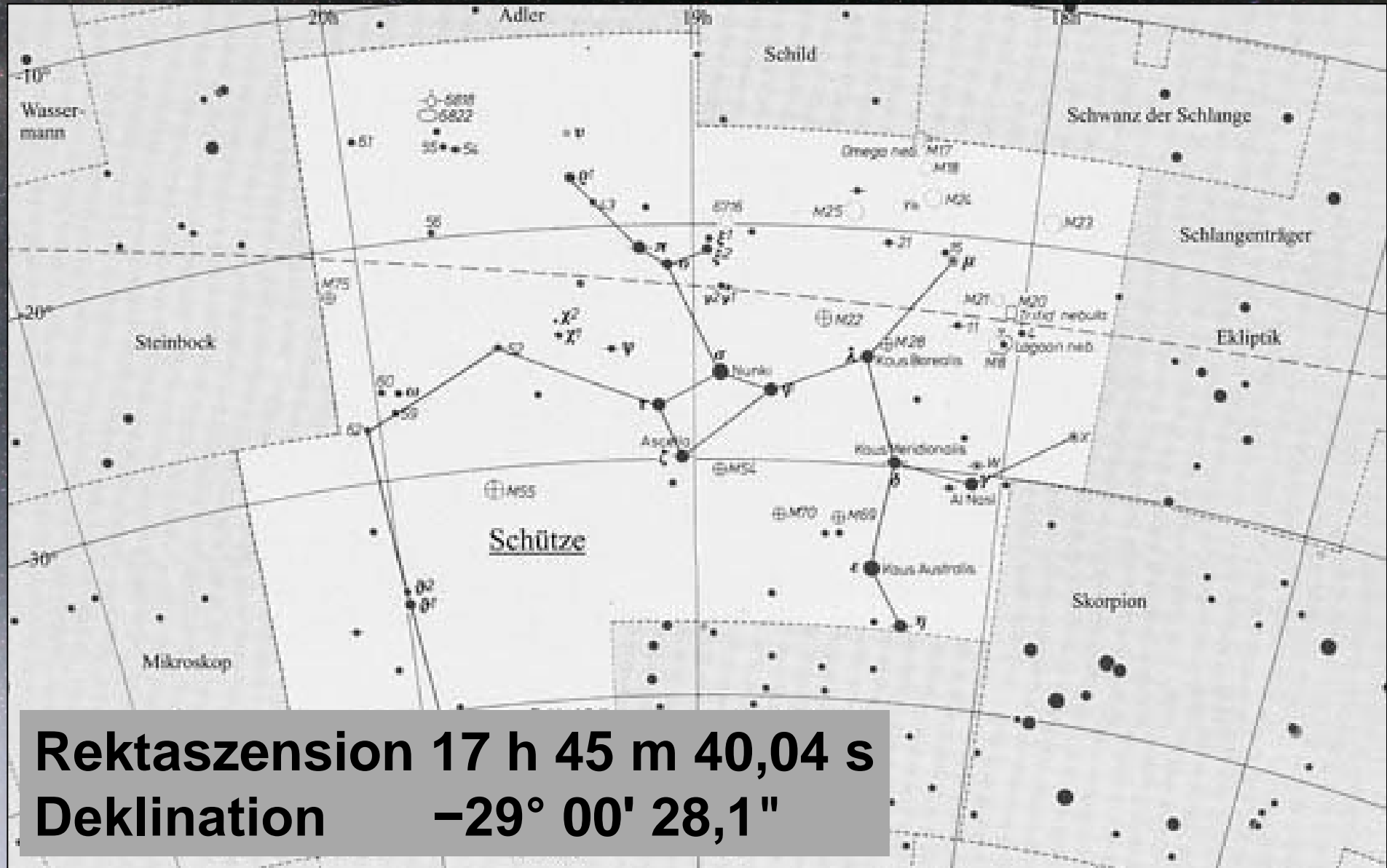


# Didaktisches zur Milchstraße

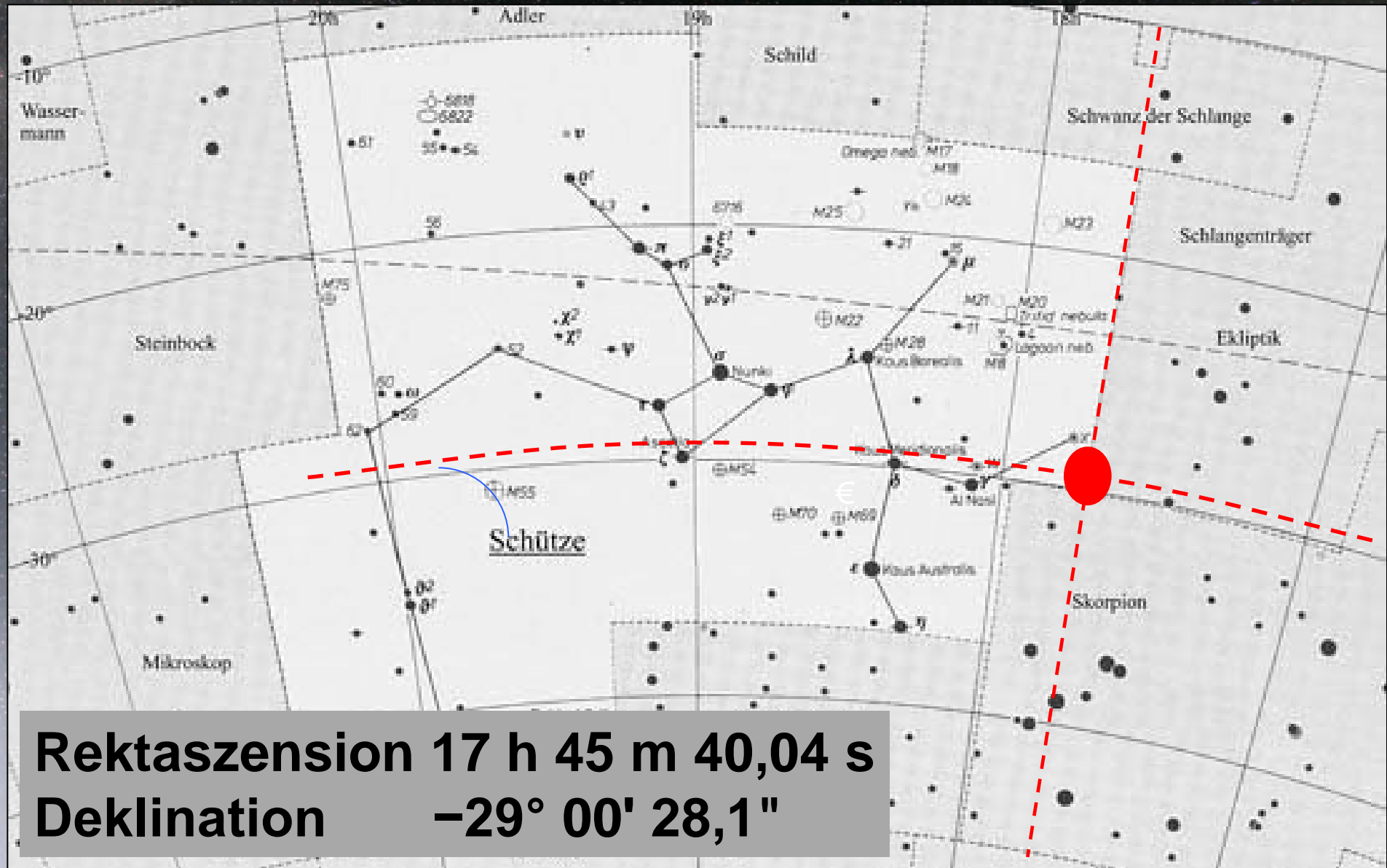


# Wo am Himmel ist das Zentrum des MSS?

à Geo: Ort nach Koordinaten aufsuchen



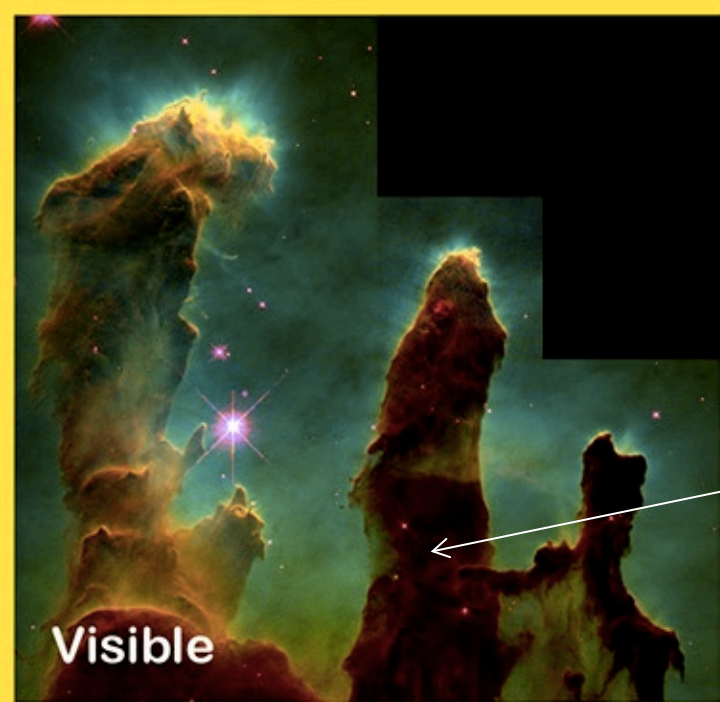
# Wo am Himmel ist das Zentrum des MSS? à Geo





# Problem 1

Der „verstellte“ Blick ins MSS  
à Interstellarer Staub



Visible



Near Infrared

Der bessere Durchblick durch den  
Interstellaren Staub  
à Infrarotdetektoren machen es möglich



# Didaktisches zur Milchstraße





# Freihandexperiment

à Ph:

