

# Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik

M. Scholz

## Leseproben



Ausgewählte Kapitel der Bände 1 bis 15

Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik 1 – 15 Leseproben

E-Book-Ausgabe 2009 - Leseprobe

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Autors unzulässig.

Bildnachweis: Wikipedia Commons, NASA, ESA, Autor

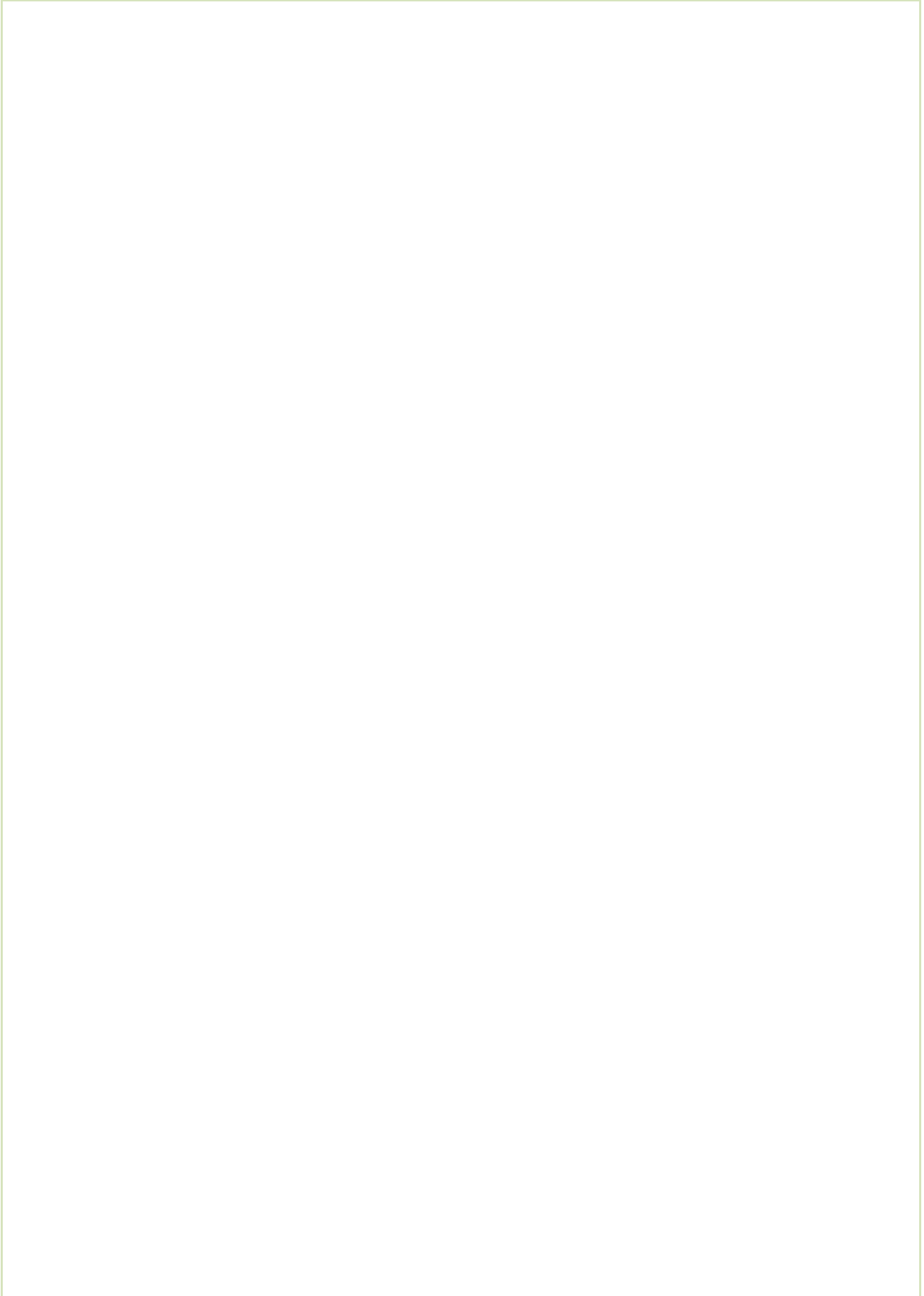
Kontakt: [mathias.scholz@t-online.de](mailto:mathias.scholz@t-online.de)

Erhältliche Bände: e-Book pdf-Format

Band 1	Klassische Astronomie
Band 2	Teleskope, Detektoren, Beobachtungsmethoden
Band 3	Struktur planetarer Körper
Band 4	Planeten des Sonnensystems I
Band 5	Planeten des Sonnensystems II
Band 6	Satelliten und Satellitensysteme
Band 7	Planetoiden und Kuiper-Belt Objects
Band 8	Kometen
Band 9	Meteoroide, Meteorite und Meteorströme
Band 10	Kosmogonie des Sonnensystems
Band 11	Extrasolare Planetensysteme
Band 12	Die Sonne als Stern
Band 13	Aktive Sonne
Band 14	Beobachtungsgrößen von Sternen
Band 15	Einführung in die Sternspektroskopie

Weitere in Vorbereitung ...

[www.astrolehrbuch.de](http://www.astrolehrbuch.de)



## Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik

M. Scholz

### Band 1: Klassische Astronomie



Die Erde als Beobachtungsort, Sphärische und Positionsastronomie, Himmelmechanik

## Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik

M. Scholz

### Band 2: Teleskope, Detektoren, Methoden



Optische- und Infrarotastronomie, Astronomie im kurzwelligen Bereich, Radioastronomie, Millimeter- und Submillimeterastronomie, Sonnenforschung, Neutronenastronomie

## Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik

M. Scholz

### Band 3: Struktur planetarer Körper



Eigenschaften planetarer Körper, innere Aufbau, Oberflächen, Atmosphäre, Magnetfelder

## Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik

M. Scholz

### Band 4: Planeten des Sonnensystems I

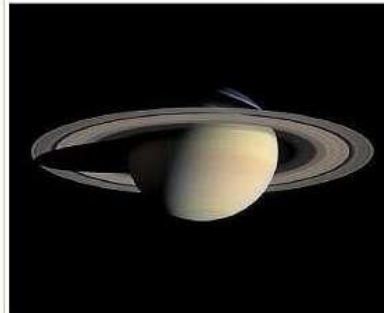


Sonnensystem, Merkur, Venus, Erde, Mars

## Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik

M. Scholz

### Band 5: Planeten des Sonnensystems II



Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun

## Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik

M. Scholz

### Band 6: Satelliten und Satellitensysteme

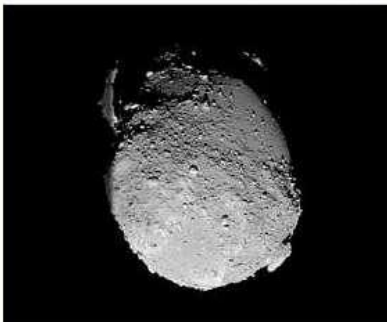


Die Monde der Planeten des Sonnensystems

## Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik

M. Scholz

### Band 7: Planetoiden und Kuiper-Belt-Objects



Objekte im Planetoiden- und Kuiper-Gürtel

## Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik

M. Scholz

### Band 8: Kometen



Kometen und Oort'sche Kometenwolke

## Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik

M. Scholz

### Band 9: Meteore und Meteorite



Meteoroiden, Meteoriten und Meteorströme, Interplanetare Materie

**Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik**

M. Scholz

**Band 10: Kosmogonie des Sonnensystems**

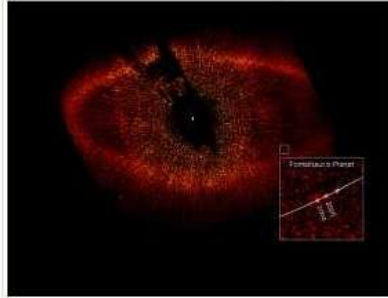


Entstehung der Planeten in einer protoplanetaren Gas- und Staubscheibe

**Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik**

M. Scholz

**Band 11: Extrasolare Planetensysteme**



Nachweismethoden und erste Ergebnisse

**Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik**

M. Scholz

**Band 12: Die Sonne als Stern**



Eigenschaften, Sonnenatmosphäre, innerer Aufbau, Energieerzeugung

**Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik**

M. Scholz

**Band 13: Aktive Sonne**



Sonnenflecke, Flares, koronale Massenauswürfe, Aktivitätszyklus, Sonnenwind

**Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik**

M. Scholz

**Band 14: Beobachtungsgrößen von Sternen**

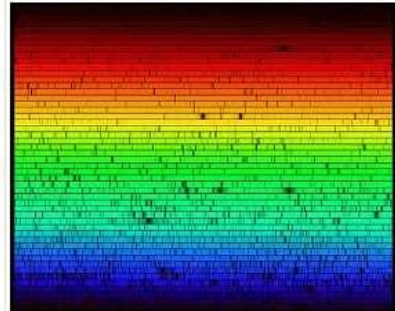


Helligkeiten, Durchmesser, Massen, Spektren, Korrelationen

**Kleines Lehrbuch der Astronomie und Astrophysik**

M. Scholz

**Band 15: Grundlagen der Sternspektroskopie**



Atom-spektren, Molekül-spektren, Linienprofile, Strahlungstransport, Spektralanalyse

Die eBooks sind im pdf-Format über [www.astrolehrbuch.de](http://www.astrolehrbuch.de) oder

<http://www.bestebuchshop.net/default.asp?pagenum=2&Group=%25&Search=%25&Reseller=1000578>

erhältlich.

## Band1: Klassische Astronomie

### Astronomische Ortsbestimmung

Die Geschichte der Ortsbestimmung – also der eindeutigen zahlenmäßigen Festlegung eines Ortes auf der Erde oder auf dem Meer durch Länge und Breite – ist eng mit der Entwicklung der Seefahrt verbunden. Insbesondere in der Zeit der großen geographischen Entdeckungen – gekennzeichnet durch die Erkundung der Küsten Afrikas unter „HEINRICH DEM SEEFAHRER“ (1394 - 1460) und der Entdeckung der Neuen Welt durch CHRISTOPH KOLUMBUS (1492) war die Ortsbestimmung auf See ein äußerst wichtiges Thema. Zwar war man in der Lage, die geographische Breite mit Hilfe eines Astrolabiums (dem Vorläufer der Theodolite) relativ sicher zu bestimmen. Die sichere Bestimmung der geographischen Länge war dagegen ein kaum lösbares Unterfangen.

So stellte PHILIPP II (1527 - 1598) von Spanien im Jahre 1598 eine bedeutende Summe für denjenigen bereit, der eine genaue Ortsbestimmung zu See durchführen kann. Wegen des Fehlens astronomischer Kenntnisse erreichte man damals jedoch lediglich eine Genauigkeit von etwa  $5^\circ$ , die in Äquatornähe einem Fehler von einigen hundert Kilometern entspricht. Erst mit der Entwicklung von seetauglichen genauen Uhren (sogenannten Schiffschronometern) wurde die Längenbestimmung auf ein Niveau gebracht, welches eine zuverlässige Bestimmung von Länge und Breite einer Schiffsposition erlaubte und das Zerschellen von Schiffen in Küstengewässern verhinderte.

Bei der astronomischen Ortsbestimmung benötigt man eine genaue Uhr und ein Meßgerät, mit dessen Hilfe die Höhe von Sternen über dem Horizont (oder deren Zenitdistanz, was dem äquivalent ist) bestimmt werden kann. Solch ein Meßgerät ist z.B. der Theodolit.

Ein Stern mit den äquatorialen Koordinaten  $\alpha, \delta$  steht zu einer bestimmten Ortssternzeit  $\Theta_0$  (bezogen auf den Nullmeridian) über einem Punkt der Erde mit den Koordinaten  $L = \Theta_0 - \alpha, \varphi = \delta$  genau im Zenit. Sein Stundenwinkel  $t$  ist zu seiner Ortssternzeit  $\Theta_p$  offensichtlich Null, da die Differenz der beiden Zeitpunkte (also  $\Theta_0 - \Theta_p$ ) gleich der geographischen Länge  $L$  ist, woraus  $L = \Theta_0 - \alpha$  folgt. Alle Orte, für die dieser Stern zu einem festen Zeitpunkt  $\tau$  die Zenitdistanz  $z$  hat, liegen auf einem Kreis mit dem Radius  $z$  um  $L, \varphi$ . Dieser Kreis wird als Standlinie bezeichnet. Wenn man also zu einem Zeitpunkt  $\tau$  die Zenitdistanz  $z$  eines bekannten Sterns mit den Koordinaten  $\alpha, \delta$  bestimmt, dann weiß man, daß man sich irgendwo auf dieser Standlinie befindet. Bestimmt man jetzt für einen zweiten Stern, dessen Äquatorialkoordinaten sich vom ersten Stern unterscheiden, auch die Zenitdistanz  $z$ , dann erhält man eine weitere Standlinie, welche die erste Standlinie an zwei Punkten schneidet. Einer dieser Schnittpunkte ist dabei der gesuchte Ort. Es gilt also nur noch den richtigen Schnittpunkt zu finden. Im klassischen Standlinienverfahren benutzt man dazu eine iterative Methode.

Ausgangspunkt dafür ist ein angenommener Ort (den man z.B. aus der letzten Schiffsposition und einer Näherung für den seitdem zurückgelegten Weg abschätzen kann). Für diesen Ort (in der Nautik wird er als „geißter Ort“ bezeichnet) berechnet man die Zenitdistanz und den Azimutwinkel der beiden

beobachteten Sterne für den Beobachtungszeitpunkt. Im Vergleich zu der beobachteten Zenitdistanz  $z_b$  ergibt sich dann für jeden Stern die Differenz

$$\Delta z = z(\tau) - z_b(\tau)$$

Ist diese Differenz negativ, dann muß der wahre Ort weiter vom Zenitort entfernt sein als der gegebene Ort. Ist die Differenz dagegen positiv, dann befindet sich der gesuchte Ort näher am Zenitort als der gegebene Ort. Korrigiert man nun den gegebenen Ort mit diesen Differenzwerten, dann erhält man als Schnittpunkt der beiden Standlinien eine neue Position, die dem wahren Ort schon eher entspricht (die Standlinie schneidet dabei immer senkrecht die Azimutlinie, weshalb Letztere auch bestimmt werden muß). Anschließend kann man das Prozedere so oft wiederholen, bis man den wahren Ort in der gewünschten Genauigkeit bestimmt hat. In der Seefahrt wurde dieses Verfahren oftmals graphisch auf einer Seekarte ausgeführt.

Heute ist das alles viel einfacher, genauer und unkomplizierter, vorausgesetzt man hat ein GPS-System zur Verfügung. Die Grundlage für ein *Global Positioning System* sind eine Anzahl von Satelliten (mindestens vier), welche permanent Zeitsignale und Statussignale aussenden, aus denen ein entsprechender Empfänger die geographischen Koordinaten seines Standortes ableiten kann. Zurzeit sind zwei Systeme im Einsatz, das amerikanische NAVSTAR-System (32 Satelliten) und das russische GLONASS-System (ebenfalls 24 Satelliten). Das Erstere ist mittlerweile frei zugänglich und erreicht Positionsgenauigkeiten von etwa  $\pm 3$  Meter. Da es unter militärischer Kontrolle steht, kann deren Präsenz in Krisenzeiten nicht garantiert werden. Deshalb haben sich die Europäer zusammengeschlossen, um bis 2008 ein unter ziviler Kontrolle stehendes GPS-System mit dem Namen GALILEO aufzubauen.

### **Wie funktioniert das Global Positioning System?**

*GPS ist ohne Zweifel einer der innovativsten Technologien der letzten Jahrzehnte. Viele Kraftfahrzeuge der Mittel- und Oberklasse sind mittlerweile serienmäßig mit satellitengestützter Navigation ausgestattet, die das Anfahren vorgegebener Orte – z.B. in Großstädten – im Vergleich zu früher stark vereinfachen. Möglich wird das durch eine permanente Ortsbestimmung des Fahrzeuges mit einer Genauigkeit von unter 5 Meter und durch exaktes Kartenmaterial des europäischen und amerikanischen Straßennetzes.*

*Die Anwendung der Satellitennavigation bei Kraftfahrzeugen ist ziemlich neu. Ursprünglich entstand GPS unter der Ägide des US-amerikanischen Verteidigungsministeriums und war eigentlich für rein militärische Zwecke ausgelegt (für zivile Anwendungen hat man sogar die Genauigkeit stark herabgesetzt). Das Prinzip des GPS besteht in nichts anderem als in Signallaufzeitmessungen zu Satelliten bekannter Position. Da die Lichtgeschwindigkeit sehr genau bekannt ist und man Zeitdifferenzen mit hoher Genauigkeit messen kann, kann man aus der Lichtlaufzeit auf die Entfernung zwischen Sender und Empfänger schließen. Stehen mehrere Satelliten zur Verfügung (im Prinzip 3, wegen Synchronisationsaufgaben sind jedoch 4 erforderlich), läßt sich prinzipiell die Position des Empfängers mit den Methoden der Triangulation bestimmen.*

*Der erste GPS-Satellit des NAVSTAR-Systems (Navigation Satellite Time And Range ) wurde am 27. Juni 1977 in eine ca. 20200 km hohe Umlaufbahn um die Erde gebracht. Ihm folgten bis 1990 23 weitere Satelliten um auf diese Weise eine globale Abdeckung zu erreichen. 1996 waren es bereits 26 operationelle Satelliten, heute sind es 32 (inkl. Reserve), so daß die Verfügbarkeit und Qualität von GPS Messungen im Normalfall überall auf der Welt permanent gewährleistet ist.*

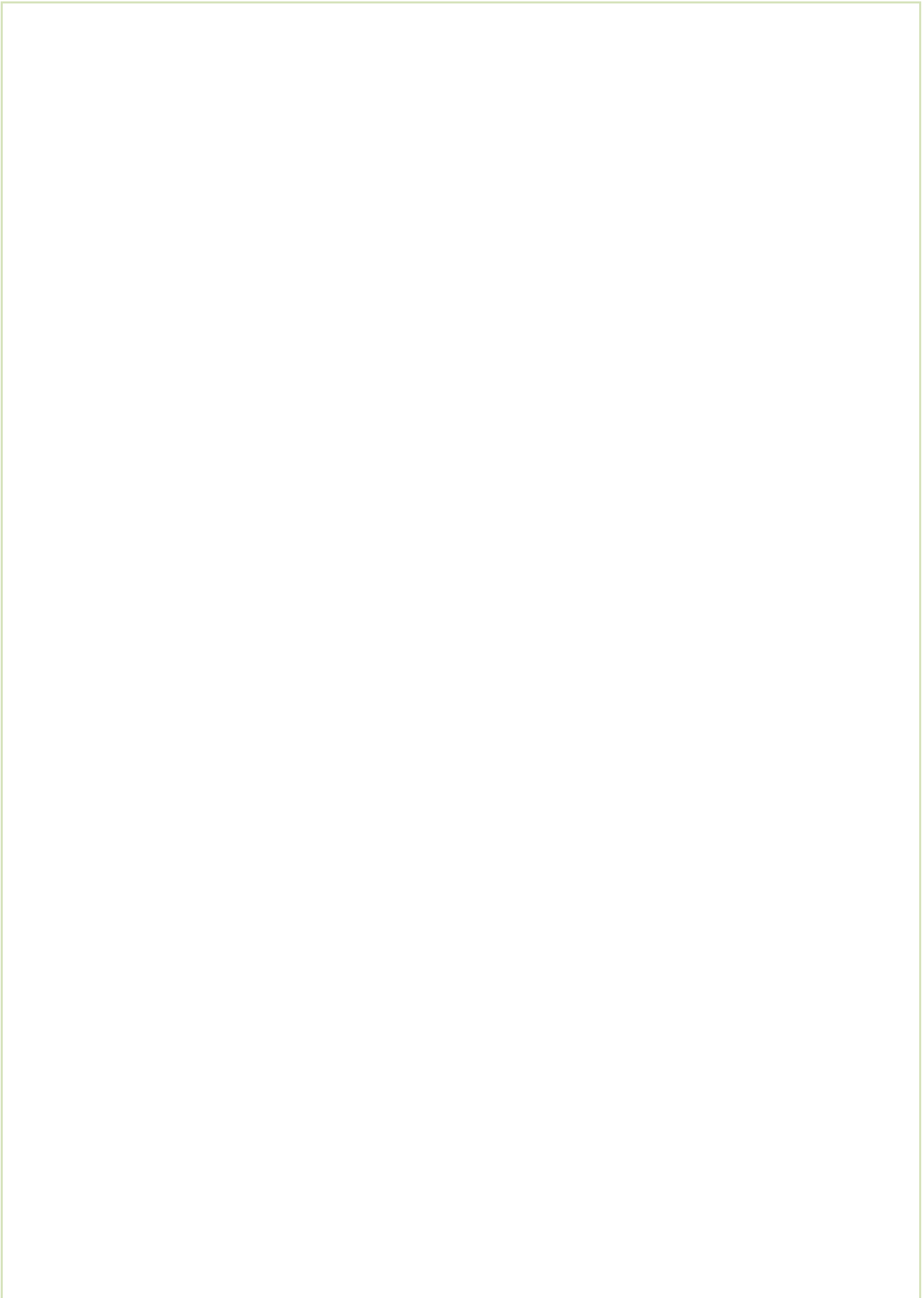
Ein GPS-System besteht aus drei wesentlichen Komponenten: den Satelliten, den Empfängern und dem Kontrollsystem. Um eine Position zu bestimmen, muß der Empfänger mindestens 4 Satelliten in „Sichtweite“ haben. Jeder weitere „Sichtkontakt“ erhöht die Qualität der Positionsbestimmung erheblich, insbesondere, weil dann durch präzise Höhenbestimmungen auch eine hohe Genauigkeit in topographisch ungünstigen Gebieten erreicht werden kann. Bei beweglichen Objekten läßt sich sogar die momentane Geschwindigkeit messen.

Die genauen Positionen der einzelnen Satelliten im Erdorbit lassen sich mit den Methoden der Himmelsmechanik sehr genau berechnen so daß man davon ausgehen kann, daß sie zu jedem gegebenen Zeitpunkt mit der notwendigen Genauigkeit bekannt sind. Wenn die von ihnen ausgesandten Signale (die quasi einen Zeitstempel in der Form „ich wurde um soundso viel Uhr abgesetzt“ beinhalten) von einem GPS-Empfänger auf der Erde empfangen werden, haben diese eine unterschiedlich lange Laufzeit, aus denen der Abstand zu den jeweiligen Satelliten bis auf wenige Meter genau abgeleitet werden kann. Simultan dazu erzeugt der Empfänger selbst ein Signal mit der gleichen Kennung und synchronisiert dieses mit den empfangenen Informationen. Voraussetzung dafür ist die genaue zeitliche Gleichschaltung der Satelliten und des Empfängers. Dazu kommen noch z.T. recht komplizierte Korrekturen, welche in die Laufzeitberechnung einfließen (so ist z.B. die Lichtgeschwindigkeit in der Erdatmosphäre etwas geringer als im Vakuum des Weltalls).

Der von einem einzelnen Satelliten ausgesendete Zeitimpuls zeichnet eine Kugelsphäre mit dem Radius  $c_0 t$  ( $c_0$ =Lichtgeschwindigkeit) um den Satelliten, auf dessen Oberfläche das Signal jeweils gleichzeitig empfangen werden kann. Wird nun simultan dazu ein Signal eines zweiten Satelliten empfangen, kommt eine zweite kreisförmige Standlinie hinzu, welche die mögliche Position des Empfängers auf zwei gemeinsame Schnittpunkte mit der ersten Standlinie eingrenzt. Eine mathematisch eindeutige Positionsbestimmung kommt schließlich über die Einbindung einer weiteren Standlinie mit definierter Zeitkennung eines dritten Satelliten zustande. Es ist damit offensichtlich, daß die Genauigkeit der Positionsbestimmung in erster Linie von der Genauigkeit der Laufzeit – und damit Entfernungsmessung abhängt und diese wiederum von der Genauigkeit der zur Verfügung stehenden Zeitbasis. Letztere ist durch Atomuhren gegeben, die in den Satelliten installiert und genauestens synchronisiert sind (hier müssen sogar relativistische Effekte mit berücksichtigt werden).

