

## Hinweise zur Navigation

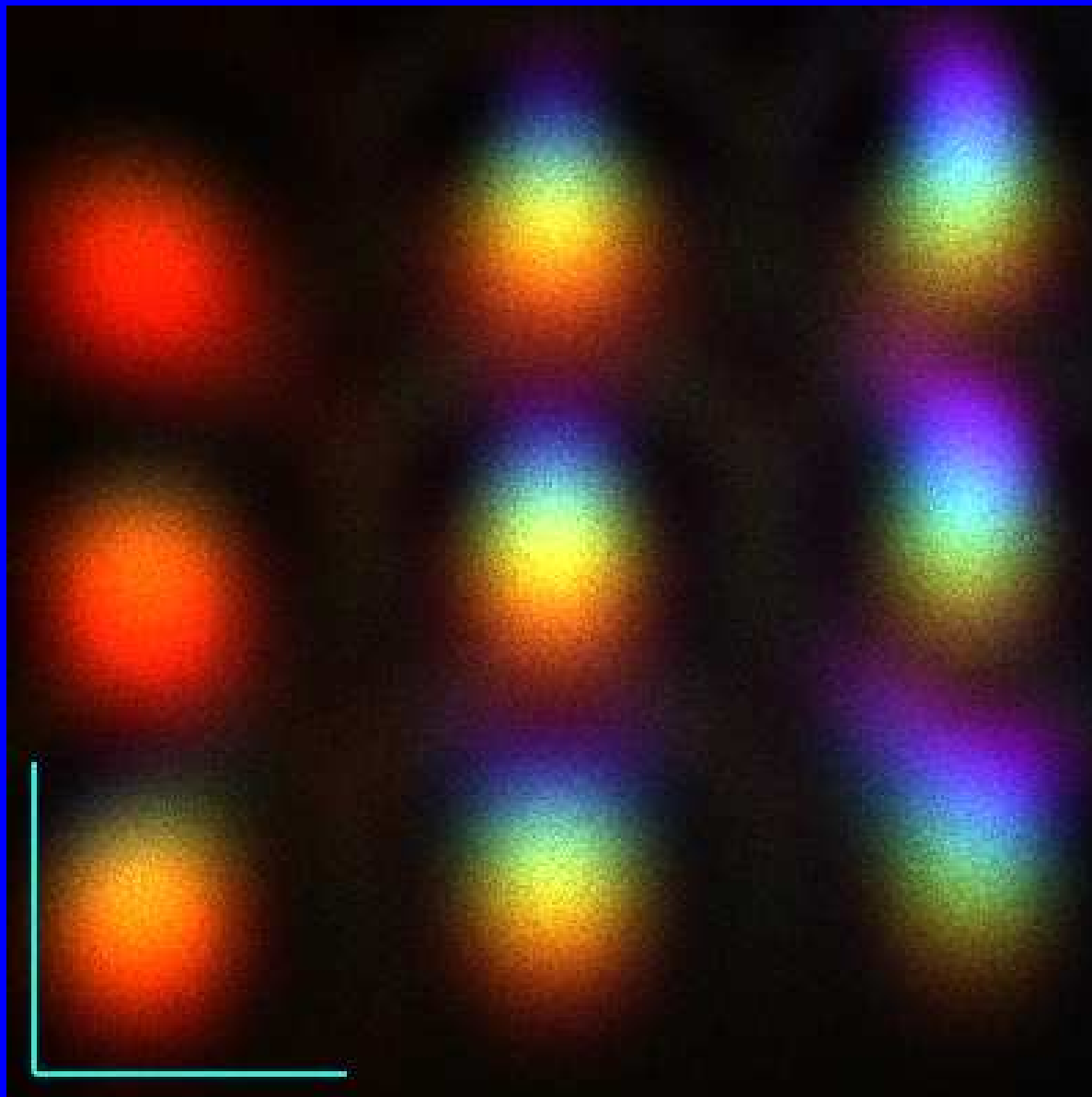
Der Fullscreen Modus kann durch drücken der **ESC**-Taste verlassen werden.

Das folgende PDF Dokument kann **nicht** einfach durch geblättert werden.

Befindet sich ein oder mehrere **Hyperlinks**, dargestellt mit der Farbe **cyan**, dann klickt man auf den ersten Link und fährt fort bis zum letzten. Sind alle Links abgearbeitet oder hat es keine, dann klickt man in der Fusszeile auf der rechten Seite den Link in **GELB**, welcher zur logisch nächsten Folie führt.

In der Fusszeile links befindet sich der Link zum aktuellen Inhaltsverzeichnis und die Gesamtseitenzahl rechts führt zur Zusammenfassung am Ende.

In der Kopfzeile führt das Datum an den **Beginn der Präsentation**.



# Astrofotografie vom Grund des Luftmeers

Die Auswirkungen der Refraktion, der  
Dispersion und der Ausrichtung des  
Teleskops

# Übersicht

- Zweck und Folgerung
- Beeinflussbare Grössen
- Zwei Begriffe
- Wie es dazu gekommen ist
- Die Effekte im Detail
- Ausblick und Zusammenfassung

## Zweck

- Routinemässige Herstellung von Fotografien mit der Auflösung von

$\approx 1 \dots 2''$

- Realistische Erwartungen an eine Himmelsfotografie

## Folgerung

- Alle systematischen Effekte müssen mit dieser Genauigkeit bekannt **und** kompensierbar sein

## Beeinflussbare Grössen

Eine ansprechende Himmelsfotografie hängt von den folgenden **beeinflussbaren** Punkten ab

- Teleskop: Objektiv, Montierung
- Detektor: konventionelle Kamera, CCD, ...
- Fokussierung
- **Ort am Himmel**
- **Ausrichtung der Stundenachse**
- **Übung und Erfahrung**

- **Refraktion:**

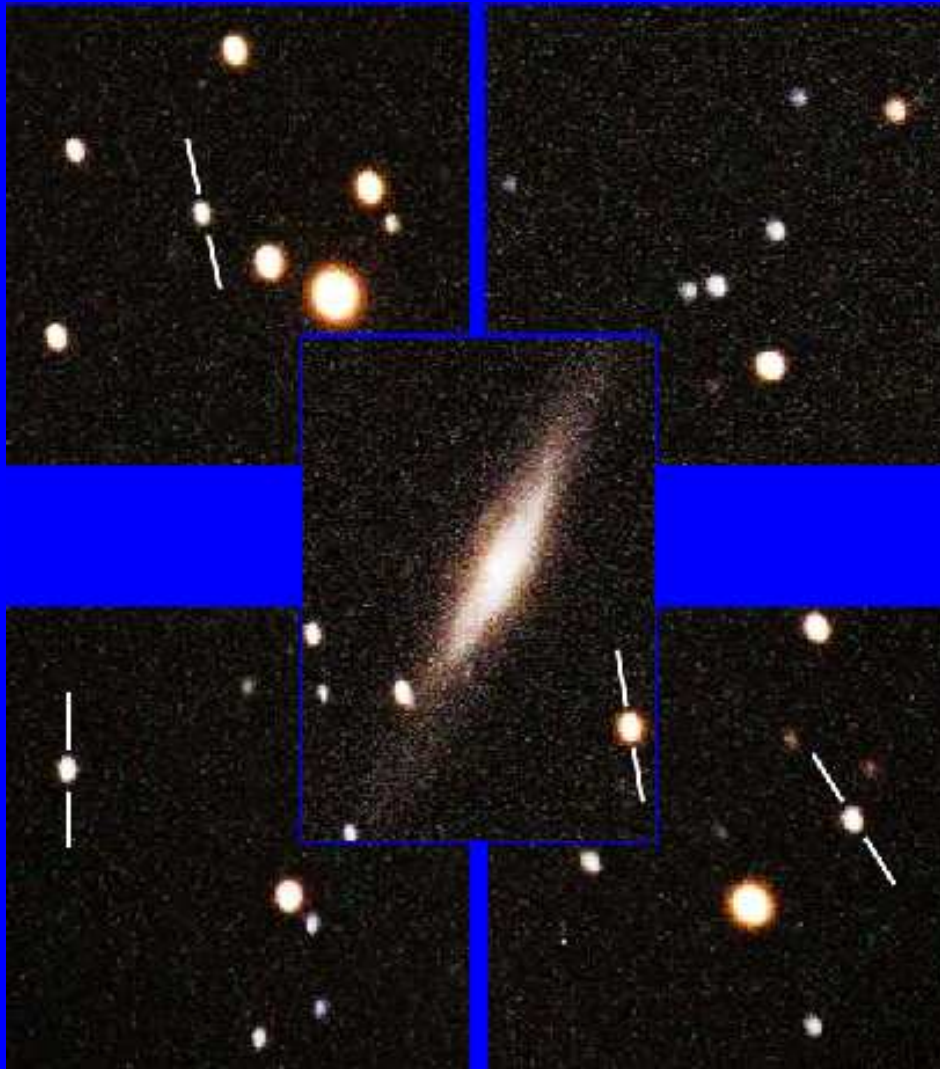
Brechung des Lichtes an einer Grenzfläche

- **Dispersion:**

Aufspaltung des Lichts in seine Farben

## Wie es dazu gekommen ist

Diskussion mit Arthur von Känel	Juli 2001
Recherche I	August 2001
Ausrichtung der Stundenachse	September 2001
Erste Resultate	Frühjahr 2002
Anleitung ...	
Simulation	Sommer 2002
Recherche II	Winter 2002
Resultat I: Bestätigung der Vermutungen <sup>+</sup>	Frühjahr 2002
Resultat II: Dias von Arthur von Känel	ab Sommer 2002
Resultat III: Manuskript	September 2003



NGC 2683 70 Min.,  $\delta = 33.4^\circ$ ,  
 $\tau = -3^h 10^m$

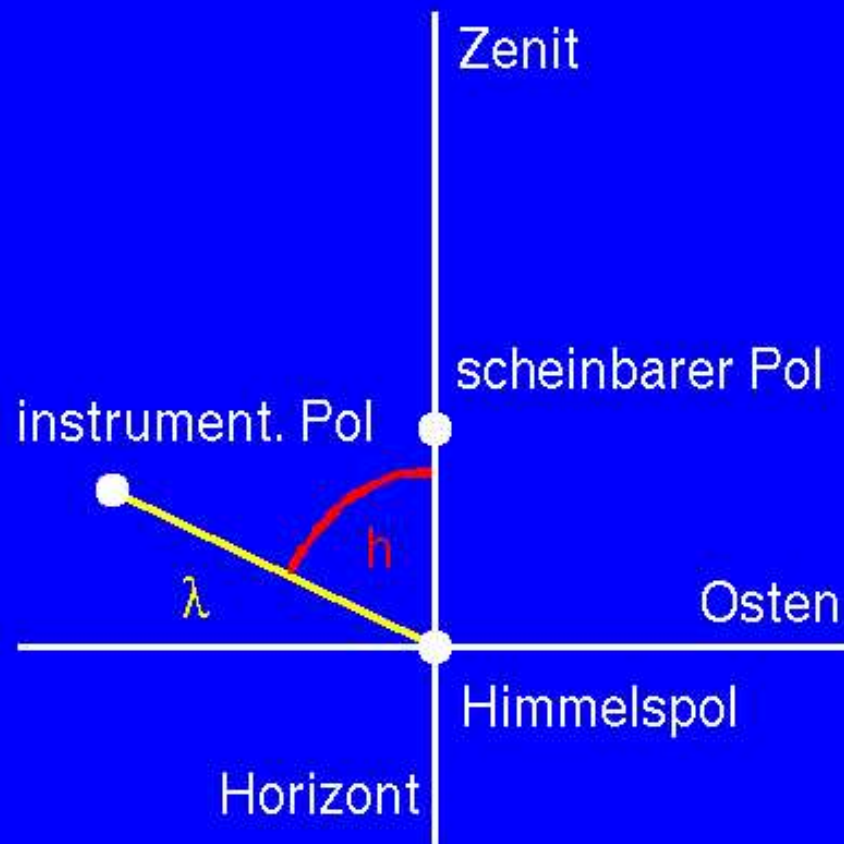
- Variation der Spuren
  - Richtung
  - Längeüber das ganze Feld.
- Verminderung der
  - Auflösung
  - Beleuchtung
- Mögliche Ursachen
  - “differentielle” Refraktion
  - Ausrichtung

- Refraktion der Atmosphäre
  - **Differential refraction revisited**, Donnelly, R. H., 1993
  - **Alignment, Pointing Accuracy and Field Rotation of the UK 1.2-m Schmidt Telescope**,  
P.T. Wallace & K.P. Tritton, 1979
  - **Forms of images in stellar photography**,  
E.S. King, 1902
- Ausrichtung der Stundenachse
  - Methode nach J. Scheiner (Drift Alignment Methode)
  - Hinweise zu einer fotografischen Methode gemäss E.S. King
  - **Homepage** mit einem Artikel von L. Dettwiller et. al.

- Refraktion der Atmosphäre
  - **Differential refraction revisited**, Donnelly, R. H., 1993
  - **Alignment, Pointing Accuracy and Field Rotation of the UK 1.2-m Schmidt Telescope**, P.T. Wallace & K.P. Tritton, 1979
  - **Forms of images in stellar photography**, E.S. King, 1902
- Ausrichtung der Stundenachse
  - Methode nach J. Scheiner (Drift Alignment Methode)
  - Hinweise zu einer fotografischen Methode gemäss E.S. King
  - [Homepage](#) mit einem Artikel von L. Dettwiller et. al.

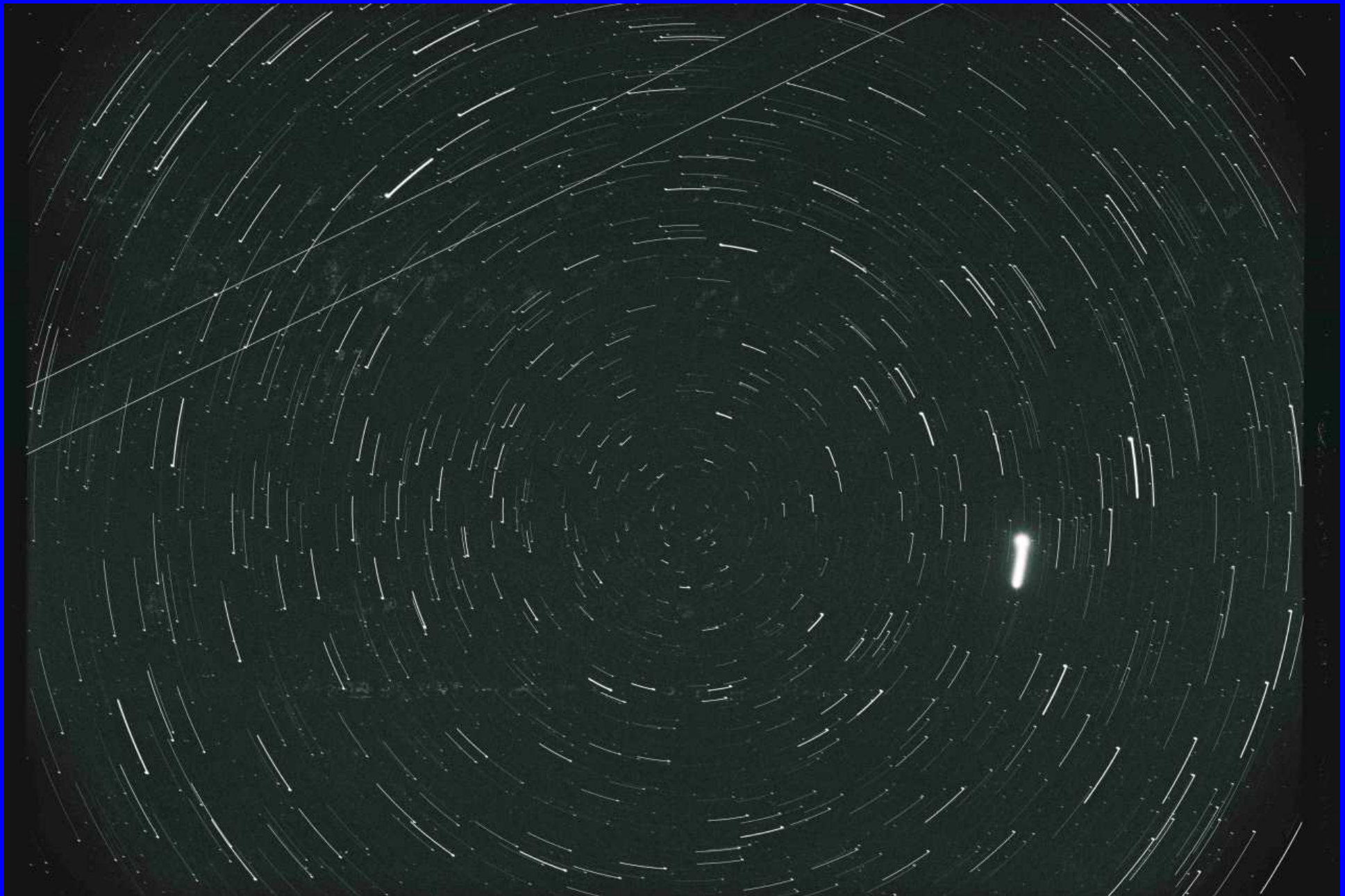
**A vos montures et bonne chance !**

# Aufgabe



## Praktische Durchführung

- Aufnahme der Polregion zuerst 10 Minuten stehend, dann 30 Minuten siderisch nachgeführt
- Auswertung der Länge und der Richtung der Spuren
- Verstellen der Stundenachse



21. Aug. 2001, 21:00UTC, nachgeführt 21:20UTC, 30 Minuten



Wie vorher, Ausschnitt um Polaris

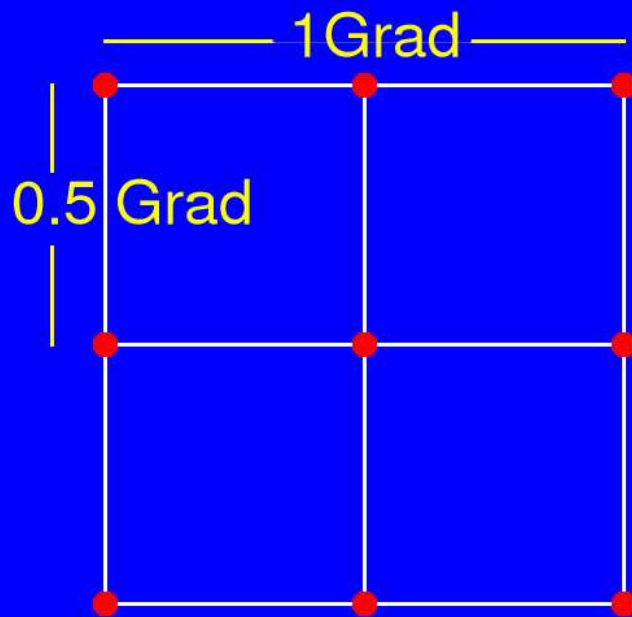
### **Vorteile der Simulation:**

- Getrennte Darstellung der verschiedenen Effekte
- Mit einem Teleskop schwierig zu machen, da alle Effekte immer in der Summe auftreten