nicht sichtbare NIR-  
Strahlung nachweisen





# Problem 2

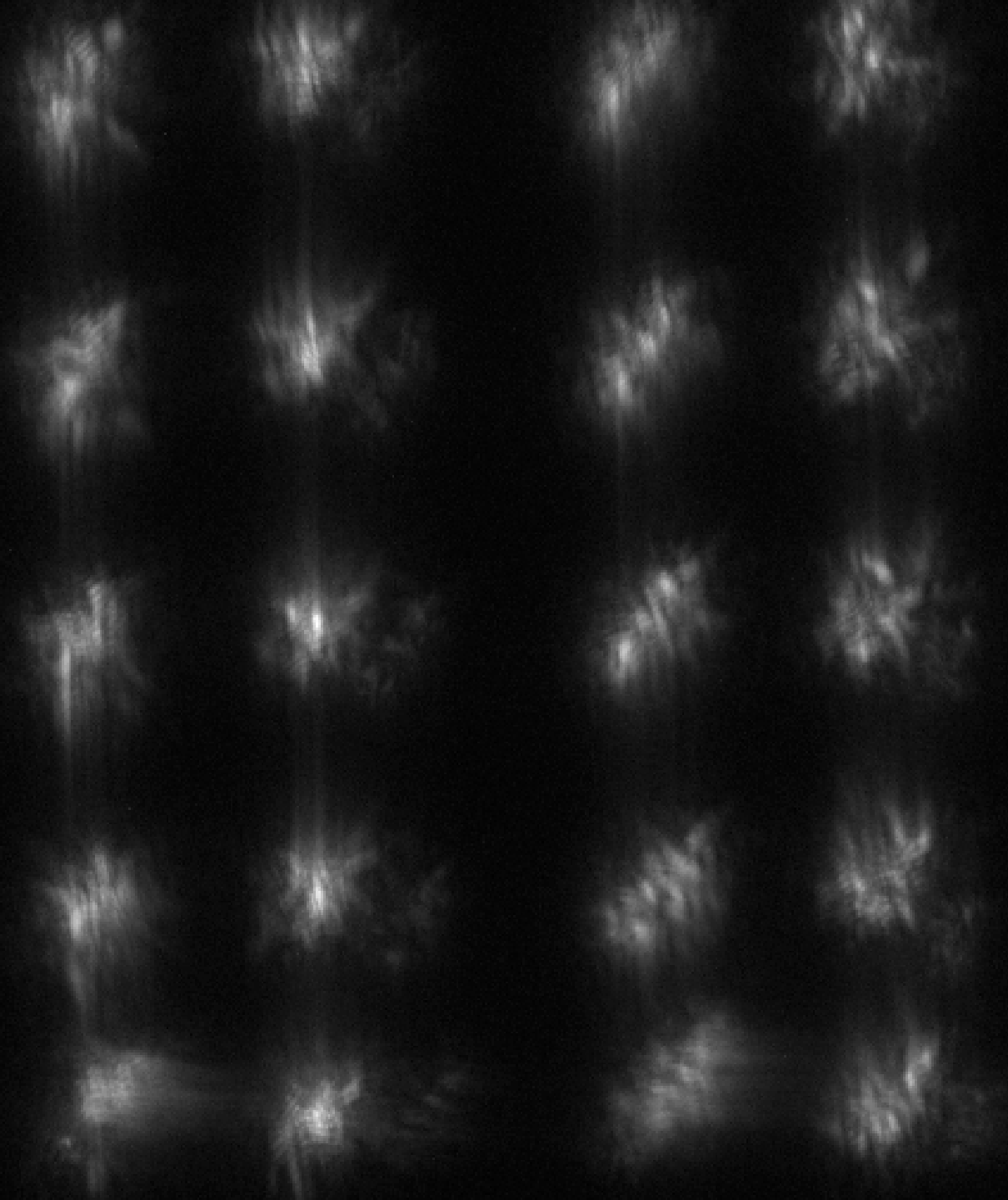
Der

„verschwommene“

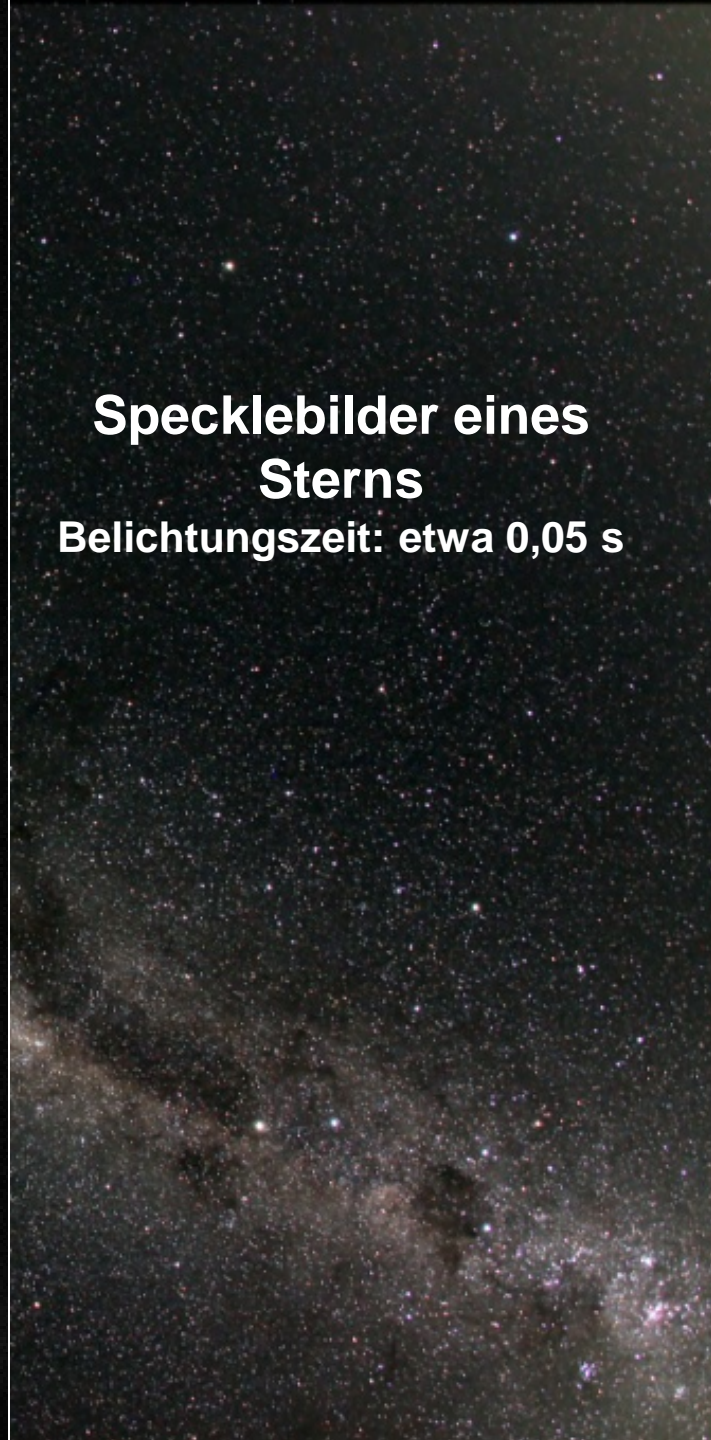
Blick ins MSS

→ Turbulente Atmosphäre





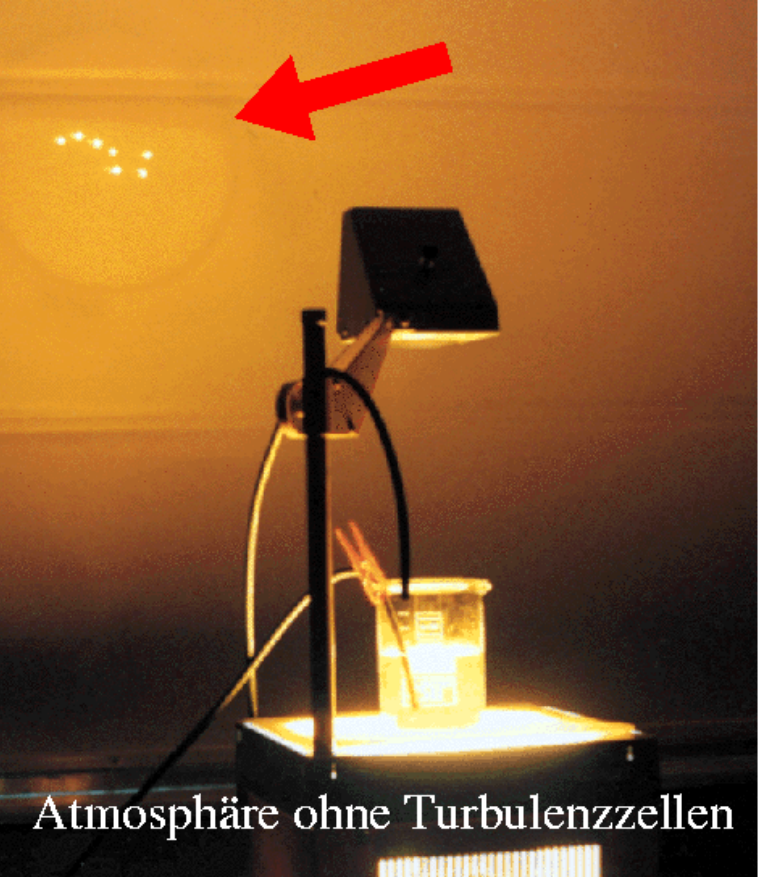
**Specklebilder eines  
Sterns**  
Belichtungszeit: etwa 0,05 s