Gemessen wird die Laufzeit durch den Vergleich der momentanen Uhrzeit bei Ausstrahlung des Signals („Zeitstempel“) im Satelliten und bei Empfang durch den GPS-Empfänger. Eine genaue Zeitmessung setzt natürlich voraus, daß die Uhren beim Nutzer und im Satelliten mit hoher Genauigkeit synchron laufen. Wie man leicht nachrechnet, bedeutet bereits eine Zeitdifferenz von lediglich einer  $1\mu\text{s}$  einen Fehler in der Entfernungsmessung von ca. 300 m. Um die bei der Verwendung weniger genauer Uhren im Empfänger (dort Atomuhren einzubauen ist einfach zu teuer) auftretenden Zeitabweichungen zu eliminieren, ist eine Zeitkorrektur notwendig. Diese Korrektur selbst ist immanenter Bestandteil des Meßvorgangs und wird technisch über einen vierten Satelliten realisiert.

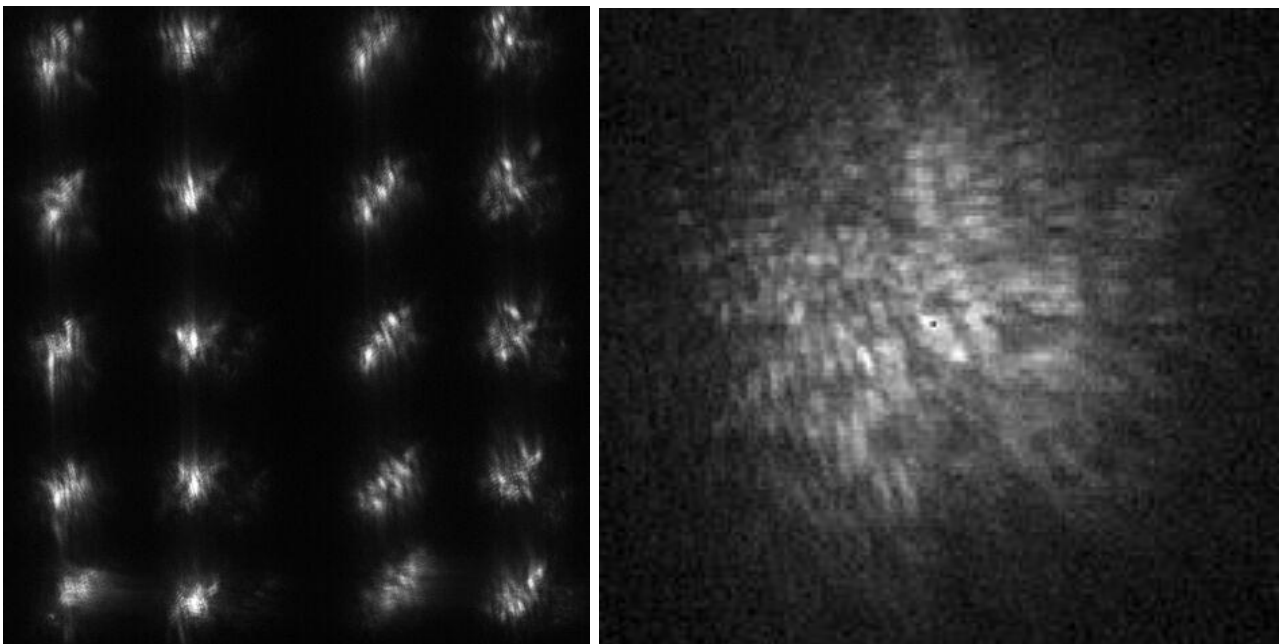
Während für die Bestimmung der drei räumlichen Koordinaten des Empfängers nur drei Entfernungsmessungen notwendig sind, muß zur Ermittlung der Abweichung der Uhrzeit  $T$  des Empfängers und zur Eliminierung der dadurch entstehenden Meßfehler eine weitere Entfernungsmessung zu einem vierten Satelliten erfolgen. Der Rest ist reine Rechnerei und kann mit in den Empfängern eingebauten Rechnern mühelos bewältigt werden.



## Band 2: Teleskope, Detektoren, Methoden

### Kompensation des Einflusses der Erdatmosphäre auf die Bildqualität

Der Brechungsindex  $n$  von Luft hängt bekanntermaßen von ihrer Dichte  $\rho$  und damit von ihrer Temperatur  $T$  ab. Außerdem ist die Erdatmosphäre hochgradig turbulent, d.h. einzelne Zellen erwärmter Luft steigen kontinuierlich nach oben während andere, kühlere und damit schwerere Luftpakete zu Boden sinken. Diese statistisch verteilten Luftpakete unterscheiden sich geringfügig in ihrem Brechungsindex, wodurch sie optisch wie schlechte langbrennweitige Linsen wirken. Das führt dazu, daß die Sterne „funkeln“, eine Erscheinung, die man auch Szintillation nennt und die man besonders gut in Horizontnähe oder beim Durchzug eines Sturmtiefs beobachten kann. Der Durchmesser der einzelnen optisch wirksamen Luftpakete beträgt dabei 10 bis 20 Zentimeter. Sie verursachen in Bodennähe Intensitätsschwankungen über einen linearen Bereich, der ungefähr dem Durchmesser dieser Luftpakete entspricht. Fällt das Sternlicht auf den Spiegel eines Teleskops, dessen Öffnung größer ist als der Durchmesser der Luftpakete, dann entfallen auf die Teleskopfläche entsprechend viele Turbulenzzellen und das beugungsbegrenzte Bild eines Sterns wird entsprechend der Anzahl dieser Turbulenzzellen in einzelne „Speckles“ aufgespalten, die sich wie wild über einen Bereich von ungefähr 1 Bogensekunde Durchmesser zufällig hin und her bewegen. Ist die Belichtungszeit kleiner als 1/10 Sekunde, dann kann man Momentaufnahmen dieser Specklebilder gewinnen. Wählt man dagegen eine größere Integrationszeit (was gewöhnlich der Fall ist), dann überlagern sich diese Specklebilder zu einem gleichmäßig ausgeleuchteten Sternscheibchen, dessen Halbwertsbreite in der Astronomie als „Seeing“ bezeichnet wird.



Bei der Fotografie des Seeingscheibchens eines Sterns wurde die Belichtungszeit so kurz gewählt, daß die einzelnen Speckles sichtbar werden

In Mitteleuropa ist das Seeing selten besser als 1'', erreicht aber an den Standorten der Großteleskope in trockenen Wüstengebieten oder auf hohen Bergen durchaus Werte <0.5''.

Nach (1.6) hängt das beugungsbegrenzte Auflösungsvermögen eines Teleskops der Öffnung  $D$  von der Wellenlänge  $\lambda$  ab. Ein 8 Meter-Spiegel des VLT hat im visuellen Spektralbereich ( $\lambda = 550$  nm) ein theoretisches Auflösungsvermögen von 0.017'' und im nahen Infrarot bei 10000 nm von 0.3''. Das praktische Auflösungsvermögen erreicht aber aufgrund des Seeing kaum das eines 20-cm Amateurteleskops (0.69'' bei  $\lambda = 550$  nm).

Das Licht eines Sterns trifft aufgrund seiner riesigen Entfernung auf der Erde quasi als ebene Welle ein. Beim Durchgang durch die Erdatmosphäre wird diese ebene Welle gestört oder genauer gesagt, über Skalen, die dem Durchmesser der Turbulenzzellen entsprechen, verbeult. Die durchschnittliche Breite einer derartigen Turbulenzzelle wird als Korrelationslänge oder Fried-Parameter  $r_0$  bezeichnet und ist wellenlängenabhängig. Das Seeing  $\sigma$  kann man deshalb durch folgende Beziehung ausdrücken:

$$\sigma = \frac{1.2 \lambda}{r_0} \quad [1.7]$$

Wobei  $r_0$  zu  $\lambda^{\frac{6}{5}}$  proportional ist. Das erklärt, warum gerade große Teleskope mit einer Apertur von mehreren Metern im Infrarotbereich praktisch beugungsbegrenzte Sternabbildungen liefern.

Der Durchmesser eines Airy-Scheibchens eines Teleskops der Öffnung  $D$  ist dagegen gegeben durch:

$$d_{\text{airy}} = \frac{1.2 \lambda}{D} \quad [1.8]$$

Die Anzahl der Speckles, die in der Fokalebene abgebildet werden, entspricht ungefähr der Anzahl von Turbulenzzellen der Ausdehnung  $r_0$ , die auf die Objektivfläche entfallen. Sie läßt sich folgendermaßen abschätzen:

$$N = \frac{D^2}{r_0^2} \quad [1.9]$$

Wie aus der Tabelle zu entnehmen ist, besteht die „Speckle-Wolke“ bei einem Teleskop der 8-Meter-Klasse im visuellen Bereich bei  $\lambda = 550$  nm aus über 6000 Einzelbildern der Größe 0.017'', die sich wild bewegend über die Größe des Seeingscheibchens verteilen. Bei einer Wellenlänge von 20  $\mu$ m hat man es dagegen nur noch mit einem Speckle-Bild zu tun. Der einzige Effekt, der aufgrund der Turbulenz weiterhin auftritt, besteht in einem relativ langsamen hin- und her bewegen dieses Bildchens. Wenn es durch geeignete Maßnahmen gelingt dieses hin- und her wandern auszuschalten, dann kann man das entsprechende Teleskop ab dieser Wellenlänge beugungsbegrenzt betreiben. Die einfachste Möglichkeit ist, in dem man mit einem in zwei Achsen kippbaren Planspiegel die Bildbewegung kompensiert und so das Sternbildchen zwingt, während der gesamten Integrationszeit seine Position auf der CCD, der Fotoplatte oder dem Spektrographenspalt beizubehalten. Derartige Korrekturoptiken werden als Tip-Tilt-Systeme bezeichnet. Sie bestehen aus einem Wellenfrontsensor,

einem schnellen Computer und dem schon erwähnten Kippspiegel. Man kann sie mittlerweile so preiswert herstellen, daß sie auch in der Amateurastronomie als „*low cost adaptive Optic*“ ihren Einzug gehalten haben. Mit Hilfe einer solchen Korrekturoptik lassen sich nicht nur „schärfere“ CCD-Aufnahmen gewinnen. Sie ist auch in der Lage, Unzulänglichkeiten in der Fernrohrmontierung und in der Nachführung auszugleichen.

Der Einsatz von reinen Tip-Tilt-Systemen ist bei Großteleskopen nicht mehr üblich. Man strebt vielmehr eine komplette Rekonstruktion der ursprünglichen ebenen Wellenfront an, d.h. man versucht nicht nur einem Speckle nachzuführen, sondern möglichst vielen. Technisch erreicht man das durch adaptive Optiken mit deformierbaren Hilfsspiegeln.

## **Adaptive Optik**

Moderne adaptive Optiken bestehen aus einer Kombination aus Wellenfrontsensor, einem tip-tilt-Spiegel und einem verformbaren Korrektionspiegel, der die atmosphärische Wellenfrontdeformation kontinuierlich ausgleicht. Die Informationen, die der Wellenfrontsensor über den Zustand der einfallenden Wellenfront (darunter versteht man die räumliche Fläche gleicher Phase) liefert, muß ein schneller Computer in Echtzeit in Steuersignale für sogenannte Aktuatoren umrechnen. Darunter versteht man die hinter einem dünnen Planspiegel angeordneten piezoelektrischen Bauelemente, mit denen gezielt auf den Spiegel Druck ausgeübt werden kann. Ziel ist es, die Spiegelfläche kurzzeitig so zu „verbiegen“, daß als Resultat - nach der Reflektion - wieder eine annähernd ebene Wellenfront entsteht. Diese Deformation muß innerhalb der Korrelationszeit

$$\tau_0 \approx \frac{r_0}{v_{wind}} \quad [1.10]$$

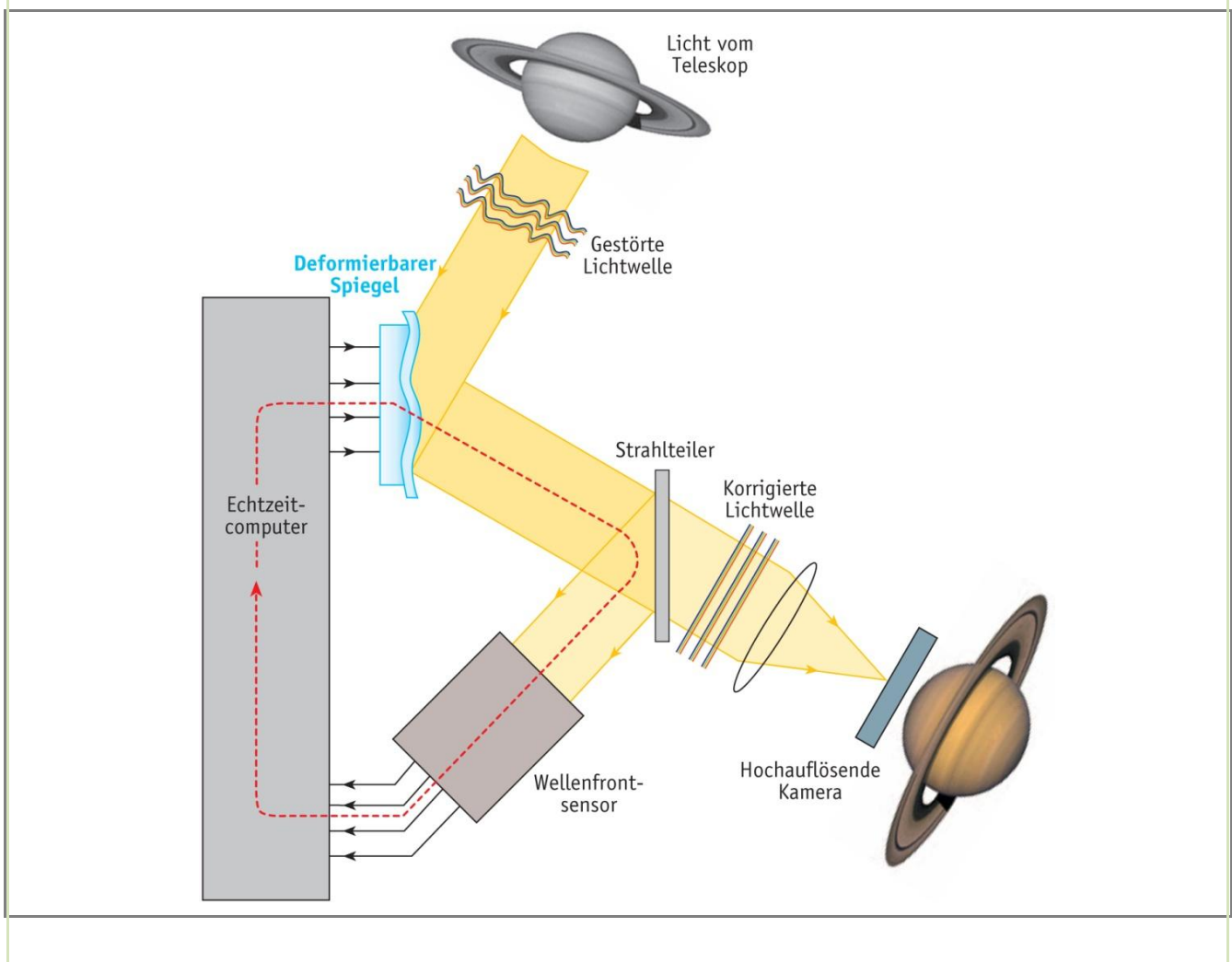
erfolgen.  $v_{wind}$  ist dabei die mittlere Windgeschwindigkeit in der Luftschicht, in der sich die störenden Luftpakete befinden. Die Anzahl der über einen Spiegel verteilten Aktuatoren sollte in der Größenordnung der zu erwartenden Speckles sein. Hier wird deutlich (siehe Tabelle), warum man bei Großteleskopen adaptive Optiken besonders für Beobachtungen im infraroten Spektralbereich einsetzt. Da die von den Piezo-Aktuatoren erreichte maximale Auslenkung ( $\pm 10 \mu\text{m}$ ) nicht ausreicht, um die durch das Seeing bewirkten Richtungsänderungen voll auszugleichen, werden adaptive Systeme zusätzlich noch mit einem tip-tilt-Spiegel ausgestattet.

Wesentlich ist dabei die über den Steuercomputer realisierte Rückkopplungsstrecke. Die gestörte Wellenfront von einem genügend hellen Referenzstern wird von dem entsprechend deformierten Spiegel in eine möglichst perfekte ebene Wellenfront reflektiert. Diese fällt auf einen Strahlteiler und von dort auf einen Wellenfrontsensor. Dort werden die noch bestehenden Abweichungen von der Idealform bestimmt und die Ergebnisse vom Steuerrechner in entsprechende Signale für die Aktuatoren umgerechnet, welche den Korrekturspiegel Bruchteile von Sekunden danach neu in Form bringen. Wenn die Zeit zum Durchlaufen dieser Rückkopplungsstrecke kürzer ist als die Korrelationszeit  $\tau_0$ , dann wird die Wellenfront hinter dem System weitgehend dem Ideal einer ebenen Welle entsprechen.

Als Wellenfrontsensor verwendet man häufig einen sogenannten Shack-Hartmann-Sensor. Durch einen Kollimator wird das einfallende Licht in ein gerades Strahlenbündel verwandelt und auf ein rechteckiges Array von kleinen Linsen geleitet, die auf einem dahinterliegenden CCD-Chip jeweils ein kleines Sternbildchen erzeugen. Das Ziel ist es, die Position dieser Sternbildchen möglichst genau und mit hoher Zeitauflösung zu bestimmen. Eine Störung der Wellenfront äußert sich dann darin, daß diese kleinen Sternbildchen gegenüber ihrer Normallage verschoben sind. Aus dieser Verschiebung kann man mit Hilfe spezieller mathematischer Verfahren näherungsweise die Form der gestörten Wellenfront berechnen.

Damit man überhaupt mit adaptiver Optik beobachten kann, benötigt man in unmittelbarer Objektnähe einen möglichst hellen Referenzstern. Und das ist auch das Problem. Diese Forderung läßt sich leider in den meisten Fällen für das gerade interessierende Beobachtungsziel nicht erfüllen. Deshalb arbeitet man neuerdings mit einem künstlichen Referenzstern. Man erzeugt ihn, in dem man einen Laserstrahl in eine bestimmte, in ca. 90 Kilometer Höhe befindliche Atmosphärenschiicht richtet. In dieser Schicht gibt es in geringer Konzentration Natriumatome, die von diesem Laserlicht zu einer Lichtemission bei einer Wellenlänge von 589.6 nm bzw. 589.0 nm (die „D-Linien“) angeregt werden. Der dabei entstehende Lichtfleck wird dann als Referenzstern für die adaptive Optik verwendet.

Die folgende Abbildung zeigt den prinzipiellen Aufbau einer adaptiven Korrektoptik:



## **Band 3: Struktur planetarer Körper**

### **Oberflächen**

Von „Oberflächen“ kann man genaugenommen nur bei Planeten, Planetoiden, Kometen und Monden sprechen, die überwiegend aus festen Stoffen – Metallen, Silikaten und Eis verschiedener Zusammensetzung – bestehen. Die Riesenplaneten wie Jupiter und Saturn haben zwar auch einen Gesteinskern. Ihre alles dominierende Atmosphäre geht jedoch quasi stufenlos in einen flüssigen Zustand über (flüssiger und danach metallischer Wasserstoff). An der Untergrenze dieser Schicht herrschen solch enorme Druck- und Temperaturverhältnisse, daß es nach derzeitigem Wissensstand sinnlos ist, über eine „etwaige Oberfläche“ der Gesteiskerne zu philosophieren. Das gilt natürlich auch für die Großplaneten Uranus und Neptun.

Die Oberfläche eines erdartigen Planeten oder eines Mondes kann aus festen Gesteinen (z.B. Mond, Mars), oder aus Eis (z.B. Jupitermond Europa, Saturnmond Enceladus) bestehen. Natürlich ist es auch möglich, daß solch ein Körper mehr oder weniger mit einer Flüssigkeit (z.B. Wasser wie bei der Erde) oder – wenn er noch keine Kruste ausgebildet hat - mit geschmolzenen Gesteinen bedeckt ist. In unserem Sonnensystem findet man nur noch erdartige Planeten mit bereits erstarrter Kruste bzw. sogenannte „Eismonde“, die überwiegend aus Wassereis bzw. (in ihrem Inneren) Wasser bestehen. Als exponierte Ausnahmen sind noch der Jupitermond Io mit seinen außergewöhnlichen Vulkanlandschaften und der Saturnmond Titan zu nennen, dessen Landschaftsformen, die sich dem Radar der Cassini-Sonde immer mehr erschließen, gelinde gesagt, interpretationsbedürftig sind.

Die Struktur der Kruste, ihr Aufbau und ihre Morphologie werden entscheidend durch endogene und exogene Prozesse bestimmt. Welche Form überwiegt, hängt wieder davon ab, ob der entsprechende Himmelskörper noch geologisch aktiv ist bzw. eine Atmosphäre / Hydrosphäre besitzt.

#### **Exogene Prozesse**

Unter exogenen Prozessen versteht man alle Einflüsse auf die Kruste eines Planeten, die sich aus der Wechselwirkung mit der Atmosphäre, der Hydrosphäre und mit dem kosmischen Raum (Strahlung, Impakte) ergeben. Auch Schwerkraftwirkungen (z.B. Hangrutschungen in Impaktkratern) zählt man zu den exogenen Prozessen.

#### **Endogene Prozesse**

Unter endogenen Prozessen versteht man alle Wirkungen, die sich aus dem Innern eines Planeten ergeben. Dazu gehören in erster Linie vulkanische und tektonische Prozesse. Die dazu notwendige Energie wird vom Planeten selbst geliefert (Mantel-Konvektion, Aufsteigen von Plumes) oder sie entsteht in seinem Innern durch eine Gezeitenwechselwirkung mit einem anderen Himmelskörper (Jupitermond Io).

