

Bernhard · Lindner · Schukowski

Wissensspeicher

Astronomie

Grundbegriffe, Grundgesetze ■ Seite 5

1

Methoden und Instrumente
der Astronomie ■ Seite 17

2

Orientierung am Sternhimmel ■ Seite 33

3

Sonnensystem ■ Seite 51

4

Sterne ■ Seite 99

5

Sternsysteme ■ Seite 121

6

Kosmologie ■ Seite 139

7

Raumfahrt ■ Seite 147

8

Anhang ■ Seite 173

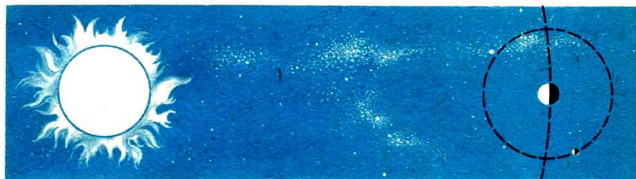
A

Register ■ Seite 183

R

Wissensspeicher Astronomie

Das Wichtigste
in Stichworten und Übersichten



Helmut Bernhard, Klaus Lindner,
Manfred Schukowski



Volk und Wissen
Volkseigener Verlag Berlin
1986

Verfaßt von

Dr. Helmut Bernh rd (4. 1., 4. 3. bis 4. 9., 7., 8.)

Dr. Klaus Lindner (1. 2., 2., 3., 6.)

Prof. Dr. sc. Manfred Schukowski (1. 1., 1. 3., 4. 2., 5.)

ISBN 3-06-081702-2

  Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin 1986

Lizenz-Nr. 203 · 1000/86 (E 081702-1)

LSV 1407

Redaktion: Willi W rstenfeld

Zeichnungen: Heinrich Linkwitz, Horst Boche,

Karl-Heinz Wieland

Einband: Manfred Behrend

Typografie: Atelier vvv, Wolfgang Lorenz

Printed in the German Democratic Republic

Lichtsatz: Karl-Marx-Werk Pößneck V 15/30

Druck und buchbinderische Verarbeitung:

Grafischer Großbetrieb Völkerfreundschaft, Dresden

Schrift: 9/10 p Maxima TVS

Redaktionsschluß: 21. 10. 85

Bestell-Nr. 709 206 1

00710

Inhalt

Grundbegriffe, Grundgesetze	➔	1	Seite	5
Allgemeines	➔	1 1	Seite	5
Zeit	➔	1 2	Seite	8
Grundlegende Gesetze	➔	1 3	Seite	14
Methoden und Instrumente der Astronomie	➔	2	Seite	17
Mittel zur Erkenntnisgewinnung	➔	2 1	Seite	17
Astronomische Beobachtungsinstrumente	➔	2 2	Seite	19
Sternwarten	➔	2 3	Seite	31
Orientierung am Sternhimmel	➔	3	Seite	33
Himmelskugel	➔	3 1	Seite	33
Scheinbare Bewegungen der Gestirne	➔	3 2	Seite	38
Astronomische Koordinaten	➔	3 3	Seite	44
Sonnensystem	➔	4	Seite	51
Aufbau des Sonnensystems	➔	4 1	Seite	51
Sonne	➔	4 2	Seite	53
Planeten	➔	4 3	Seite	60
Mond	➔	4 4	Seite	77
Satelliten bei anderen Planeten	➔	4 5	Seite	86
Planetoiden	➔	4 6	Seite	89
Kometen	➔	4 7	Seite	90
Meteore, Meteoriten	➔	4 8	Seite	91
Entstehung des Sonnensystems	➔	4 9	Seite	95
Sterne	➔	5	Seite	99
Benennung der Sterne	➔	5 1	Seite	99
Helligkeit und Entfernung der Sterne	➔	5 2	Seite	99
Zustandsgrößen der Sterne	➔	5 3	Seite	103

Innerer Aufbau der Sterne	➔	5 4	Seite 109
Hertzsprung-Russel-Diagramm – Sternarten	➔	5 5	Seite 112
Kosmogonie der Sterne	➔	5 6	Seite 117
Sternsysteme	➔	6	Seite 121
Milchstraßensystem	➔	6 1	Seite 121
Andere Sternsysteme	➔	6 2	Seite 131
Kosmologie	➔	7	Seite 139
Struktur des Kosmos	➔	7 1	Seite 139
Geschichte des Kosmos	➔	7 2	Seite 142
Raumfahrt	➔	8	Seite 147
Zum Wesen der Raumfahrt	➔	8 1	Seite 147
Arten der Raumflugkörper	➔	8 2	Seite 148
Dynamik des Raumfluges	➔	8 3	Seite 153
Raumfahrt für die Erde	➔	8 4	Seite 157
Anhang	➔	A	Seite 171
Zeittafel zur Geschichte der Astronomie	➔	A	Seite 171
Zeittafel zur Geschichte der Raumfahrt	➔	A	Seite 178
Register	➔	R	Seite 183