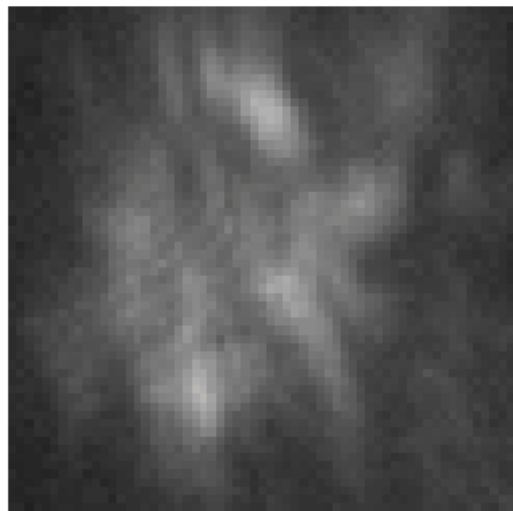
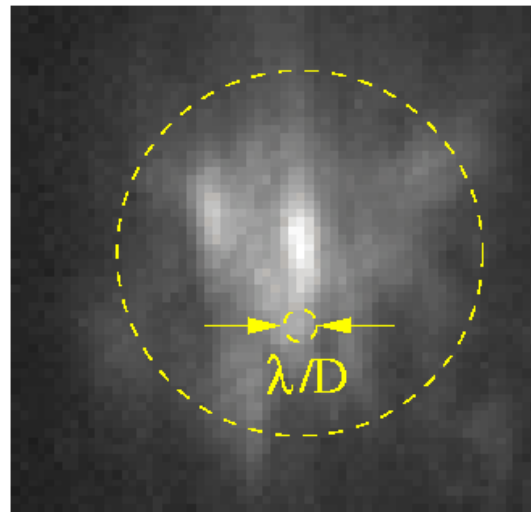
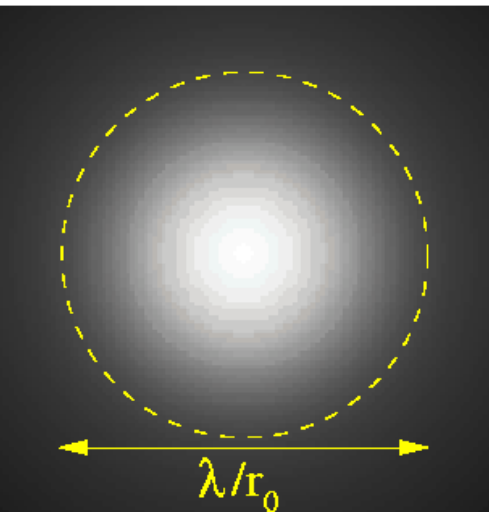
# Didaktisches zur Milchstraße



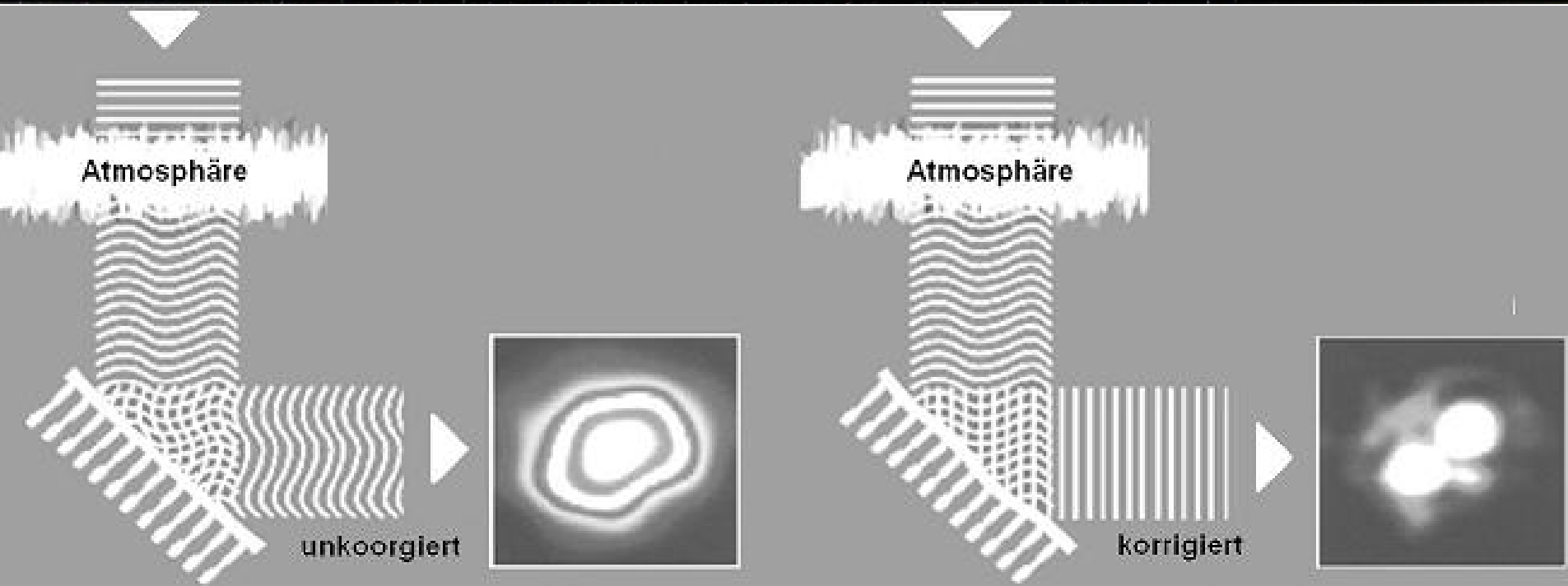




Freihandanalogie-  
Experiment  
à Ph:  
Bildverschmierung bei  
turbulenter Atmosphäre