Unter den exogenen Prozessen spielten besonders in der Frühzeit des Sonnensystems vor mehr als 3.5 Milliarden Jahren Impaktereignisse eine große Rolle bei der Oberflächenstrukturierung. Die Planeten

Merkur und Mars sowie der Mond haben diese Ereignisse in Form von ausgedehnten Kraterlandschaften bis heute konserviert. Bei der Erde und bei der Venus ist jedoch davon so gut wie nichts mehr zu erkennen, da beide Planeten tektonisch aktiv sind bzw. waren (Venus) und zumindest bei der Erde der Prozeß der Gradation – der Abtragung durch Verwitterung – eine Landschaft in geologisch kurzer Zeit völlig verändern kann. Aber schon seit mindestens 3 Milliarden Jahren spielen Einschlagphänomene so gut wie keine Rolle mehr bei der exogenen Oberflächengestaltung der inneren Planeten. Zwar rechnet man z.B. bei der Erde bei einer Zeitskala von mehreren zehn Millionen Jahren immer wieder mit dem Einschlag eines einige Kilometer großen Gesteinsbrockens. So katastrophale Auswirkungen das auch auf die Biosphäre haben mag, für die globale Geologie und Morphologie der Erde haben derartige „Nadelstiche“ kaum eine Bedeutung. Sie werden in geologisch kurzer Zeit quasi „vergessen“. Der Asteroid, der vor ca. 65 Millionen Jahren zum Niedergang der Sauropoden geführt hat, erzeugte z.B. einen Krater von ca. 200 km Durchmesser im Bereich des heutigen Golf von Mexiko (Chicxulub-Krater) sowie – was aber noch kontrovers diskutiert wird - zu einem verstärkten Vulkanismus an anderen Stellen der Welt (z.B. im heutigen Sibirien). Trotzdem erfordert es einen riesigen Aufwand an Feldforschung, um überhaupt noch den Krater selbst und seine Grenzen nachweisen zu können. Trotz der mit diesem Einschlag verbundenen globalen Katastrophe für das Leben in jener erdgeschichtlich gar nicht allzu weit entfernten Epoche kann der Autor und mit ihm viele andere Menschen speziell diesem Impakt durchaus etwas Positives abgewinnen. Den Grund dafür hat in seiner unnachahmlichen Art der bekannte Paläontologe STEPHEN JAY GOULD (1941-2002) folgendermaßen beschrieben: *„Hätte nicht der Himmelskörper ihre (der Dinosaurier, d.V.) blühende Vielfalt zunichte gemacht, wären sie vielleicht heute noch am Leben (Warum nicht? Es war ihnen 100 Millionen Jahre lang gut gegangen, und in der Erdgeschichte sind seitdem erst wieder 65 Millionen Jahre hinzugekommen). Gäbe es die Dinosaurier noch, wären die Säugetiere mit ziemlicher Sicherheit klein und unbedeutend (wie während der hundertmillionenjährigen Herrschaft der Dinosaurier). Und wenn Säugetiere klein, in ihren Möglichkeiten beschränkt und nicht mit Bewußtsein ausgestattet sind, entstehen daraus sicher keine Menschen, die ihre Gleichgültigkeit zum Ausdruck bringen können. Oder die ihre Söhne Peter nennen (Anspielung auf PETER WARD, Mitautor des Buchs „Einsame Erde“). Oder die über Himmel und Erde staunen. Oder die über das Wesen der Wissenschaft und die richtige Beziehung zwischen Tatsachen und Theorie nachgrübeln. Sie wären zu dumm, es zu versuchen; zu sehr damit beschäftigt, sich die nächste Mahlzeit zu verschaffen und sich vor dem bösen Velociraptor zu verstecken.“*

Das kurz nach der Entstehung der inneren Planeten Impakte besonders häufig aufgetreten sind liegt daran, daß noch genügend „Baumaterial“ in Form von mehr oder weniger großen Brocken von Planetesimals den Bereich des inneren Sonnensystems bevölkerten. Nach und nach wurden sie von den größeren Planeten und den Erdmond eingefangen bzw. durch die gravitative Wirkung der Riesenplaneten außerhalb der Marsbahn aus dem inneren Sonnensystem entfernt. Die damit einhergehende „Ausdünnung“ macht sich z.B. auf dem Mars (wo die Oberfläche zu verschiedenen Zeiten vulkanisch überformt wurde) durch Gebiete unterschiedlicher Kraterdichte bemerkbar. Aus dem Fakt der rapiden Abnahme der Einschlagsdichte über weniger als eine Milliarde Jahre und durch die Erstellung von Kraterstatistiken kann man mit einigen Zusatzannahmen beispielsweise auf dem Mars das relative Alter der einzelnen Landschaften bestimmen. Durch die Analyse von Mondgestein und von Meteoriten lassen sich durch die Ausnutzung radioaktiver Zerfallsreihen absolute Altersangaben gewinnen. Aus solchen Untersuchungen weiß man z.B. daß das Zeitalter des „letzten schweren

Bombardements“ vor ca. 3.9 Milliarden Jahren zu Ende gegangen ist. Das bedeutet nicht, daß zu jener Zeit jeden Tag ein kilometergroßer Krater auf dem Mond entstanden ist. Der zeitliche Abstand zwischen zwei derartigen Ereignissen lag nach modernen Abschätzungen durchschnittlich bei ungefähr 2500 Jahren.

Planeten, Planetoiden und Monde, deren Inneres nach ihrer Entstehung schnell ausgekühlt ist, haben jene ferne Zeit in ihrer Oberfläche sehr gut konservieren können. Beim Mars haben vulkanische Prozesse und in geringerem Umfang Erosionserscheinungen einen Teil der uralten Kraterlandschaften überformt. Auf diese Weise kommt die auffällige Zweiteilung (Dichotomie) der Marsoberfläche in eine alte, kraterreiche Hemisphäre und in eine jüngere, vulkanisch überprägte Hemisphäre zustande. Heute weiß man, daß auch Erosion durch fließendes Wasser sowie durch Eis in der Vergangenheit bei der Landschaftsbildung des Mars eine beachtliche Rolle gespielt hat.

Auch auf der Venus haben großräumige vulkanische Prozesse in Form von Magmaüberflutungen alle Hinweise auf das Zeitalter des „Großen Bombardements“ ausgelöscht. Das gilt natürlich noch mehr für die Erde. Plattentektonik und Erosion durch Wind und Wasser bewirken, daß sogar die Spuren von sehr großen Impakten innerhalb von wenigen Millionen Jahren quasi von der Erdoberfläche getilgt werden.

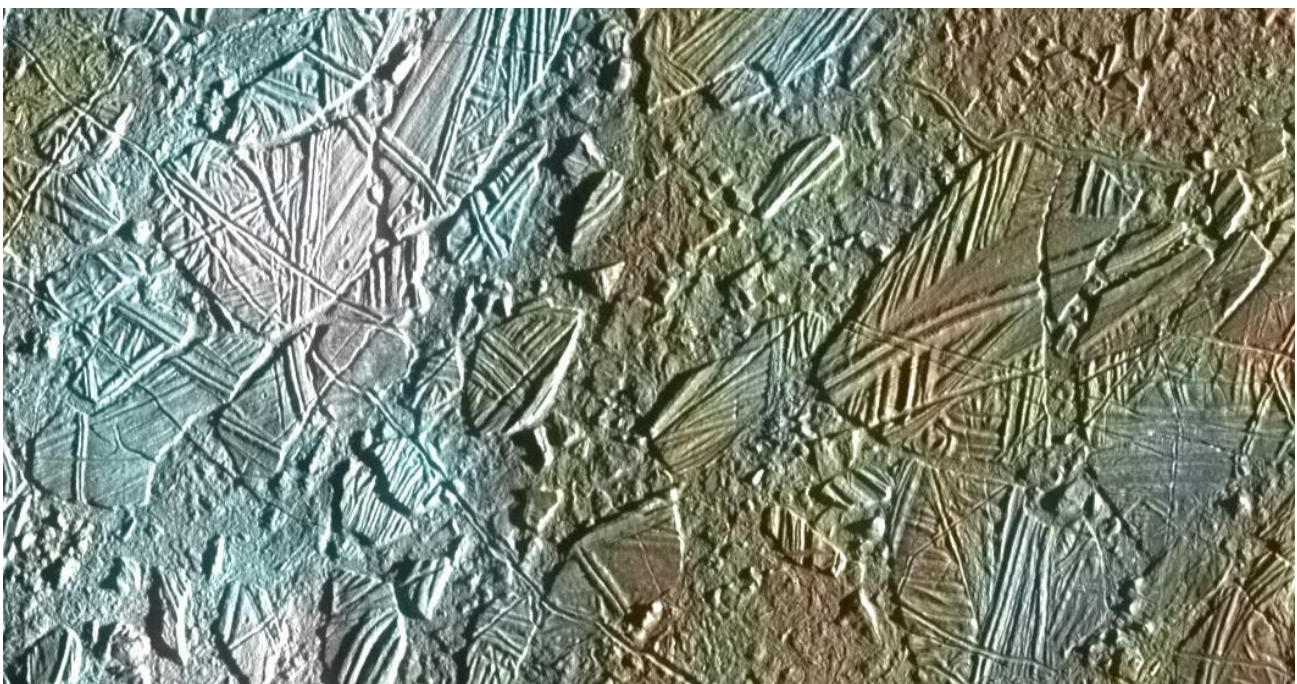
Genügend große Planeten kühlen jedoch so langsam ab, daß sie in ihrem Inneren lange Zeit – z.T. bis heute - flüssige bzw. hochplastische Schichten halten können. Konvektionsbewegungen in diesen Schichten oder das Aufsteigen von Magmablases (Plumes) führen bei ihnen zu den beobachteten vulkanischen und tektonischen Prozessen. Die Gebirgsbildung auf der Erde, die Entstehung von Bruchstrukturen in der Erdkruste und nicht zuletzt die Kontinentaldrift erhalten ihre Energie aus der Mantelkonvektion. Plattentektonik ohne andauernde Mantelkonvektion ist unmöglich. Bei Venus und Mars findet man keine eindeutigen Anzeichen von derartigen plattentektonischen Prozessen. Man findet aber dafür umso mehr morphologische Strukturen, die auf einen ausgeprägten Vulkanismus hindeuten. Riesige Vulkanbauten gibt es sowohl auf dem Mars (z.B. die Tharsis-Aufwölbung) als auch auf der Venus. Die Venusoberfläche wurde vor 500-800 Millionen Jahren fast völlig erneuert. Großräumige Flutbasalte haben ausgedehnte Regionen überformt und alle älteren Strukturen zum Verschwinden gebracht. Überall auf der Venusoberfläche findet man Vulkane in einer außergewöhnlichen morphologischen Variationsbreite sowie riesige, z.T. mehrere 1000 km lange Lavakanäle.

Trotzdem sich Erde und Venus in ihrer Größe und Masse stark ähneln, haben beide überraschenderweise eine jeweils völlig andere geologische Entwicklung durchgemacht, die im Fall der Erde zu einem „Garten Eden“ und im Fall der Venus zu einer „Gluthölle“ geführt haben.

Etwas anders sieht es bei den „Eisplaneten“ aus. Darunter versteht man die großen Monde der Riesenplaneten Jupiter bis Neptun, deren mittlere Dichte je nach Größe ihres Gesteinskerns zwischen 1000 und 3000 kg/m<sup>3</sup> liegt und die deshalb überwiegend bzw. zu einem großen Teil aus Wassereis bestehen. Mit Ausnahme von Europa (Jupiter), Enceladus (Saturn) und Triton (Neptun) haben alle sehr alte und kraterübersäte inaktive Oberflächen. Nur einige zeigen Anzeichen von Erosionserscheinungen, die mit einem sogenannten „Kryovulkanismus“ zusammenhängen (Dione, Tethys, Enceladus (Saturn), Miranda, Ariel (Uranus)). Diese exotische Art von Vulkanismus wurde zuerst durch Voyager 2 auf dem Neptunmond Triton entdeckt. Ganz allgemein versteht man darunter das

geysirartige Abblasen von flüssigen bzw. gasförmigen Stoffen (z.B. Wasser, Stickstoff etc.) aus der kalten Oberfläche eines Eismondes heraus in den kosmischen Raum. Eine weitere Überraschung war der verhältnismäßig kleine Saturnmond Enceladus, von dem aus kontinuierlich Eiskristalle in den Bereich seiner Umlaufbahn gelangen und dort den feinen E-Ring bilden.

Der etwa erdmondgroße Jupitermond Europa ist in vielfacher Hinsicht bemerkenswert. Seine mittlere Dichte impliziert, daß er neben einem kleinen Eisenkern hauptsächlich aus Silikaten aufgebaut ist. Seine Oberfläche besteht jedoch aus einer (vielleicht mehrere Kilometer dicken (?)) Eisschicht, unter der sich ein schätzungsweise 50 km tiefer Ozean aus flüssigem Wasser verbirgt. Auf ihr hat man nur wenige Einschlagkrater, deren Durchmesser einen Kilometer übersteigt, gefunden. Das bedeutet, daß die sichtbare Oberfläche kaum älter als ca. 200 Millionen Jahre sein kann. Dafür erkennt man ein sehr komplexes System von gegeneinander verschobenen Eisschollen, die der Oberfläche ein bizarres Aussehen verleihen.



Ausschnitt des Gebietes Conomara Chaos auf dem Jupitermond Europa. Es sind eine Vielzahl zerbrochener und z.T. verdrehter Eisschollen zu erkennen.

Genauso wie Europa wird das Innere von Io durch die Gezeitenwechselwirkung mit Jupiter (neben einem kleinen Anteil, der aus dem radioaktiven Zerfall schwerer Elemente herrührt) mit thermischer Energie versorgt. Nur hat sich hier ein außergewöhnlicher Schwefelvulkanismus etabliert, der diesen Mond zu dem vulkanisch aktivsten Körper des Sonnensystems macht. Über 300 Vulkane sind bekannt, die zufällig verteilt die rötlich-orangene Oberfläche bedecken. Die Planetensonde Galileo hat sich mehrfach diesem Mond genähert und eine Fülle von Informationen geliefert, aus denen man sehr detailliert eine Erklärung für diese spezielle Art von Vulkanismus erarbeiten konnte.

## Band 4 und 5: Planeten des Sonnensystems I und II

### Jupiter - Ringsystem

Am 4. März 1979 gelang Voyager 1 eine Aufnahme der unmittelbaren Umgebung des Riesenplaneten, die überraschenderweise eine leichte diffuse Aufhellung zeigte. Nach ein paar Tagen Bildbearbeitung und Analyse war klar, Jupiter besitzt einen schwachen Ring. Einige Wissenschaftler haben bereits 1974, als Pioneer 11 in einem Abstand von lediglich 114000 km vorbeiflog, die Frage diskutiert, ob nicht auch Jupiter eine Scheibe bzw. einen Ring ähnlich dem des Saturns besitzt. Der Grund für diese Vermutung war eine signifikante Verringerung der Anzahl hochenergetischen Teilchen, als die Sonde die Äquatorebene des Planeten passierte. Ein Ring aus kleinen Eis- und Gesteinsbrocken würde genau diese Teilchen absorbieren und die Diskrepanz erklären. Wie sich jedoch später herausstellte, handelt es sich bei den Jupiterringen um fast reine Staubringe, die sich völlig von den Saturnringen unterscheiden, so daß diese Erklärung zumindest teilweise obsolet wurde.



Galileo-Aufnahme des Jupiterringsystems von der Jupiterrückseite aus bei abgedeckter Sonne

Voyager 2 hat man als Reaktion auf die Entdeckung seiner Vorgängersonde so umprogrammiert, daß er bei seiner Passage weitere Aufnahmen von den Ringen anfertigen konnte. Sie zeigen u.a. daß sie besonders gut im Gegenlicht zu erkennen sind was darauf hindeutet, daß hier nicht Felsbrocken umherschwirren sondern vielmehr fein verteilter Staub mit Korngrößen im Mikrometerbereich das Sonnenlicht streut. Der Ring ist etwa 100000-mal lichtschwächer als Jupiter was seine Beobachtung von der Erde aus außerordentlich erschwert. Nur im Infraroten Spektralbereich, genauer gesagt in der Mitte einer Methan-Absorptionsbande bei einer Wellenlänge von  $2,27 \mu\text{m}$  (was quasi den Jupiter dunkel erscheinen läßt), konnte das Streulicht des Rings mit dem 10-Meter Keck-Teleskop fotografiert werden. Ihre detaillierte Erforschung begann aber erst mit der Galilei-Mission.

Während der Galileo-Umläufe um Jupiter gelangen mehrere Dutzend Aufnahmen und auch die Saturnsonde Cassini konnte bei ihrem Fly by -Manöver um Jupiter am 11. Dezember 2000 eine ganze

Anzahl guter Fotos liefern. Auf diesem Material baut sich im Wesentlichen der heutige Kenntnisstand über den Jupiter-Ring auf. Danach besteht er aus insgesamt drei Hauptstrukturen:

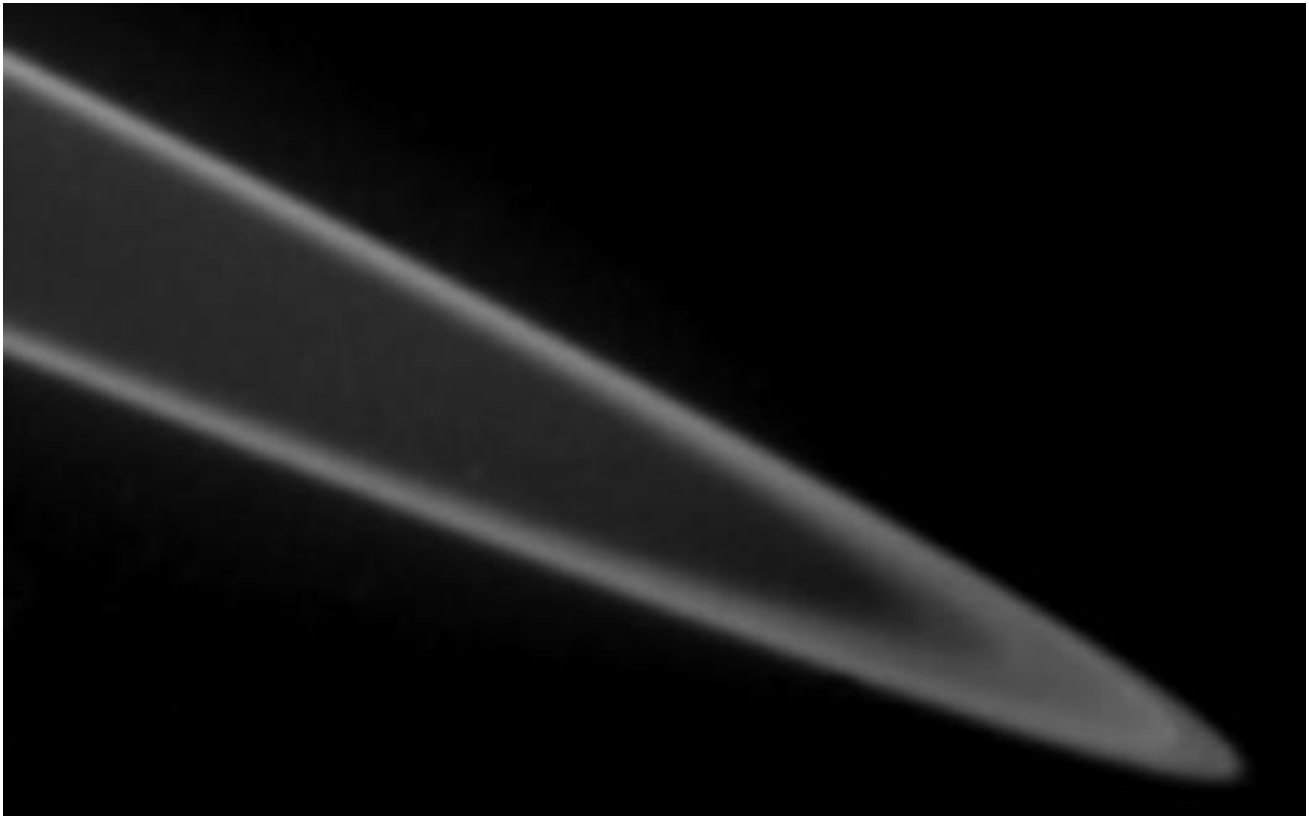
- a. **Haupttring:** Breite ungefähr 7000 km, Dicke max. 30 km. Er endet abrupt in einer Entfernung von 129130 km vom Zentrum des Planeten. In ihm bewegen sich die kleinen Monde Adrastea und Metis. Man vermutet, daß sie neben kieselsteingroßen Materiebrocken, von denen es durchaus einige im Haupttring geben sollte, die wichtigsten Staublieferanten sind. Die Umlaufzeit der Ringpartikel um Jupiter beträgt ca. 7 Stunden.
- b. **Halo:** Beginnend am Innenrand des Haupttrings überzieht ein ca. 20000 km dickes Halo den Ring bis in die Nähe der Wolkenobergrenze des Jupiter. Es enthält sehr feines Ringmaterial, welches aus dem Bereich des Haupttrings und der Gossamer-Ringe eingewandert ist.
- c. **Gossamer-Ringe:** Seit die Ergebnisse der Galileo-Sonde vorliegen ist bekannt, daß es sich bei den Gossamer-Ringe um zwei ineinander verschlungene Staubringe handelt, die von den kleinen Jupitermonden Amalthea und Thebe nach außen begrenzt werden. Sie befinden sich im Außenbereich des Ringsystems. Da die vertikale Ausdehnung des Inneren der beiden Ringe exakt der Bahnneigung Amaltheas entspricht und auch die Dicke des äußeren Rings sehr gut zu Thebe paßt (seine Mächtigkeit ist gleich dem Abstand zwischen dem höchsten und niedrigsten Bahnpunkt der um  $0.8^\circ$  geneigten Mondbahn in bezug auf die Äquatorialebene Jupiters), ist es sehr realistisch anzunehmen, daß der Staub aus dem die Ringe bestehen, auch von diesen Monden stammt.

Die Messungen des Staubdetektors der Galileo-Sonde ergaben 1998 Hinweise auf die Existenz eines noch schwächeren 4. Staubtrings, der sich an die Gossamer-Ringe anschließt und bis zu 20 Jupiterradien in den Raum hinausreichen soll. Im Gegensatz zu den inneren Ringen bekommt er Materialnachschub hauptsächlich aus dem interplanetaren Raum und aus dem Material, den Kometen bei ihrer Auflösung hinterlassen.

Im Gegensatz zu den Saturn- und Uranusringen, die Gesteins- und Eisbrocken von Zentimeter- bis Metergröße enthalten, bestehen die Jupiterringe fast ausschließlich aus mineralischen Staubteilchen in der Größenordnung von wenigen Mikrometern (vergleichbar mit den Rußteilchen in Zigarettenrauch). Derartige Teilchen streuen Licht bevorzugt nach vorn, weshalb die Ringe im Gegenlicht trotz ihrer geringen optischen Tiefe ( $\tau \approx 10^{-6}$  für den Haupttring,  $10^{-7}$  für die Gossamer-Ringe) relativ hell erscheinen (d.h. man erkennt sie am besten, wenn man von der Kante auf sie schaut). Diese Art von Streuung – auch Mie-Streuung genannt – tritt immer dann auf, wenn die Partikelgröße etwas größer als die Lichtwellenlänge ist. Beobachtet man die Ringe unter verschiedenen Winkeln, dann kann man aus den gemessenen Intensitäten der gestreuten Sonnenstrahlung auf die Größe der streuenden Teilchen schließen. Die unten erwähnte optische Tiefe  $\tau$  ist übrigens ein gebräuchliches Maß für die Strahlungsdurchlässigkeit einer homogenen Materieschicht. Dabei gilt: eine Staubschicht der optischen Dicke  $\tau$  schwächt eine senkrecht hindurchgehende Strahlung um den Faktor  $e^{-\tau}$ .

Staubteilchen im Mikrometerbereich können sich nur einige hundert bis zehntausend Jahre auf Bahnen um den Jupiter halten. Eine Anzahl von Effekten führt dazu, daß sie sich immer mehr in Richtung Jupiteroberfläche bewegen wo sie schließlich akkretiert werden. Aufgrund ihrer Größe und ihrer geringen Teilchenzahldichte spielen für ihre Dynamik Zusammenstöße untereinander kaum eine Rolle. Dafür sind sie anfällig für Wechselwirkungen mit dem Magnetosphärenplasma und für Wechselwirkungen mit der Sonnenstrahlung. Letztere führt zu einem Effekt, der die Halbachse der Bahnen der Staubteilchen im Laufe der Zeit immer mehr schrumpfen läßt. Ursache dafür ist ein Verlust

an Bahndrehimpuls durch die isotrope Wiederabstrahlung absorbierten Sonnenlichts (Poynting-Robertson-Effekt).