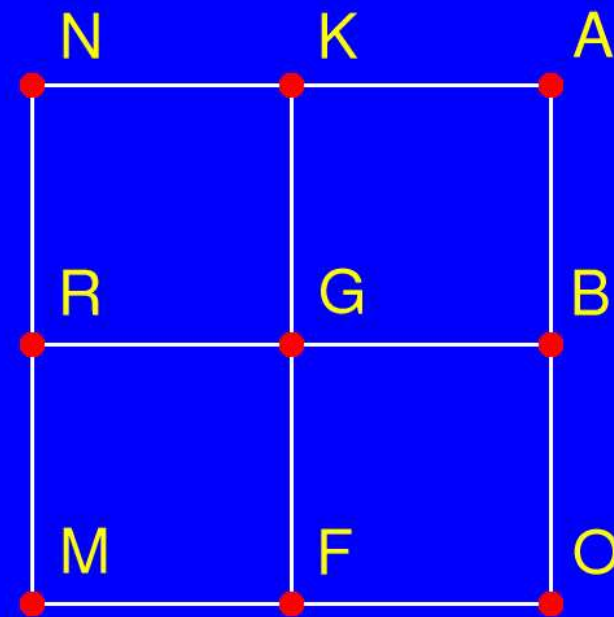
### **Was berücksichtigt wird:**

- Alle analytisch berechenbaren Zusammenhänge

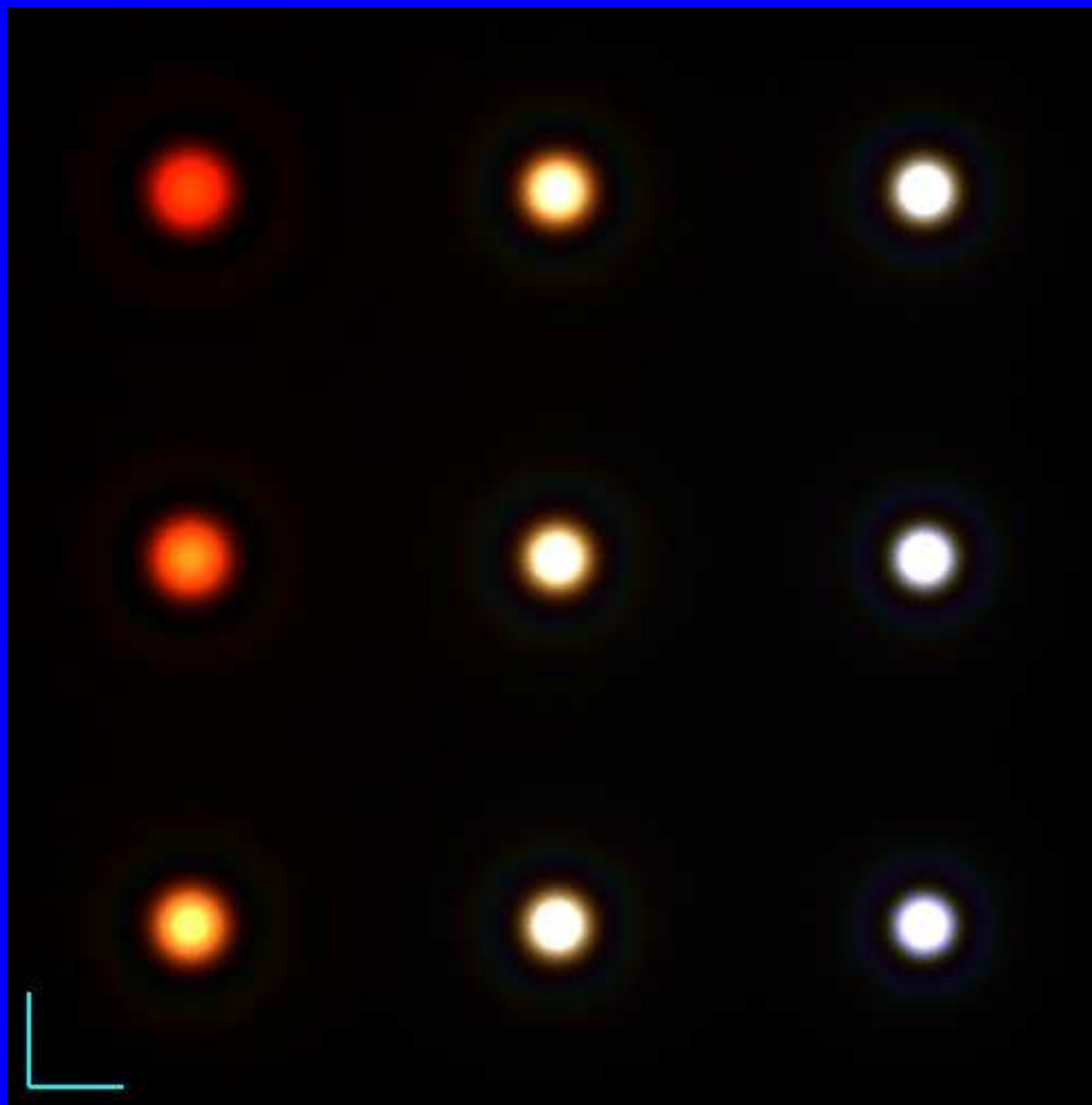
## Schematisches Sternfeld



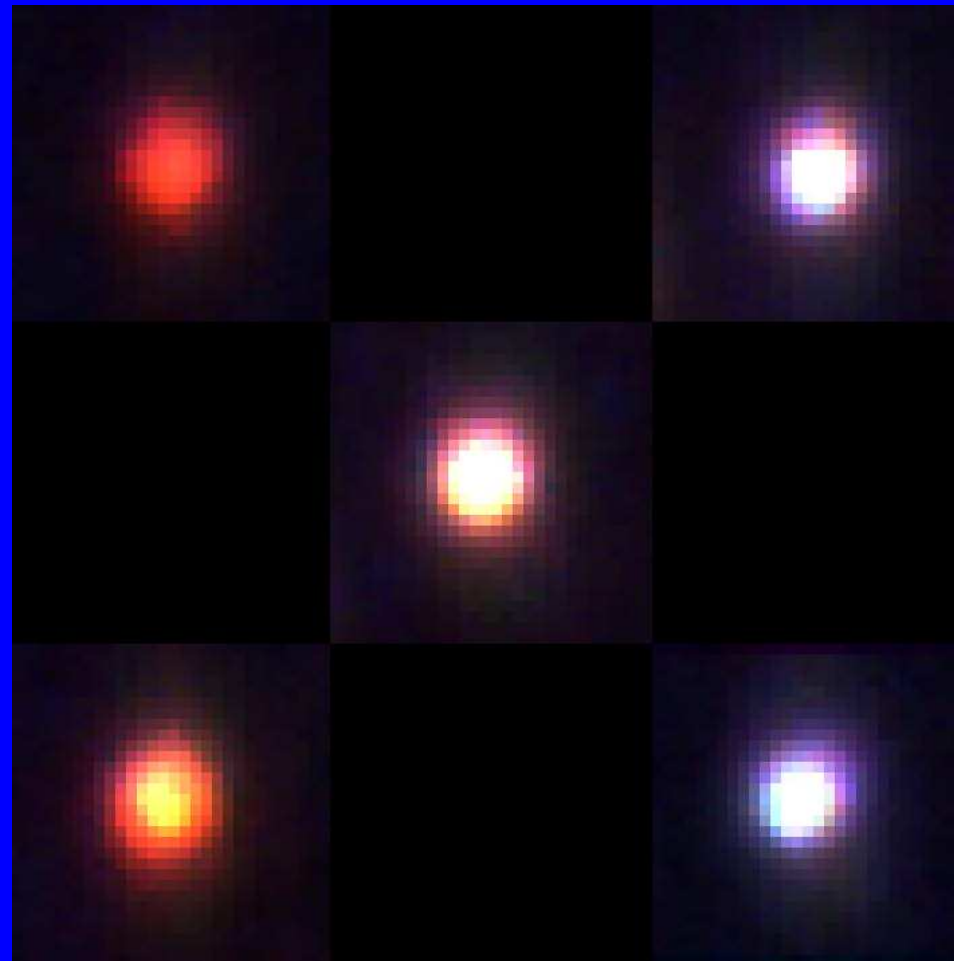
Geometrie



Spektraltypen



Simulierte Sterne der Spektralklassen N bis O

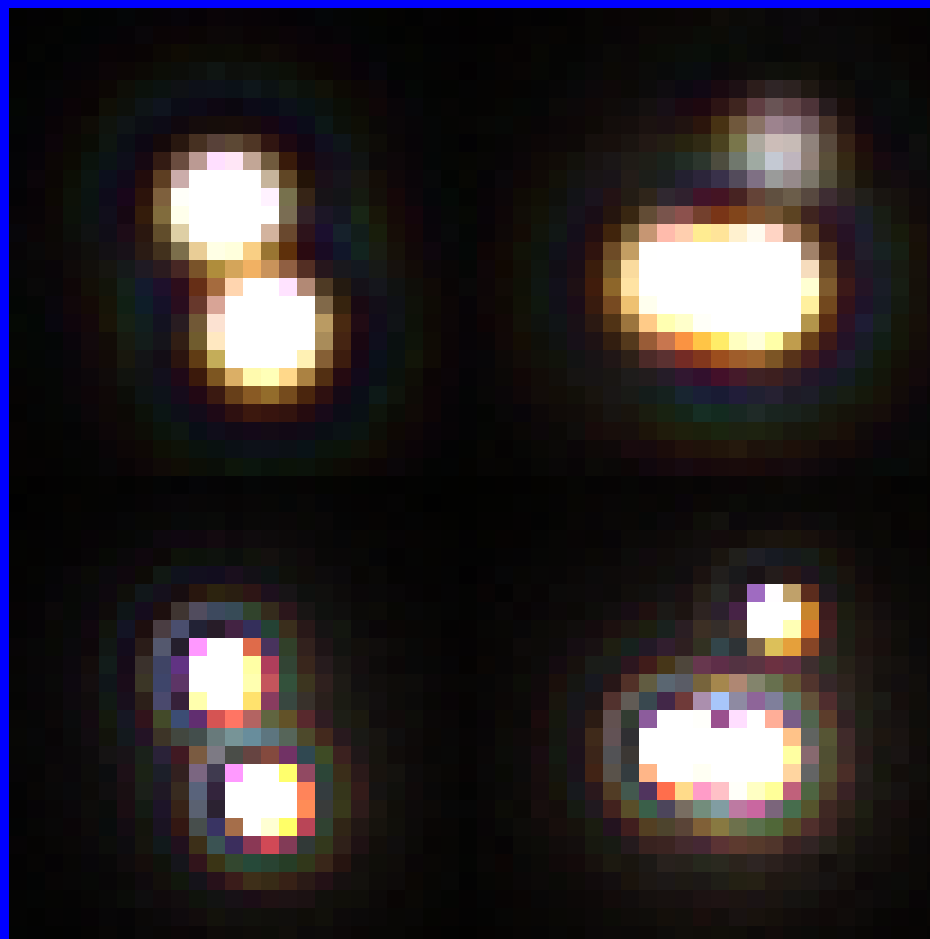


Sterne verschiedener Spektralklassen  
(Fotografie)



$\sigma < 1/4 a$	<b>Perfect images, without visible distortion and little agitated</b>
$\sigma = 1/4 a$	<b>Complete rings, crossed by moving rings</b>
$\sigma = 1/2 a$	<b>Medium turbulence, diffraction rings broken, central spot</b>
$\sigma = a$	<b>Strong turbulence, rings weak or absent</b>
$\sigma = 3/2 a$	<b>Image tending towards a planetary appearance</b>

**High resolution astrophotography, Dragesco, J. 1995**



$\epsilon_2$  Lyrae (links),  $\epsilon_1$  Lyrae (rechts), Auflösung  $.2''$  /Pixel,  
Öffnungsdurchmesser  $D = 100$  mm (oben),  $D = 200$  mm (unten).

Ausrichtung	Allgemein
<b>J. Challis 1879</b>	<b>F. Brünnow 1880</b>
<b>J. Scheiner 1889</b>	<b>H.H. Turner 1893</b>
<b>A. A. Rambaut 1893</b>	
<b>A.S. Hinks 1898</b>	
<b>E.S. King 1902</b>	
<b>P.T. Wallace et. al. 1979</b>	<b>A.V. Filippenko 1982</b>
	<b>R.H. Donnelly et. al. 1993</b>
	<b>J.L. Prieur 2001</b>

# Die notwendige Mathematik

$$\frac{d\Delta\tau(\lambda)}{d\tau} = -(n-1) \frac{\cos\phi}{\cos\delta} \frac{\cos\phi \cos\delta + \sin\phi \sin\delta \cos\tau}{\cos^2\zeta} + \lambda \tan\delta \cos\tau. \quad (1)$$

$$\frac{d\Delta\delta(\lambda)}{d\tau} = +(n-1) \frac{\sin\phi \cos\phi \sin\tau}{\cos^2\zeta} - \lambda \sin\tau \quad (2)$$

$$\lambda = \pm \arcsin \left( (n-1) \frac{\cos\phi \sin\delta}{\cos(\phi-\delta)} \right) \approx (n-1) \frac{\cos\phi \sin\delta}{\cos(\phi-\delta)} \quad (3)$$

$$\frac{d}{d\tau} \Delta\xi = (n-1) \left( \frac{dX}{d\tau} - 2X \frac{dX}{d\tau} \xi - \left( X \frac{dY}{d\tau} + Y \frac{dX}{d\tau} \right) \eta \right) \quad (4)$$

$$\frac{d}{d\tau} \Delta\eta = (n-1) \left( \frac{dY}{d\tau} - \left( X \frac{dY}{d\tau} + Y \frac{dX}{d\tau} \right) \xi - 2Y \frac{dY}{d\tau} \eta \right). \quad (5)$$

$$X = \frac{\tan\tau \sin q}{\cos(p-q)} \quad (6)$$

$$Y = \tan(p-q) \quad (7)$$

$$\tan q = \tan c \cos\tau \quad (8)$$

## Ergebnisse der Recherche

Die Star Dirft Alignment Methode, so wie sie heute propagiert wird, hat folgende Eigenschaften:

- **Refraktion ist nicht berücksichtigt**
- **hat entscheidende methodische Schwächen (“Null-Resultat”)**
- **zeitraubend, ermüdend**

Damit leidet die Genauigkeit der Ausrichtung der Stundenachse.

- **Die Position der Stundenachse ist am Ende unbekannt**

Es gibt mindestens zwei Wege zur Ausrichtung der Stundenachse

- **A.A. Rambaut (1893): fast überall am Himmel anwendbar**
- **E.S. King (ca. 1902): Polregion**

Diese beiden Methoden können **visuell** oder **fotografisch** innerhalb ca. 1 Stunde abgearbeitet werden und die erreichbare Genauigkeit beträgt

$\leq \pm 30''$  weiter weg vom Pol

Erforderlich:  $\pm 5'' \dots \pm 1''$  in der Nähe des Pols

Zwei konkrete Anweisungen, wie die Stundenachse ausgerichtet werden muss:

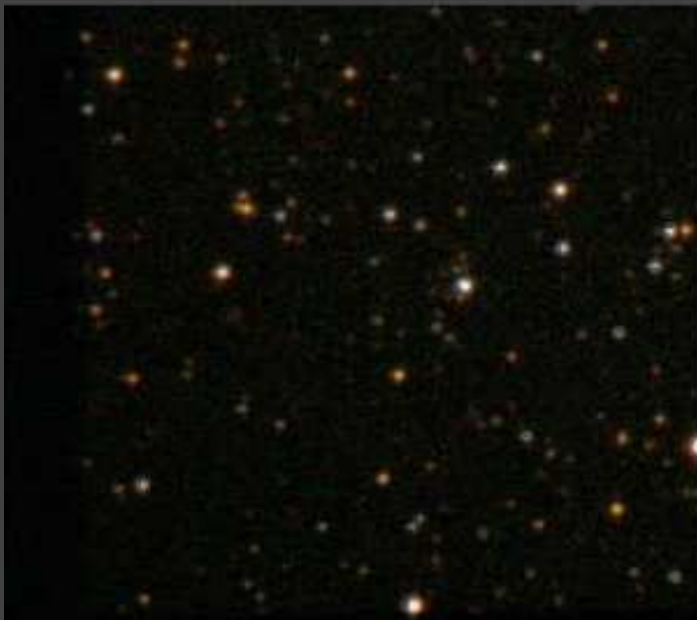
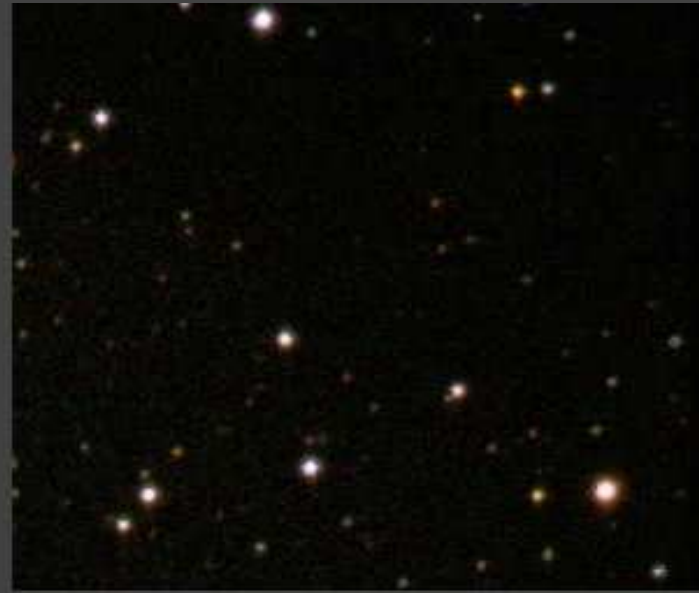
- **E.S. King (1902):** Bewegung in der  $\delta$ -Richtung ist NULL
- **Wallace & Tritton (1979):** Minimierung der Bildfeldrotation

Weitere Themen (Auswahl), welche heute Abend nicht abgehandelt werden

- Beschreibung, weswegen die Methode gemäss J. Scheiner in den meisten Fällen nicht zum Ziel führt
- Detaillierte Beschreibung dreier Methoden, wie die Stundenachse ausgerichtet werden kann
- Nachführung mit einem Leitstern
- Steuerung des Antriebs eines Teleskops in beiden Achsen
- Rolle der Nachführkorrektursysteme
- Dimensionierung eines Teleskops für die Fotografie







Omega-Nebel M 17, Ecken, 35 Min.,  $\delta = -16.2^\circ$ ,  $\tau = -1^{\text{h}}43^{\text{m}}$

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführende Fragen</b>	<b>31</b>
<b>2</b>	<b>Refraktion</b>	<b>35</b>
<b>3</b>	<b>Bildfeldrotation ...</b>	<b>47</b>
<b>4</b>	<b>Optimierung der Ausrichtung</b>	<b>65</b>
<b>5</b>	<b>Ausrichtung der Stundenachse</b>	<b>71</b>
<b>6</b>	<b>Dispersion</b>	<b>77</b>

# 1 Einführende Fragen

**Kann man die Stundenachse so ausrichten, dass Korrekturen der Nachführung unnötig werden?**

Ja, aber:

die **Ausrichtung der Stundenachse** und die **Geschwindigkeit** müssen an den zu **beobachtenden Ort angepasst** werden **plus weitere Einschränkungen.**