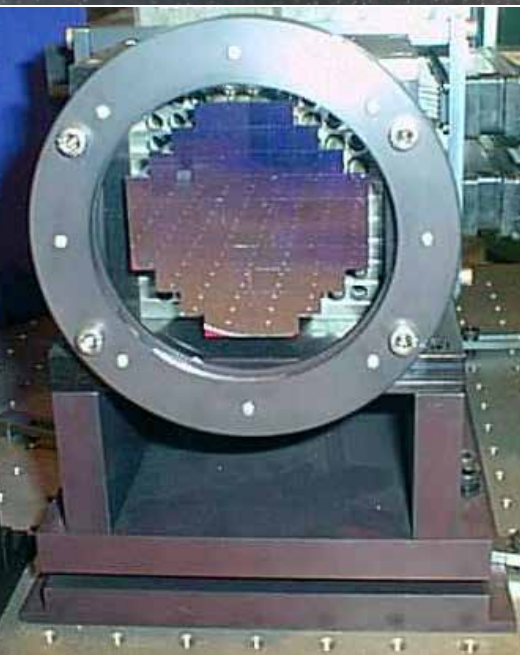






Wellenfronten werden in Atmosphäre verbogen

Deformierbarer Spiegel biegt Wellenfronten wieder in Ursprungsform



Segmentierter Spiegel des William-Herschel-Teleskops (La Palma)  
mit 76 Elementen und 228 Piezo-Aktuatoren.

Quelle: MPI Heidelberg



**Adaptive Optik mit dem VLT:  
Erzeugung eines Laserleitsterns**

Bild: Yuri Beletsky - NASA Astronomy Picture of the Day



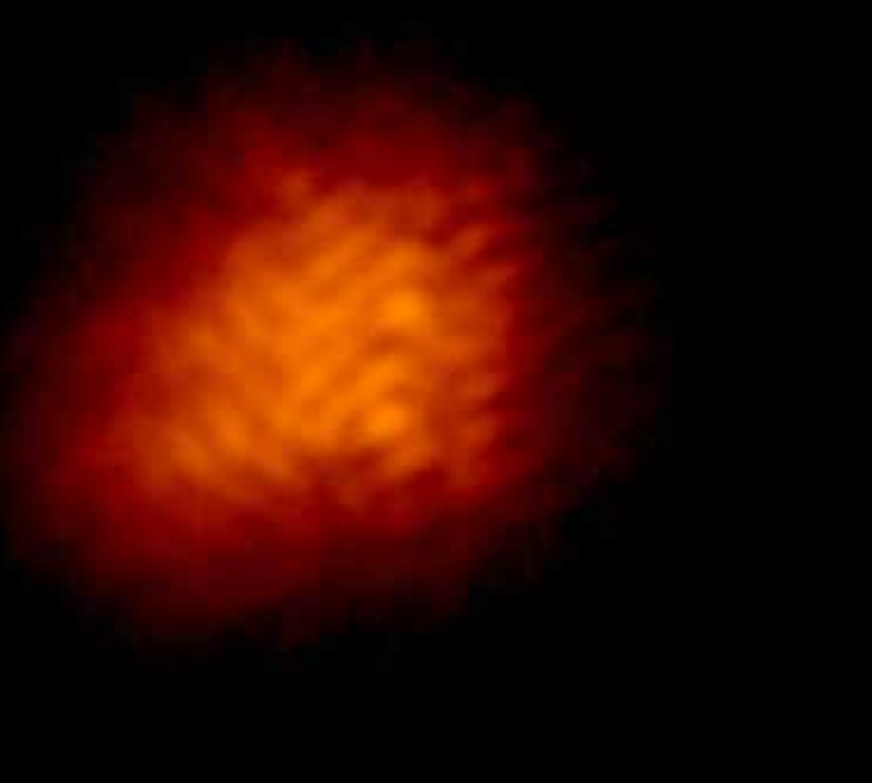
## Doppelsternsystem

Aufnahme am Palomar Observatory, Californien

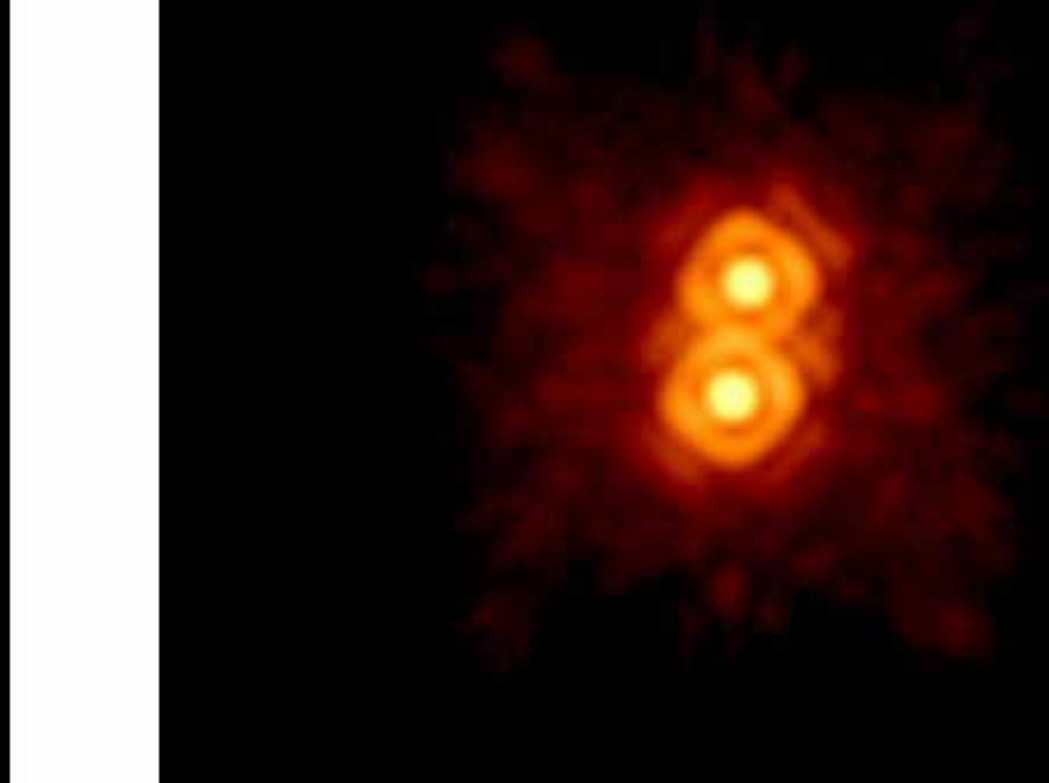
Quelle: <http://mtech.dk/thomsen/usa2006/may/07.JPG>

siehe auch: [http://www.sebastian-wilken.de/docs/sonstiges/adaptive\\_optik.pdf](http://www.sebastian-wilken.de/docs/sonstiges/adaptive_optik.pdf)

**Adaptive Optik aus**



**Adaptive Optik an**





# Zentrums des Milchstraßensystems

Aufgenommen am Keck Observatory, Hawaii

Quelle: [http://cosmicmatters.keckobservatory.org/2007/dec/images/galactic\\_center\\_ao.jpg](http://cosmicmatters.keckobservatory.org/2007/dec/images/galactic_center_ao.jpg)