Haupttring Jupiters auf einer Voyager 2 -Aufnahme

### ***Poynting-Robertson-Effekt***

*Größere Staubteilchen, die sich auf einer Bahn um die Sonne oder um einen Planeten bewegen und dabei Sonnenlicht absorbieren, verringern kontinuierlich ihre Bahnhalbachsen, da sie aufgrund der isotropen Reemission der aufgenommenen Energie Bahndrehimpuls verlieren. Das begrenzt ihre Lebensdauer und führt z.B. im Jupitersystem dazu, daß das Material der Gossamer-Ringe ständig nachgeliefert werden muß, da es innerhalb von nur einigen 10000 Jahren von Jupiter akkretiert wird.*

*Dieser Effekt, der nach ihren Entdeckern JOHN HENRY POYNTING (1852-1914) und HOWARD PERCY ROBERTSON (1903-1961) benannt ist, soll im Folgenden anhand eines Testteilchens der Dichte  $\rho$  und des Radius  $r$ , welches sich in der Entfernung  $R$  von der Sonne befindet, näher erläutert werden. Bekanntlich besitzen Lichtquanten einen genau definierten Impuls (welcher der Energie  $E_\gamma = h\nu$  proportional ist), den sie während eines Absorptionsvorgangs auf das Teilchen übertragen können. Bezeichnet man mit  $L_\odot$  die Sonnenleuchtkraft, dann beträgt der übertragene Impuls pro Zeiteinheit*

$$P = \frac{r^2}{4R^2} L_\odot \quad (a)$$

*wobei die Richtung näherungsweise der Richtung des Radiusvektors Teilchen - Sonne entspricht. Aus Sicht des Teilchens muß sie genau genommen noch um den Aberrationswinkel korrigiert werden. Das führt dazu, daß der auf das Teilchen übertragene Impuls neben der radialen Komponente noch eine kleine tangentielle Komponente besitzt, die dem Geschwindigkeitsvektor des Teilchens entgegen*

gerichtet ist. Auf diese Weise verringert sich der Bahndrehimpuls und das Teilchen bewegt sich effektiv (und zwar in einer Spiralbahn) in Richtung der Strahlungsquelle. Dabei wird angenommen, daß die Reemission der Strahlung isotrop erfolgt. Die dabei pro Zeiteinheit reemittierte Strahlungsenergie resultiert in einer tangentialen Kraftkomponente der Größe (alle folgenden Überlegungen beziehen sich auf die Sichtweise eines ruhenden Beobachters)

$$F_t = P \frac{v}{c^2} L_{\odot} \quad (b)$$

Für die Änderung des Bahndrehimpulses  $l$  ergibt sich daraus

$$\frac{dl}{dR} = -F_t R = -\frac{r^2}{4R} L_{\odot} \quad \text{mit} \quad l = \frac{4\pi}{3} \rho r^3 \sqrt{GM_{\odot} R} \quad (c)$$

d.h. der Bahndrehimpuls des Teilchens ändert sich mit der Zeit wie

$$\frac{dl}{dt} = \frac{4\pi}{6} r^3 \rho v \frac{dR}{dt} \quad (d)$$

also mit (c) und (d)

$$\frac{dR}{dt} = -\frac{3L_{\odot}}{8\pi R \rho r c^2} \quad (e)$$

Um zu erfahren, wie groß die Lebensdauer eines Teilchens mit den Radius  $r$  und der Dichte  $\rho$  in der Entfernung  $R$  von der Sonne ist, braucht (e) nur integriert zu werden:

$$t = \frac{4\pi R \rho r c^2}{3L_{\odot}} \quad (f)$$

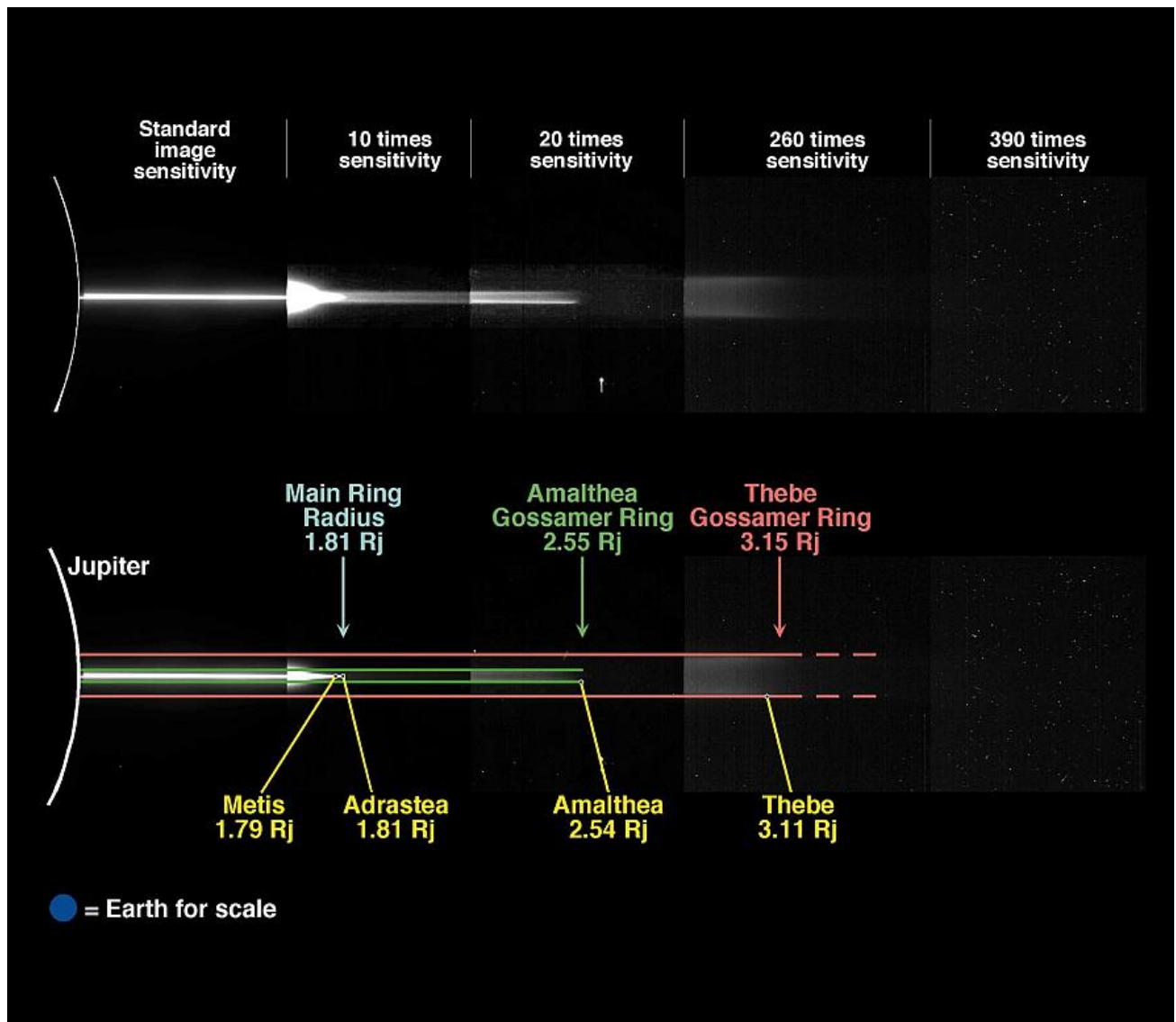
Auf einen sehr interessanten Sachverhalt soll an dieser Stelle noch hingewiesen werden: Die Lebensdauer des Teilchens im Gravitationsfeld der Sonne ist offensichtlich von dem Wert der Gravitationskonstante  $G$  völlig unabhängig. Eine Variation von  $G$  hätte demnach keinen Einfluß auf die Verweildauer des Teilchens auf seiner Bahn.

Die aus (f) folgende Lebensdauer ist verständlicherweise nur eine obere Schranke. Je mehr sich das Teilchen der Sonne nähert, um so größer wird die Wahrscheinlichkeit, daß es in noch kleinere Partikel zerfällt (die dann u.U. per Strahlungsdruck aus dem Sonnensystem geblasen werden) oder sogar völlig verdampft.

Die Schlußfolgerung daraus ist, daß der Staub in den Ringen kontinuierlich nachgeliefert werden muß, wenn sie über lange Zeiträume bestand haben sollen. Als Quellen kommen die mit den Ringen assoziierten Monde Metis,Adrastea, Amalthea und Thebe in Frage. Der Materieabtrag erfolgt dabei durch Sputterung, d.h. hochenergetische Teilchen aus den Strahlungsgürteln sowie Mikrometeorite erodieren die Oberflächengesteine dieser Körper wobei die dabei freigesetzten mikrometergroßen

Staubteilchen soviel kinetische Energie gewinnen, daß sie das Schwerefeld der Monde verlassen können. Dieser Staub wird unter dem Einfluß kurzwelliger Sonnenstrahlung elektrisch aufgeladen und unter Mitwirkung von Jupiters Magnet- und Gravitationsfeld in den Ringbereichen eingelagert und verteilt.

Die gegenwärtige Gesamtmasse des Jupiter-Ringsystems wird auf  $10^8$  bis  $10^{13}$  kg geschätzt.



Struktur des Jupiter-Ringsystems



### Ganymed



Würde Ganymed nicht um Jupiter kreisen, sondern wie Mars oder Erde um die Sonne, dann wäre er zweifellos als ein Planet klassifiziert worden. Mit einem Durchmesser von 5268 km ist er fast 400 km größer als Merkur. Vergleicht man aber die Dichte der beiden Körper (Merkur  $5430 \text{ kg/m}^3$ , Ganymed  $1940 \text{ kg/m}^3$ ), dann zeigen die Unterschiede, daß sich der innere Aufbau Ganymeds von Merkur radikal unterscheiden muß. Ganymed ist überwiegend ein Eiskörper mit einem metallischen Kern und einem silikatischen Mantel von der Größe des Mondes. Der Rest ist Wasser bzw. Wassereis. Das erklärt auch den relativ großen Albedo von 0.42.

Betrachtet man Gesamtaufnahmen von Ganymed, die von Voyager bzw. 20 Jahre später von Galileo aufgenommen wurden, dann fallen auf der bräunlichen Oberfläche zwei unterschiedliche Landschaftsformen auf. Einmal dunklere Gebiete wie die Galilei Regio auf der Seite des Mondes, die in Bewegungsrichtung zeigt (auch Ganymed führt eine gebundene Rotation aus), die aus der Entfernung etwas den lunaren Maren ähneln. Zum anderen etwas hellere, wo Impakte im Eis Krater mit einem hellen Auswurf gebildet haben. Beide Regionen unterscheiden sich signifikant in ihrer Kraterdichte. Das bedeutet konkret, daß sie unterschiedlich alt sein müssen. Aus Kraterzählungen hat man für die dunklen Gebiete ein Alter zwischen 3 und 3 ½ Milliarden Jahren abgeleitet. Danach hat sich dort nicht mehr viel getan. Die etwas helleren Bereiche sind offensichtlich jünger und zeigen eine verwirrende Zahl von morphologischen Merkmalen, die auf eistektonische Prozesse hindeuten. Zu nennen sind eine Vielzahl von langen parallelen Furchen, die im Plural als „Sulci“ bezeichnet werden. Ansonsten findet man dort nur noch relativ wenige Reste von alten Kratern. Auch scheinen die helleren Gebiete im Mittel 1 km höher zu liegen. Größere Erhebungen von mehr als 1000 – 2000 m gibt es so gut wie nicht, da Eis bekanntlich unter seinem eigenen Gewicht fließen kann.

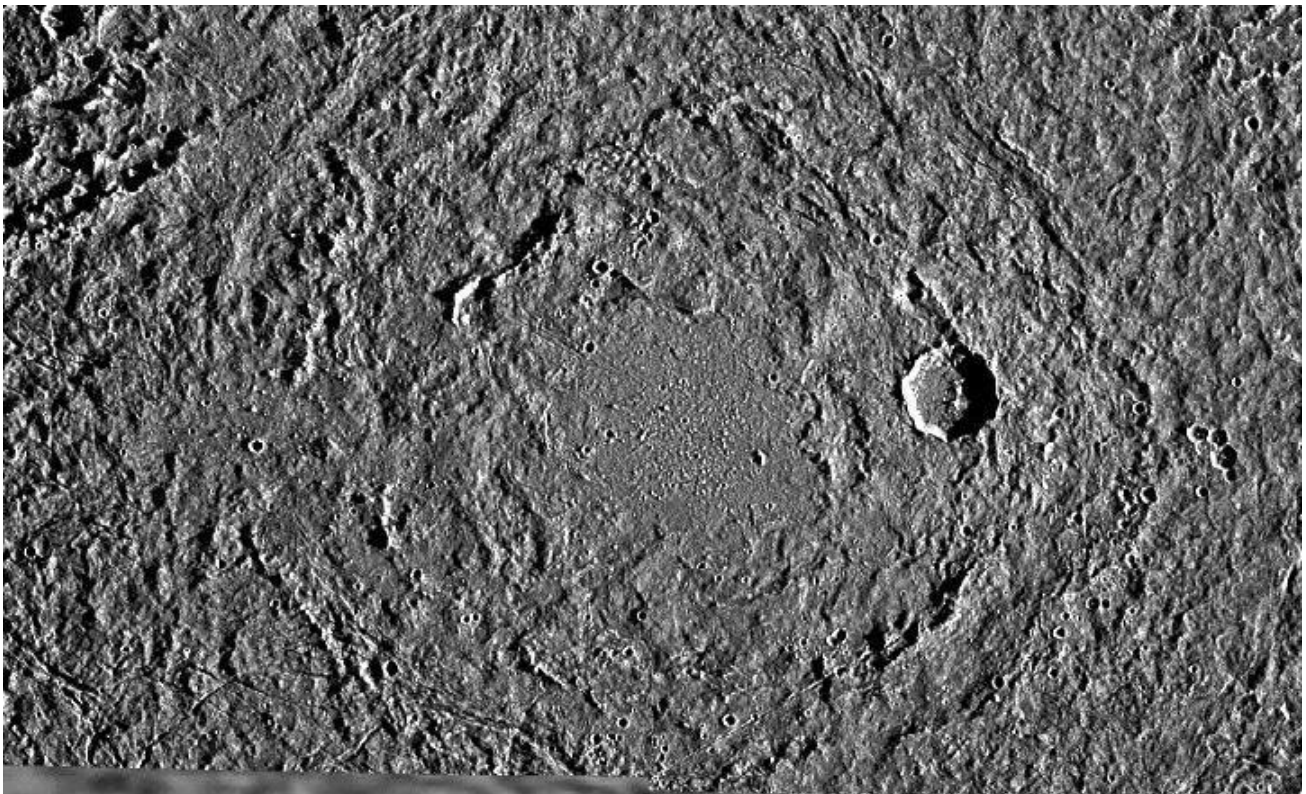
Während der Mond aus der Entfernung recht übersichtlich erscheint, offenbaren Nahaufnahmen des Galileo-Orbiters ein extrem komplexes Landschaftsbild.

Man findet bandartige Strukturen ähnlich denen Europas, nur daß sie, da sie viel älter sind, bedeutend mehr Impaktkrater aufweisen. Auch hier ist offensichtlich matschiges Eis in grabenartigen Bruchstrukturen aufgestiegen und hat beim Gefrieren die danebenliegenden Eiskrustenteile voneinander weggepreßt. Diese Vorgänge zeigen eine verblüffende Analogie zu dem „ocean floor spreading“ auf der Erde. Auch andere Oberflächenmerkmale sind starke Indizien dafür, daß es in der Tiefe von Ganymed einmal viskoses und somit mobiles Eis gab bzw. heute noch gibt, obwohl die eistektonischen Prozesse schon seit wenigstens 3 Milliarden Jahren abgeklungen sind.

Das ganze verwirrende System von Bändern, Rillen, Brüchen und Verdrehungen von Krustenteilen, das der Oberfläche Ganymeds sein eigentümliches Aussehen verleiht, hat etwas mit Dehnungsprozessen zu tun, denen der Mond in seiner Frühgeschichte wiederholt ausgesetzt war. Die Eiskruste expandierte und zerbrach, wobei an den größeren Bruchstellen ganze Krustenteile abgekippt und verdreht worden sind. In die Zwischenräume drang schließlich viskoses Eis, das die Risse ausfüllte, z.T. weiter verbreiterte und auf diese Weise die helleren Gebietsteile bildete.

Nach dieser Theorie sollten die dunklen Gebiete konservierte Bruchstücke der ehemaligen Kruste darstellen. Sie machen heute etwas mehr als 40% der Gesamtoberfläche aus und haben meist eine ovale (z.B. Galileo Regio) oder polygonartige Struktur (z.B. Marius Regio) mit bis zu 1000 km Durchmesser. Sie sind sowohl von Furchen als auch von einzelnen Depressionen durchsetzt. Man findet außerdem relativ große und nahezu kreisförmige Strukturen (z.T. mehrere 100 km Durchmesser), die man als Palimpseste bezeichnet. Dabei handelt es sich um die Überreste von großen Impakten. Sie entstehen, wenn Asteroiden auf einen Eiskörper aufschlagen und dabei zwangsläufig das Gebiet um den Einschlag aufheizen und aufschmelzen. Das dabei verflüssigte Material fließt in die Kratergrube zurück und ebnet sie ein. Beim Erstarren entsteht eine brüchige Oberflächenschicht, die entsprechend der Kratersymmetrie in konzentrische Ringe aufbricht. Man kann sie heute noch auf Ganymed sehen.

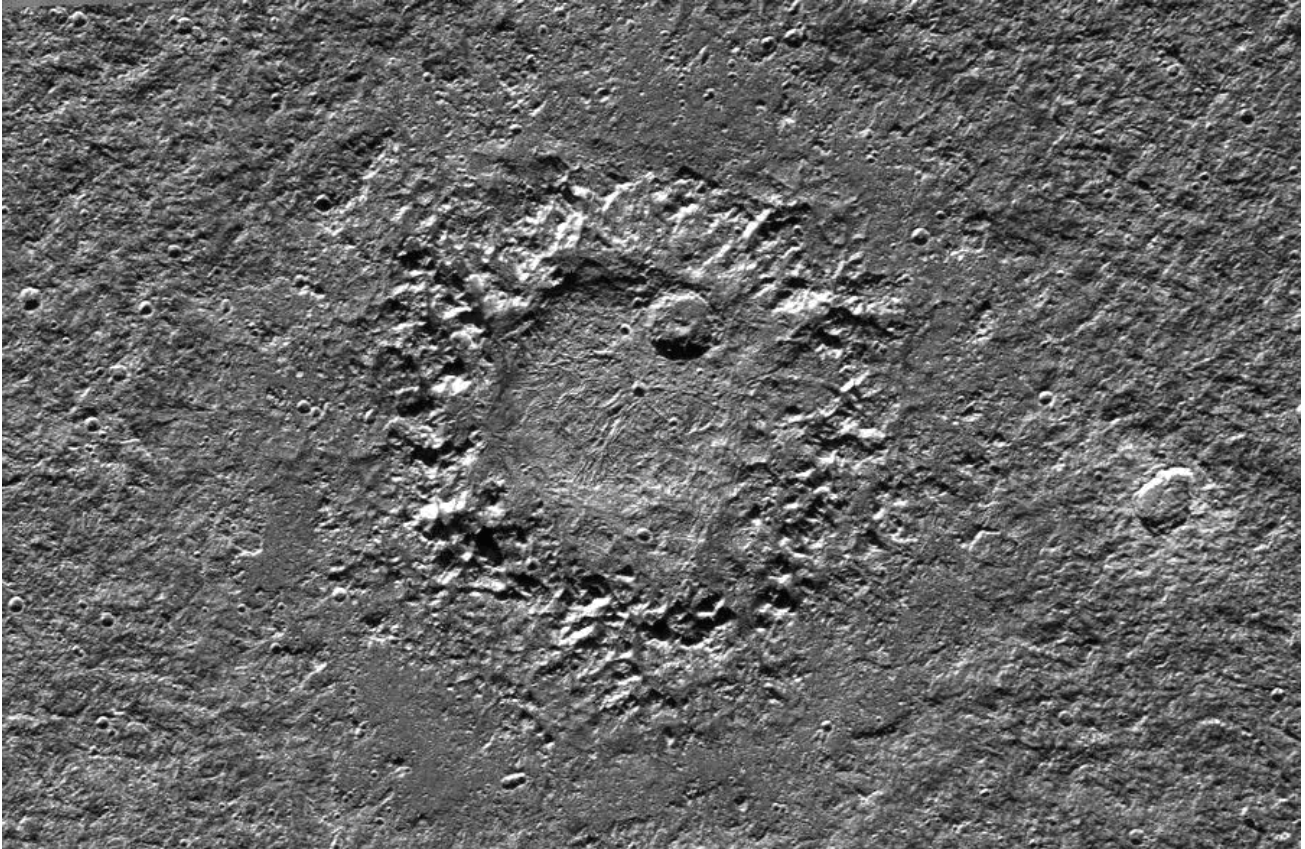
Eine Zwischenform zwischen den Palimpsest und den normalen Impaktkratern stellen die Penepalimpseste dar. Manchmal werden sie auch als „Domkrater“ bezeichnet. Ihr kennzeichnendes Merkmal ist die domartige Aufwölbung des Kraterbodens, welche den Zentralberg eines normalen komplexen Kraters ersetzt. Zwischen der zentralen Aufwölbung und dem kaum sichtbaren Kraterrand befindet sich ein nach innen geneigtes und stark zerklüftetes Gebiet. Ein typisches Beispiel für einen Penepalimpsest ist der Krater Neith. Er hat einen Durchmesser von ca. 160 km wobei die zentrale Aufwölbung ein kreisförmiges Gebiet von ca. 45 km Durchmesser überdeckt. An Neith kann man das Verhalten von weichen, leicht schmelzbaren Oberflächenmaterial unter dem Einfluß eines hochenergetischen Impakts im Detail studieren. Obwohl die physikalischen Grundprozesse die gleichen sind, unterscheiden sich die Krater, die nach einem Impakt auf einem Eisplaneten zurückbleiben, stark von denen auf Oberflächen aus silikatischen Material.



Buto Facula, ein typischer Palimpsest auf Ganymed (Marius Regio) auf einer hochauflösenden Galileo-Aufnahme. Die kleinsten Details sind knapp 400 m groß.

Ein weiteres für die Wissenschaftler überraschendes Ergebnis der Galilei-Mission ergab sich aus der Auswertung der Meßdaten des Plasmawellendetektors und des Magnetometers, die bei den Vorbeiflügen an Ganymed aufgenommen wurden: Ganymed besitzt ein eigenes – nicht durch Jupiter induziertes – Magnetfeld von ca. 750 nT (Äquatorwert). Da es sich dabei angenähert um ein reines Dipolfeld handelt, das lediglich um  $10^\circ$  gegen die Rotationsachse geneigt ist, muß man mutmaßen, daß es – analog zur Erde – durch einen Dynamoeffekt tief im Inneren erzeugt wird. Was diesen Dynamoeffekt antreibt, wird noch kontrovers diskutiert. Ein Modell geht von einem flüssigen, stark salzhaltigen Ozean unter der 200 km starken Eiskruste aus, der bei dem dort herrschenden großen Druck auch bei  $-50^\circ$  C noch nicht gefriert. Eine andere Möglichkeit besteht darin, daß die Quelle für den Dynamo in seinem Kernbereich liegt, der sich noch in einem geschmolzenen Zustand befindet.