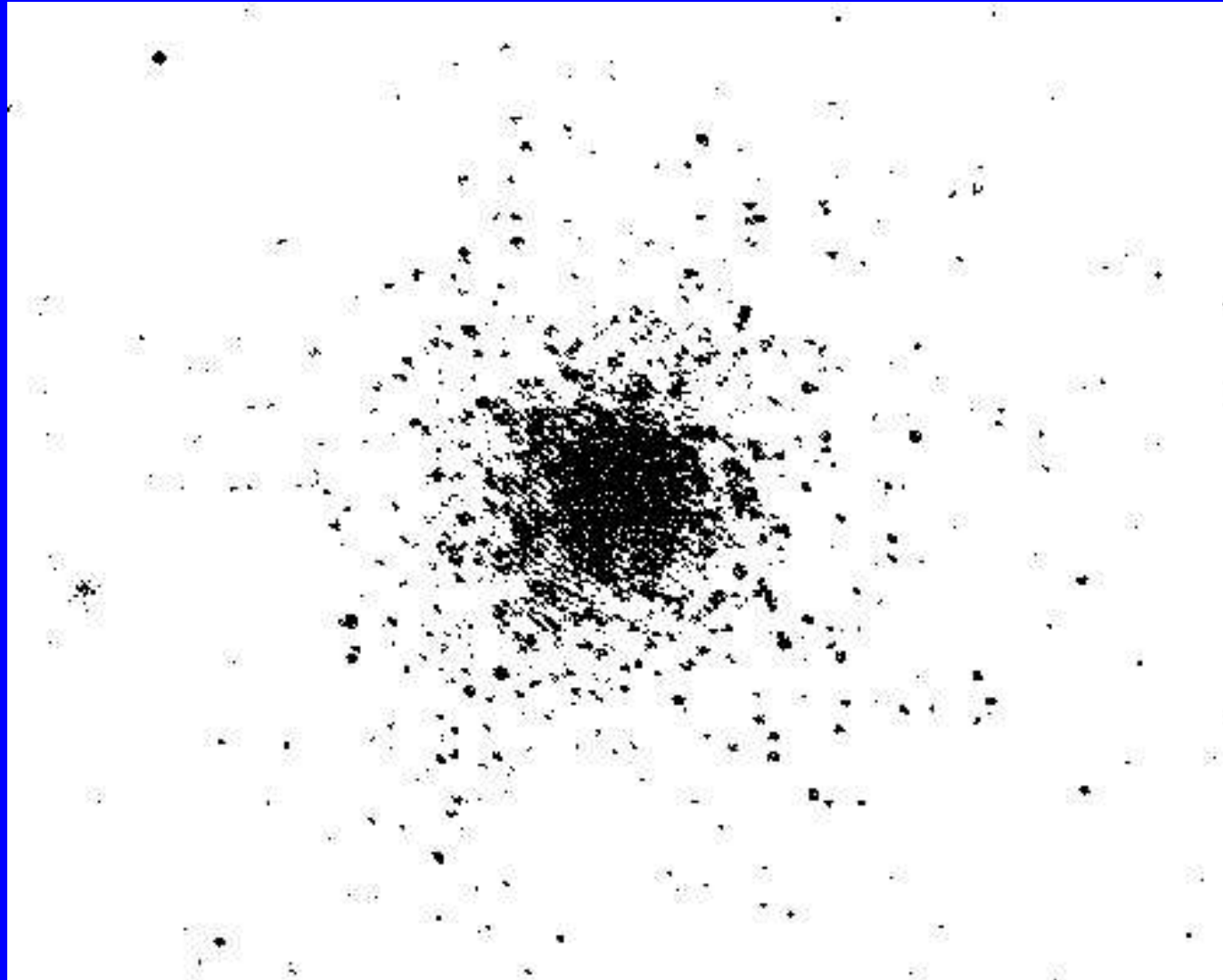
**Können die Sterne auf einer Fotografie als “pinpoints” abgebildet werden?**

Nein, aber:

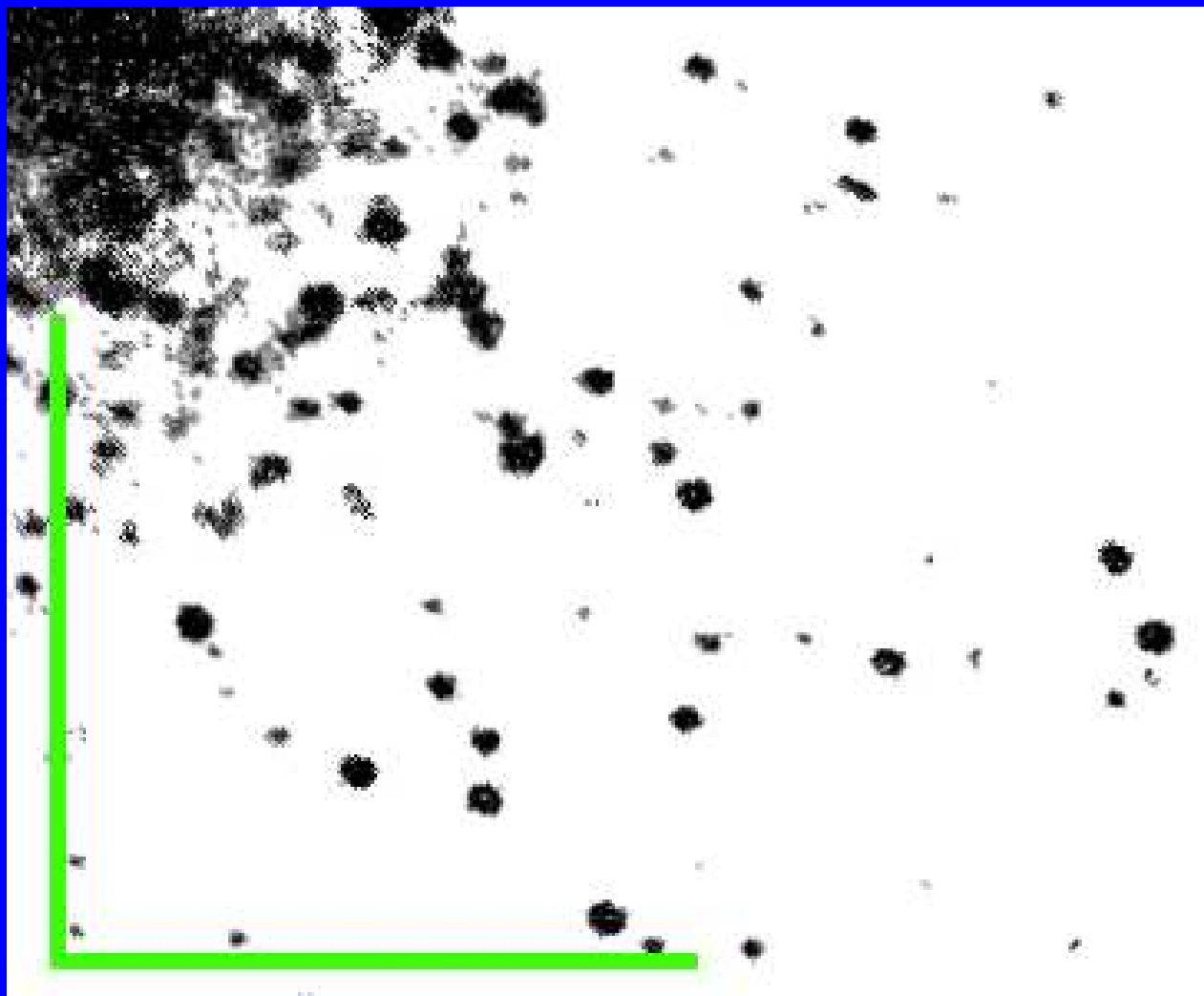
man kann die wesentlichen Effekte **gut kompensieren.**

## Einschränkungen

- Fehler des mechanischen Antriebes in RA muss klein sein.
- Nicht in der Nähe des Horizonts.



M 13, E.S. King (1902), Beginn bei  $\tau = 3^{\text{h}}11^{\text{m}}$  bis  $4^{\text{h}}11^{\text{m}}$



M 13, E.S. King (1902), vergrößerter Ausschnitt

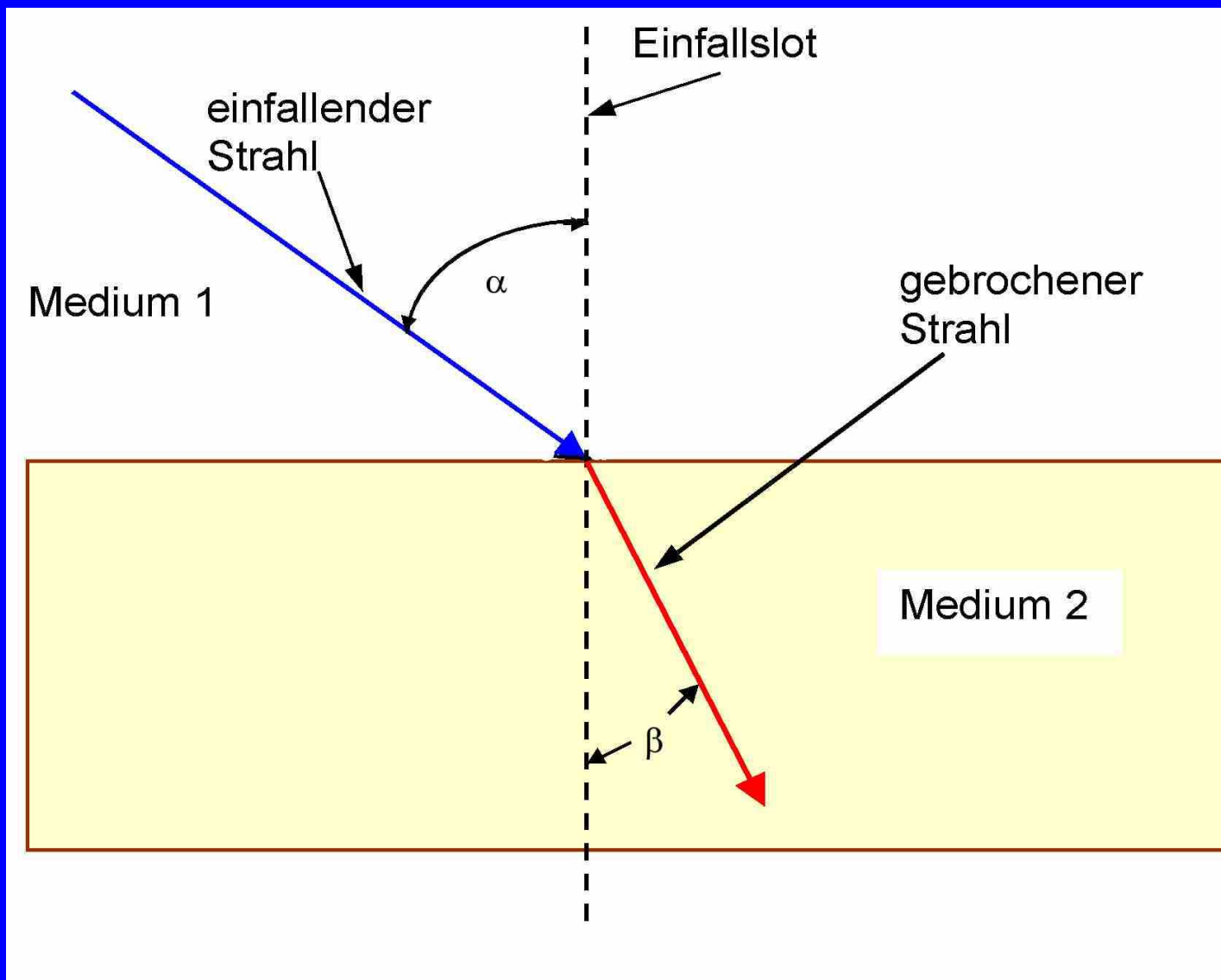
## 2 Refraktion

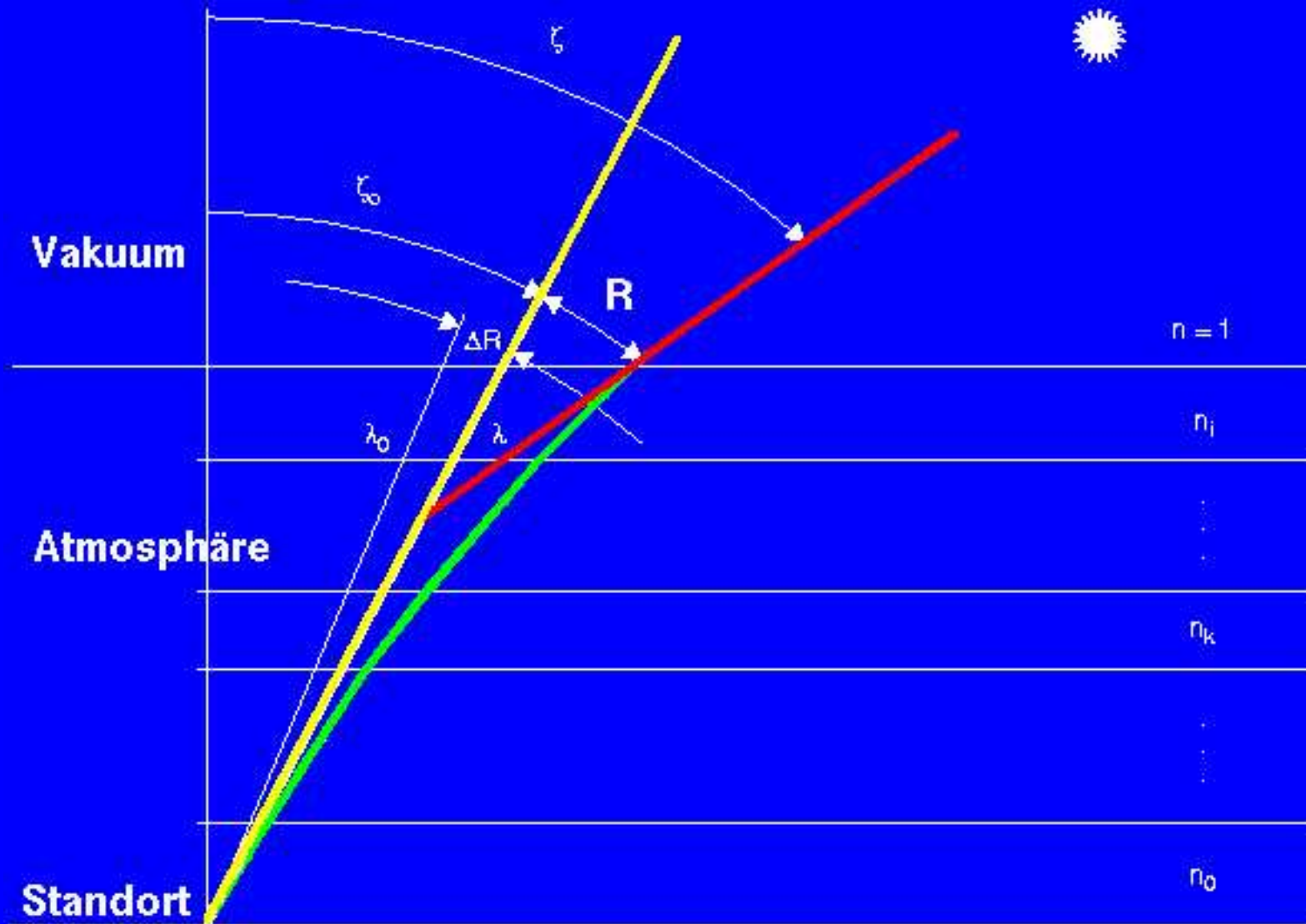
- Befunde auf den Fotografien
- Brechungsindex eines Mediums ist immer  $> 1$  ist
- Der Brechungsindex  $n$  der Atmosphäre ist in der Grösse von

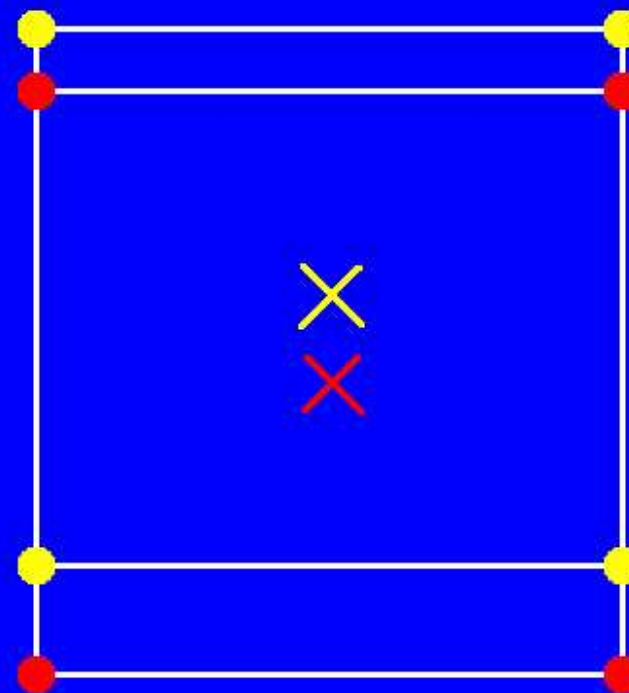
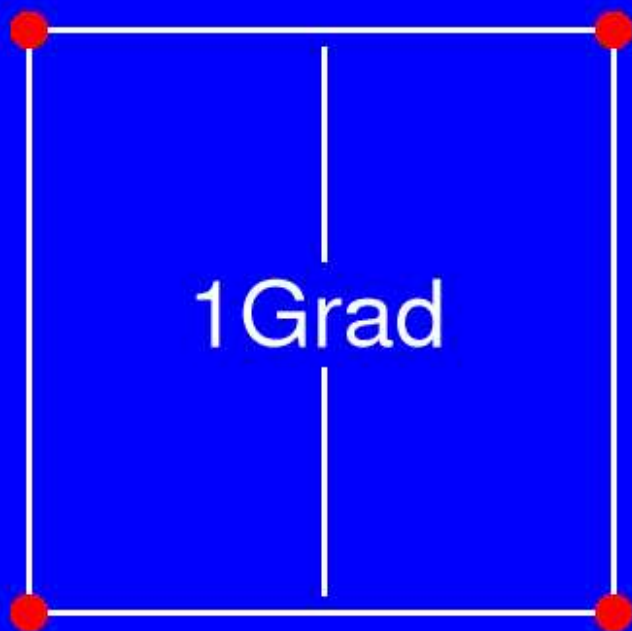
$$n_0 = 1.00027 \simeq 1$$