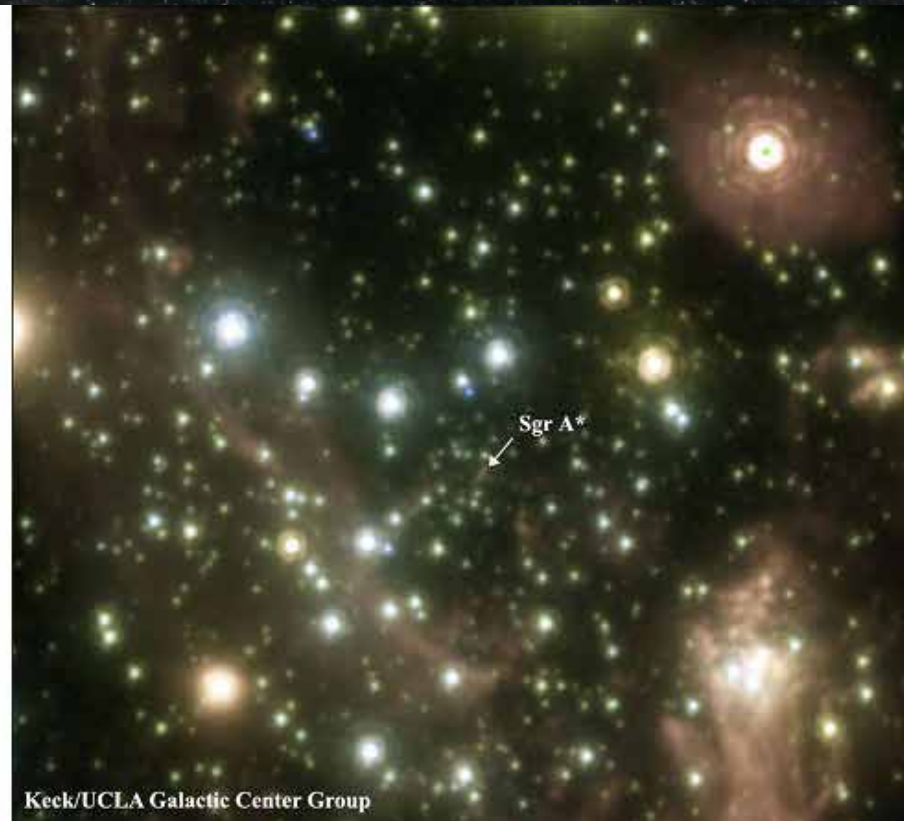
siehe auch: [http://www.sebastian-wilken.de/docs/sonstiges/adaptive\\_optik.pdf](http://www.sebastian-wilken.de/docs/sonstiges/adaptive_optik.pdf)

**Der bessere Durchblick durch die  
Erdatmosphäre  
à Adaptive Optik macht es möglich**

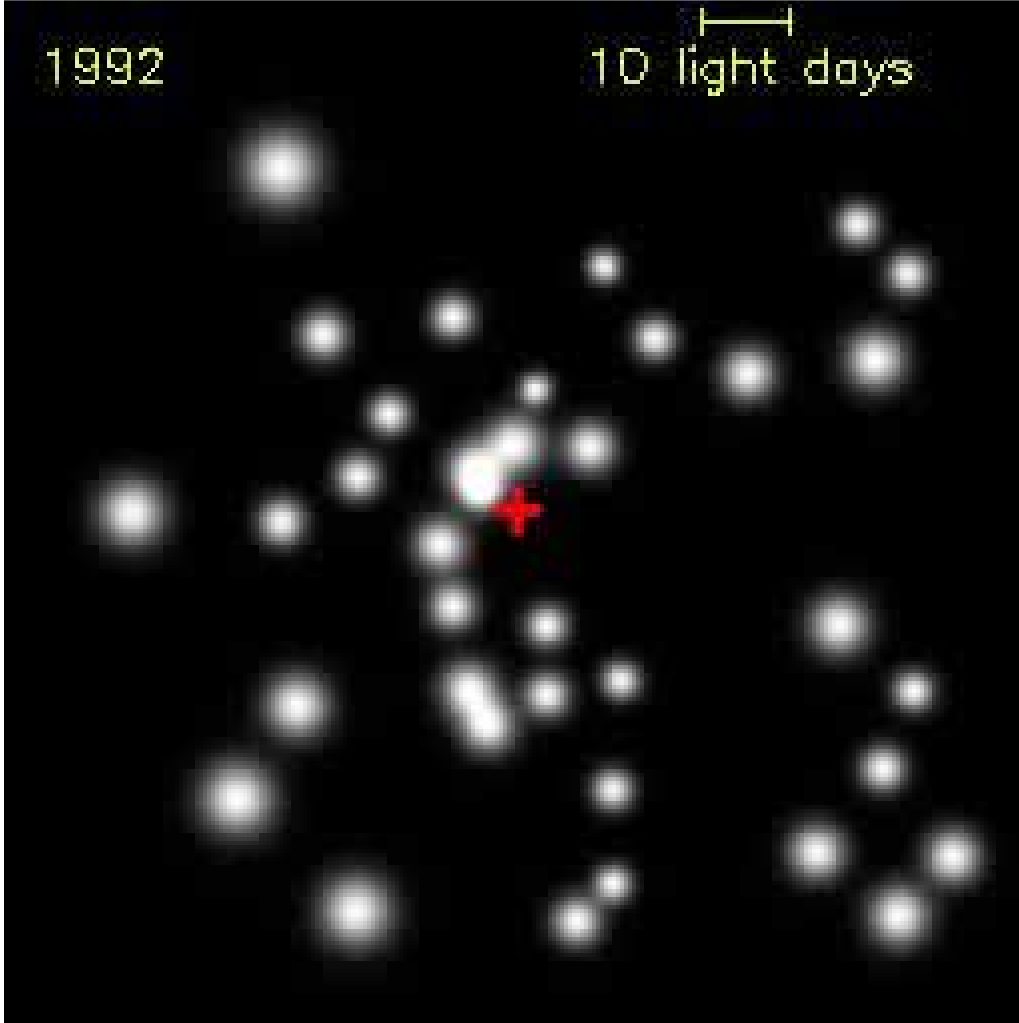
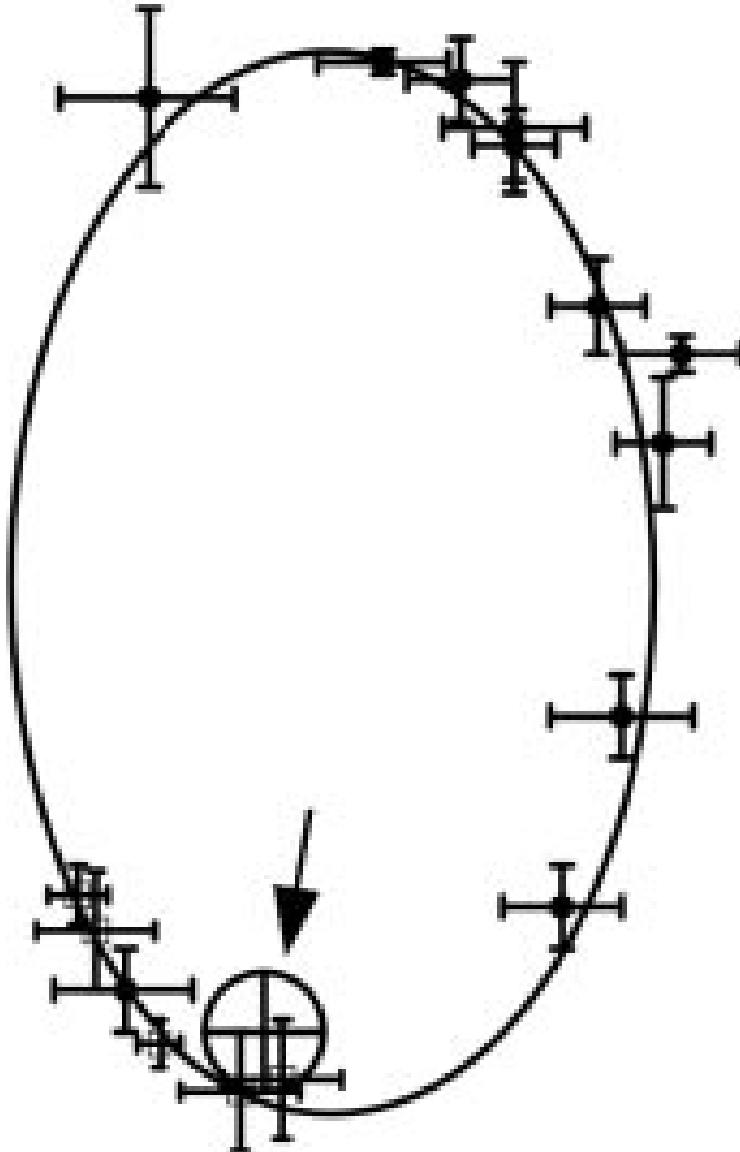
**Adaptive Optik aus**