Die Messungen des Schwerfeldes durch Galileo ergaben einen Wert für das planetare Trägheitsmoment von 0.3105, der auf eine weitgehende Differenzierung des Mondinneren schließen läßt. Danach befindet sich unter der mächtigen Eiskruste (bzw. dem hypothetischen Ozean aus flüssigen Wasser bzw. viskosen, mit Silikaten verunreinigten Eis) ein ca. erdmondgroßer silikatischer Körper mit einem zumindest teilweise aufgeschmolzenen Eisen- bzw. Eisensulfidkern. Oder anders ausgedrückt: Entfernt man die Eisschicht hat man (was den Schalenbau betrifft) den Jupitermond Io vor sich.. Die Dicke der Eisschicht wird auf ca. 170 Kilometer geschätzt. Das ist viel zu viel, als daß ein eventuell darunter verborgener Ozean heute noch irgendwelchen Einfluß auf die Oberflächenstrukturen nehmen könnte.



Domkrater ähnlich wie Neith (hier eine hochauflösende Aufnahme von Galileo) findet man auch auf Kallisto. Man schätzt sein Alter auf ca. 3.9 Milliarden Jahre.

Was den Namen „Ganymed“ betrifft, hat er natürlich etwas – wie nach den Erfahrungen mit Io und Europa auch nicht anders zu erwarten – mit Zeus, dem Göttervater (= Jupiter) zu tun. Nur war Ganymed keine wunderhübsche Frau, sondern ein lieblicher Knabe – genaugenommen der Sohn des troischen Königs Tros und der Nymphe Kallirhoe. Homer beschreibt ihn als „den schönsten Knaben unter allen sterblichen Menschen“. Und auf ihn hatte Zeus ein Auge geworfen. Flugs verwandelte er sich in einen Adler und trug ihn auf den Olymp. Dort wurde er als Mundschenk der Götter und als Geliebter des Zeus angestellt was heute zu der nicht nur für Altphilologen spannenden Frage führt, ob Zeus nicht etwa bisexuell gewesen ist...

## Band 7: Planetoiden und Kuiper-Belt-Objekte

### Einschläge von NEO`s auf der Erde (*near earth objects* = NEO)

Der Einschlag von kosmischen Körpern auf die Erdoberfläche ist astronomisch gesehen ein gewöhnliches Phänomen welches - in geologischen Zeitskalen gemessen - relativ häufig und - in menschlichen Zeitmaßen gemessen - (glücklicherweise) nur sehr selten auftritt. Das letzte größere Ereignis fand am 30. Juni 1908 in einem abgelegenen und schwer zugänglichen Gebiet Sibiriens, im Gebiet des Flusses „Steinige Tunguska“ statt. Obwohl die Energie, die bei diesem Impakt freigesetzt wurde, das rund 1000-fache der Hiroshimabombe (eigentlich kein schöner Vergleichsmaßstab) betrug (ca. 10 bis 15 Mt TNT), hat man Anfangs von diesem Ereignis kaum Notiz genommen (es soll dabei lediglich zwei menschliche Opfer gegeben haben). Erst Jahrzehnte später sind Expeditionen in das Katastrophengebiet unternommen worden, die aber meist mehr Fragen aufwarfen als sie beantworten konnten (man hat z.B. keinen Meteoritenkrater gefunden). Heute nimmt man an, daß ein großer Steinmeteorit in den dichteren Atmosphärenschichten vollständig zerplatzt und explosionsartig in eine riesige Anzahl kleiner und kleinster Steinfragmente zerfallen ist (V.V.SVETSOV, 1996) - einem Vorgang, den man als „vollständige Ablation“ bezeichnet.

Das Impakte aber auch durchaus globale, also erdumfassende Katastrophen (insbesondere für das Leben auf der Erde), hervorrufen können, zeigen eine Anzahl von Faunenschnitten in der Erdgeschichte die zweifelsfrei mit einem derartigen kosmischen Ereignis zusammenhängen. erinnert sei wieder an das tragische Ende der armen Dinosaurier vor ca. 65 Millionen Jahren...

Um trotz der diffusen Gefahr einer „kosmischen Bombe“ ruhig schlafen zu können ist es nützlich, Abschätzungen über die Einschlagwahrscheinlichkeiten verschieden großer und verschieden aufgebauter kosmischer Körper anzustellen. Um dabei zu realistischen Vorhersagen zu kommen, benötigt man eine möglichst zuverlässige Datenbasis. Diese kann man erhalten aus

- einer möglichst lückenlosen Überwachung des erdnahen Raums in bezug auf Kleinkörper (Planetoide, Meteoroiden, Kometen) mit dem Ziel realistische Angaben über Häufigkeiten, Bahnlagen und Größenverteilungen zu erhalten.
- Untersuchung von irdischen Impakten und Impaktstrukturen in bezug auf Größe des Impaktors und Alter der Strukturen.
- Ableitung der Impakthäufigkeiten für verschieden große Körper als Funktion der Zeit über die Kraterstatistik von Mond, Erde und Planetoiden (z.B. (433) Eros)
- Ableitung von Tsunami-Häufigkeiten in der Vergangenheit mittels geologischer Indikatoren an ausgewählten Küstenbereichen und Versuch der Abgrenzung von impaktinduzierter Tsunamis von denen, die durch seismische oder vulkanische Ereignisse hervorgerufen werden.
- Theoretischen Untersuchungen über die Dynamik der Population erdnahe Planetoiden und Kometen.

Ob ein Zusammenstoß mit einem NEO zur Katastrophe wird, hängt neben der Eintrittsgeschwindigkeit in erster Linie von der Größe (und damit Masse) und in zweiter Linie von seiner Beschaffenheit (z.B. ob Eis – oder Eisenklumpen) ab. Da die Anzahl potentiell gefährlicher Körper mit der Größe abnimmt, sind wirklich katastrophale Ereignisse entsprechend seltener. Eine grobe Abschätzung ergibt als Richtwert etwa folgende Zeitskalen:

Durchmesser	Ein Einschlag aller	Beispiel
100 m	250 a	Tunguska
1.5 km	500 000 a	Nördlinger Ries
10 km	100 000 000 a	Saurierkiller

Die mittleren Impaktintervalle lassen allerdings keine Rückschlüsse auf den nächsten Einschlag zu. Es ist aber davon auszugehen, daß die weltweit laufenden NEO-Überwachungsprogramme in nächster Zeit wohl die meisten der Erde gefährlich werdenden Objekte > 1 km erfassen werden. Wenn Sie bekannt sind, kann man durch „*follow-up observations*“ ihre Bahndaten laufend überwachen. Damit ist man in der Lage, Zusammenstöße mit der Erde mit einer entsprechenden Vorlaufzeit vorherzusagen. Das bedeutet aber noch lange nicht, daß man etwas Ernsthaftes zur Abwehr einer Katastrophe a la „Armageddon“ tun kann. Die Möglichkeiten, einen kilometergroßen Gesteinsbrocken, der sich auf die Erde zu bewegt, auf irgendeine Art und Weise von seiner Bahn abzubringen, ist eher als außergewöhnlich schwierig einzustufen und überhaupt nur bei einer entsprechend großen Vorwarnzeit (mehrere Jahre bis Jahrzehnte) realistisch in Angriff zu nehmen.

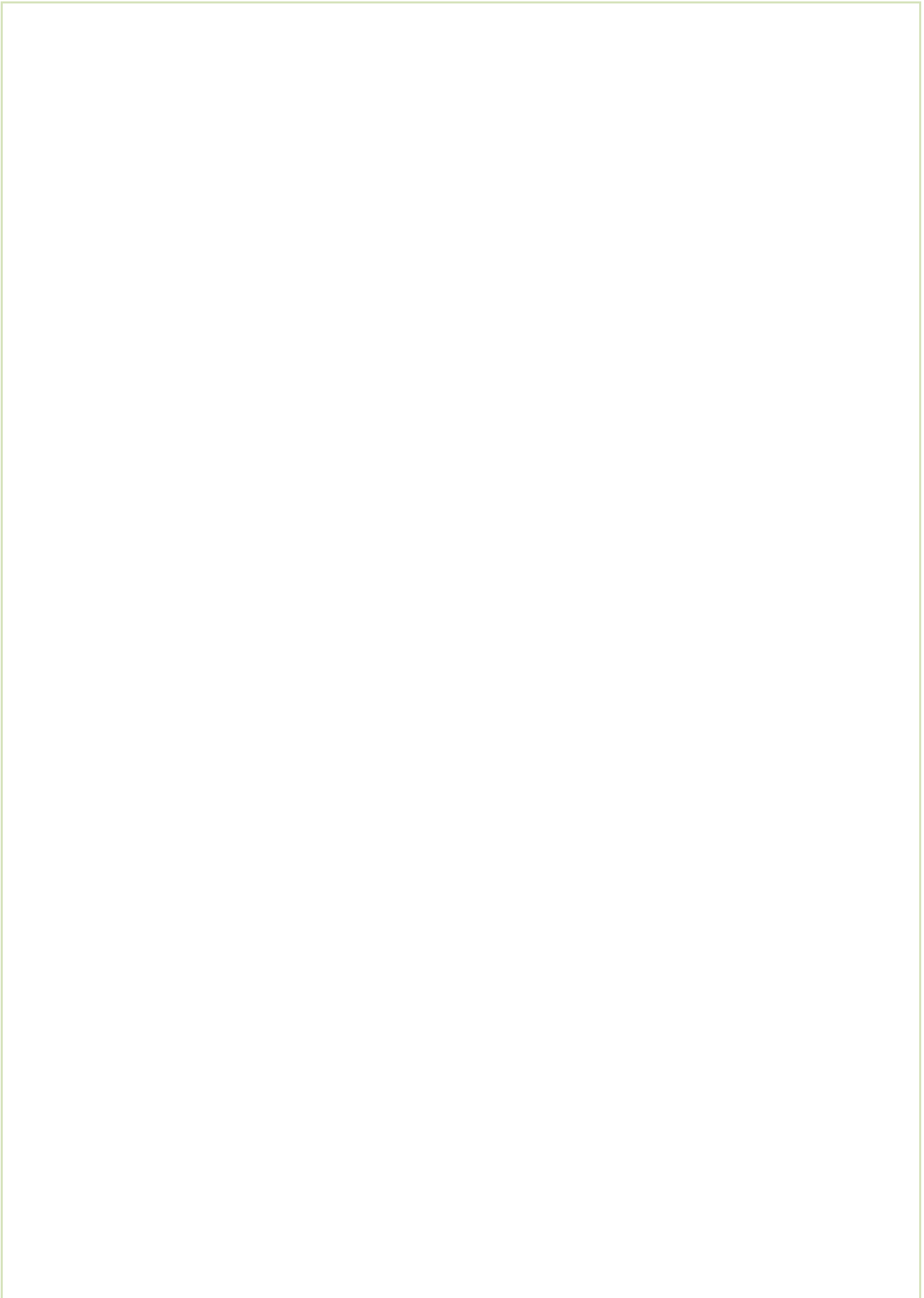
Nach den heute möglichen Technologien sind nur folgende Abwehrszenarien denkbar:

1. Objekt zerstören – sehr riskant, da u.U. viele gefährliche Bruchstücke entstehen
  - realistisch nur für kleine NEO`s (<100 m), damit die Bruchstücke in der Erdatmosphäre weitgehend verglühen können
  - Nukleare Sprengkörper notwendig
2. Bahnänderung – bei genügender Vorwarnzeit optimalste Möglichkeit
  - Abwehrsystem muß beim Zielobjekt einmalig oder kontinuierlich eine nach Betrag und Richtung abgestimmte Impulsänderung bewirken
  - Nuklearsprengkopf wird in unmittelbarer Nähe des NEO`s gezündet ohne ihn zu zerstören (abdampfendes Material bewirkt Rückstoß)
  - Dem NEO wird ein chemischer „Raketenantrieb“ verpaßt – unrealistisch wegen Treibstoffproblem
  - Ein oder mehrere „Impaktoren“ werden auf den NEO gelenkt und deren Impuls auf das Zielobjekt übertragen - bei entsprechend langer Anlaufzeit und mehreren Versuchen durchaus effektiv. Problem: Impulsübertragung bei lockeren Kometenkernen und „fliegenden Geröllhaufen“ zu uneffektiv und Gefahr des Auseinanderbrechens des NEO`s

- Ausnutzung des Strahlungsdrucks der Sonnen über Sonnensegel – bei langen Vorwarnzeiten (einige Jahre bis Jahrzehnte) sehr effektiv. Die technologischen Probleme scheinen mit der heute zur Verfügung stehenden Technologie beherrschbar zu sein.

Auch wenn die Wahrscheinlichkeit gering ist, daß in absehbarer Zeit die Erde eine größere Impaktkatastrophe heimsucht, ist es trotzdem wichtig, rechtzeitig ausreichende Vorsorgemaßnahmen zu treffen. Eine hochentwickelte Zivilisation ist aufgrund ihrer inneren Abhängigkeiten und Beziehungsgefüge bei solch einer Katastrophe als Gesamtheit viel mehr gefährdet als unsere Vorfahren zur Zeit der Sintflut (die, wie einzelne Wissenschaftler annehmen, auch einem Impaktereignis geschuldet sein soll).

*Katastrophennumerologie ...*



## Band 8: Kometen

### Kometengruppen

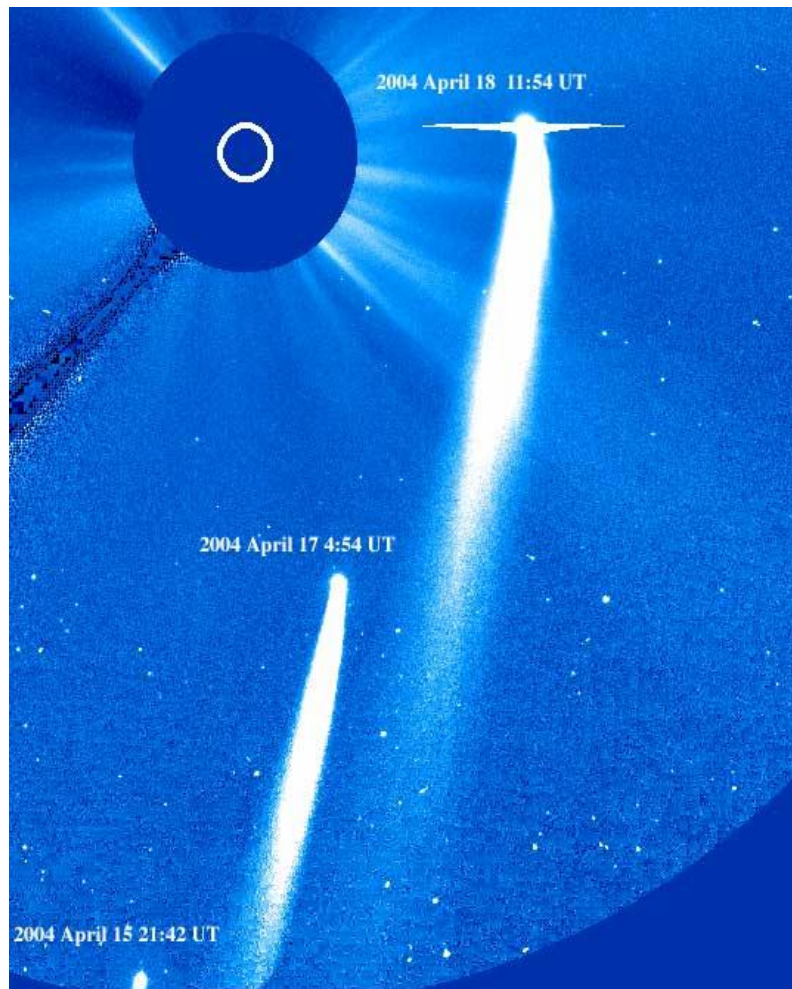
Es gibt Kometen, die der Sonne sehr nahe kommen („*Sungrazer*“) oder sie sogar „streifen“ („*Sunstrikers*“), was zu ihrer völligen Zerstörung führt. Einige besonders eindrucksvolle Kometen der Vergangenheit (z.B. der berühmte „Septemberkomet“ von 1882) waren solche „*Sungrazer*“. In der Regel handelt es sich dabei aber um Kometen, die sich von der Erde aus aufgrund ihrer Sonnennähe nur schwer entdecken und beobachten lassen, obwohl sie teilweise recht hell werden ( $> 4^m$ ).

Seitdem die Sonden SOHO („*Solar and Heliospheric Observatory*“, Start Dez. 1995) kontinuierlich den Raumbereich um die Sonne mit Hilfe eines Koronographen (LASCO) überwacht und die Aufnahmen für jeden Interessenten zugänglich ins Internet stellt, hat die Anzahl der in unmittelbarer Sonnennähe entdeckten Kometen rasant zugenommen. Ihre Zahl hat die 1000-Marke mittlerweile (2005) deutlich überschritten.

Die Bahnen von Kometen, die der Sonne recht nahe kommen, wurden ab 1888 von dem deutschen Astronomen HEINRICH KREUTZ (1854-1907) näher untersucht. Er entdeckte, daß es eine ganze Reihe von „Sungrazern“ gibt, welche ungefähr die gleichen Bahnelemente haben, aber eindeutig unterschiedliche Objekte sind. Zu erwähnen sind z.B. die „Großen Kometen“ von 1843 und von 1882, die nahezu die gleichen Bahnelemente besaßen, aber trotzdem eindeutig unterschiedliche Objekte waren. Auch der spektakuläre Komet von 1965 – Ikeya-Seki – ähnelt in dieser Beziehung den beiden genannten Kometen. Heute werden diese Kometen der sogenannten „Kreutz-Gruppe“ zugeordnet, deren Mitglieder bei genauer Betrachtung zwei Subfamilien bilden. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen in der Lage der Knotenlinie ihrer Bahnen, während die anderen Bahnparameter ziemlich identisch sind. Die Kreuzgruppe I und II umfaßt auch die meisten mit SOHO entdeckten Kometen. Bei ihnen handelt es sich größtenteils um sehr kleine Objekte, deren Kerndurchmesser in der Größenordnung von höchstens einigen 10 m liegen. Wenn sie in unmittelbare Sonnennähe gelangen, verdampfen sie sehr schnell, wodurch sie für SOHO's Instrumente kurzzeitig sichtbar werden.

Schon kurz nach der Entdeckung dieser Kometengruppe wurde die Vermutung geäußert, daß es sich dabei um die entlang der gesamten Bahnellipse verteilten Trümmer eines ehemals recht großen „Mutterkometen“ handelt, der bei früheren Periheldurchgängen nach und nach zerplatzt ist. Entsprechende Bahnrechnungen unter der Berücksichtigung der Störungen der großen Planeten wurden durchgeführt, wobei deren Ergebnisse diese Hypothese erhärteten. Heute, wo Dank SOHO eine bessere statistische Ausgangsbasis vorliegt, erscheinen die Verhältnisse etwas komplizierter. Danach verteilen sich die Kometen in einzelne Schwärme oder bewegen sich auf nahezu parallelen Bahnen. Da sie in dieser Form kaum einen Periheldurchgang überstehen würden ist es auch unwahrscheinlich, daß sie während eines früheren Durchgangs entstanden sind. ZDENEK SEKANINA (2002) nimmt deshalb an, daß der Zerfallsprozeß eines Kometen nicht nur in Sonnennähe, sondern überall auf seiner Bahn stattfinden kann. Diese These wird durch eine Analyse der Abstände der Kometen gestützt. Die Kreutz-Gruppe ist seiner Meinung nach das Ergebnis des Zerfalls eines

ungefähr 120 km großen Ausgangskörpers, der sich in ca. 200000 Bruchstücken zerlegt hat. Ihre Bahnen sind gewissermaßen Einbahnstraßen, da sie quasi im Bereich der Sonnenkorona enden wo die Kometenkerne schließlich verdampfen.



Diese Aufnahme mit dem SOHO-LASCO –Koronographen zeigt drei überlagerte Aufnahmen des Kometen Bradfield (C/2004 F4) in Sonnennähe. Der innere Kreis stellt die scheinbare Größe der Sonnenscheibe dar.

Während bis 1990 nur „Sungrazer“ der Kreutz-Gruppe bekannt waren, sind mittlerweile weitere Gruppen (z.T. von Amateurastronomen) entdeckt worden. Die folgende Tabelle gibt den Stand von Mitte 2007 wieder:

Gruppe	Anzahl
Kreutz	1084
Meyer	77
Marsden	30
Kracht	32

+ eventuell 3 weitere, noch nicht gesicherte Gruppen.

## Band 9: Meteoroiden, Meteorite und Meteorströme

### Meteorströme

Wenn um den 12./13. August der Meteorstrom der Perseiden aktiv wird, kann es sogar vorkommen, daß man in den Abendnachrichten (zumindest beim „Wetter“) darauf hingewiesen wird. Wenn der Himmel klar und nicht gerade Vollmond ist, sollte man sich diese Gelegenheit auch nicht entgehen lassen und mal (vielleicht ganz in Familie) ein Stündchen „Sternschnuppenzählen“ einlegen. Selbst für einen Profiastronomen ist das eine erholsame Tätigkeit, da er ja heutzutage die meiste Arbeitszeit vor dem Computer und vor dem Schreibtisch verbringt und kaum mehr die Gelegenheit hat, den „originalen“ Sternenhimmel einmal in Ruhe zu betrachten...

Daß auffällige Häufungen im Auftreten von Sternschnuppen sich an bestimmten Tagen jährlich wiederholen, ist schon lange bekannt. So gibt es z.B. für das Jahr 36 n.Chr. Aufzeichnungen chinesischer „Astronomen“ von einem Sternschnuppenfall, den man heute eindeutig den Perseiden (ihr Radiant liegt im Sternbild Perseus) zuordnen kann. Genau 222 Jahre später (also im Jahre 258) trat ein weiteres Ereignis ein, das mittelbar (aber nicht kausal) etwas mit den Perseiden zu tun hat. Und zwar kam in den Augusttagen jenes Jahres der HEILIGE LAURENTIUS zu Tode. Seitdem – so sagt man – weint der Himmel „Laurentiustränen“. Und das nicht ohne Grund, denn dem heiligen Laurentius hatte der damalige römische Kaiser mit dem Namen „Valerian“ übel mitgespielt, und zwar wegen einer Geldangelegenheit. Der Papst SIXTUS II (195-262) vertraute aus irgendwelchen Gründen seinem Erzdiakon Laurentius (der zu diesem Zeitpunkt noch nicht „heilig“ war) den Kirchenschatz an und VALERIAN (195-262) brauchte auch gerade Geld. Als der Kaiser davon erfuhr, forderte er Laurentius auf, den Schatz gefälligst herauszurücken. Der aber verteilte ihn an die Armen, was ihm zwar letztlich große Sympathien bei der Nachwelt einbrachte, den Kaiser aber so erzürnte, daß er ihn auf einem großen Rost grillen lies (wie wir heute sagen würden). Daher kommt also der Name „Laurentiustränen“ für die Meteore des Perseidenstroms – und man hat etwas Interessantes zu erzählen, sobald eine Sternschnuppe über den Himmel huscht...

Meteorströme kann man nicht nur im August beobachten. Sie gehören vielmehr zu den durchaus gewöhnlichen Erscheinungen, die über das gesamte Jahr verteilt auftreten. Die meisten von ihnen fallen jedoch kaum auf, da sie sich vom Hintergrund der sporadischen Meteore – zumindest für den Laien – kaum abheben. Gekennzeichnet sind sie durch eine sogenannte Aktivitätsperiode, die von wenigen Stunden bis zu mehreren Wochen reichen kann, durch einen mehr oder weniger ausgeprägten Radianten und durch eine Rate, welche die ungefähre Anzahl pro Stunde und Helligkeitsintervall angibt. In seltenen Fällen kann es zu sogenannten „Meteorstürmen“ kommen, wo innerhalb weniger Stunden mehrere Tausend Sternschnuppen wie ein Feuerwerk am Himmel sichtbar werden.

Die Meteore der einzelnen Meteorströme unterscheiden sich oftmals auch noch in ihrem physischen Erscheinungsbild und zwar je nach dem, mit welcher Geschwindigkeit sie in die Erdatmosphäre eintreten, aus welchem Material die Meteoroiden bestehen und wie die verschiedenen großen Teilchen in der Partikelwolke verteilt sind.