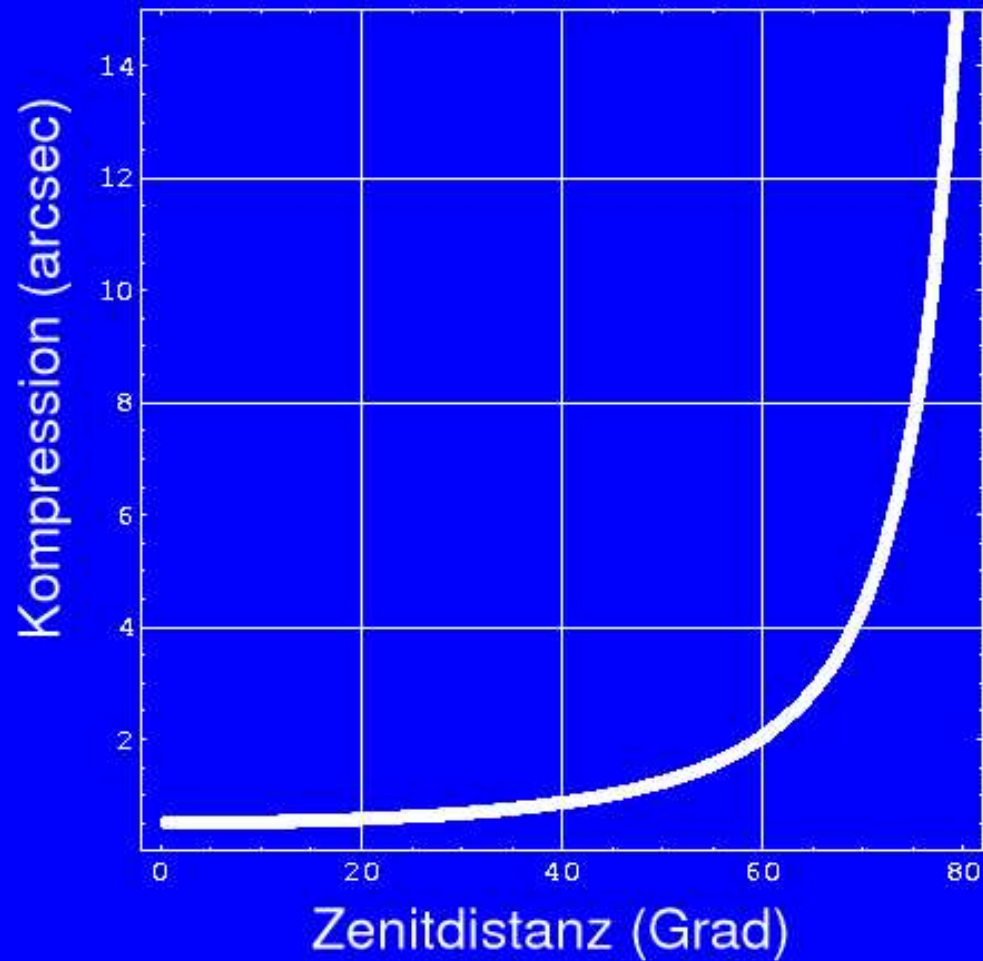
- Der Betrag der Brechung der Atmosphäre ist von der Zenitdistanz abhängig und die Näherung dafür lautet

$$R \simeq (n_0 - 1) \times \tan \zeta$$

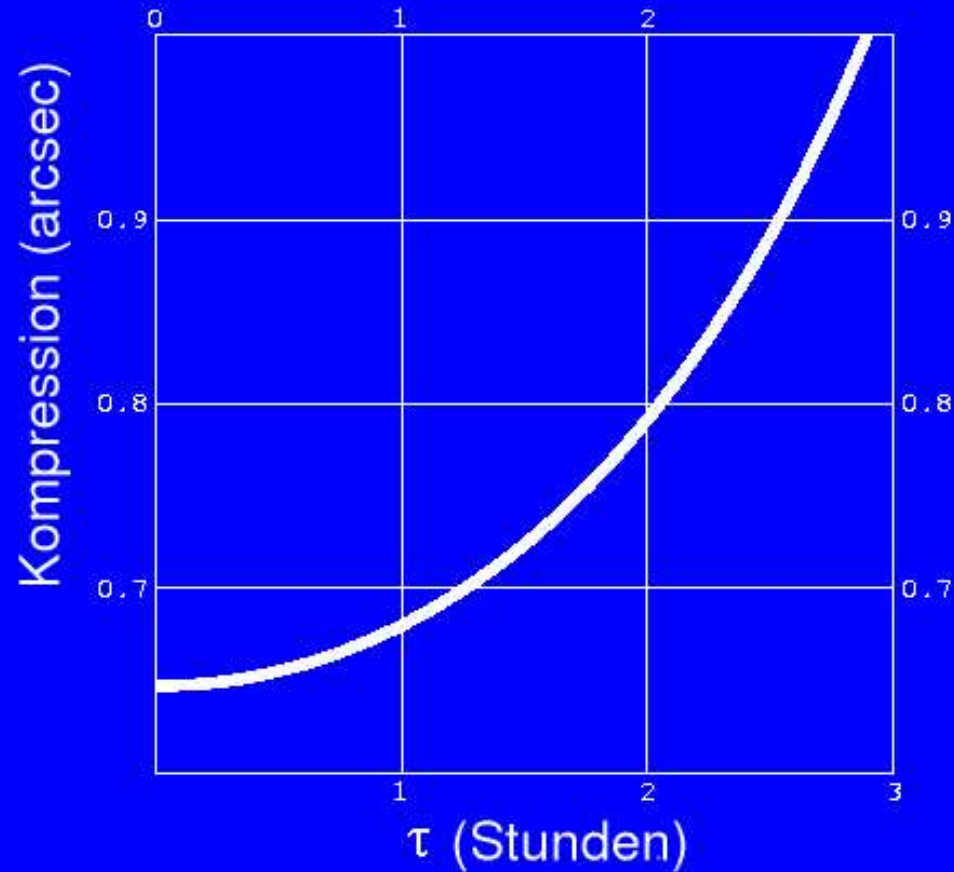




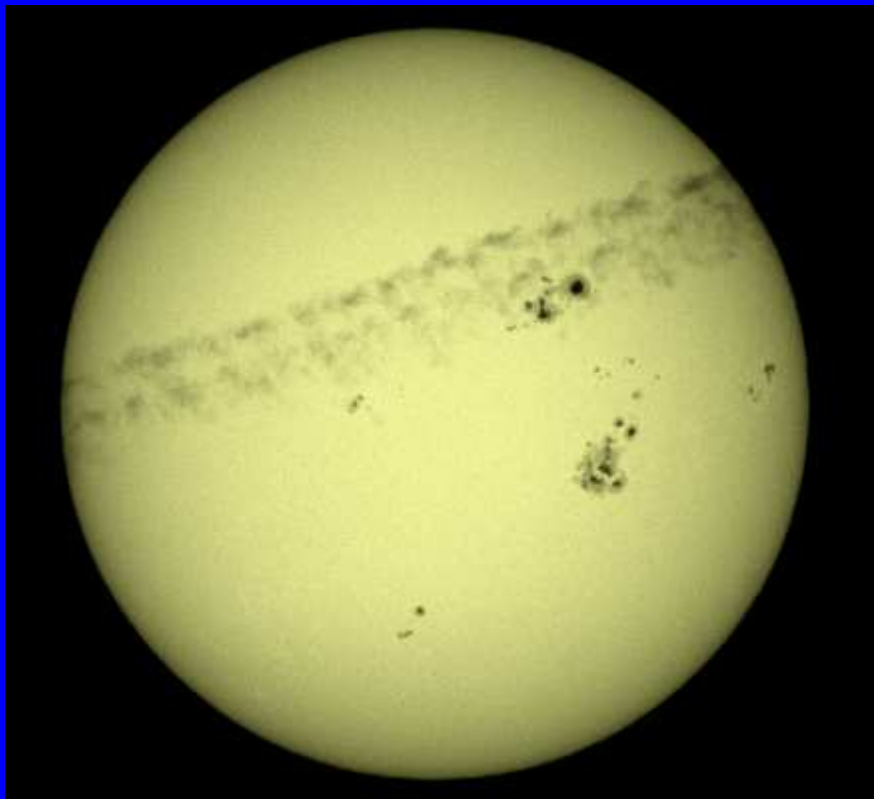




Bildfeldkompression Kantenlänge  $1^\circ$



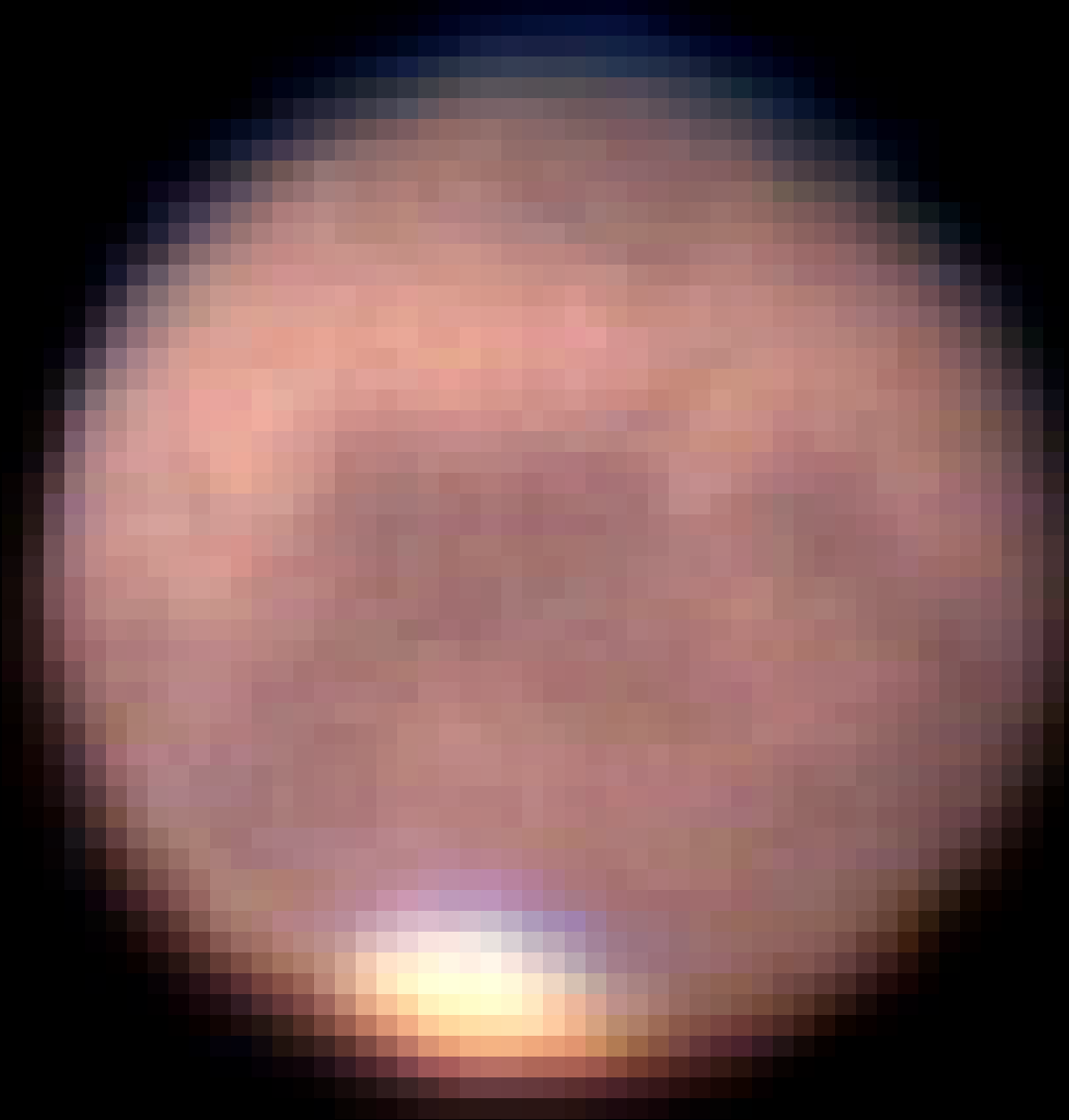
Bildfeldkompression Kantenlänge  $1^\circ$ , als Funktion des Stundenwinkels,  
 $\delta = +20^\circ$

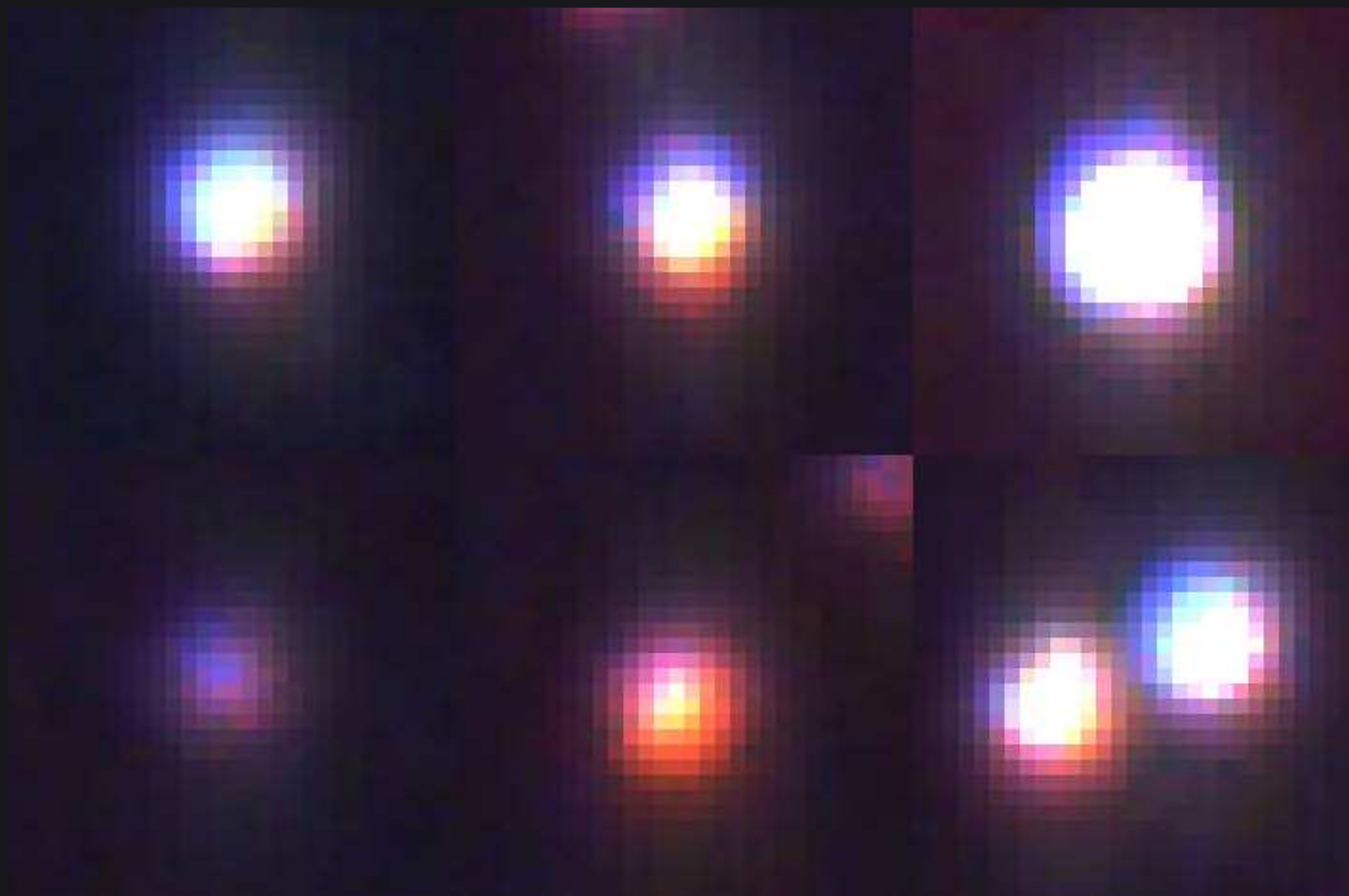


Sonne am 30. Oktober 2003  
Fleckengruppen 486 und 488



Sonne am Horizont

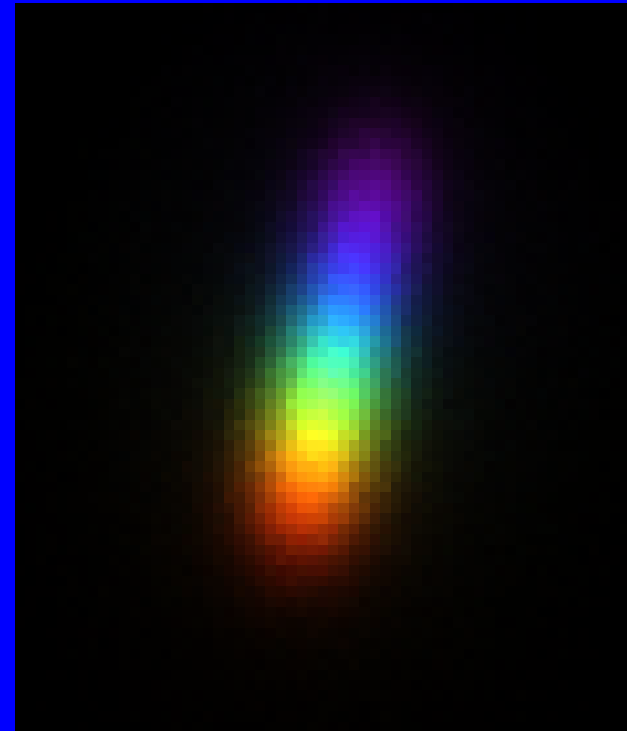




Auschnitt M16 (Fotografie)



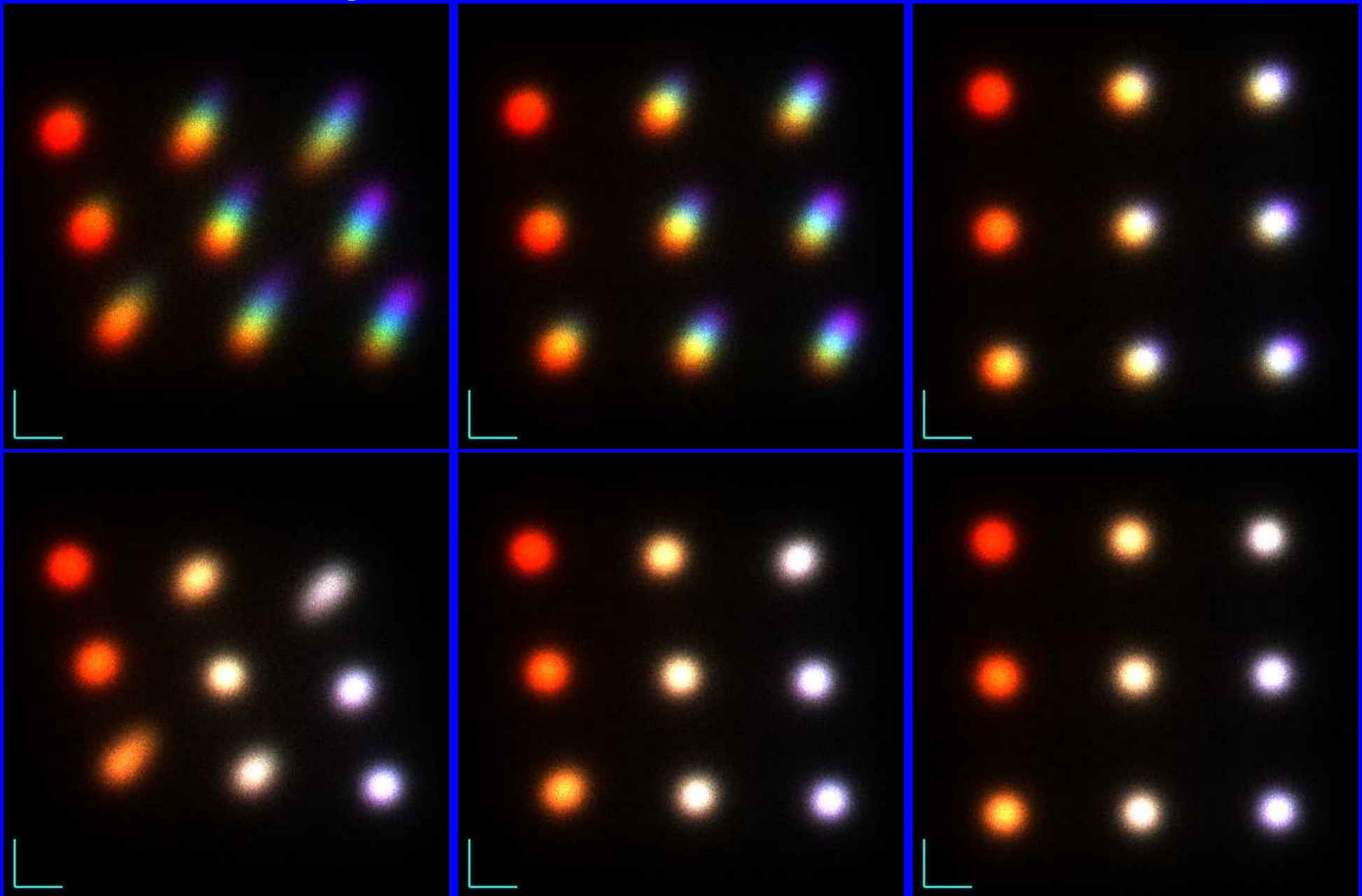
Fomalhaut (Typ A3)  $6.4^\circ$  über dem Horizont. Die Länge des Spektrums beträgt ca.  $7.7''$  im sichtbaren Bereich.