**Adaptive Optik an**



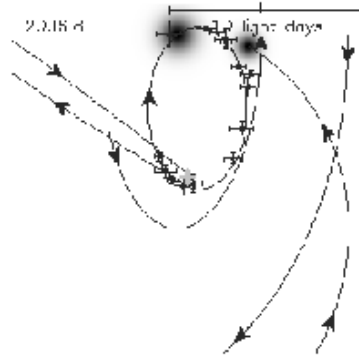
# Umlaufbahn des Sterns S2





**Aufgaben: Das „Monster“ im galaktischen Zentrum „auf der Waage“**  
(WiS!-Material zu SuW 11/2006)

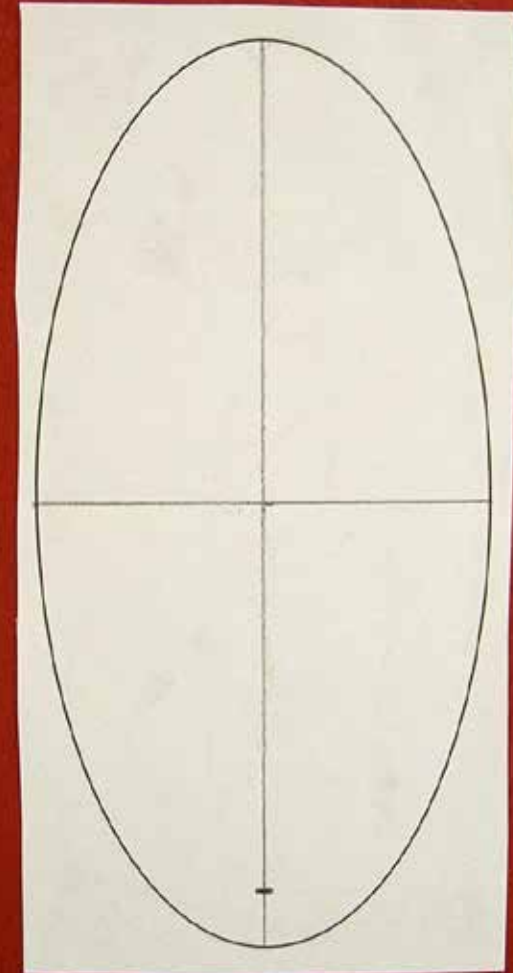
Das Movie [MPA-Movie](#) (zu finden bei den angehängten didaktischen Materialien) zeigt im Zeitraffer den Umlauf von Riesensternen, deren Infrarotlicht den galaktischen „Staubvorhang“ teilweise zu durchdringen vermag, um das Zentrum des Milchstraßensystems. Im Bild rechts (Standbild aus dem Movie) werden die gemessenen Orte bis zum Zeitpunkt 2006,8 gezeigt.



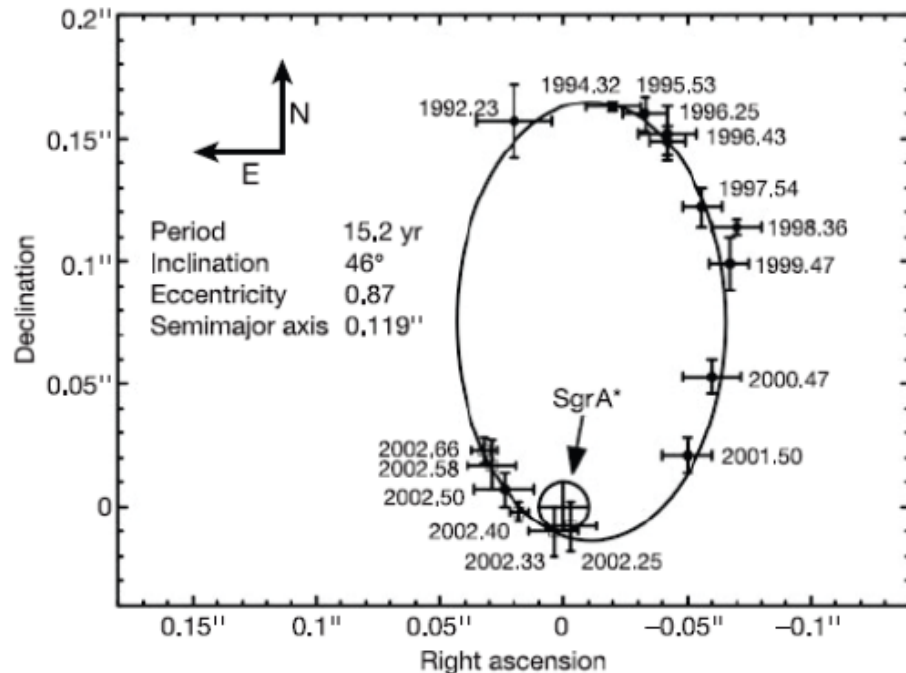
In der unten gezeigten Abbildung (Quelle: Nature Letters), Band 419, 17. Oktober 2002, S. 695) wird die Bahn des ausgesuchten Sterns S2 um das Zentrum des Milchstraßensystems (Ort der Radioquelle Sgr A') präsentiert, die aus den zu verschiedenen Zeiten bestimmten Positionen konstruiert wurde. Im Zentrum wird schon lange ein Schwarzes Loch vermutet.

# nur Aufgabe 1

(20 min)



1. Warum steht Sgr A' nicht im Brennpunkt der sichtbaren Ellipse (Leserfrage aus SuW 8/2006, S. 7)? Diese Frage ist u. a. auch mit anschaulichen Hilfsmitteln zu klären. Welche Exzentrizität hat die sichtbare Ellipse?
2. Welche Masse befindet sich im Zentrum des Milchstraßensystems?



## Das zentrale Schwarze Loch im Milchstraßensystem

(... besser messen ... besser „wiegen“)

2002 erschien in der Zeitschrift „Nature“ ein kurzer Beitrag, der darstellt, dass die Masse im galaktischen Zentrum, die auf Grundlage 10 Jahre lang durchgeführter Positionsmessungen eines Sterns (S2), der das Zentrum auf einer Keplerbahn umläuft, ermittelt wurde, zumindest teilweise in einem supermassiven Schwarzen Loch konzentriert sein muss. Die Genauigkeit der Winkelmessung lag damals bei etwa 0,01" (Bogensekunden).

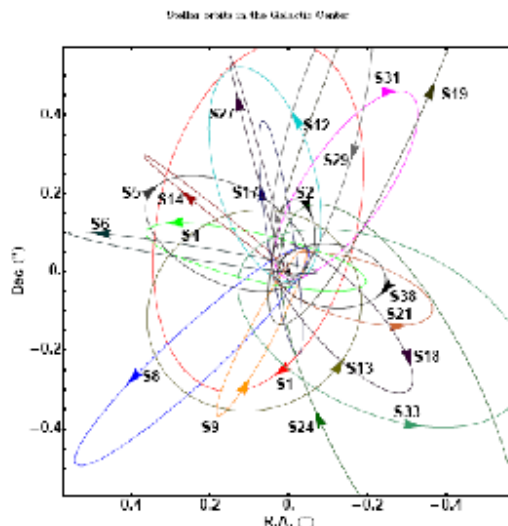
2009 wurden bessere Messungen (Winkelmessgenauigkeit: 0,0003"), die man nunmehr 16 Jahre lang durchführte, im „Astrophysical Journal“ vorgestellt. Daraus wurden die Umlaufbahnen mehrerer Sterne (darunter S2) um die zentrale Masse im galaktischen Zentrum konstruiert (siehe Bild).

1. Wie groß ist eine Bogensekunde?

Gib neben der Umrechnung in Grad auch einen Vergleich an, der die Kleinheit dieses Winkels veranschaulicht.

2. Bestimme für die im „Nature“-Beitrag (2002) gezeigte Bahnellipse des Sterns S2 (siehe Bild im Anhang) die Zentralmasse mit Hilfe des 3. keplerschen Gesetzes. Die Werte für die große Bahnhalbachse  $a$ ["] (in Bogensekunden) und die Umlaufzeit  $T$  findest du im Bild. Die nötigen Formeln und weitere Werte stehen unten.