Neben den Perseiden gehören noch die Quadrantiden, die Geminiden und die Leoniden zu den Strömen, die zumindest jeden Amateurastronomen geläufig sind.

Meteorströme entstehen, wenn die Erde bei ihrer Bewegung um die Sonne die Bahn mehr oder weniger ausgedehnter Partikelwolken kreuzt, die wiederum mit Kometenbahnen assoziiert sind. Diese Partikelwolken sind der sichtbare Ausdruck für die Auflösung periodischer Kometen, die besonders in Sonnennähe forciert wird. Die Staubteilchen verteilen sich entlang der Kometenbahn und dissipieren im Laufe der Zeit über die gesamte Bahnellipse. Gerät die Erde in diesen Bereich, dann beobachtet man einen Meteorstrom. Liegt der Radiant nahe an der Ekliptik, dann kann die Erde im Laufe eines Jahres die Meteorbahn an zwei verschiedenen Punkten kreuzen. Derartige Ströme werden als Ekliptikalströme bezeichnet.



Berühmte Zeichnung des „Sternschnuppenvorhangs“ der Leoniden im Jahre 1833 in Australien

...

## Band 10: Kosmogonie des Sonnensystems

### Koagulationsphase

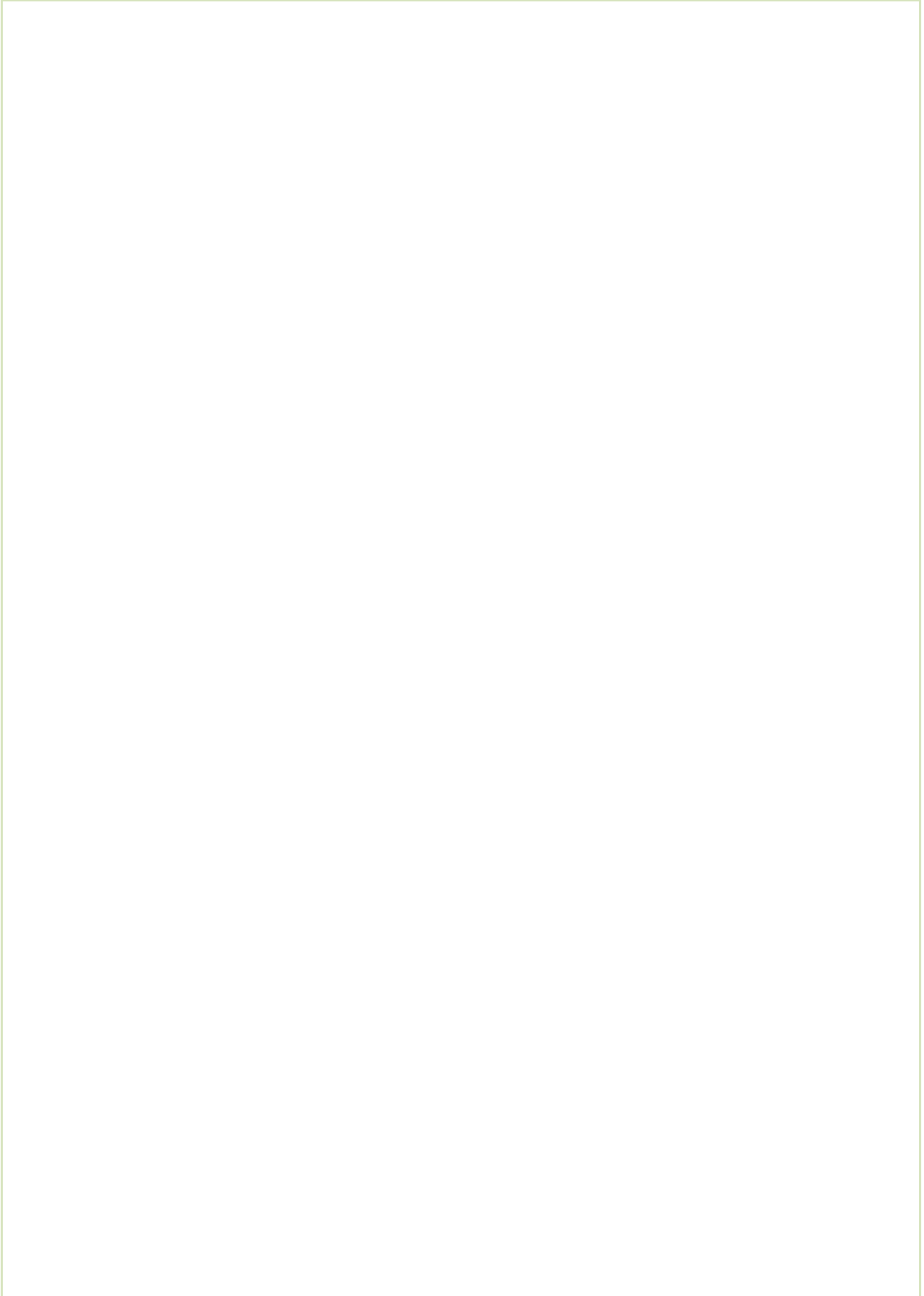
Wie neuere Beobachtungen an zirkumstellaren Scheiben ergeben haben, bildet das um den Protostern rotierende Gas einer in Bezug auf die Scheibenebene geschichtete Struktur mit einer in beide vertikale Richtungen abnehmenden Dichte. Das Dichteprofil entspricht dabei einer weitgehend hydrostatischen Schichtung. Für die Staubteilchen bedeutet das, daß sie innerhalb der rotierenden Scheibe einer Absetzbewegung in Richtung der Scheibenebene ausgesetzt sind, wobei die schwereren Partikel schneller sedimentieren als die Kleineren und Leichtereren. Dabei tritt ein Effekt auf, der aus der Meteorologie her gut bekannt ist und als Koagulation bezeichnet wird. Aufgrund der höheren Sinkgeschwindigkeit größerer Wassertropfen in einer Regenwolke kommt es immer wieder mit kleineren und deshalb langsamer absinkenden Tröpfchen zu Kollisionen und anschließender Verschmelzung. Auf diese Weise vergrößern sich die Tropfen während des Falls durch die Wolke. In einer rotierenden und näherungsweise hydrostatisch geschichteten Staubscheibe kommt es zu einem ähnlichen Prozeß. Bei ihrer Absetzbewegung sammeln größere Staubpartikel kleinere (bis hin zu Molekülen) auf, indem diese auf Grund der schwachen van-der-Waals-Kräfte aneinander haften bleiben und lockere fraktalähnliche Agglomerate bilden. Da auch in radialer Richtung ein Druckgradient besteht, rotiert das Gas ein klein wenig langsamer, als es der Keplergeschwindigkeit in der jeweiligen Entfernung entsprechen würde. Kleine Staubteilchen werden dabei vollständig mit dem Gas mitgeführt. Da sie sich dabei zwangsläufig auch langsamer bewegen, als nach Kepler „erlaubt“ ist, spüren sie eine Kraftkomponente, die sie in radialer Richtung nach innen spiralen lassen. Auch hier holen größere Teilchen die Kleineren ein und können dabei Agglomerate bilden.

Ein wichtiger Mechanismus zur Bildung von Agglomeraten ist noch zu erwähnen. In das Scheibengas eingebettete Staubteilchen unterliegen der bekannten Brown'schen Bewegung. Das führt dazu, daß manchmal Staubpartikel mit Relativgeschwindigkeiten von mehreren mm/s aneinanderstoßen, wobei sie dabei häufig „zusammenkleben“. Auf diese Weise können unter den Bedingungen des Sonnennebels sehr schnell Staubagglomerate mit Größen um die 100  $\mu\text{m}$  entstehen.

Den Vorgang der Koagulation bzw. (s.u.) Agglomeration versucht man heute unter möglichst realistischen Bedingungen im Labor nachzuvollziehen. Es geht dabei um die Bestimmung von wichtigen Wachstumsparametern von Staubpartikeln wie Stoßquerschnitt  $\sigma$ , die Stoßgeschwindigkeit  $v_{\text{stoß}}$  und die Haftwahrscheinlichkeit  $w$ . Diese Parameter hängen auf komplexe Weise voneinander ab. Es ist sowohl theoretisch als auch experimentell sehr schwierig, realistische Parameterkonfigurationen bei gegebenen Umgebungsbedingungen (Temperatur, Gasdruck, turbulente Strömungen) zu bestimmen, bei denen eine effektive Koagulation auftritt.

Der nächste Schritt beinhaltet die Frage, wie die Koagulate, deren Größe im Submillimeterbereich liegen, zu dem eigentlichen Ausgangsmaterial der Planeten, der „Planetesimale“ zusammenwachsen. Das geschieht während der Agglomerationsphase.

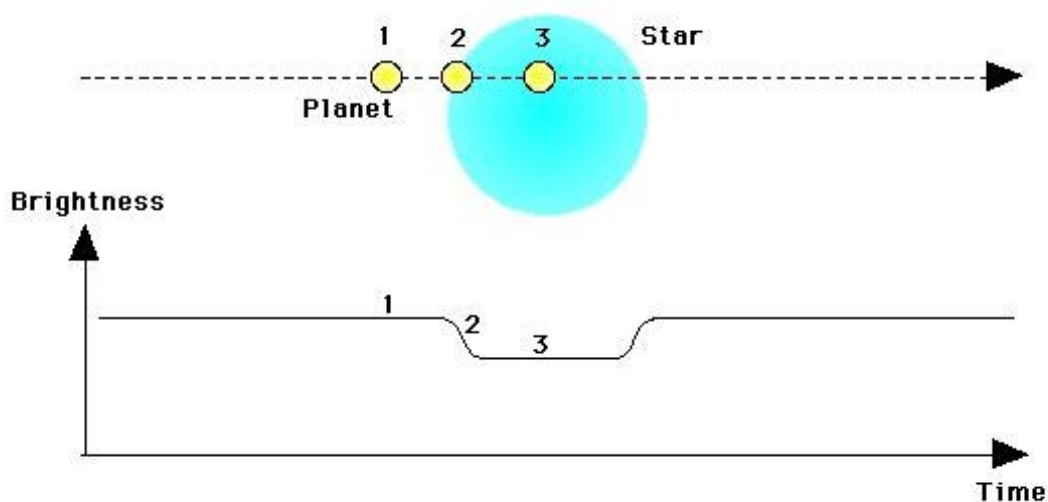
...



## Band 11: Extrasolare Planetensysteme

### Transit-Methode

Unter einen Transit versteht man den Vorübergang eines Planeten vor dem Zentralstern. Da Planeten gewöhnlich selbst nicht leuchten, führt das zu einem kurzzeitigen Intensitätsabfall, der sich unter günstigen Bedingungen mit photometrischen Methoden nachweisen läßt. Die Lichtkurve, die dabei entsteht, entspricht im Prinzip der, wie man sie auch von Bedeckungsveränderlichen kennt, nur das primär das dabei oftmals zu beobachtende Sekundärminimum fehlt. Auch der Intensitätseinbruch während eines Transits ist extrem gering und beträgt nur einige Promille bis einige Prozent der Gesamthelligkeit des Sterns. Wie groß solch ein Intensitätsabfall ist, soll wieder am Beispiel von Jupiter abgeschätzt werden. Angenommen, man beobachtet einen Jupitertransit vor der Sonnenscheibe aus einer Entfernung von 10 pc. Um wieviel Prozent wird die Helligkeit der Sonne dabei verringert?



Grundprinzip der Transit-Methode zum Nachweis extrasolarer Planeten

Der Intensitätseinbruch  $\Delta I$  zur Gesamtintensität  $I$  verhält sich offensichtlich wie die Querschnittsfläche  $A_{pl}$  des Planeten zur Querschnittsfläche  $A_s$  des Zentralsterns, also

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{A_{pl}}{A_s} \quad [1.6]$$

Wie lange dieser Intensitätseinbruch anhält, hängt vom Durchmesser  $d_s$  des Zentralsterns und von der Bahngeschwindigkeit  $v_{pl}$  des Planeten ab. Unter der Annahme, daß die Bahnebene in Blickrichtung genau durch das Zentrum des Zentralsterns verläuft ( $i=90^\circ$ ), beträgt die maximale Transitzeit

$$t_T = \frac{d_s}{v_{pl}} \quad [1.7]$$

Um daraus die Bahndaten des Exoplaneten einigermaßen verlässlich abzuleiten ist es erforderlich, möglichst eine größere Zahl von Transits zu verfolgen. Im Fall von Jupiter beträgt  $\Delta I/I \approx 10^{-2}$  (1%) und die Transitzeit ca. 30 Stunden. Solch eine „partielle“ Verfinsterung sollte bei anderen sonnenähnlichen Sternen unserer Milchstraße mit modernen photometrischen Methoden durchaus nachweisbar sein.

Der erste Stern, bei dem in der Lichtkurve eine „Delle“ nachgewiesen werden konnte, war HD 209458 (D.CHARBONNEAU et.al. 1999). Das war kein Zufall, da bereits vorher aufgrund von Radialgeschwindigkeitsmessungen bekannt war, daß er einen engen planetaren Begleiter von ungefähr Jupitergröße besitzen muß. Dadurch, daß mittlerweile mehrere Transit-Ereignisse beobachtet wurden, konnte eine Bahn, die mit den gemessenen Radialgeschwindigkeiten verträglich ist, bestimmt werden. Unter der Annahme, daß der Zentralstern ca. 30% größer ist und rund 10% mehr Masse besitzt als unsere Sonne, lassen sich für den Planeten (er erhielt den Namen HD 209458 B „Osiris“) einige Daten ableiten:

**a) Zentralstern:**

Entfernung von der Sonne:	153.55 Lichtjahre
Spektraltyp:	F8 V
Scheinbare Helligkeit:	7.65 m
Masse:	1.1 Sonnenmassen
Radius:	1.2 Sonnenradien
Sternbild:	Pegasus

**b) Planet („Osiris“)**

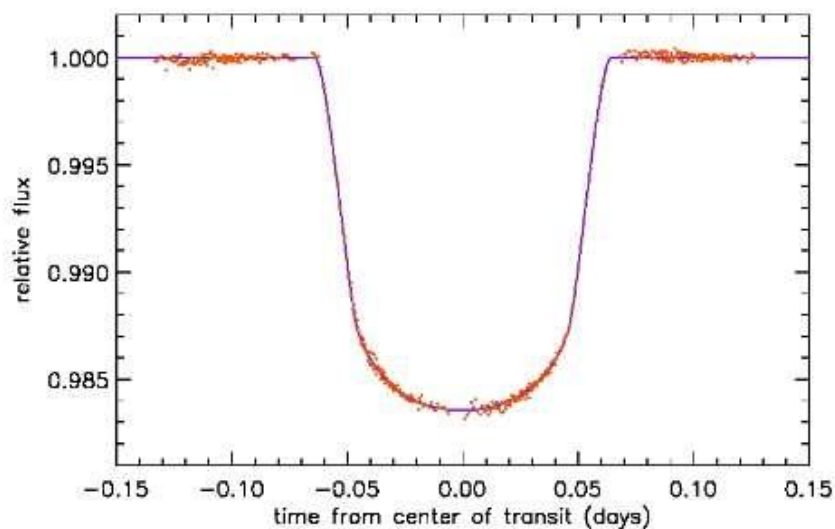
Typ:	jupiterartiger Gasplanet
Masse:	0.69 Jupitermassen
Radius:	1.32 Jupiterradien
Mittlere Entfernung vom Zentralstern:	0.045 AE
Umlaufszeit:	3.525 Tage

Da durch einen beobachteten Transit für die Größe  $\sin(i) \approx 1$  folgt, läßt sich im Zusammenspiel mit Radialgeschwindigkeitsmessungen die Planetenmasse relativ genau bestimmen. Deshalb stellt die Suche nach Transit-Phänomenen bei geeigneten Sternen, bei denen man bereits weiß, daß Sie ein eigenes Planetensystem besitzen, eine gute Ergänzung zu den Radialgeschwindigkeitsmessungen dar. Die Wahrscheinlichkeit, daß man dabei aber auch fündig wird, ist relativ gering. Sie läßt sich allgemein wie folgt abschätzen: Die Beobachtungswahrscheinlichkeit eines Transits entspricht offensichtlich dem Verhältnis des Raumwinkels  $\Omega_{Tran}$ , unter dem der Transit sichtbar ist, zum gesamten Raumwinkel  $\Omega_G$ . Damit ergibt sich für die Transitwahrscheinlichkeit p:

$$p = \frac{\Omega_{Tran}}{\Omega_G} = \frac{d_s}{2a} \quad [1.8]$$

wobei a die große Halbachse der Bahn des Planeten ist.

Als sehr hoffnungsvoll kann die Beziehung (1.8) wahrlich nicht bezeichnet werden. Rechnet man  $p$  für das obige Jupiter-Beispiel aus, dann erhält man einen Wert von ungefähr  $1/1000$ . Die Wahrscheinlichkeit nimmt aber zu, je näher sich ein Planet am Zentralstern befindet. Da es genügend viele Sterne gibt, besteht eine erfolgversprechende Strategie zur Entdeckung von Exoplaneten darin, möglichst viele Tausende von Sternen photometrisch zu überwachen. Die Genauigkeit, die dabei mit erdgebundenen Teleskopen erreicht wird, ist für die Entdeckung von Objekten der Jupiter-Klasse ausreichend. Das man dazu nicht einmal besonders große Fernrohre benötigt, zeigt das Projekt BEST („*Berlin Exoplanet Search Telescope*“) des Instituts für Weltraumsensorik und Planetenerkundung der DLR. Dort benutzt man ein handelsübliches 8-Zoll Schmidt-Cassegrain-Teleskop (wie es viele Amateurastronomen verwenden) mit einer angeschlossenen CCD-Kamera als Überwachungsinstrument.



Lichtkurve eines Transits des Planeten „Osiris“ im HD 209458 -System, beobachtet mit dem Hubble Space Telescope

Mit weltraumgestützten, für die Entdeckung und Verfolgung von Transits ausgelegten Teleskopen wird man die Genauigkeit sogar soweit steigern können, daß Planeten von der Größe unserer Erde in ihre Reichweite gelangen. Als Stichworte sollen nur die Projekte COROT („*Convection, Rotation and planetary Transits*“, Frankreich, im Orbit), und KEPLER (ESO, Start 2007) genannt werden, mit denen man in nächster Zukunft einige 100000 Sterne nach Planeten absuchen möchte.

Bis zum 31. Mai 2007 sind 21 Planeten bekannt geworden, die sich durch einen Transit bemerkbar machen.



## Band 12: Die Sonne als Stern

### Die Sonne als Stern

Unsere Sonne ist ein mehr oder weniger typischer Hauptreihenstern, wie man ihn in unserem Milchstraßensystem allenthalben finden kann. Auch ihr Alter von  $4.6 \cdot 10^9$  Jahre ist nicht weiter ungewöhnlich. Genaugenommen befindet sie sich gegenwärtig gut in der Mitte ihres Lebens als Hauptreihenstern. Aufgrund ihrer Masse von  $1.9884 \cdot 10^{30}$  kg kann man heute recht sicher voraussagen, daß sie noch ungefähr 8 Milliarden Jahre vor sich hat, bis sie in Form eines Weißen Zwergsterns ein stabiles Endstadium erreichen wird. Zuvor wird sie sich noch zu einem roten Riesenstern aufblähen und zum Schluß einen – hoffentlich hübschen – planetarischen Nebel entstehen lassen.

Vom Standpunkt des Astronomen, der sich hauptsächlich mit weit entfernten Sternen beschäftigt, ist die Sonne also nichts wirklich Besonderes, eher ein recht einfaches „Ding“, daß sich durch relativ wenige Parameter – zu nennen sind z.B. Leuchtkraft, Leuchtkraftklasse, effektive Temperatur, Spektraltyp und Masse - vollständig beschreiben läßt. Anders sieht es aus, wenn man sie vom Standpunkt unserer Erde aus betrachtet. Nicht nur, daß sie auch für die Astronomen auf der Erde lebensnotwendig ist. Sie ist aufgrund ihrer Entfernung von gerade einmal 149 Millionen Kilometer im Gegensatz zu allen anderen Sternen als flächenhaftes Objekt sichtbar und kann deshalb mit hoher räumlicher Auflösung beobachtet werden. Auf diese Weise „wandelt“ sich dieser einfache G2-Stern zu einem hochkomplizierten Objekt mit einer Vielzahl von Erscheinungen und Prozessen in seiner Atmosphäre, die nicht immer einfach zu beobachten, zu beschreiben und auch nicht einfach zu erklären sind. In dem wir die Sonne in allen Details erforschen, gewinnen wir auch Einsichten über die Entwicklung und das „Funktionieren“ anderer Sterne, die uns bekanntermaßen auch in den größten Teleskopen nur als Lichtpunkte erscheinen. Deshalb ist die Sonne für die stellare Astrophysik „der Musterstern“, dessen Erforschung zugleich hilft, auch die anderen stellaren Bewohner unseres Kosmos besser zu verstehen.

### *Die Zukunft der Sonne*

*Unsere Sonne existiert seit etwa 4.6 Milliarden Jahren, wobei sie 99% dieser Zeit in einem stabilen Hauptreihenstadium verbracht hat, das mindestens noch weitere 6 Milliarden Jahre anhalten wird. Dieses Hauptreihenstadium ist dadurch gekennzeichnet, daß während dieser Zeit die Sonne ihren Energiehaushalt durch Wasserstoffusionsprozesse in ihrem Kernbereich bestreitet. Dabei wird ihre Leuchtkraft langsam aber stetig weiter zunehmen und zwar derartig, daß es bereits in 500 Millionen Jahren auf der Erde zunehmend ungemütlicher wird.*

*Die zukünftige Entwicklung unserer Sonne – oder allgemeiner, die eines Hauptreihensterns mit einer Masse von ungefähr 1 Sonnenmasse – läßt sich mittels der Theorie der Sternentwicklung prinzipiell vorhersagen. Dabei interessiert vor allem, wie sich a) die Leuchtkraft und b) der Durchmesser im Laufe der Zeit entwickelt und welche Energieerzeugungsmechanismen in den einzelnen Entwicklungs-*

sphasen den Stern stabil halten. Und natürlich die Frage, welche Auswirkungen haben diese Entwicklungen auf unser Planetensystem und insbesondere auf die Erde?

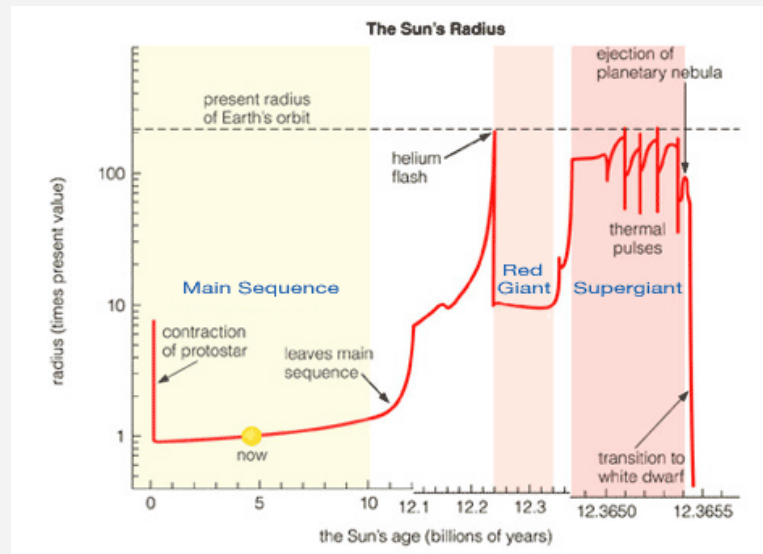
Problematisch in der Prognose sind immer die Phasen im Leben eines Sterns, die mit einem größeren Masseverlust verbunden sind. Das liegt daran, daß die physikalischen Bedingungen im Zentralbereich der Sterne, also dort, wo durch Kernfusion deren Energie erzeugt wird, stark masseabhängig sind. Deshalb kann auch nicht mit absoluter Sicherheit vorhergesagt werden, ob die Sonne beim Übergang in das Rote Riesen-Stadium soweit expandiert, daß die Erde in ihrem Inneren verschwindet.