Zur Benutzung des Buches

In diesem Buch ist das Wissen, das im Astronomieunterricht vermittelt wird, ergänzt um einige Fakten, Erscheinungen, Methoden und Verfahren, in knapper und übersichtlicher Form enthalten. Das Buch enthält außerdem Größen und weitere Angaben, die häufig gebraucht werden. Das Wissen ist – unabhängig von der Reihenfolge der Behandlung im Unterricht – nach Sachgebieten gegliedert und zahlreichen *Schlagworten* zugeordnet. Alle Schlagworte sind hervorgehoben und werden erläutert. Bei der Benutzung des Buches ist eine schnelle Orientierung wichtig. Dazu dient eine besondere Leiteinrichtung. Auf dem vorderen Innendeckel des Buches wird ein Überblick über die Abschnitte 1 bis 8 gegeben. Die weitere Untergliederung ist im *Inhaltsverzeichnis* angegeben. In der äußeren oberen Ecke jeder Buchseite wird durch einen *Pfeil* auf die Nummer des jeweiligen Abschnitts und Teilabschnitts des Buches hingewiesen (➔ 1|3). Dadurch wird das Auffinden erleichtert. Die *Überschriften* jedes Teilabschnitts sind durch farbige Schrift hervorgehoben. Zur umfassenden Information über ein bestimmtes Sachgebiet sind oftmals mehrere Schlagworte erforderlich. Außer der Leiteinrichtung enthält das Buch ein alphabetisch geordnetes *Register*.

In diesem Buch verwendete Symbole:

■ Beispiel

➔ Hinweis auf ein anderes Schlagwort

1.1. Allgemeines

Astronomie

Wissenschaft von den Eigenschaften, dem Aufbau, den Bewegungen und der Entwicklung kosmischer Objekte.

Die Astronomie gehört zu den ältesten Naturwissenschaften.

↗ Zeittafel zur Geschichte der Astronomie, S. 171

Forschungsgegenstand. Zustand und Entwicklung des Weltalls sowie der in ihm enthaltenen Systeme und Himmelskörper: Sonnensystem und seine Mitglieder, Sterne und Sternhaufen, Galaxien und Galaxienhaufen, Metagalaxis.

↗ Metagalaxis, S. 139

Sonnensystem		interstellare Gas- und Staubwolken		Gravitations-, Strahlungs- und Magnetfelder
Planeten Satelliten Kometen Planetoiden Meteorite	Sonne Sterne	Sternhaufen (offene und Kugelstern- haufen, As- soziationen)	Milchstra- ßensystem (Galaxis) extra- galaktische Systeme (Galaxien)	Galaxien- haufen

Kosmische Objekte

Wissenschaftsbereiche. Die Astronomie wird in Teilgebiete gegliedert, zwischen denen es vielfältige Beziehungen gibt. Da den Einteilungen unterschiedliche Gesichtspunkte zugrundeliegen, überschneiden sich die Wissenschaftsbereiche teilweise.

Einteilung nach der Art der untersuchten Strahlung	
Teilgebiet	Untersuchte Strahlung
<i>Optische Astronomie</i>	elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen von etwa 400 nm ... 800 nm (optischer Bereich, Licht)
<i>Nichtoptische Astronomie</i>	nicht sichtbare Strahlungen
Radioastronomie	elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen von etwa 1 mm bis 20 m (Radiofrequenzstrahlung)
Infrarot-astronomie	elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen von etwa 0,001 mm ... 1 mm (Infrarotstrahlung)
Ultraviolett-astronomie	elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen von etwa 10 nm ... 400 nm (Ultraviolettstrahlung)
Röntgen-astronomie	elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen kürzer als etwa 10 nm (Röntgenstrahlung, Gammastrahlung)
<i>Neutrino-astronomie</i>	von kosmischen Objekten abgestrahlte Neutrinos ¹⁾

1) In der Astronomie werden auch andere Partikelstrahlungen untersucht (kosmische Strahlung, Sonnenwind), für die gemäß obiger Einteilung kein spezielles Teilgebiet der Astronomie ausgewiesen ist.