3. Bestimme nun die Zentralmasse für die Bahnellipse des Sterns S2 ausgehend von den Werten, die im „Astrophysical Journal“ (2009) veröffentlicht wurden (siehe Tabelle im Anhang).



Der für die trigonometrische Berechnung der großen Bahnhalbachse  $a$  in Metern wichtige Abstand bis zum galaktischen Zentrum wurde im „Nature“-Beitrag mit  $r = 8$  kpc (Kiloparsec) und im Artikel im „Astrophysical Journal“ mit  $r = 8,33$  kpc angegeben.

Weitere wichtige Werte sind:

$$\text{Gravitationskonstante } \gamma = 6,6743 \cdot 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$$

$$\text{Umrechnung: } 1 \text{ pc} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ m}$$

$$\text{Sonnennasse } M_s = 1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

Formeln:

$$a = \tan \alpha \cdot r \quad (\text{trigonometrische Berechnung der großen Bahnhalbachse } a \text{ in Metern),}$$

$$M = \frac{a^3}{T^2} \cdot \frac{4\pi^2}{\gamma} \quad (\text{3. keplersches Gesetz in allgemeiner Form).}$$

## Aufgabe 2 (45 min)



# Das Schwarze Loch im Milchstraßensystem

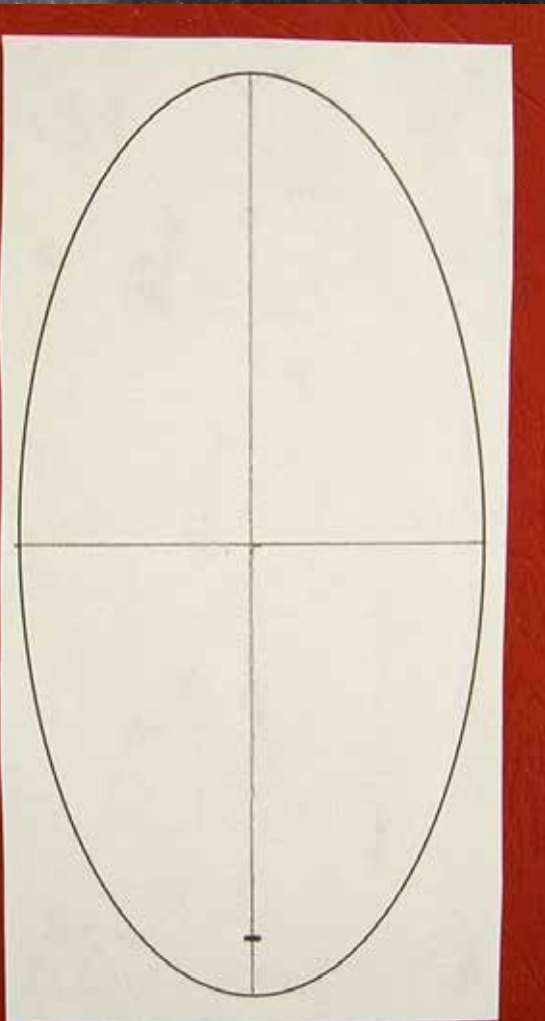
*Workshop*

# Lösungen

Haus der Astronomie

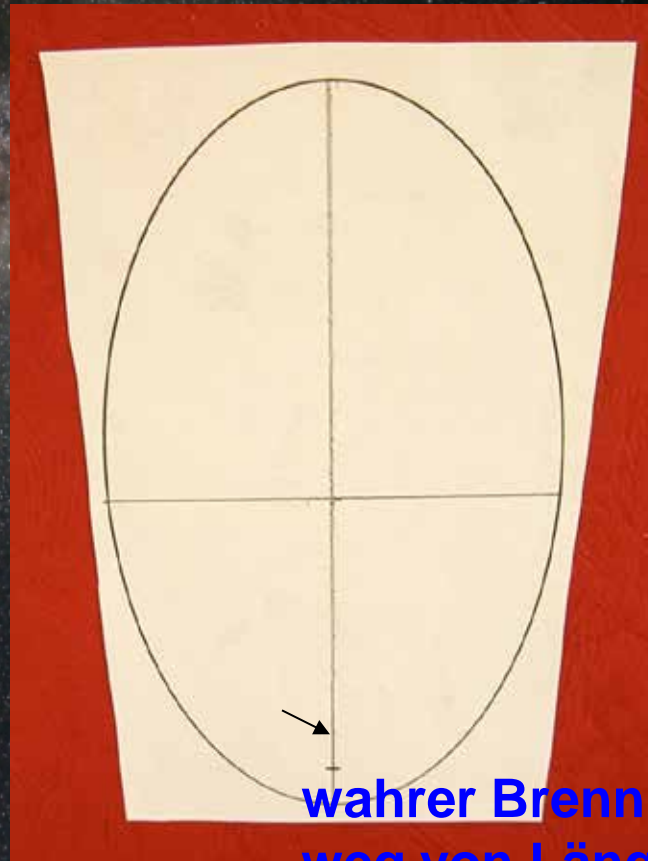
# Aufgabe 1.1

wahre Bahnellipse



Kippung gegen  
Tangentialebene

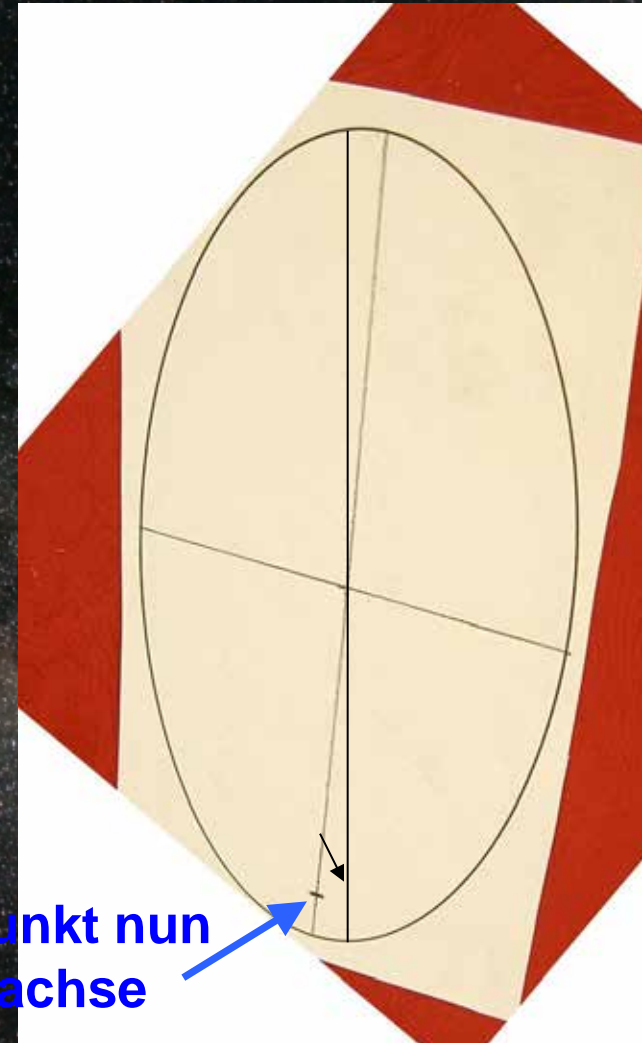
- à scheinbare Bahnellipse:
- à andere Exzentrizität, neuer Brennpunkt



wahrer Brennpunkt nun  
weg von Längsachse

Verdrehung in neuer  
Ebene

- à neue scheinbare Bahnellipse:
- à wieder andere Exzentrizität,  
wieder neuer Brennpunkt





## Aufgabe 1.1

Die Längen der großen und der kleinen Ellipsenachse der in Projektion sichtbaren Ellipse betragen  $a=247$  und  $b=150$  Pixel. Daraus ergibt sich für die im Bild sichtbare Ellipse (scheinbare Bahnellipse) eine numerische Exzentrizität von

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} = \frac{\sqrt{247^2 - 150^2}}{247} = 0,79$$



## Aufgabe 2.1

Eine Bogensekunde (") entspricht dem 1/3600-sten Teil eines Grads. Ein Millimeterabstand auf dem Lineal muss aus einer Entfernung von ca. 200 m (206,265 m) betrachtet werden, wenn man ihn unter einem Winkel von 1" sehen will.