Simulation (Typ A), Luftunruhe  $\sigma = 1.0''$



Omega Centauri Ausschnitt, ca.  $10^\circ$  über Horizont Belichtungszeit ca. 600 sec

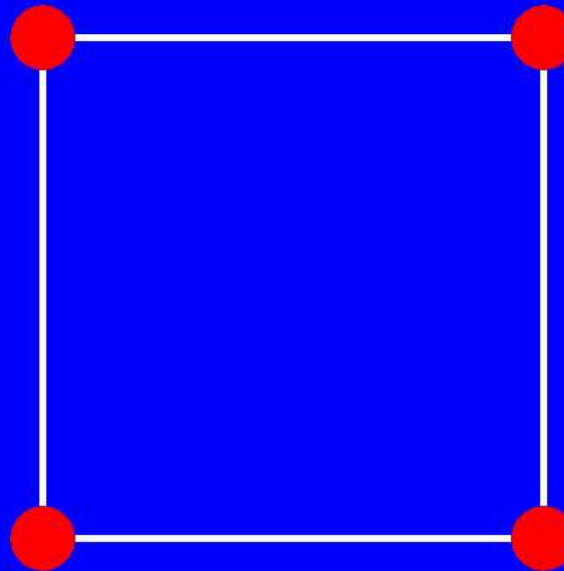


$\delta = -10, 0, 30^\circ$  (v.l.n.r),  $\tau = -3^h$ , Luftunruhe  $\sigma = 1.0''$ , Belichtungszeit 3600 sec

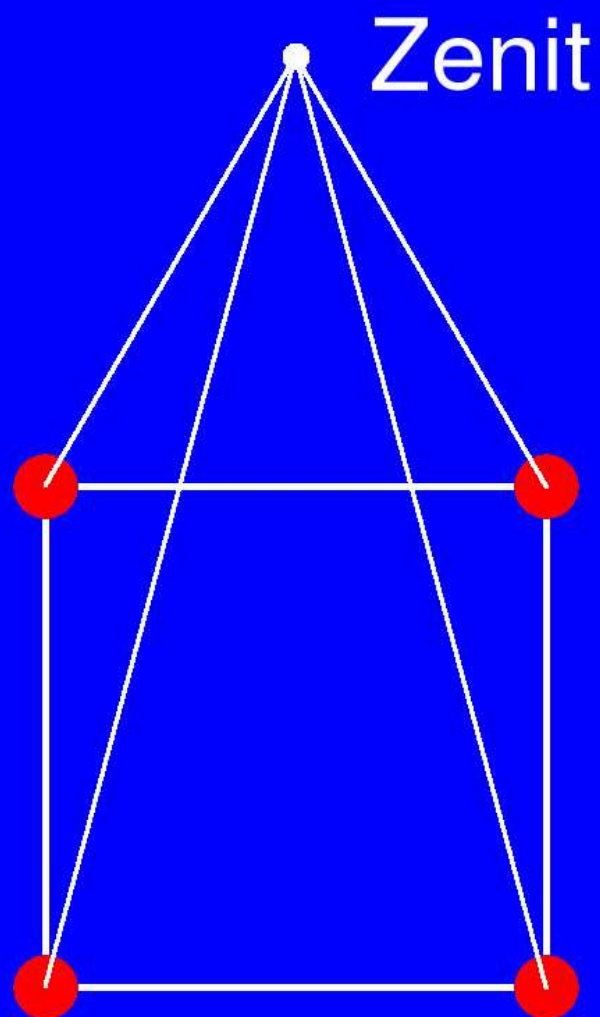
### 3 Bildfeldrotation ...

- Die Fotografie eines Sternfeldes hat eine gewisse Ähnlichkeit mit dem Schachspiel
- Einfache Regeln führen zu “wilden” Sternspuren ...
- ... als Folge der Refraktion
- ... als Folge der Ausrichtung der Stundenachse

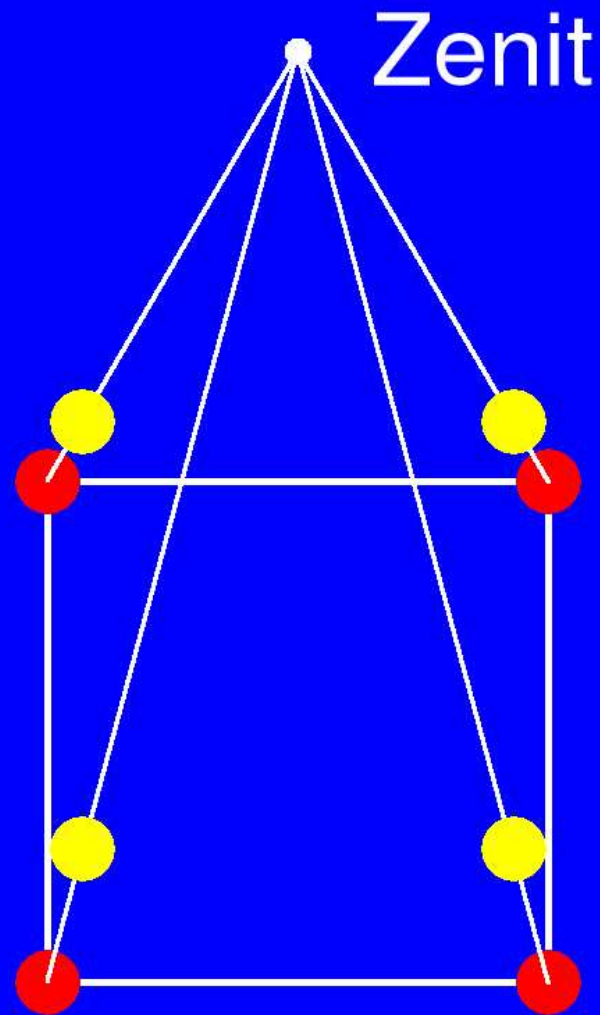
- Zenit



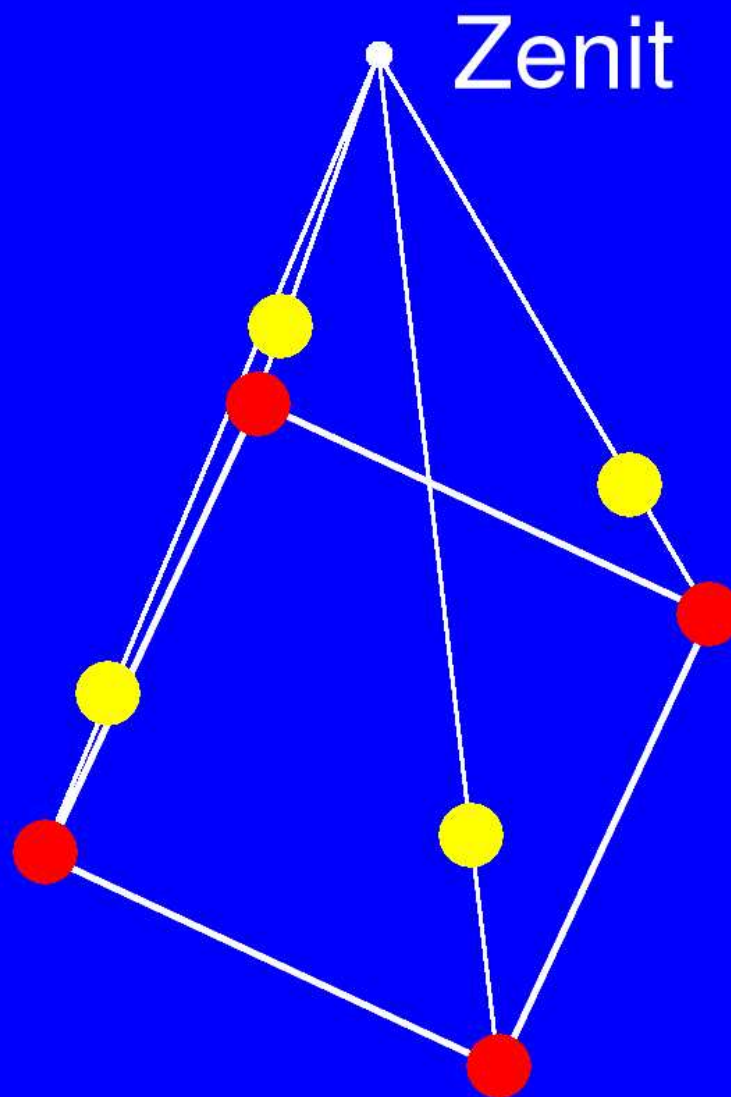
Situation im Meridian



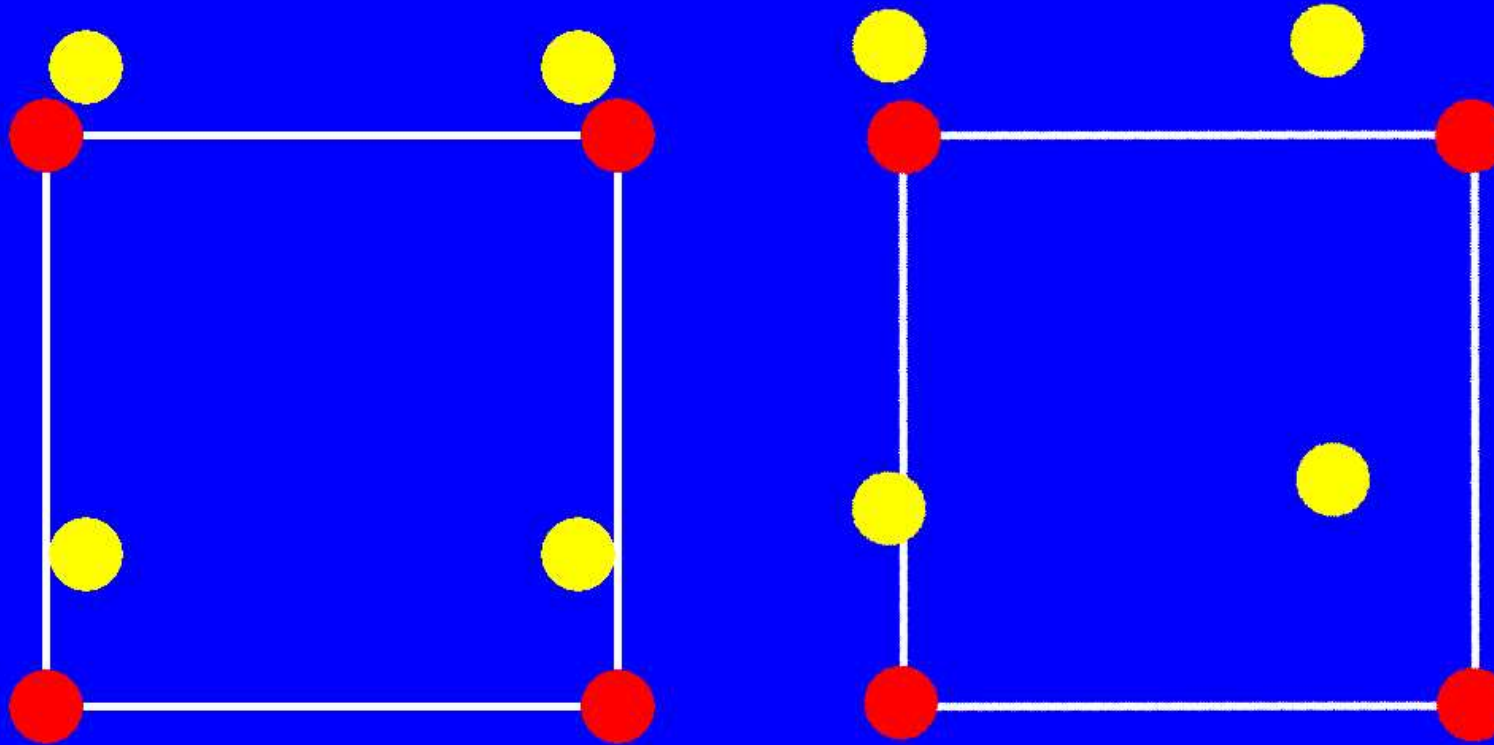
Situation im Meridian



Situation im Meridian



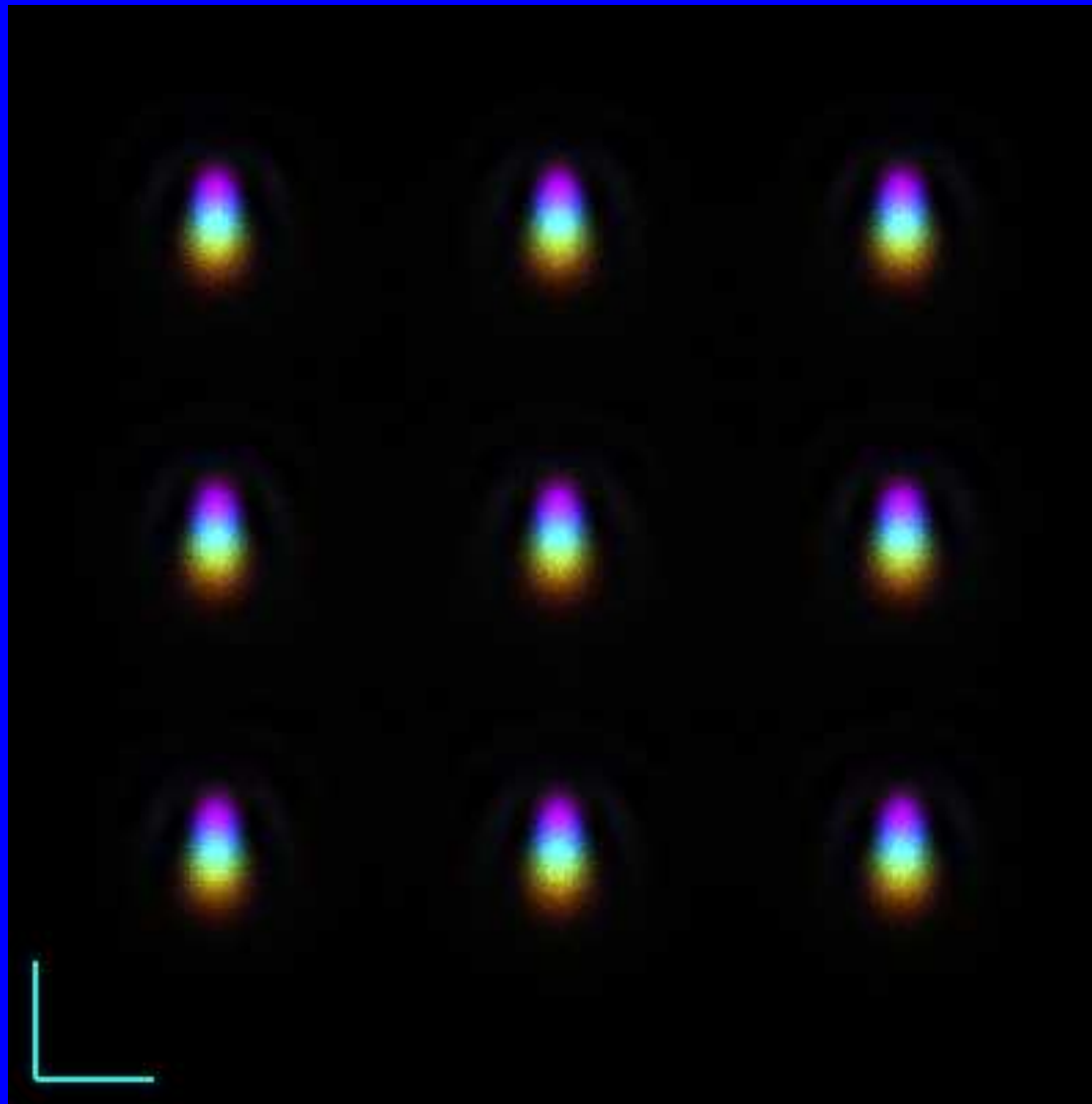
Situation im Westen



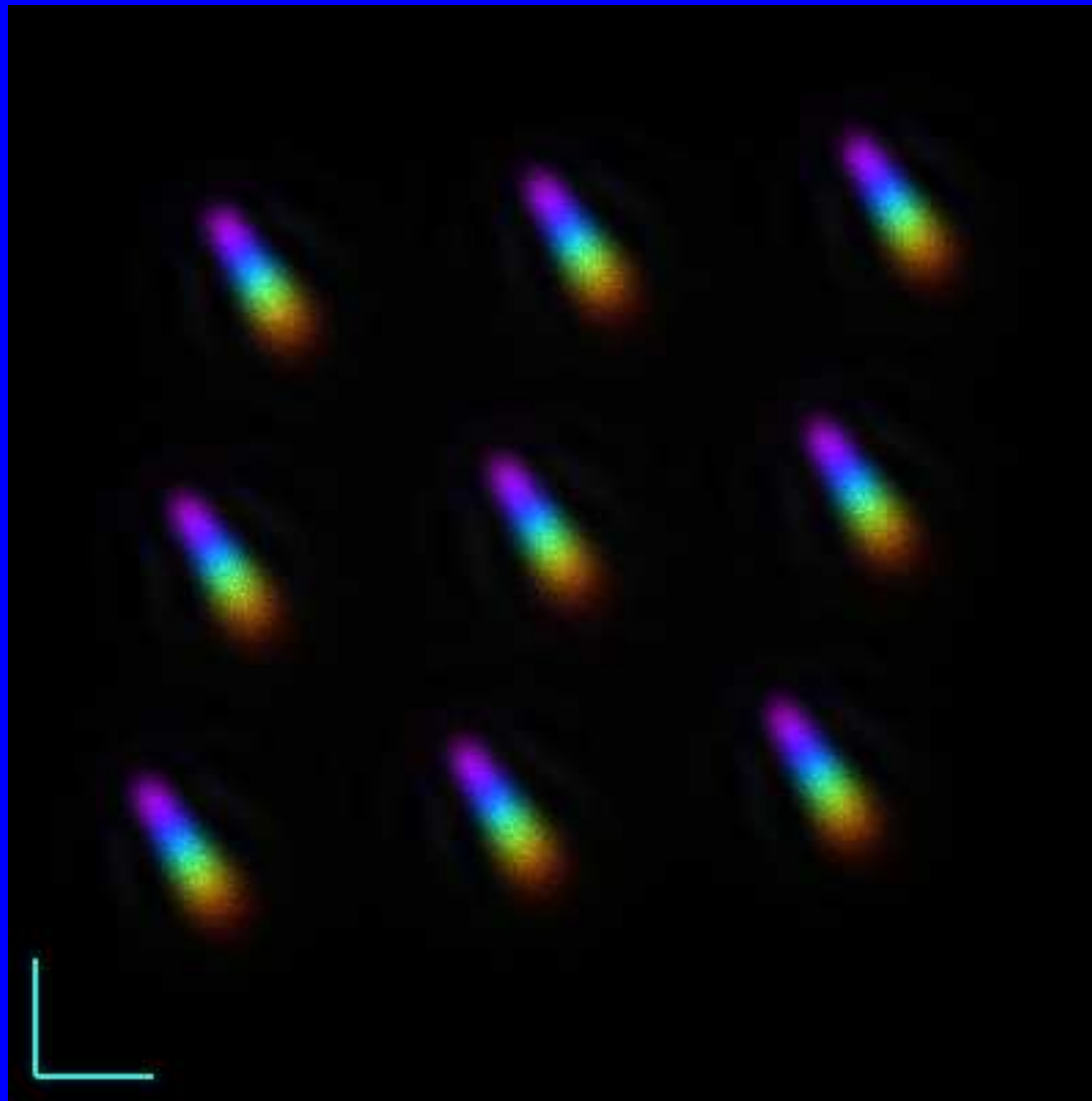
Vergleich der wahren und scheinbaren Sternpositionen