Einteilung nach der Zielsetzung und den angewandten Methoden	
Teilgebiet	Zielsetzung/Methoden
<i>Klassische Astronomie</i>	Bestimmung der Positionen und Bewegungen der Himmelskörper mit astrometrischen und himmelsmechanischen Methoden
Astrometrie (sphärische Astronomie, Positions-astronomie)	Vermessung der Positionen der Gestirne an der scheinbaren Himmelskugel sowie Methoden und Instrumente zur Ausführung dieser Aufgabe

Teilgebiet	Zielsetzung/Methoden
Himmelsmechanik	Untersuchung der Bewegungen der Himmelskörper im Raum, die sie unter dem Einfluß der Gravitationskräfte ausführen; Bestimmung der Bahnen von Himmelskörpern (insbesondere von Körpern des Sonnensystems)
<i>Stellarstatistik</i>	Untersuchung der räumlichen Verteilung und Bewegung der Sterne mit statistischen Methoden, um den Aufbau des Milchstraßensystems (und anderer Sternsysteme), die inneren Bewegungsverhältnisse sowie die Verteilung der Sternsysteme im Raum zu erforschen
<i>Astrophysik</i>	Erforschung der physikalischen Eigenschaften und chemischen Zusammensetzung der kosmischen Objekte durch Untersuchung ihrer Strahlung nach Intensität und Zusammensetzung sowie durch theoretische Untersuchungen
<i>Kosmogonie</i>	Erforschung der Entstehung und Entwicklung der Himmelskörper
<i>Kosmologie</i>	Erforschung der Struktur und Entwicklung der Metagalaxis

Weltall, Kosmos, Universum

Gesamtheit des mit Materie erfüllten Raumes. Gegenwärtig ist der astronomischen Forschung ein Raum mit einem Radius von etwa 3 Milliarden Parsec (ungefähr 10 Milliarden Lichtjahren) zugänglich. In diesem derzeit überschaubaren Teil des Weltalls ist schätzungsweise eine Gesamtmasse von etwa 5 Trilliarden ($5 \cdot 10^{21}$) Sonnenmassen verteilt.

↗ Entfernungseinheiten, S. 101

↗ Sonne, S. 53

Himmelskörper

Alle natürlichen Körper im Weltall, insbesondere Sterne, Planeten, Satelliten, Kometen und Meteorite.

Gravitation

Universelle Wechselwirkung aller Materie, die mit deren Eigenschaft verbunden ist, Masse zu besitzen.

Eine spezielle Bezeichnung der Gravitation als *Schwerkraft* kennzeichnet die Anziehung von Massen in der Nähe der Erde oder anderer Himmelskörper durch die Masse der Erde bzw. der anderen Himmelskörper.

➔ Gravitationsgesetz, S. 14

➔ Gravitationsbeschleunigung, S. 108

Astrologie

Irrlehre, nach der das Schicksal und der Charakter eines Menschen durch die Stellung von Himmelskörpern zur Zeit der Geburt des Menschen vorbestimmt seien. Bis in das Mittelalter hinein waren Astronomie und Astrologie eng verknüpft. Mit wachsender astronomischer Erkenntnis – insbesondere seit Copernicus – und der Entwicklung der Astronomie zur *Naturwissenschaft* verlor die Astrologie ihre historische Rechtfertigung.

➔ Zeittafel zur Geschichte der Astronomie, S. 171

1.2. Zeit

Astronomische Zeitdefinition

Einteilung der Zeit durch periodisch ablaufende, an der Himmelskugel beobachtbare Vorgänge. Augenfälligste Zeiteinheit ist der *Tag*, definiert als Dauer einer Umdrehung der Erde um ihre Achse, bezogen auf den Meridiandurchgang der Sonne oder des Frühlingspunktes.

Die Erde rotiert je Sterntag um 360° , je Stunde um 15° , je Minute um $0,25^\circ$.

➔ Sternzeit, S. 11

➔ Sonnenzeit, S. 8

Physikalische Zeitdefinition

Festlegung der Zeiteinheit durch einen periodisch ablaufenden, mit physikalischen Mitteln überwachten Vorgang. Sie ist notwendig, weil die Erdrotation nicht völlig gleichförmig verläuft.

Die Sekunde ist die Dauer von 9192631770 Perioden der Strahlung, die dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes des Atoms Zäsium 133 entspricht.

Sonnenzeit

Von der täglichen scheinbaren Bewegung der Sonne an der Himmelskugel abgeleitete Zeiteinteilung.

Wahre Sonnenzeit. Ungleichförmiges Zeitmaß, das durch unmittelbare Beobachtung der Sonne ermittelt werden kann. Die Zeitspanne zwischen zwei unteren Kulminationen der Sonne ist der *wahre Sonnentag*. Seine Dauer ist nicht konstant, weil sich die Sonne bei ihrer scheinbaren jährlichen Bewegung an der Himmelskugel mit veränderlicher Geschwindigkeit in einer ge-

gen den Himmelsäquator geneigten Bahn, der Ekliptik, bewegt. Die wahre Sonnenzeit wird an *Sonnenuhren* abgelesen.