Für den Kreis gilt folgende Verhältnisgleichung:

b ... Bogenlänge (kleine Bogenlängen können auch eine Strecke angenähert werden)

u ... Umfang

$$\frac{b}{u} = \frac{b}{2\pi \cdot R} = \frac{1''}{360^\circ}$$

$$R = \frac{b \cdot 360^\circ}{2\pi \cdot \left(\frac{1}{3600}\right)^\circ} = \frac{1 \text{ mm} \cdot 360 \cdot 3600}{2\pi} \approx \mathbf{206.265 \text{ mm}}$$



# Aufgaben 2.2 u. 2.3

## Gegeben:

### Ergebnisse

Nature, Band 419 (2002), S. 694-696

(astrometrische Genauigkeit: 10 Millibogensekunden, 10 Jahre Messzeit)

Stern S2:

Große Bahnhalbachse  $a = 0,119''$

Umlaufzeit  $T = 15,2$  a

Abstand zum galaktischen Zentrum  $r \approx 8$  kpc

$a = \tan \alpha \cdot r$

$$a = \tan\left(\frac{0,119}{3600''/\circ}\right) \cdot 8000 \cdot 3,086 \cdot 10^{16} \text{ m}$$

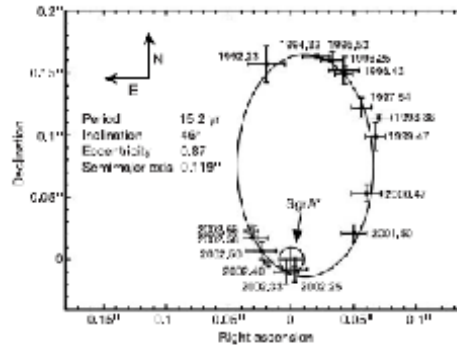
$$a = 1,424 \cdot 10^{14} \text{ m}$$

$$M = \frac{a^3}{T^2} \cdot \frac{4\pi^2}{\gamma}$$

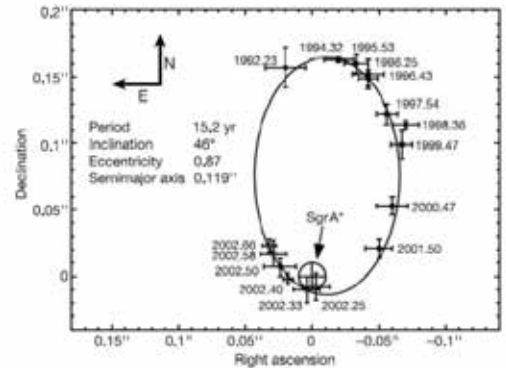
$$M = \frac{(1,424 \cdot 10^{14} \text{ m})^3}{(15,2 \cdot 365,25 \cdot 86400 \text{ s})^2} \cdot \frac{4\pi^2}{6,6743 \cdot 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}} \approx 7,42 \cdot 10^{36} \text{ kg}$$

$$M \approx 3,7 \cdot 10^6 M_{\odot}$$

→ Zentralmasse: 3,7 Mio Sonnenmassen



Die Abbildung zeigt die Bahn des Sterns S2 um das Zentrum des Milchstraßenzentrums (Sgr A\*) basierend auf Daten von 1992 bis 2002. Die Bahn ist als Ellipse dargestellt, die das Zentrum Sgr A\* umschließt. Die Achsen sind mit 'Dec' (Declination) und 'Right ascension' beschriftet. Die Bahnparameter sind: Period 15,2 yr, Inclination 46°, Eccentricity 0,87, Semimajor axis 0,119''. Verschiedene Datenpunkte sind mit Jahreszahlen und Koordinaten beschriftet.



Astrophysical Journal, Band 692 (2009), Teil 2, S. 1075-1109

(viel bessere astrometrische Genauigkeit: 300 Mikrobogensekunden, nun 16 Jahre Messzeit)

Stern S2:

Große Bahnhalbachse  $a = 0,123''$

Umlaufzeit  $T = 15,8$  a

Abstand zum galaktischen Zentrum  $r \approx 8,33$  kpc

$a = \tan \alpha \cdot r$

$$a = \tan\left(\frac{0,123}{3600''/\circ}\right) \cdot 8330 \cdot 3,086 \cdot 10^{16} \text{ m}$$

$$a = 1,5329 \cdot 10^{14} \text{ m}$$

$$M = \frac{a^3}{T^2} \cdot \frac{4\pi^2}{\gamma}$$

$$M = \frac{(1,5329 \cdot 10^{14} \text{ m})^3}{(15,8 \cdot 365,25 \cdot 86400 \text{ s})^2} \cdot \frac{4\pi^2}{6,6743 \cdot 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}} \approx 8,57 \cdot 10^{36} \text{ kg}$$

$$M \approx 4,31 \cdot 10^6 M_{\odot}$$

→ Zentralmasse: 4,31 Mio Sonnenmassen

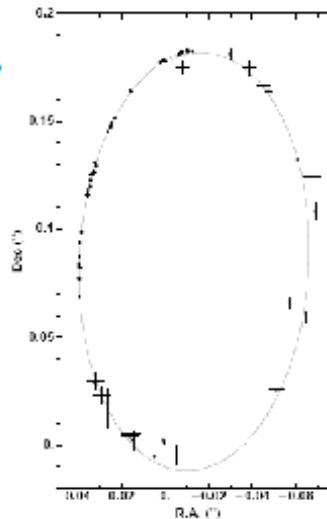


TABLE 2  
ORBITAL PARAMETERS OF STARS S0-16, FOR WHICH WE WERE ABLE TO DETERMINE ORBITS. THE PARAMETERS WERE DETERMINED BY THE METHOD AS OUTLINED IN SECTION 4.2.8. THE ERRORS GIVEN IN THIS TABLE ARE THE FORMAL 1 $\sigma$  ERRORS AFTER INCLUDING THE BURN THAT THE REDUCED  $\chi^2 = 1$  AND INCLUDING THE UNCERTAINTIES FROM THE FITTING. THE LAST THREE COLUMNS GIVE THE SPHERICAL VELOCITY FOR GALACTIC YEAR 0 FOR OBSERVED YEARS, THE KEPLERIAN VELOCITY AT THE ORBITAL PERIHELION FOR THE FIRST YEAR, THE PERIHELION VELOCITY FOR GALACTIC YEAR 0, AND THE VELOCITY FOR A HYPERBOLIC ORBIT WITH  $e > 1$ . WE ALSO GIVE THE ORBITAL SOLUTIONS FOR THE YEARS 196 AND 197 WHICH WERE OBTAINED ONLY FROM ACCELERATION DATA (SECTION 7.2.1).

Star	$\log a$	$\log e$	$\log i$	$\log \Omega$	$\log \omega$	$\log v_{\text{peri}}$	$\log v_{\text{gal}}$	$\log v_{\text{hyp}}$	$\log v_{\text{gal}}$
01	1,70	0,70	0,00	0,00	0,00	1,70	1,70	1,70	1,70
02	1,10	0,90	0,00	0,00	0,00	1,10	1,10	1,10	1,10
03	1,20	0,80	0,00	0,00	0,00	1,20	1,20	1,20	1,20
04	1,30	0,70	0,00	0,00	0,00	1,30	1,30	1,30	1,30
05	1,40	0,60	0,00	0,00	0,00	1,40	1,40	1,40	1,40
06	1,50	0,50	0,00	0,00	0,00	1,50	1,50	1,50	1,50
07	1,60	0,40	0,00	0,00	0,00	1,60	1,60	1,60	1,60
08	1,70	0,30	0,00	0,00	0,00	1,70	1,70	1,70	1,70
09	1,80	0,20	0,00	0,00	0,00	1,80	1,80	1,80	1,80
10	1,90	0,10	0,00	0,00	0,00	1,90	1,90	1,90	1,90
11	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,00	2,00	2,00
12	2,10	0,00	0,00	0,00	0,00	2,10	2,10	2,10	2,10
13	2,20	0,00	0,00	0,00	0,00	2,20	2,20	2,20	2,20
14	2,30	0,00	0,00	0,00	0,00	2,30	2,30	2,30	2,30
15	2,40	0,00	0,00	0,00	0,00	2,40	2,40	2,40	2,40
16	2,50	0,00	0,00	0,00	0,00	2,50	2,50	2,50	2,50