Als vor etwa 4.6 Milliarden Jahren die Sonne bei der Kontraktion einer interstellaren Gas- und Staubwolke entstanden ist, bestand sie zu 73% aus Wasserstoff, zu 25% aus Helium und zu ca. 2% aus den sogenannten „Metallen“ (das sind in der Astrophysik alle Elemente schwerer als Helium). Da ihr Inneres zu jener Zeit bis zum Zentrum konvektiv war, war diese Elementzusammensetzung überall im Stern gleich, d.h. es gab in dieser Beziehung keinen Unterschied zwischen Kernbereich und Sternatmosphäre. Als sich nach einigen Anfangsinstabilitäten (z.B. T-Tauri Stadium) im Sonnenkern eine Zone ausgebildet hatte, wo selbstregulierend Wasserstoff zu Helium fusionierte, mußte sich im Laufe der Zeit in diesem Bereich zwangsläufig die Zusammensetzung ändern. Man vermutet, daß der innerste Kernbereich heute (d.h. nach mehr als 4 Milliarden Jahre Wasserstoffbrennens) aus ca. 35% Wasserstoff, 63% Helium und 2% „Metallen“ besteht, während die Sonnenatmosphäre im Wesentlichen immer noch die ursprüngliche Zusammensetzung aufweist. Da der Wasserstoffgehalt im Kern im Laufe der Zeit kontinuierlich abnimmt und das bei der Wasserstofffusion entstehende schwerere Helium an den Kernprozessen nicht teilnimmt, muß aus Stabilitätsgründen der Sonnenkern langsam schrumpfen was zu einer Temperaturerhöhung und damit zu einem effektiveren Wasserstoffbrennen führt. Das bedeutet letztendlich, daß die Leuchtkraft im Laufe der Zeit langsam ansteigt, da sich die Energieproduktionsrate mit steigender Temperatur erhöht. So ist die Leuchtkraft der Sonne seit dem Zeitpunkt, als sie die Hauptreihe erreicht hat, bis heute um ca. 30% angestiegen. In den nächsten 1.2 bis 1.3 Milliarden Jahren wird ihre gesamte Abstrahlung um weitere 10% anwachsen. Nach dem Stefan-Boltzmann'schen Gesetz entspricht das zwar nur einem Zuwachs der effektiven Temperatur um etwa 150 K. Die Auswirkungen auf die Erde werden jedoch dramatisch sein.

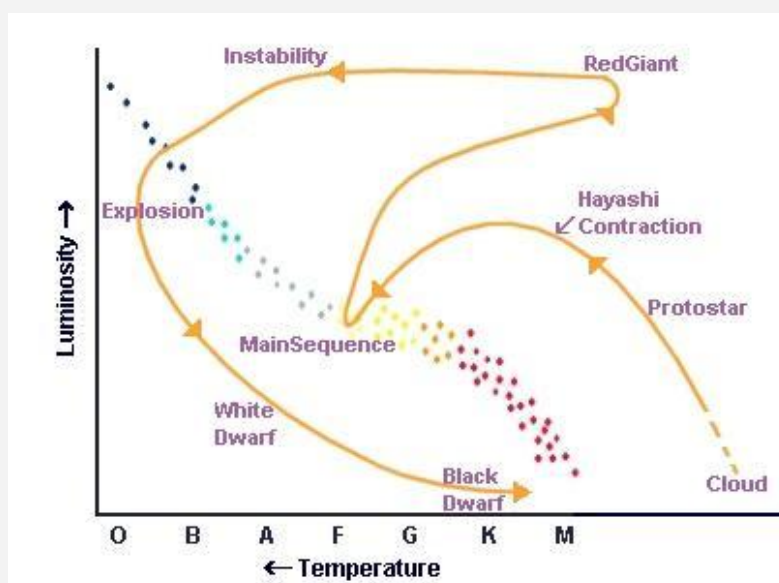
In ungefähr 6.4 Milliarden Jahren wird die Sonne eine Leuchtkraft von ca.  $2.2 L_{\odot}$  erreichen und ihr Kernbereich zunehmend an Wasserstoff verarmen. Sie versucht dann dieses Defizit durch eine Kontraktion des Kerns auszugleichen, was jedoch aufgrund des Virialsatzes nur zu einer weiteren Erhöhung der Leuchtkraft über die nächsten 700 Millionen Jahre führt. Konkret bedeutet das, daß die Sonne auf das 2.3-fache ihres heutigen Durchmessers anwachsen und die Leuchtkraft das 2.7-fache der heutigen Leuchtkraft erreichen wird. Der Planet Mars wird dann in etwa den gleichen Energieeintrag erhalten wie die Erde heute.

Ab diesem Moment beginnt eine zwar kurze (gemessen an der Dauer des Hauptreihenstadiums), aber sehr turbulente und aufregende Phase im Leben der Sonne. Sobald der Wasserstoffanteil im Sonnenkern unter 12% abgesunken ist, wird sich eine dicke, den Heliumkern umgebende Schale ausbilden, in der die Wasserstofffusion fortgeführt wird. Die physikalischen Bedingungen im heliumreichen Kern reichen aber vorerst noch nicht aus, um auch darin Kernfusionsprozesse zu zünden. Mit dem Beginn des Schalenbrennens verläßt die Sonne endgültig die Hauptreihe im Hertzsprung-Russel-Diagramm und beginnt mit ständig zunehmender Leuchtkraft und weiterer Vergrößerung des Durchmessers in Richtung Riesenast zu wandern. Da dieser Vorgang mit einer Aufblähung des Sterns auf das über 170-fache des heutigen Durchmessers bei gleichzeitig sinkender effektiver Temperatur und (wegen der Vergrößerung der strahlenden Oberfläche) mit einer Erhöhung der Leuchtkraft auf über  $2000 L_{\odot}$  verbunden ist, stellt dieser Vorgang den Übergang in das Rote Riesen-Stadium dar. Außerdem nimmt der Sonnenwind massiv an Stärke zu was dazu führt, daß rund 38% der Sonnenmasse in den kosmischen Raum abgeblasen wird. Dieser Masseverlust ist

auch die Ursache dafür, daß die Erdbahn weiter nach außen wandert und so wahrscheinlich ihrer vollständigen Zerstörung entgehen kann. Merkur und Venus werden aber auf jedem Fall im Inneren des Roten Riesensterns verschwinden.



Aber auch das Schalenbrennen im Innern der Sonne wird aufgrund des Wasserstoffverbrauchs schnell immer uneffektiver. Der Kern beginnt wieder zu kontrahieren wobei die einsetzende Elektronenentartung die Kerntemperaturen auf über 100 Millionen K treibt, also auf einen Wert, wo ein neuer Kernfusionsprozeß zünden kann. Es handelt sich dabei um den Tripel-Alpha-Prozeß, bei dem aus Heliumkernen über die Zwischenstufe Beryllium Kohlenstoffatome aufgebaut werden. Die Kohlenstoffatome können sich wiederum durch den Einfang von  $\alpha$ -Teilchen in Sauerstoffatome umwandeln. Es kommt zu einer dramatischen Schrumpfung der Sonne, wodurch die Leuchtkraft absinkt und ein neuer stabiler Zustand erreicht wird der solange anhält, wie das Heliumbrennen im Kern genügend Energie liefert. Das sind einige 100 Millionen Jahre. Sollte die Erde diesen „first red-giant peak“ überlebt haben, dann liegt ihre Oberflächentemperatur auf der Sonnenseite jetzt bei über  $600^{\circ}\text{C}$ . So etwas wie eine Atmosphäre hat sie dann aber nicht mehr (ihre Hydrosphäre hat sie bereits viel früher aufgrund eines ausufernden Treibhauseffektes verloren).



Aus physikalischen Gründen ist der Aufbau von Elementen mit einer Ordnungszahl größer 8 (also Sauerstoff) in massearmen Sternen unterdrückt. Erst bei Sternen ab einer Masse von rund 4 Sonnenmassen kann auch durch Kohlenstoffbrennen Energie erzeugt werden. Derartige Kernreaktionen sind aber bei der Sonne aufgrund ihrer geringen Masse (z.Z. des Heliumbrennens  $\sim 0.6 M_{\odot}$ ) nicht möglich. Deshalb passiert jetzt quasi das Gleiche, wie beim Erlöschen des Wasserstoffbrennens im Sonnenkern am Ende ihrer Hauptreihenexistenz. Im Kern, der sich aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit des entarteten Elektronengases weitgehend isotherm verhält, sammelt sich Kohlenstoff und Sauerstoff an was dazu führt, daß er irgendwann als Fusionsreaktor inaktiv wird. Das Heliumbrennen verlagert sich in eine Schale, die langsam nach außen wandert. Auch darin ist das Elektronengas entartet und bestimmt den Gasdruck allein. Damit fällt ein wichtiger Regelmechanismus weg, der im Hauptreihenstadium zu der außergewöhnlichen Stabilität dieser Sterne beigetragen hat. Während in einem normalen Gas eine lokale Erhöhung der Energiefreisetzungsrates eine Volumenvergrößerung eines Masselements bewirkt (wobei die zusätzliche zugeführte Energie soweit verbraucht wird, bis wieder Stabilität eintritt – ein typischer Fall von Kühlung), ist das in einem entarteten Gas nicht möglich. Eine Erhöhung der Energiefreisetzungsrates in einer heliumbrennenden Schale hat quasi überhaupt keinen Einfluß auf den Druck des entarteten Elektronengases und führt deshalb auch nicht zu dessen Expansion. Die Energie kommt allein dem umgebenden Gas zugute wodurch sich dessen Temperatur erhöht. Eine Temperaturerhöhung verbessert aber zugleich die Fusionsbedingungen so daß noch mehr Energie freigesetzt wird. Dieser Prozeß stoppt erst, wenn die Temperaturen so stark angewachsen sind, daß die Entartung des Elektronengases aufgehoben wird und das normale Gas (welches sich wie ein ideales Gas verhält) wieder die Oberhand gewinnt. Dieser Vorgang, der als thermische Instabilität bezeichnet wird, kann innerhalb kürzester Zeit zu einer enormen Leuchtkrafterhöhung („Flash“ genannt) führen und wiederholt sich mehrfach mit Perioden von einigen 1000 bis 10000 Jahren. Bei der Sonne sagen die Sternentwicklungsmodelle 4 bis 5 derartiger „Helium shell flashes“ voraus, wobei immer Teile der Sternatmosphäre verlorengehen. Beim letzten „Flash“ wird dann die gesamte verbliebene äußere Atmosphäre abgesprengt und es entsteht ein neuer planetarischer Nebel. Danach bleibt nur noch der entartete Kern übrig, der als kompakter Weißer Zwergstern langsam auskühlt um schließlich als „Schwarzer Zwerg“ endgültig zu verlöschen. Die Sonne hat zum Zeitpunkt der Entstehung des Weißen Zwergsterns ein Alter von 12.37 Milliarden Jahre erreicht.

...

### Flares

Die – zumindest lokal – hochenergetischsten Prozesse der Sonne finden nicht tief in ihrem Innern, sondern in der Korona statt. Es handelt sich dabei um Phänomene, die man (aus historischen Gründen) als chromosphärische Eruptionen oder kurz als Flares bezeichnet, obwohl sie in der Korona stattfinden und die auffälligen chromosphärischen Emissionen (s.u.) – wie man heute weiß – „nur“ ein Sekundäreffekt sind. Man kennt Flares eigentlich schon recht lange, aber ihre intensive Erforschung wurde erst möglich, als man oberhalb der Erdatmosphäre die Sonne mit Instrumenten, die im kurzwelligen UV, Röntgen- und Gammabereich arbeiten, untersuchen konnte. Dabei wurde sehr schnell klar, daß mit solaren Flares eine gewisse Gefährdung der bemannten und unbemannten Raumfahrt außerhalb des schützenden Erdmagnetfeldes verbunden ist. Die Gefahr geht dabei weniger von den Flares selbst aus, sondern von den intensiven Partikelströmen der manchmal mit ihnen verbundenen koronalen Masseauswürfen (CME – „*coronal mass ejection*“). Dabei können im erdnahen Raum durchaus Strahlenbelastungen auftreten, die z.B. für die Apollo-Astronauten auf ihrem Weg zum Mond hätten tödlich sein können.

„Chromosphärische Eruptionen“ beobachtet man am Häufigsten innerhalb komplexer bipolarer Sonnenfleckengruppen (z.B. in  $\delta$ -Konfigurationen). Sie sind deutlich auf  $H_\alpha$ -Spektroheliogrammen als relativ kurze (einige Dutzend Minuten) und lokal begrenzte Strahlungsausbrüche zu beobachten. Die Energie, die bei solch einer Eruption freigesetzt wird, kann bis zu  $10^{25}$  J (!) betragen. Das entspricht ungefähr der Energiefreisetzung von einigen Millionen Wasserstoffbomben, wobei davon nur ein Areal von weniger als 0.1 Promille der Sonnenoberfläche betroffen ist, was ungefähr der Fläche eines gewöhnlichen Sonnenflecks entspricht. Dabei kann sich das Plasma, welches das Eruptionsgebiet ausfüllt, auf mehrere 10 Millionen K aufheizen und sich damit zum Ort mit der höchsten Temperatur auf der Sonne entwickeln. Es ist klar, daß bei derartigen Temperaturen - geht man von einem Planckschen Strahler aus – ein großer Teil der Energie im Röntgenbereich abgestrahlt wird. Deshalb lassen sich Flares auch besonders gut mit abbildenden Röntgenteleskopen, die auf Satelliten außerhalb der Erdatmosphäre stationiert sind, beobachten. Aber auch nichtthermische Prozesse spielen für die Dynamik der Flares eine wichtige, wenn nicht sogar ausschlaggebende Rolle. Ein Beispiel aus der Beobachtungspraxis der Radioastronomen sind die Radiobursts, die synchron zu Flares auftreten und von in Magnetfeldern beschleunigten Elektronen verursacht werden. Die extremen physikalischen Bedingungen während eines Flares führen sogar zu Kernreaktionen, bei denen Gamma-Strahlung hoher Energie in Form eines charakteristischen Spektrums emittiert wird.

Die Emission im sichtbaren Bereich ist dagegen meist so gering, daß der Kontrast zur Photosphäre nicht ausreicht, um sie z.B. in einem gewöhnlichen Teleskop beobachten zu können (nur ca  $\frac{1}{4}$  der freigesetzten Energie wird im sichtbaren Licht abgestrahlt). Es gibt aber auch Ausnahmen, wo besonders starke Eruptionen zu im optischen Bereich sichtbaren, sogenannten „White Flares“ führen. Sie sind sehr selten und dauern kaum länger als einige Minuten. Der erste „weiße Flare“ wurde

unabhängig voneinander von zwei britischen Liebhaberastronomen – RICHARD C.CARRINGTON und RICHARD HODGSON – am 1. September 1859 beobachtet. In dem Aufsatz von CARRINGTON in den „*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*“, Vol. 20, findet man sogar eine ziemlich detaillierte Zeichnung von diesem Ereignis. Das damals eigentlich Aufregende an dieser Beobachtung war, dass andere Wissenschaftler knapp 17 Stunden später eine Störung des Erdmagnetfeldes und auffällige Polarlichter, die bis weit in südliche Breiten hin sichtbar waren, notierten. Damit konnte die Vermutung, daß die irdischen Polarlichter etwas mit der Sonnenaktivität, insbesondere den Sonnenflecken, zu tun haben, eindrucksvoll erhärtet werden.

Mit der Erfindung des Spektroheliokops durch G.E.HALE verbreiterte sich auch die Beobachtungsbasis der solaren Flares. Es zeigte sich, daß diese rätselhaften Eruptionen gar nicht so selten sind und genaugenommen mit zu den eher gewöhnlichen Phänomenen der Sonnenaktivität gehören. Von einer Erklärung ihrer wahren Natur war man natürlich noch sehr weit entfernt.

Ab 1944 wurde man auf ein weiteres Phänomen aufmerksam, welches mit Flares koinzidierte. J.S.HEY entdeckte die bereits erwähnten Radiobursts und die damit verbundenen Störungen der Ionosphäre der Erde. Außerdem entdeckte man, daß die Intensität der „Höhenstrahlung“ nach einem starken Flare-Ereignis signifikant zunahm. Alle diese Beobachtungen ließen bereits erahnen, daß man es hier mit extrem hochenergetischen und zumindest z.T. nichtthermischen Prozessen in der Chromosphäre bzw. unteren Korona zu tun hat.

Eine Bestätigung dieser Vermutung gelang mit dem Nachweis von „harter“ Röntgenstrahlung bei einem Raketenanstieg im Jahre 1959, die von einem intensiven Flare stammte. Kurze Zeit später konnte auch „weiche“ Röntgenstrahlung festgestellt und die Temperatur des Emissionsgebietes auf mindestens 10 Millionen K geschätzt werden. Es ist verständlich, daß damit die Neugier der Astronomen, die sich mit der Sonne – aber auch bestimmten eruptiven veränderlichen Sternen (z.B. UV Ceti-Sterne) – beschäftigen, geweckt wurde.

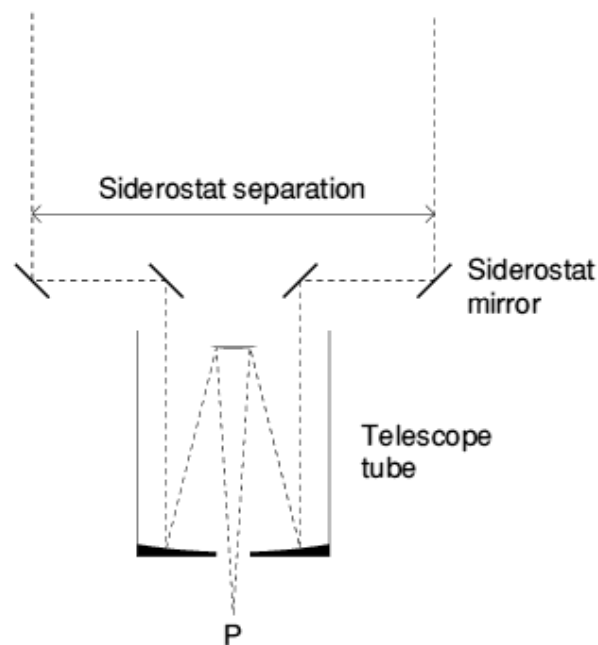
1972 ist das Jahr, wo eine Forschungsgruppe unter Leitung von E.L.CHUPP zum ersten Mal hochenergetische Gamma-Emissionen aus einem Flare-Gebiet mit einer Quantenenergie von über 1 MeV entdeckte. Zwei Jahre später veröffentlichte JACK GOSLING eine Arbeit, wo er eine Verbindung zwischen den Flares und den kurz zuvor entdeckten koronalen Masseauswürfen herstellt und eine erste Theorie über ihre Entstehung formuliert.

Die Installation von Meß- und Beobachtungsinstrumenten auf Satelliten (und bemannten Raumstationen wie Skylab oder Mir) eröffnete den Sonnenphysikern ab den 70ziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts einen völlig neuen und überraschenden Ausblick auf die solaren Flares und insbesondere auf die physikalischen Prozesse, die zu ihrer Entstehung führen. Sehr viele grundlegende Beobachtungen gelangen z.B. mit dem SMM-Satelliten („*Solar Maximum Mission*“, 1980-1989), mit YOHKOH (1991-2001), RHESSI (gestartet 2002), TRACE (gestartet 1998) und SOHO (gestartet 1995) sowie einer Anzahl weiterer Satelliten, welche auch die Auswirkungen von solaren Flares und koronalen Masseauswürfen auf den erdnahen Raum und das Erdmagnetfeld untersuchten. Diesen Missionen verdankt man neben einer großen Zahl von erdgebundenen Beobachtungen der verschiedensten Sonnenobservatorien das heutige, bereits sehr detaillierte Modell dieser lange Zeit äußerst rätselhaften Eruptionen auf der Sonne.

## Band 14: Beobachtungsgrößen von Sternen

### Durchmesserbestimmungen mit dem Michelson-Sterninterferometer

Das Meßprinzip des Michelson-Sterninterferometers beruht auf dem bekannten Doppelspaltexperiment, mit dem in einer abgewandelten Form THOMAS YOUNG (1773-1829) im Jahre 1803 die Wellennatur des Lichtes endgültig bewiesen hat. In einem modernen Sterninterferometer entsprechen den beiden Spalten zwei Teleskope, deren Lichtwege so gekoppelt sind, daß sie in ihrem gemeinsamen Brennpunkt interferieren können. Da man in den zwanziger Jahren des vorigen Jahrhunderts die mechanische Präzision (Einhaltung der Kohärenzbedingung), die dafür erforderlich ist, noch nicht aufbringen konnte, wählte ALBERT ABRAHAM MICHELSON (1852-1931) einen anderen Weg.



Grundprinzip des zweiarmigen Michelson-Sterninterferometers, mit dessen Hilfe 1921 MICHELSON und PEASE den Durchmesser einiger Riesensterne mit dem 100 Zoll Hooker-Spiegel des Mt. Wilson-Observatorium bestimmt haben.

Über ein Spiegelsystem mit dem Abstand  $d$  leitete er zwei parallel zur Teleskopachse einfallende Teilstrahlen eines Sterns in das Teleskop und beobachtete am Brennpunkt P die das Beugungsscheibchen durchziehenden Interferenzstreifen (Fringes). Wenn die ankommende Wellenfront völlig parallel ist (was bedeutet, daß sie von einer idealen Punktquelle stammt), dann entstehen in der Brennebene des Teleskops Fringes mit dem Winkelabstand

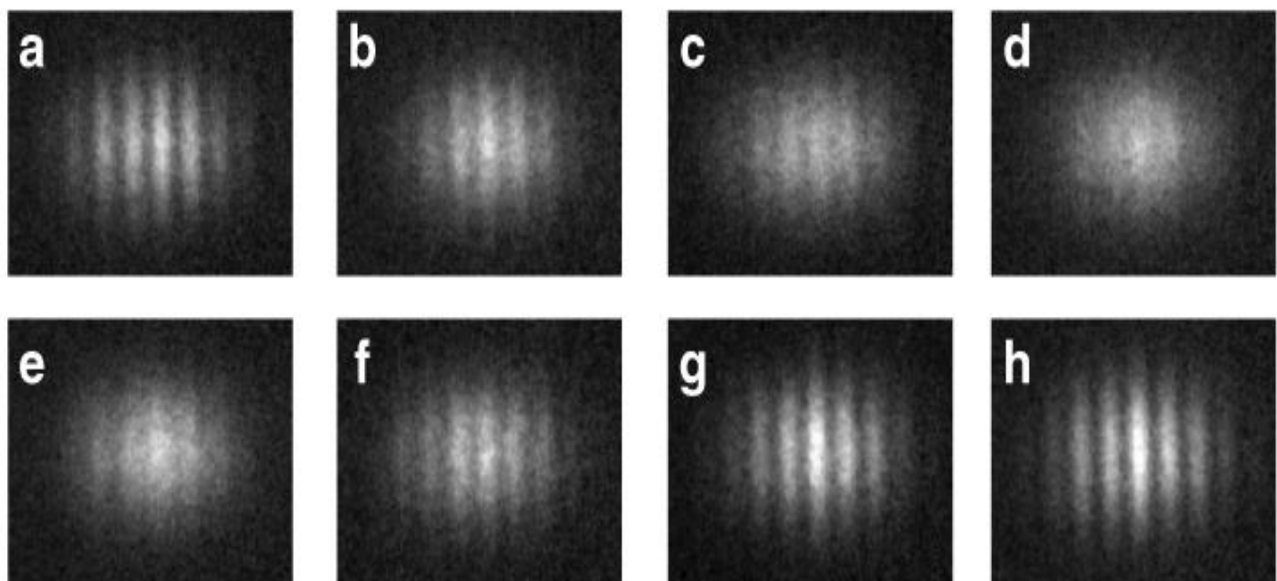
$$\alpha = 1.22 \frac{\lambda}{d} \quad (\text{in rad}) \quad [1.47]$$

Besitzt der Stern jedoch eine endliche Ausdehnung, dann gilt (1.47) für jeden Punkt auf der Sternscheibe und die Streifensysteme verschiedener Punkte überlagern sich was zu einer Unschärfe des Interferenzmusters führt (d.h. deren Kontrast nimmt ab). Genaugenommen verschwindet es sogar, wenn der Winkeldurchmesser des Sterns ungefähr  $\lambda/d$  beträgt. Meßtechnisch bedeutet das, daß der Abstand  $d$  solange variiert wird, bis diese Bedingung erfüllt ist. Da die Luftunruhe das Interferenzmuster auf dem Beugungsscheibchen des Sterns ohnehin stark stört, ist diesem Verfahren eine natürliche Grenze gesetzt, die aber heute durch den Einsatz von aktiven Optiken teilweise wesentlich unterschritten werden kann.