## Wirkliche Verzerrung

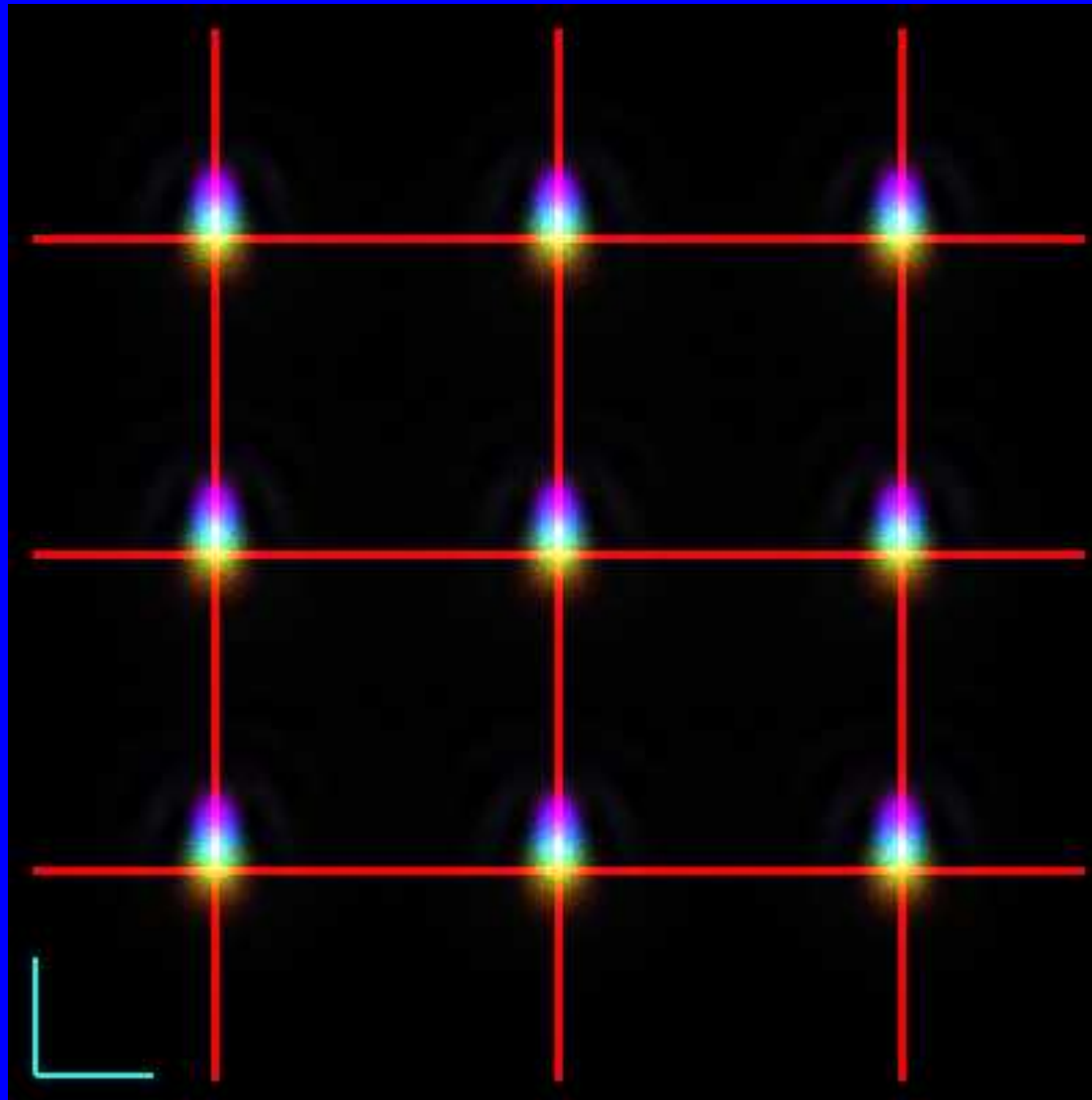
- ohne Luftunruhe
- mit Luftunruhe 1''



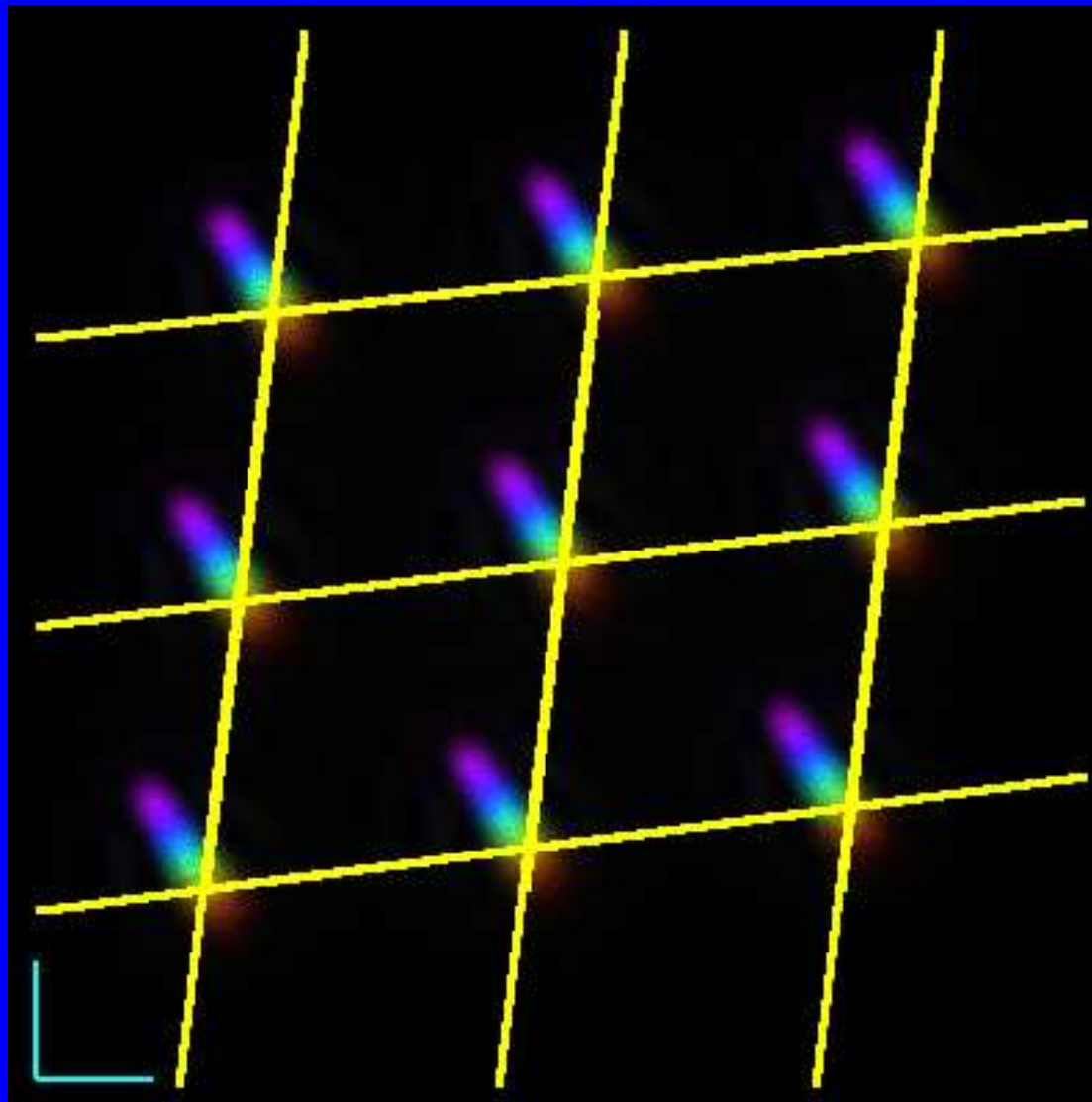
1 sec,  $\delta = 0^\circ$ ,  $\tau = 0^h$ , Spektraltyp G



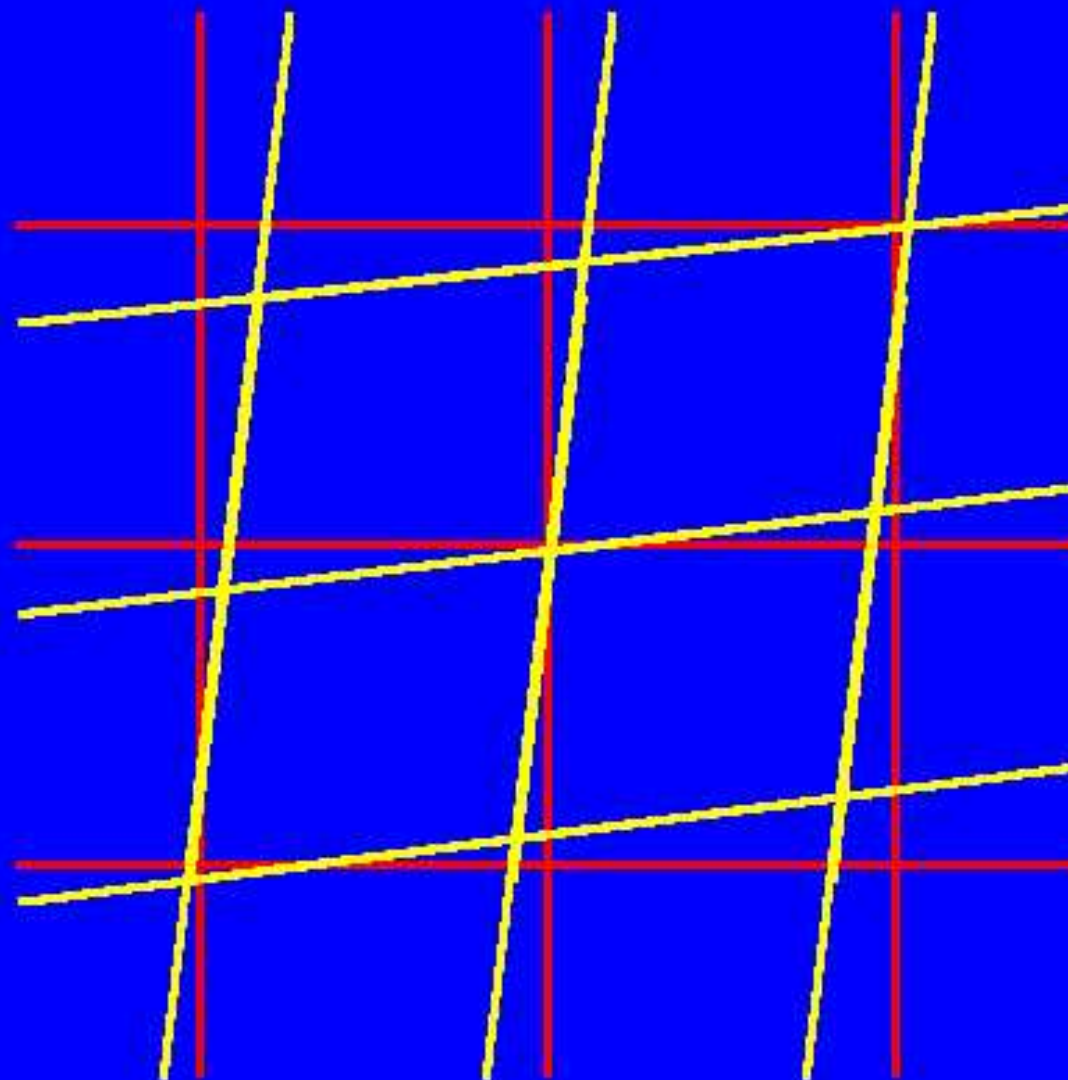
1 sec,  $\delta = 0^\circ$ ,  $\tau = 3^h$ , Spektraltyp G



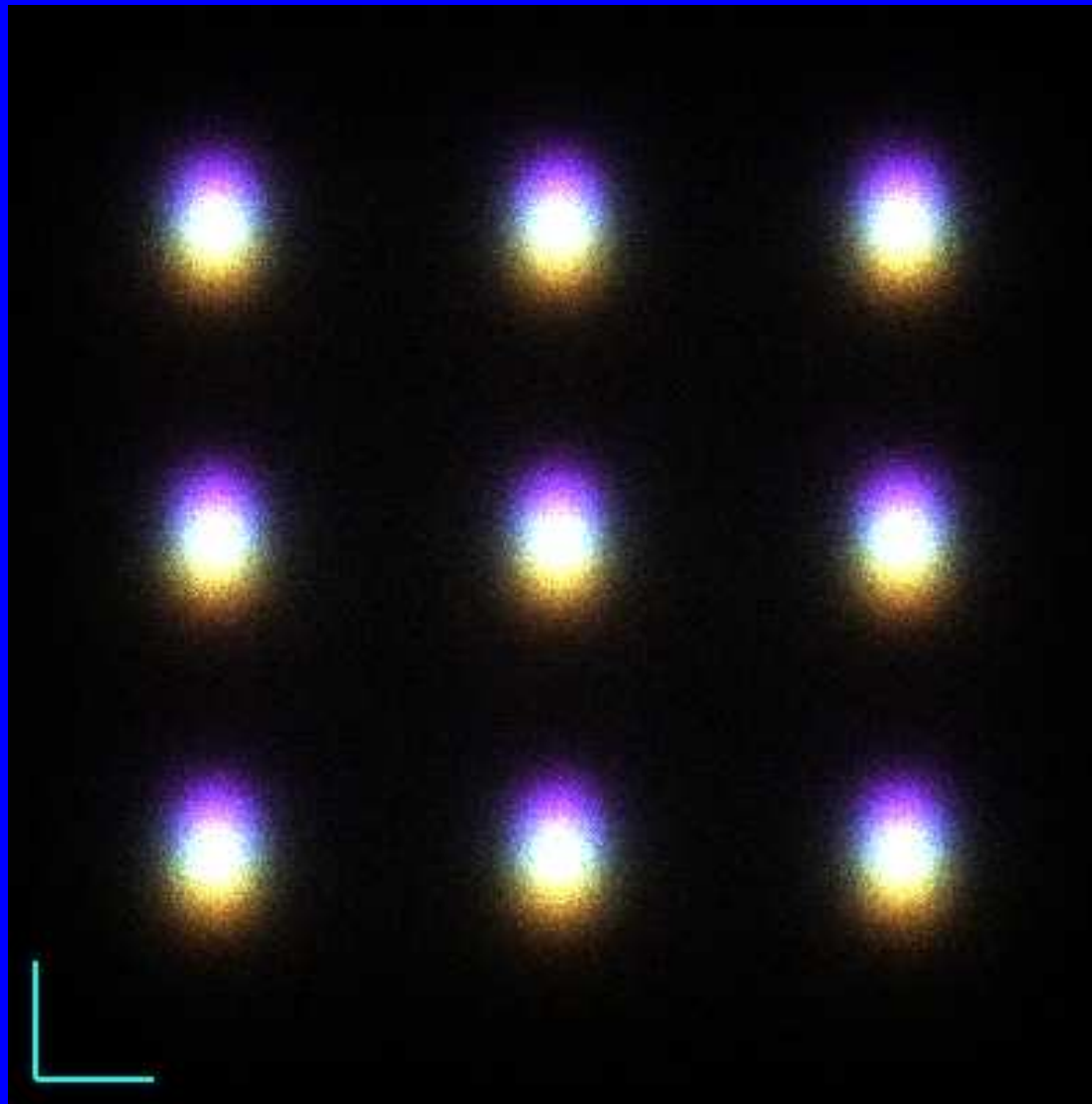
1 sec,  $\delta = 0^\circ$ ,  $\tau = 0^h$ , Spektraltyp G