Ein Maß für die Sichtbarkeit der Interferenzstreifen ist die Größe  $V$ , die gewöhnlich als **Visibilität** (oder als **Fringe-Kontrast**) bezeichnet wird (siehe Band 2). Sie läßt sich durch die maximale und minimale Helligkeit  $I_{\max}$  und  $I_{\min}$  der Streifen auf dem durch das Interferenzmuster gestörten Beugungsscheibchens des Stern ausdrücken und mit photometrischen Methoden messen:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad [1.48]$$

Wird  $V$  über die (veränderliche) Größe  $d$  aufgetragen, dann erhält man die **Visibilitätskurve**. Daraus wiederum kann der scheinbare Winkeldurchmesser des Sterns abgeleitet werden.



Interferenzmuster auf einem Beugungsscheibchen mit abnehmender (a bis d) und wieder zunehmender Visibilität (e bis h). (a) und (h) entspricht maximaler Visibilität ( $V \sim 1$ ); (d) minimaler Visibilität ( $V \sim 0$ )

Die Visibilität  $V$  ist eine fundamentale Größe der optischen Interferometrie. Physikalisch ist sie ein Maß für den Kohärenzgrad der beiden Teilstrahlen und stellt gleichzeitig nach dem van Cittert-Zernicke-Theorem die Fouriertransformierte der Helligkeitsverteilung am Punkt  $d/\lambda$  dar. Das hat die Konsequenz, daß bei einem nicht zu großen Abstand  $d$  der beiden Teilstrahlen aus der gleichen Wellenfront kleinere Quellen (geringer Winkeldurchmesser) eine hohe und Quellen mit einem größerem Winkeldurchmesser eine geringere Visibilität aufweisen. In der optischen Interferometrie

(wie sie z.B. am Cerro Paranal praktiziert wird) erlaubt dieser Zusammenhang sogar die rechnerische Rekonstruktion eines Bildes von dem Objekt, welches die Strahlung emittiert.

Beispiele für einige Riesen- und Überriesensterne, deren scheinbarer Durchmesser mit einem Michelson-Sterninterferometer gemessen wurden:

Stern	Winkeldurchmesser	Parallaxe $\pi$	Spektraltyp	Helligkeit ( $m_v$ )	BC
$\alpha$ Boo	0.020"	0.08885"	K1.5 III	-0.04	-0.6
$\alpha$ Tau	0.020"	0.05009"	K5 III	0.85	-1.0
$\alpha$ Ori (*)	0.047"	0.00763"	M2 lab	0.58	-2.1
$\beta$ Peg	0.021"	0.01637"	M2.5 II-III	2.42	-1.8
$\alpha$ Her	0.030"	0.00853"	M5 lab	3.06	-3.5
$\sigma$ Cet (*)	0.047"	0.00779"	M7 IIIe	3.04	-2.8
$\alpha$ Sco	0.040"	0.00540"	M1.5 lab-b	1.09	-1.5

Die scheinbaren Winkeldurchmesser beziehen sich auf eine gleichmäßig leuchtende Sternscheibe. Effekte aufgrund einer zu erwartenden Randverdunklung (ähnlich wie bei der Sonne) werden vernachlässigt. Ihre Berücksichtigung würde zu etwas größeren Sterndurchmessern führen. (\*) Durchmesser veränderlich.

## Intensitätsinterferometrie nach R.Hanbury-Brown und R.Q.Twiss

Mit dem klassischen Michelson-Interferometer gelang die Durchmesserbestimmung nur von wirklich großen Riesen- und Überriesensternen. Selbst nahe Hauptreihensterne waren zu lichtschwach und zu klein, um innerhalb der Genauigkeitsschranke von ca. 0.01" (ohne aktive Optik) brauchbare Meßwerte zu liefern. Mitte der fünfziger Jahre des vorigen Jahrhunderts schlugen ROBERT HUNBURY-BROWN (1916-2002) und RICHARD Q.TWISS eine interferometrische Methode zur Bestimmung von Sterndurchmessern vor, deren Grundidee sie einem bereits damals praktizierten Verfahren der Radioastronomie entlehnt hatten (Intensitäts-Interferometrie). Obwohl ihr Interferometer prinzipiell wie ein Michelson-Sterninterferometer arbeitet, ist die Art und Weise, wie die Kohärenz des Sternlichts als eine Funktion des Abstandes der beiden Teilstrahlen gemessen wird, völlig verschieden.

In einem Experiment konnten sie zeigen, daß die Photonen, die z.B. von einem Stern an unterschiedlichen Stellen der Sternoberfläche emittiert werden, oft gemeinsam in „Klumpen“ auf der Erde ankommen. Dieses Ergebnis, welches auf dem ersten Blick reichlich absurd erscheint, läßt sich aber mit den Mitteln der Quantenstatistik ohne weiteres erklären. Dazu muß man wissen, daß der Amplitude einer elektromagnetischen Welle quantenmechanisch eine bestimmten Photonendichte entspricht. Betrachtet man zwei Wellenzüge mit nahezu gleicher Frequenz, die von zwei gegenüberliegenden Rändern eines Sterns emittiert werden, dann können diese Wellenzüge interferieren. Es entsteht so etwas wie eine „Schwebung“, d.h. die Amplituden der Teilwellenpakete überlagern sich und schwingen selbst im Gleichtakt. Dort, wo die Amplitude groß ist, reisen - wenn man es im Teilchenbild betrachtet - sehr viele Photonen gemeinsam. Entlang der Ausbreitungsrichtung entsteht auf diese Weise ein „bunching“-Effekt, der am Detektor (z.B. einem SEV) ein

szintillationsunabhängiges „Photonenrauschen“ verursacht. Registriert man dieses „Photonenrauschen“ (z.B. in Form einer Intensitätsmessung oder durch „Zählen“ der eintreffenden Photonen) von verschiedenen Standorten aus (unterschiedliche Abstände  $d$ ), dann lassen sich die erhaltenen Meßreihen untereinander korrelieren. Als Ergebnis erhält man die Korrelation der Intensitätsfluktuationen als Funktion der Basislänge. Natürlich gibt es auch hier prinzipbedingte Probleme, die eine Anwendung nur auf verhältnismäßig helle Sterne (so bis ca.  $2''$ .5) begrenzen. So muß das Licht näherungsweise monochromatisch sein, was durch entsprechende Interferenzfilter (Bandbreite ca. 10 nm) erreicht wird. Andererseits benötigt man zum Sammeln des Lichts dieser Sterne nicht extrem genaue Spiegelteleskope. Es reicht aus, wenn das Sternlicht als zentimetergroßer Lichtfleck auf einem Photomultiplier mit sehr hoher Zeitauflösung (wegen der sehr geringen Kohärenzlänge des Sternlichts) abgebildet und der entsprechend verstärkte Photostrom registriert wird. ROBERT HUNBURY-BROWN hat - nachdem erste Versuche an dem Stern Sirius in Cambridge zufriedenstellend verlaufen sind - eine entsprechende Anlage in Australien, genauer am Paul-Wild-Observatorium in Narrabri (New South Wales), aufgebaut.

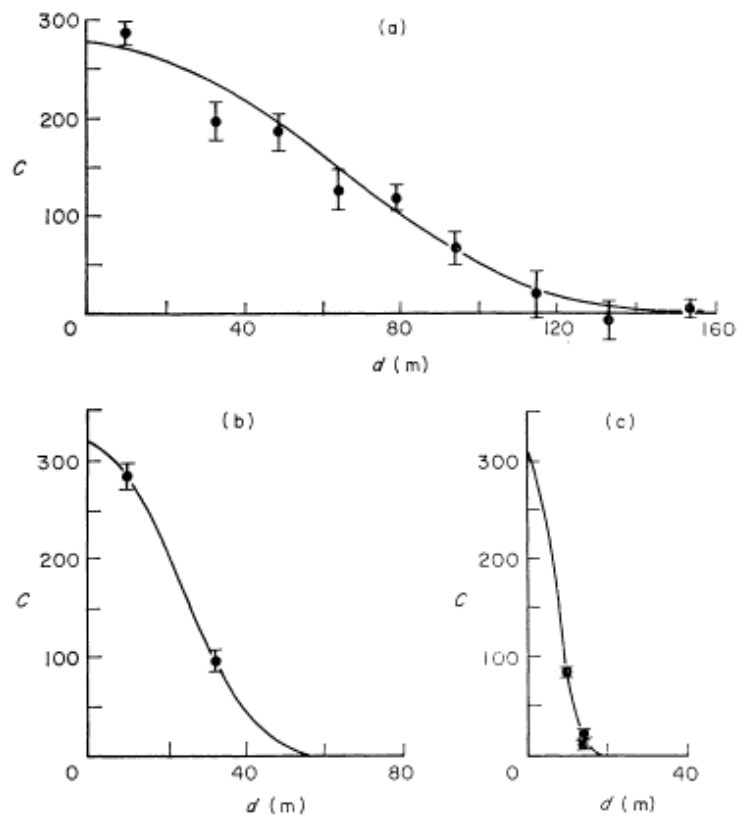
Es bestand aus zwei azimuthal montierten Mosaik-Spiegelanordnungen von jeweils 6.7 m Durchmesser. Im Brennpunkt dieser Spiegel wurde ein Photomultiplier angeordnet, mit dem die Intensitätsfluktuationen des Sternlichts registriert wurden. Die Spiegel konnten auf einer kreisförmigen Schiene von 188 m Durchmesser bewegt werden, um deren Abstand zu verändern (Minimalabstand 10 m). Die elektrischen Signale der zeitlich hoch auflösenden Lichtdetektoren wurden schließlich über Kabel in einem elektronischen Kreuzkorrelator zusammengeführt und damit die Korrelation des Photonensauschens für einen bestimmten Stern in Abhängigkeit des Abstandes  $d$  gemessen. Diese Korrelation verschwindet bei immer kleineren Werten von  $d$  je größer der Winkeldurchmesser des untersuchten Sterns ist. Das Meßregime ist dabei so ausgestaltet, daß die nichtkorrelierten Intensitätsschwankungen, die durch die Erdatmosphäre (Szintillation) und durch die Rauschteile der Meßelektronik verursacht werden, sich im Mittel aufheben. Auf diese Weise hat man mit dem Intensitätsinterferometer von Narrabri eine Genauigkeit in der Größenordnung von ca.  $1/10000$  Bogensekunden erreicht! Während man mit den Michelson-Sterninterferometer besonders Sterne mit einem relativ großen scheinbaren Winkeldurchmesser auflösen konnte, ist das Hanbury-Brown-Interferometer besser für helle Sterne mit relativ kleinen scheinbaren Winkeldurchmesser geeignet. Winkeldurchmesser  $>10^{-2}$  Bogensekunden sind dagegen mit diesem Gerät nicht zu vermessen, weil man einfach den Abstand  $d$  der beiden optischen Spiegel nicht soweit verringern kann, wo die Korrelation verschwindet. In diesem Sinne ergänzen sich beide Interferometeranordnungen sehr gut.

Wie bereits erwähnt, gelingt es aus den entsprechenden Korrelationskurven den scheinbaren Durchmesser der Sternscheibchen mit hoher Genauigkeit auszurechnen. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse für 31 Sterne mit den modernen Werten für ihrer Parallaxe (Hipparcos), ihres Spektraltyps und der Leuchtkraftklasse angegeben.

Heute werden Sterndurchmesser u. a. mit an Großteleskope gekoppelte bzw. in sie integrierte Interferometer vermessen. Damit lassen sich sogar sehr genau Randverdunklungen (wichtig für die Theorie der Sternatmosphären) sowie rotationsbedingte Abplattungen (z.B. beim Stern  $\alpha$  Aqu, Altair) beobachten.



Intensitätsinterferometer von Narrabri, New South Wales, Australien



Korrelation der Intensitätsfluktuationen für verschiedene Sterne als Funktion der Basislänge. a)  $\beta$  Cru (0.000722"), b)  $\alpha$  Eri (0.00192"), c)  $\alpha$  Car (0.0066") © Hanbury-Brown, 1967

Mit dem Intensitäts-Interferometer von Narrabri gemessene scheinbare Winkeldurchmesser einiger heller Sterne (Zusatzdaten SIMBAD)

Stern	Winkeldurchmesser	Parallaxe $\pi$	Spektraltyp	Helligkeit ( $m_v$ )
$\alpha$ Lyr	0.00324"	0.12893"	A0 V	0.03
$\alpha$ Aql	0.00298"	0.19445"	A7 V	0.77
$\alpha$ Eri	0.00192"	0.02268"	B3 V	0.50
$\alpha$ CMa	0.00589"	0.37921"	A1 V	-1.47
$\alpha$ Leo	0.00137"	0.04209"	B7 V	1.35
$\alpha$ Vir	0.00087"	0.01244"	B1 III+IV	1.04
$\alpha$ Car	0.00660"	0.01043"	F0 II	-0.72
$\alpha$ CMi	0.00550"	0.28593"	F5 IV-V	0.34
$\alpha$ Oph	0.00163"	0.06984"	A5 III	2.10
$\alpha$ PsA	0.00210"	0.13008"	A3 V	1.16
$\alpha$ Gru	0.00102"	0.03216"	B7 IV	1.74
$\alpha$ Pav	0.00080"	0.01780"	B2 IV	1.91
$\beta$ Cru	0.00072"	0.00925"	B0.5 IV	1.30
$\beta$ CMa	0.00052"	0.00653"	B1 II/III	1.98
$\beta$ Ori	0.00255"	0.00422"	B8 I	0.12
$\beta$ Car	0.00159"	0.02934"	A2 IV	1.70
$\beta$ Leo	0.00133"	0.09016"	A3 V	2.14
$\gamma$ Ori	0.00072"	0.01342"	B2 III	1.64
$\gamma$ Crv	0.00075"	0.01978"	B8 III	2.59
$\gamma$ Gem	0.00139"	0.03112"	A0 IV	1.90
$\delta$ Sco	0.00046"	0.00812"	B0.2 IV	2.29
$\delta$ CMa	0.00360"	0.00182"	F8 I	1.84
$\epsilon$ Ori	0.00069"	0.00243"	B0 I	1.70
$\epsilon$ Sgr	0.00144"	0.02255"	B9.5 III	1.80
$\epsilon$ CMa	0.00080"	0.00757"	B2 I	1.51
$\epsilon$ Cen	0.00048"	0.00868"	B1 III	2.26
$\kappa$ Ori	0.00045"	0.00452"	B0 I	2.05
$\zeta$ Oph	0.00051"	0.00712"	O9 V	2.58
$\zeta$ Ori	0.00048"	0.00399"	O9.5 I	1.79
$\zeta$ Pup	0.00042"	0.00233"	O5 I	2.21
$\eta$ CMa	0.00075"	0.00102"	B5 I	2.40

Leuchtkraftklassen:

- I Überriesen,
- II helle Riesen,
- III normale Riesen,
- IV Unterriesen,
- V Hauptreihensterne

## Band 15: Einführung in die Sternspektroskopie

### Doppler Imaging

Solange sich ein Stern in einem Teleskop nicht räumlich auflösen läßt, erscheint es auf dem ersten Blick fast aussichtslos, Informationen über die flächenhafte Verteilung von Strukturen in dessen Photosphäre durch Beobachtungen zu erhalten. Solche Informationen können aber durchaus in den Sternspektren vorhanden sein, wie bereits 1958 ARMIN DEUTSCH zeigen konnte.

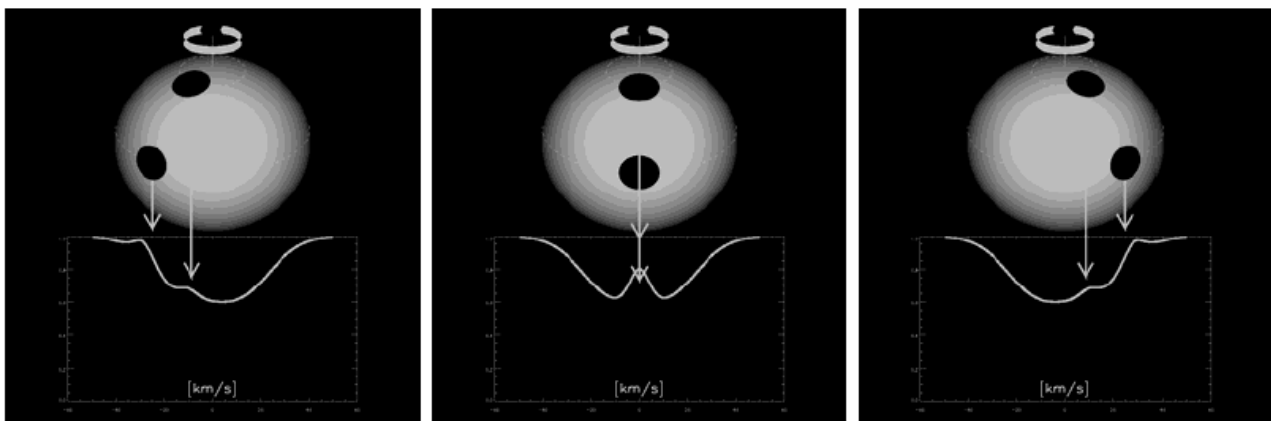
Angenommen, ein größerer „Sternfleck“ (ähnlich einem Sonnenfleck) wandert aufgrund der Eigenrotation des Sterns über die Sternoberfläche. Seine Radialgeschwindigkeit ist am Größten, wenn er entweder gerade an einem Rand des Sterns auftaucht oder am anderen Rand des Sterns wieder verschwindet. Das Licht, welches von diesem Fleck emittiert wird, weist deshalb über den Zeitraum einer halben Rotationsperiode eine wechselnde Rotverschiebung auf. Da sich seine Intensität von der Umgebung unterscheidet, macht er sich im Linienprofil durch eine Einsenkung (er ist dunkler als seine Umgebung) oder durch eine Intensitätserhöhung (er ist heller als seine Umgebung) bemerkbar (also in Form von sogenannten „bumps“), wobei diese Abweichung von der Linienkontur innerhalb einer halben Rotationsperiode über das gesamte Linienprofil wandert. Eine genaue Analyse von Zeitreihen hochaufgelöster Spektren eines genügend schnell rotierenden Sterns sollte deshalb Informationen über das Vorhandensein und die Verteilung von Strukturen in der Photosphäre des jeweiligen Sterns liefern können. Von S.S.VOGT und G.D.PENROD ist 1983 an dem Stern HR 1099 (einem Veränderlichen vom Typ RS Canis Venaticorum) exemplarisch gezeigt worden, das die hier vorgestellten Ideen auch wirklich funktionieren. Von Ihnen stammt übrigens die Bezeichnung „Doppler Imaging“, welches sich seitdem neben dem Begriff der „Doppler Tomographie“ für dieses spezielle bildgebende Verfahren durchgesetzt hat.

Die für die Analyse benutzten Spektrallinien müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllen um brauchbare Ergebnisse zu liefern. Ihr Profil sollte beispielsweise fast ausschließlich durch die Rotation festgelegt sein, was bei Rotationsgeschwindigkeiten von mehr als 20 km/s meistens der Fall ist. Außerdem dürfen sie noch keine Sättigung im Bereich ihres Minimums aufweisen (optisch dünne Linien). Durch moderne elektronische Aufnahmeverfahren konnte das Signal- zu-Rausch Verhältnis bei der Spektrengewinnung gegenüber fotografischen Verfahren um Einiges gesteigert werden, so daß sich geringe Veränderungen in der Linienkontur erfolgreich vermessen lassen. Unter bestimmten Umständen können aus einer Anzahl von solchen (eindimensionalen) Linienprofilen zweidimensionale (monochromatische) Intensitätsverteilungen auf der Sternscheibe berechnet werden. Der zur Lösung dieses „inversen“ Problems notwendige Rechenaufwand ist zwar sehr hoch, aber die einzelnen Schritte von der Photometrie der Spektrallinie bis zum Zeichnen einer Intensitätskarte lassen sich sehr gut algorithmisieren.

Bleibt noch die Frage zu beantworten, inwieweit man den berechneten Intensitätsverteilungen glauben schenken darf. Diese Frage ist keineswegs trivial, da verschiedene Helligkeitsverteilungen auf der Sternscheibe durchaus zu einer Abfolge ähnlicher Linienprofile (die aufgrund des Rauschens nicht unterscheidbar sind) führen können. Doppler Imaging gehört mathematisch gesprochen zu den schlecht

konditionierten Problemen und man muß viel Aufwand betreiben, um aus der Klasse der möglichen Intensitätsverteilungen die jeweils Wahrscheinlichste zu finden. Ein Verfahren zur Lösung dieses Problems soll hier nur als Begriff erwähnt werden, die Maximum-Entropie-Methode. Neuerdings gelangen auch mit steigendem Erfolg evolutionäre Algorithmen zum Einsatz, um auf indirekte Art und Weise Oberflächenkarten von Sternen aus Linienprofilen abzuleiten.

Von der Sonne weiß man, daß ihre Aktivitätszyklen physikalisch mit dem internen Dynamo zu tun haben, der für die Entstehung und Aufrechterhaltung des solaren Magnetfeldes verantwortlich ist. Bei anderen Sternen ist das natürlich ähnlich. Indem man Sternflecken untersucht, lassen sich wertvolle Informationen (oftmals im Zusammenspiel mit anderen Beobachtungsverfahren) über eventuell vorhandene Magnetfelder, ihre Stärke und zeitliche Entwicklung gewinnen. Insbesondere die Einbeziehung von Spektrallinien, die durch lokale Magnetfelder aufgrund des Zeeman-Effektes in mehrere, unterschiedlich polarisierte Komponenten aufgespalten werden, führten zu wichtigen neuen Erkenntnissen über die physikalischen Bedingungen bei magnetischen Sternen. Das indirekte Bildgebungsverfahren, welches auf der Ausnutzung beider Effekte (also Doppler-Effekt und Zeeman-Effekt) beruht, liefert im Prinzip ähnliche Informationen wie die Magnetogramme der solaren Astronomie und wird deshalb auch als *Zeeman-Doppler-Imaging* bezeichnet.



Entstehung eines "bumps" im Dopplerprofil einer Spektrallinie durch eine kühlere und damit weniger intensiv strahlende Struktur in der Photosphäre eines Sterns © J.B.Rice, 2002