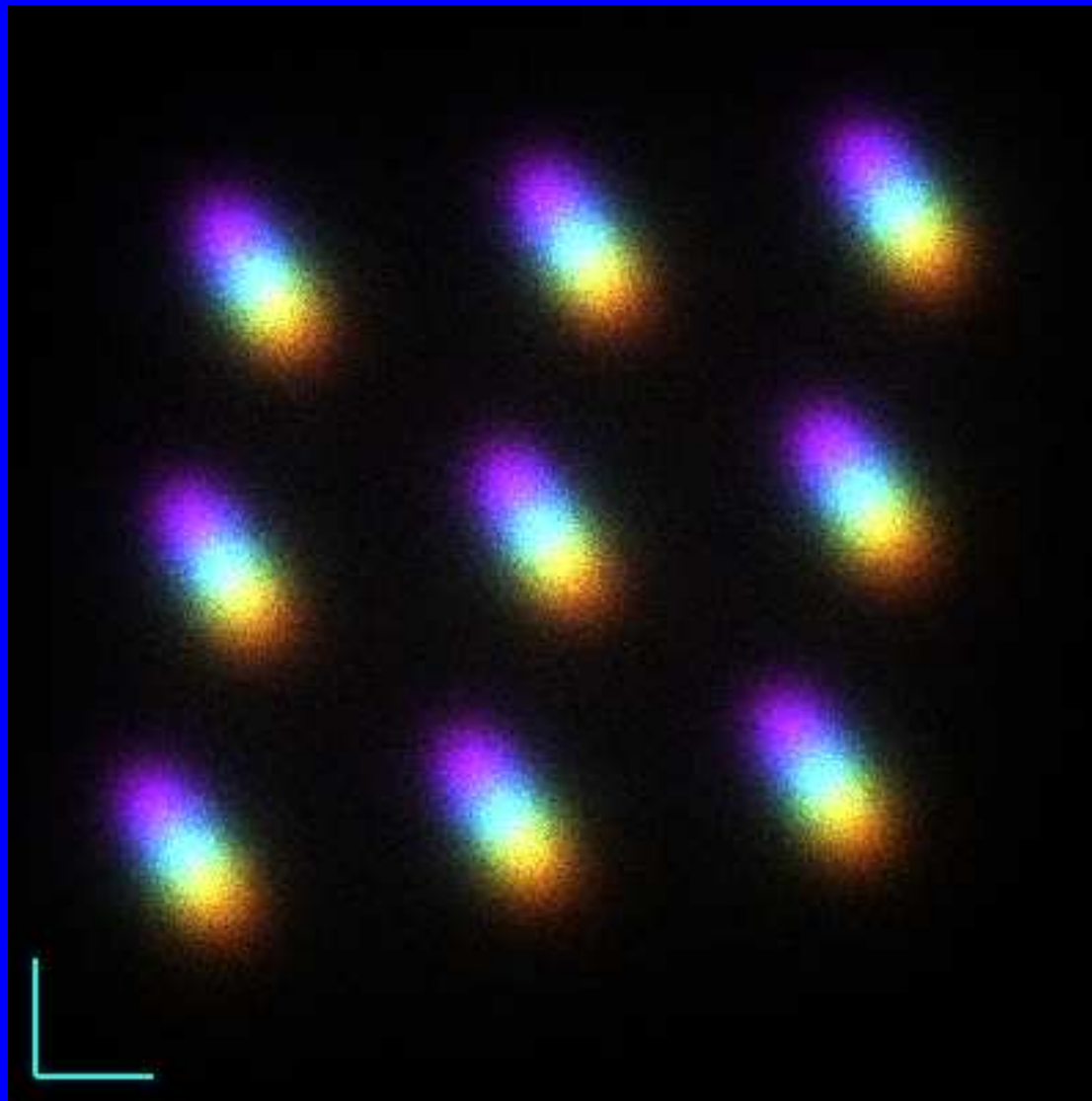
1 sec,  $\delta = 0^\circ$ ,  $\tau = 3^h$ , Spektraltyp G



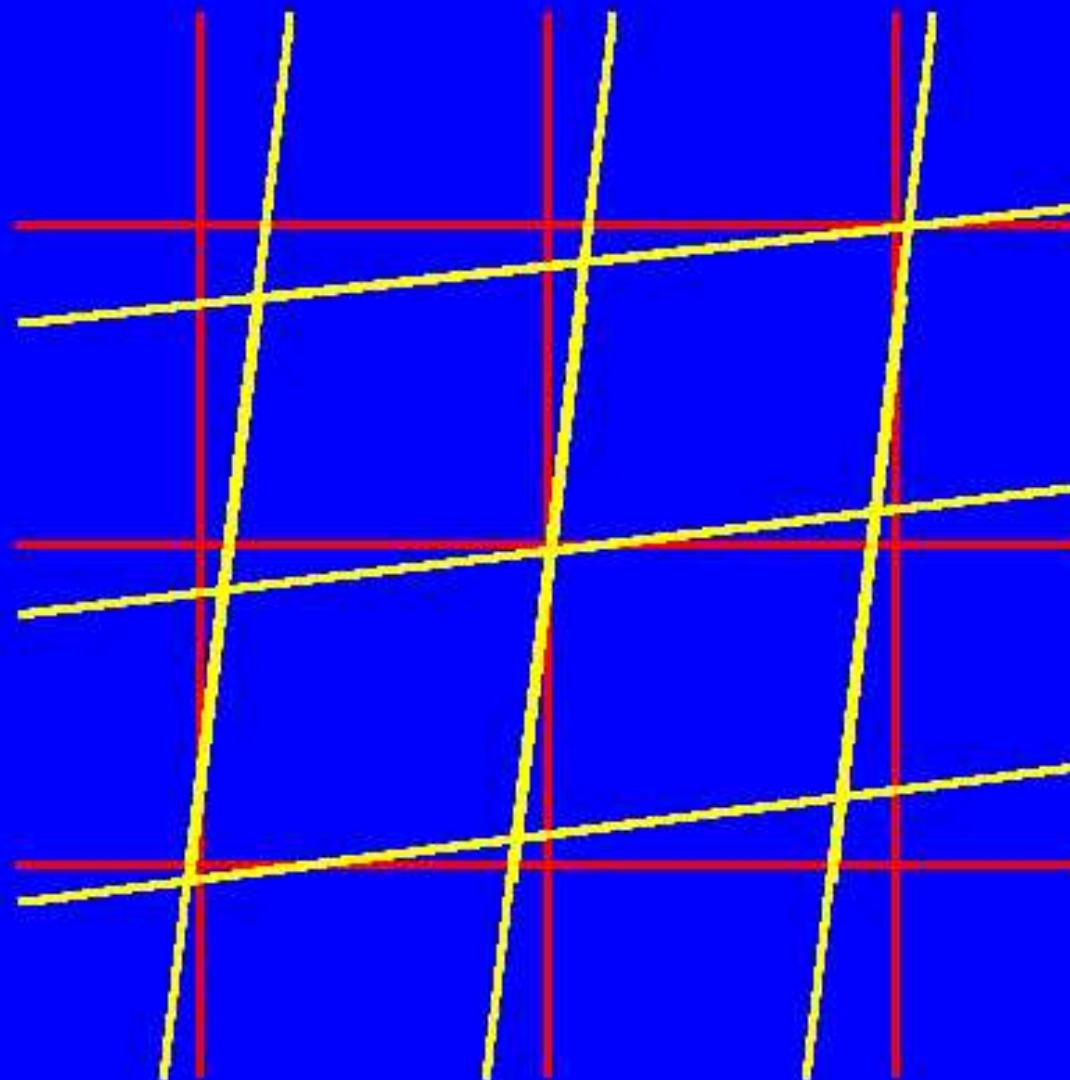
Vergleich der Verzerrung



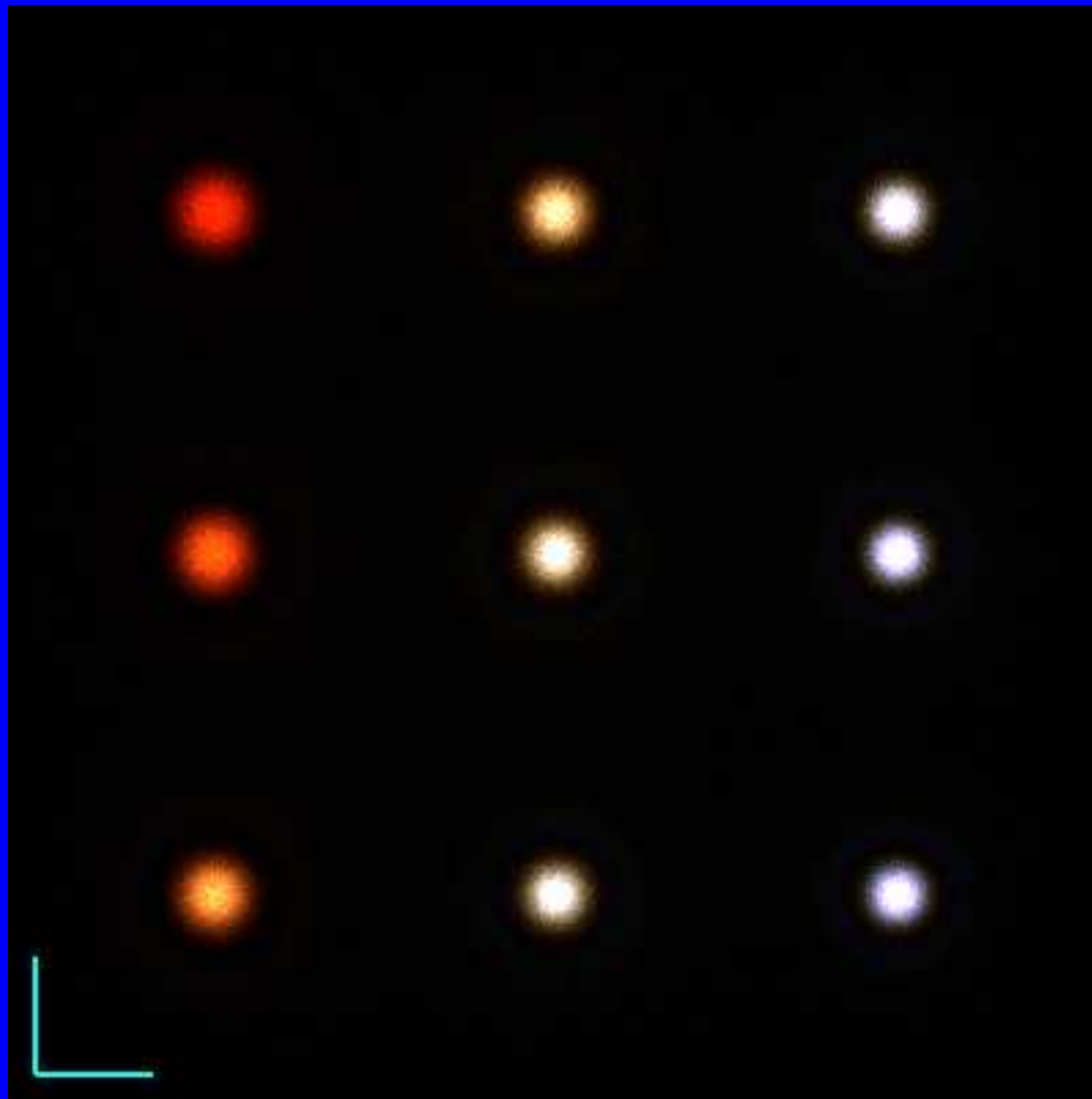
1 sec,  $\delta = 0^\circ$ ,  $\tau = 0^h$ , Spektraltyp G, Luftunruhe  $\sigma = 0.5''$



1 sec,  $\delta = 0^\circ$ ,  $\tau = 3^h$ , Spektraltyp G, Luftunruhe  $\sigma = 0.5''$



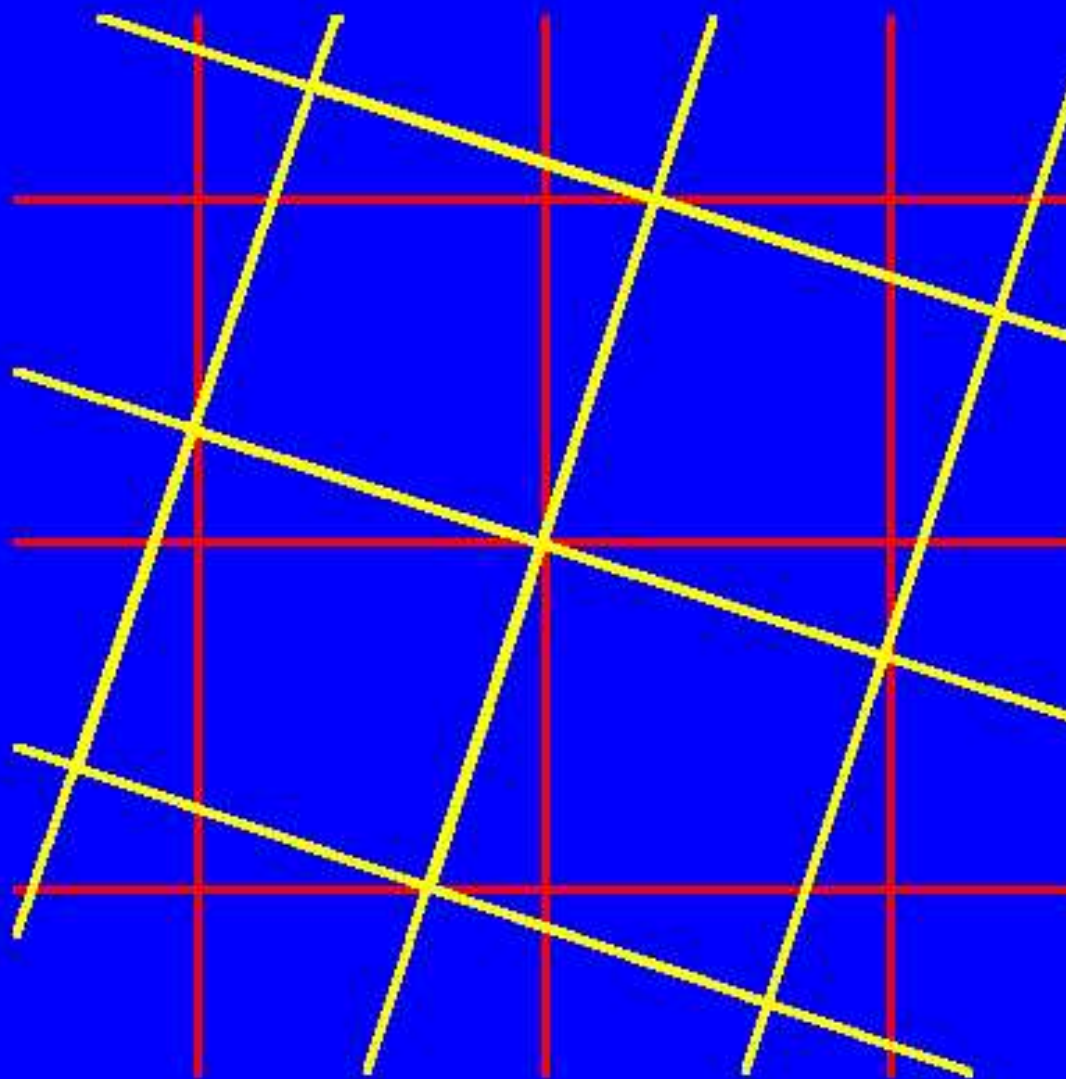
Vergleich der Gitter: Verzerrung



1 sec,  $\delta = 47.5^\circ$ ,  $\tau = 0^h$ , ohne Atmosphäre



1 sec,  $\delta = 47.5^\circ$ ,  $\tau = 1^h$ , ohne Atmosphäre



Vergleich der Gitter: Rotation

## 4 Optimierung der Ausrichtung

Es gibt zwei sich ausschliessende Möglichkeiten:

- **E.S. King (1902):** Bewegung in der  $\delta$ -Richtung ist NULL
- **Wallace & Tritton (1979):** Minimierung der Bildfeldrotation

Beiden gemeinsam ist die Tatsache, dass die Position der Stundenachse nicht mehr fest ist, sondern dass sie in Abhängigkeit des zu beobachtenden Ortes am Himmel variiert.

$$\lambda = 4' (3')$$

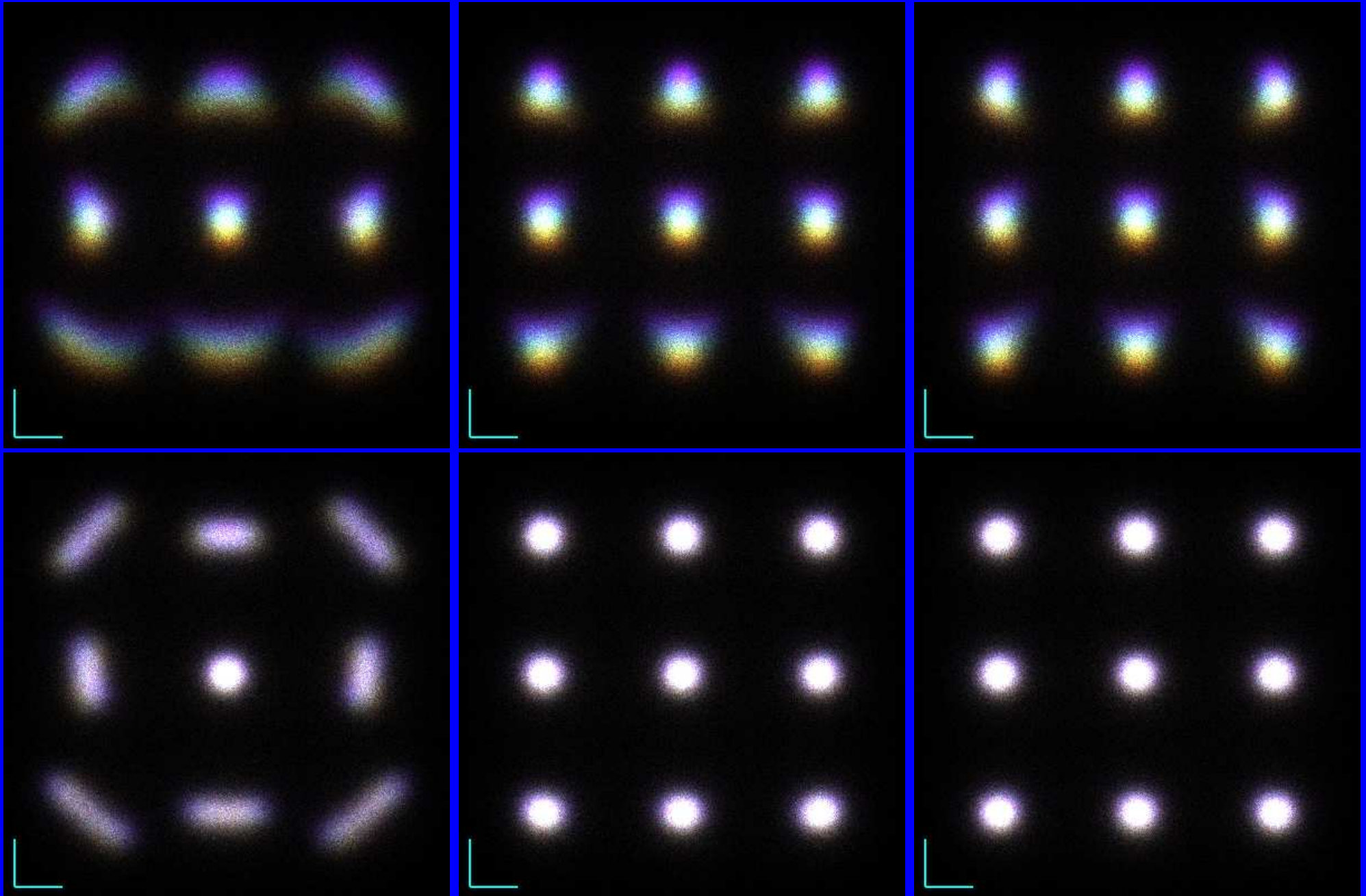
Stundenachse  
experimentell  
gemäss  
J. Scheiner  
**fest** ausgerichtet

$$\lambda = 51.8''$$

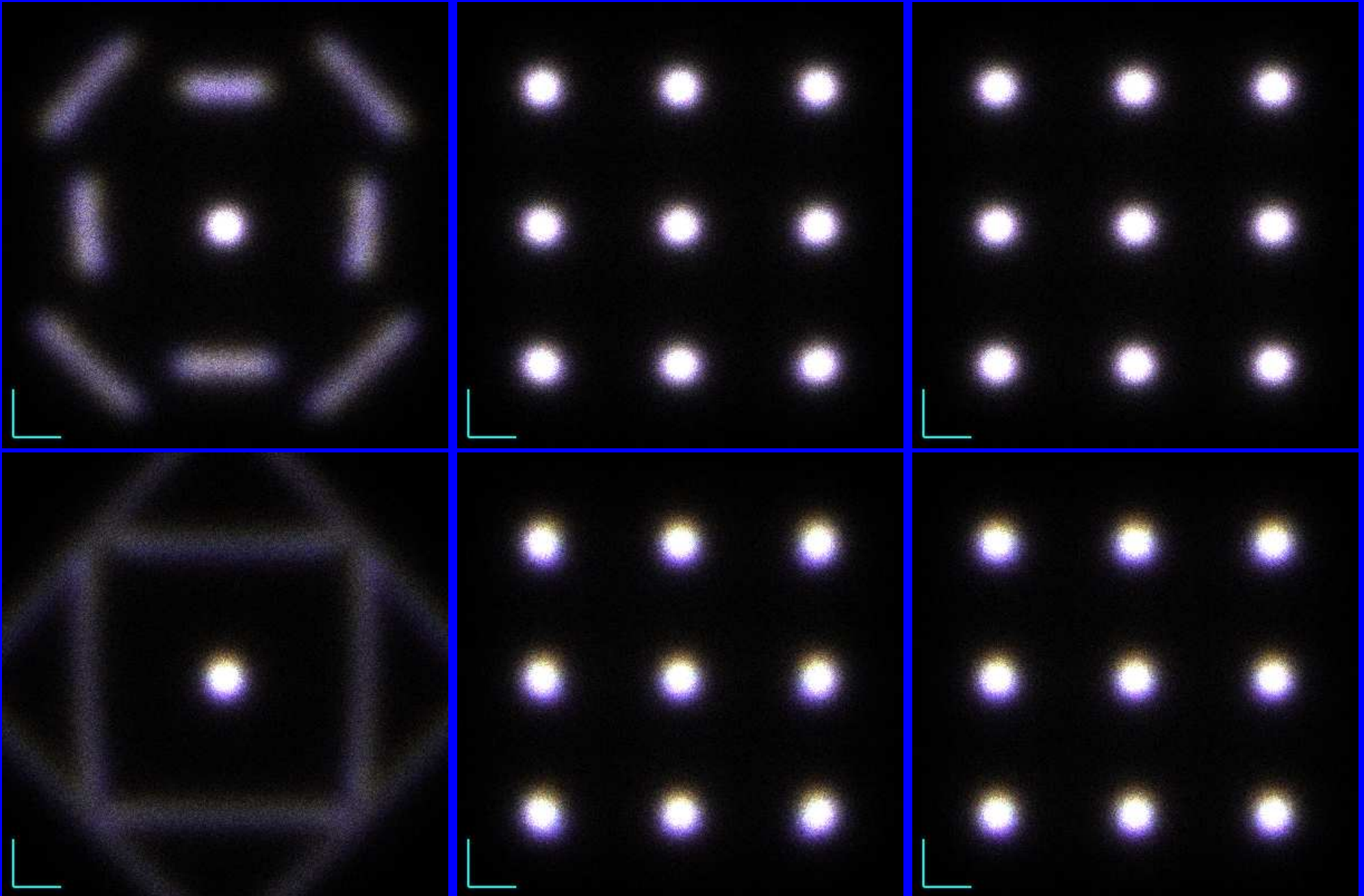
Stundenachse  
zeigt **fest**  
auf den  
scheinbaren Pol

$$\lambda = f(\delta)$$

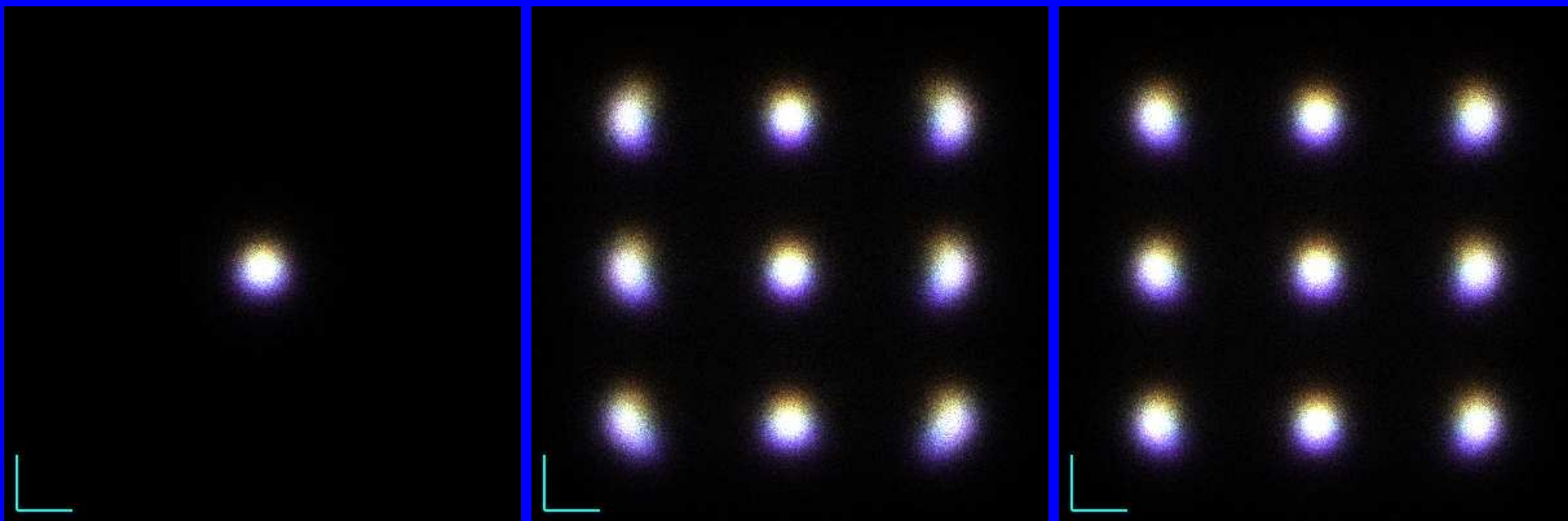
Stundenachse  
**variabel**  
gemäss  
Wallace & Tritton



$\delta = 0, 40^\circ$  Beginn  $\tau = -3^h$  Ende  $\tau = +3^h$



$\delta = 60, 80^\circ$  Beginn  $\tau = -3^h$  Ende  $\tau = +3^h$



$\delta = 90^\circ$  Beginn  $\tau = -3^h$  Ende  $\tau = +3^h$

## Eine Kette ist so stark ...

- Die Ausrichtung der Stundenachse mit der Genauigkeit der Methode gemäss **J. Scheiner** ist **ungenügend**.
- Ist die **Luftunruhe ausserordentlich gering** oder steht eine Fotografie in der **Polregion** an, dann muss man die Stundenachse gemäss **Wallace & Tritton** ausrichten.
- Für die **übrigen Situationen** fährt man mit der Ausrichtung auf den **scheinbaren Pol** gut.

## 5 Ausrichtung der Stundenachse

Anforderungen:

- Genauigkeit  $\leq 30''$
- zeitlicher Aufwand  $\leq 30$  Minuten
- Eignung für alle Teleskope und Montierungen

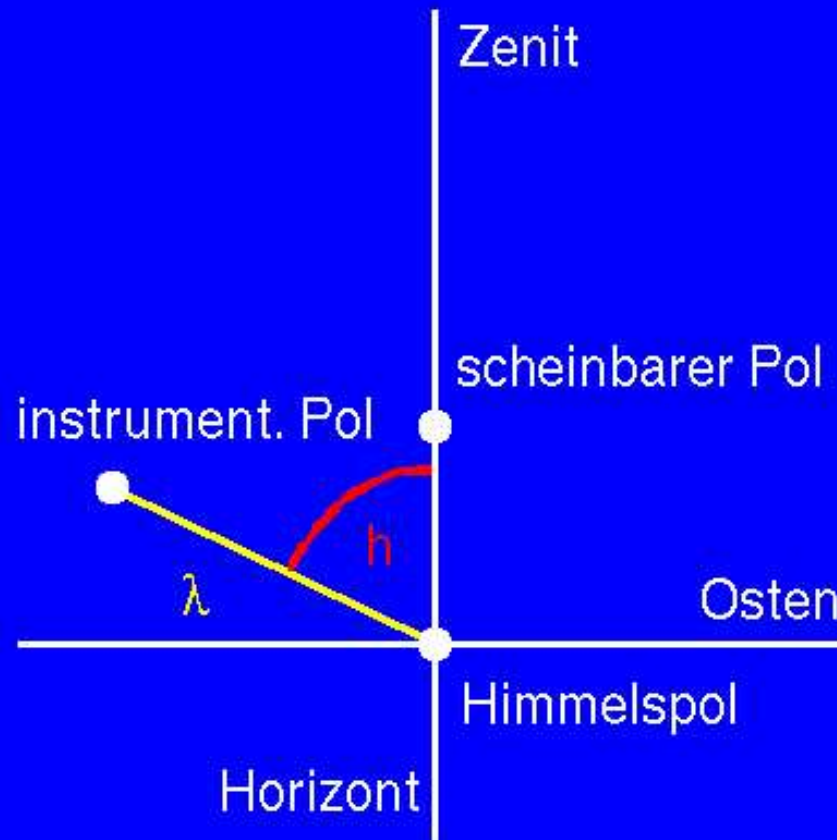
Methoden:

- E.S. King: Messung in der Polregion
- A.A. Rambaut: Messung "irgendwo" am Himmel

Zusätzliche Mittel:

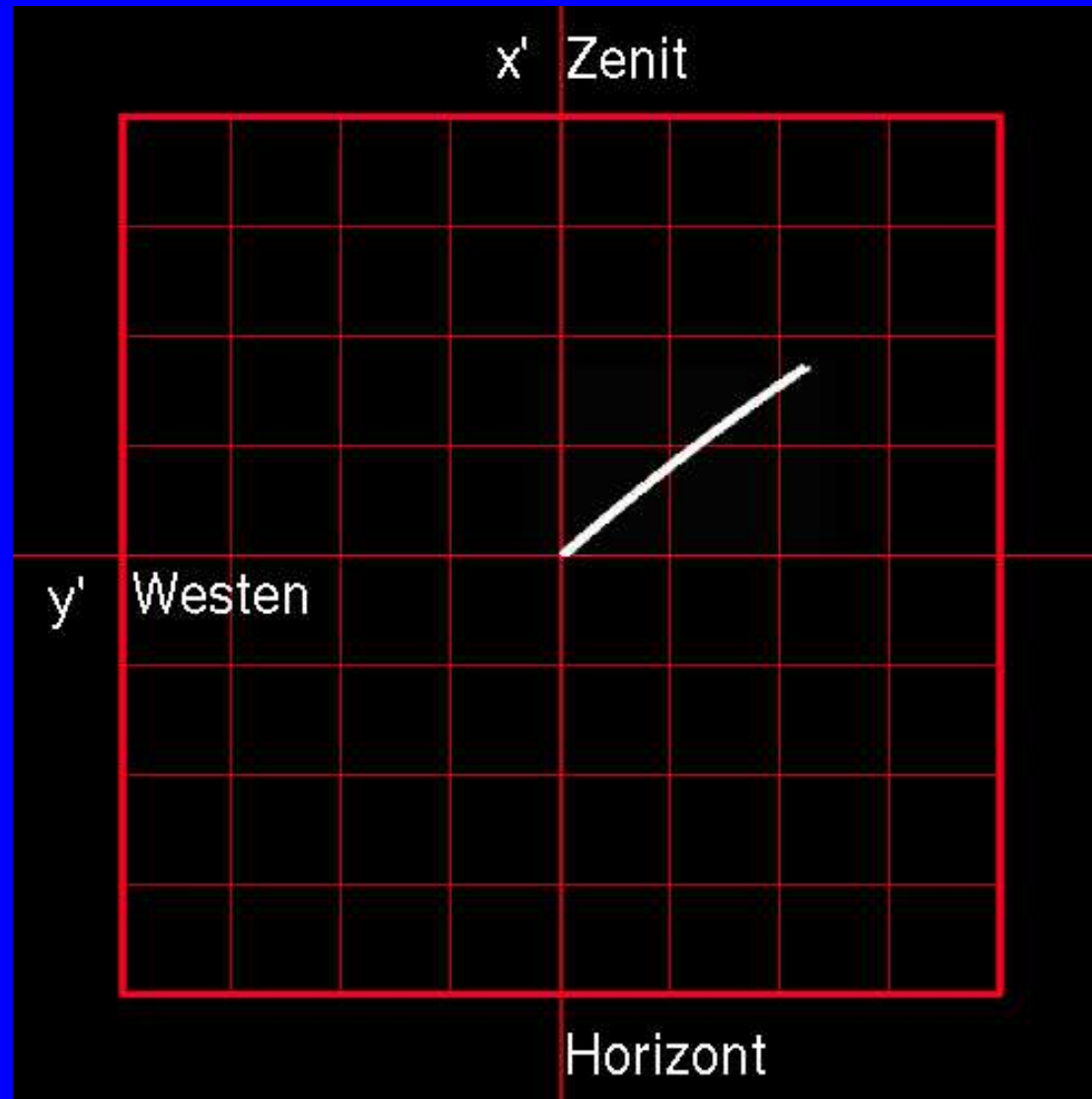
- Stoppuhr
- Messokular
- programmierbarer Taschenrechner

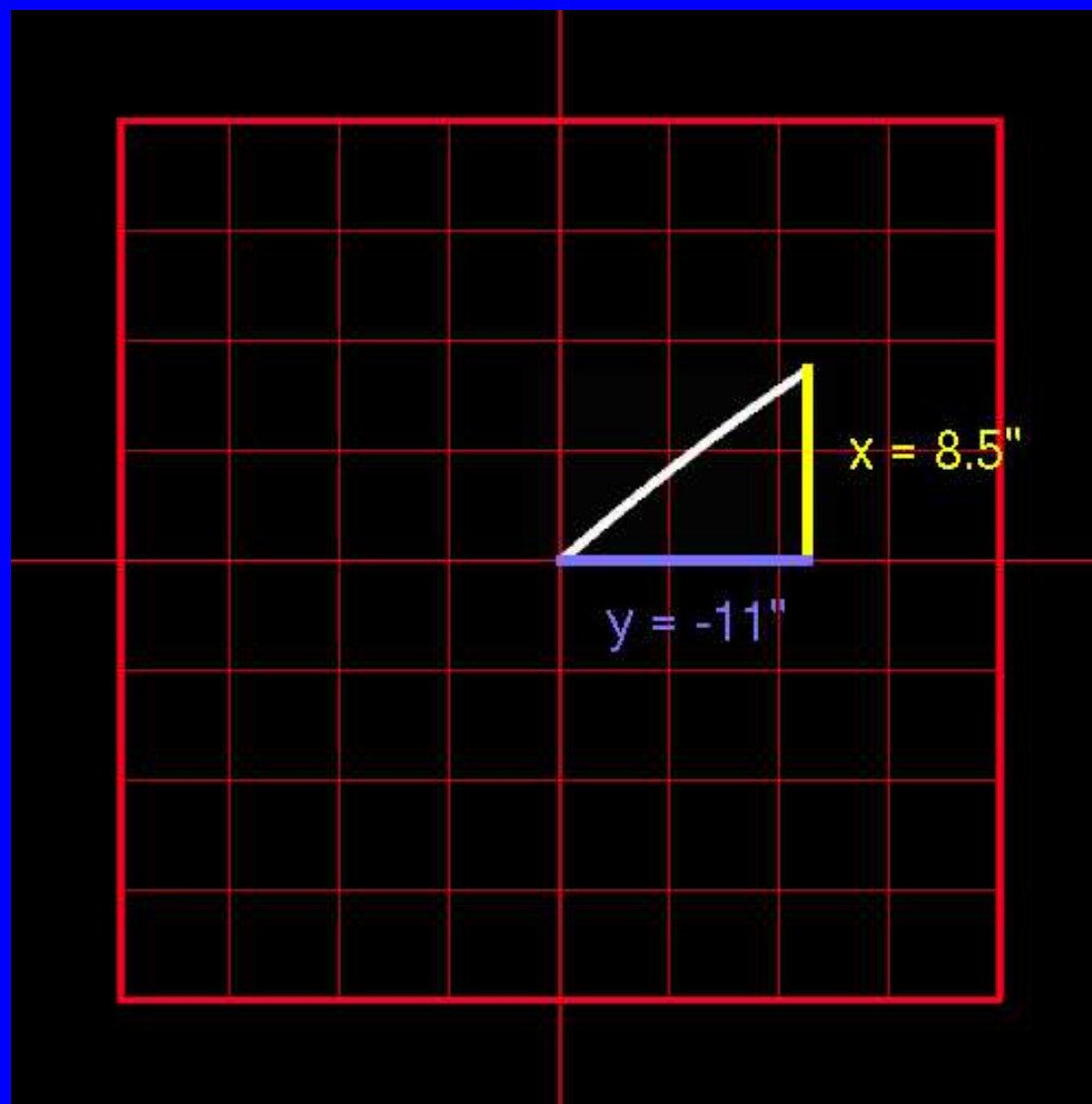
# Aufgabe



## Beispiel: E.S. King visuell

1. Nivellierung des Stativs
2. Grobe Ausrichtung der Montierung
3. Ausrichtung des Messfeldes parallel zum Horizont
4. Zentrierung des Sterns, z.B. Polaris
5. Siderische Nachführung, z.B. 30 Minuten
6. Berechnung der Korrekturen
7. Verstellen der Stundenachse





## Auswertung

Mit dem Satz von Pythagoras bestimmt man die Länge der Spur

$$l = \sqrt{8.5^2 + 11^2} = 13.9''$$

Die Distanz des instrumentellen Pols vom scheinbaren Pol

$$\lambda = \frac{T \times l}{2\pi \times \Delta t} = \frac{86164.1 \text{ sec} \times 13.9''}{2\pi \times 1800 \text{ sec}} = \underline{106''}$$

und der Winkel vom Meridian aus gezählt

$$h = \frac{7.5^\circ}{2} + \arctan\left(\frac{8.5}{11}\right) + 180^\circ = (3.75 + 37.69 + 180)^\circ = \underline{221.5^\circ}$$

## 6 Dispersion

- Befunde auf den Fotografien
- Das Licht ist normalerweise ein Gemisch von Photonen aller Wellenlängen
- Der Brechungsindex hängt von der Wellenlänge ab und das führt zum bekannten Phänomen der Dispersion
- Die Dispersion kann mit Risley-Prismen kompensiert werden

## Ausblick und Zusammenfassung

- **Automatische präzise Ausrichtung der Stundenachse**
- Es gibt nur bedingt “pinpoints”, die Refraktion ist die Limite.
- Die **resultierende** Verzerrung des Bildfeldes kann durch die Position der Stundenachse minimiert werden.
- Die Stundenachse kann mit einer Genauigkeit von  $\simeq 30''$  ausgerichtet werden.

- **<http://www.one-arcsec.org>**

30' / 30" / 03"

- 30 Minuten für die Messung
- 30" Genauigkeit der Ausrichtung
- 3" garantiertes Auflösungsvermögen

Längere Sternspuren auf Himmelsaufnahmen  
sind Vergangenheit.

**A vos montures et bonne chance !**

Luc Dettwiller et. al. 1992

# Automatisierte Ausrichtung der Stundenachse

## Bestehende Komponenten

- CCD, Webcams
- Motoren für die Ausrichtung in Azimut und Elevation
- Zwei Methoden zur Ausrichtung

## Aufwand zur Herstellung eines Prototyps

- Programmierung (Methoden und Steuerung): 1 Woche
- Mechanik: 2 Wochen