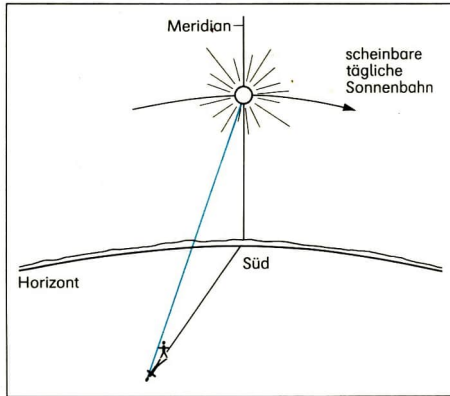
↗ Kulmination, S. 39

↗ Zeitgleichung, S. 10

↗ Keplersche Gesetze, S. 14

↗ Ekliptik, S. 40

Mittlere Sonnenzeit. Nahezu gleichförmiges Zeitmaß, das von einer *gedachten mittleren Sonne* abgeleitet wird.



Obere Kulmination der wahren Sonne. Für den Beobachter ist es 12^h wahre Sonnenzeit.

Die scheinbare jährliche Bewegung der mittleren Sonne erfolgt

- längs des Himmelsäquators,
- in der gleichen Zeit wie die der wahren Sonne,
- mit gleichförmiger Geschwindigkeit.

Eine Umdrehung der Erde, bezogen auf die mittlere Sonne, dauert einen *mittleren Sonnentag*.

Ursachen für Schwankungen der mittleren Sonnenzeit
Reibung zwischen Land und Meer bei Ebbe und Flut
Verlagerungen von Massen im Inneren der Erde
Verlagerung von Luftmassen und Abschmelzen von Eis an den Polen der Erde im Rhythmus der Jahreszeiten
Veränderungen der Lage der Rotationsachse innerhalb der Erde

Mittlere und wahre Sonnenzeit unterscheiden sich im Laufe eines Jahres bis zu 16 Minuten.

➔ Zeitgleichung, S. 10

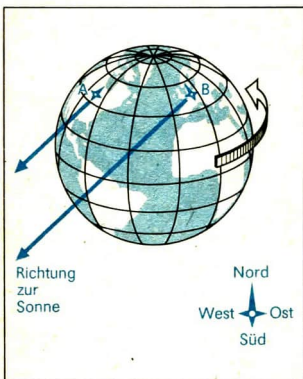
Ortszeit

Auf den Beobachtungsort bezogene Zeitangabe. Der Meridian des Beobachtungsortes gilt als Bezugslinie.

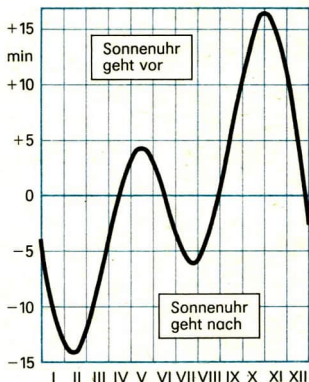
Wahre und mittlere Sonnenzeit sind Ortszeiten: Zwei auf unterschiedlichen geographischen Längen befindliche Uhren zeigen unterschiedliche Zeiten an, weil für die beiden Orte die mittlere bzw. die wahre Sonne zu unterschiedlichen Zeitpunkten kulminiert.

Auch die Sternzeit ist eine Ortszeit.

➔ Sternzeit, S. 11



Für den Beobachter A kulminiert die Sonne, für den Beobachter B ist später Nachmittag.



Kurve der Zeitgleichung

Zeitgleichung

Differenz zwischen wahrer und mittlerer Sonnenzeit. Sie gibt an, wieviel eine Sonnenuhr (wahre Sonnenzeit) gegenüber einer nach mittlerer Sonnenzeit gehenden Uhr vor- oder nachgeht.

Zonenzeit

Eine nach internationalen Vereinbarungen für ein größeres Gebiet (*Zeitzone*) gültige Normalzeit, meist die Ortszeit für Orte auf einem die Zeitzone annähernd halbierenden Meridian.

Westeuropäische Zeit (Greenwicher Zeit, Weltzeit, WEZ) Ortszeit für 0° geogra- phischer Länge	gültig u. a. für Irland, Portugal	12 ^h MEZ = 11 ^h WEZ MEZ - 1 h = WEZ
Mitteleuropäische Zeit (MEZ) Ortszeit für 15° östlicher Länge	gültig u. a. für DDR, BRD, ČSSR, Ungarn, Österreich, Schweiz, Dänemark, Norwe- gen, Schweden	
Osteuropäische Zeit (OEZ) Ortszeit für 30° östlicher Länge	gültig u. a. für Bul- garien, Rumänien, Griechenland, Finnland	12 ^h MEZ = 13 ^h OEZ MEZ + 1 h = OEZ
Moskauer Zeit (MOSKZ) Ortszeit für 45° östlicher Länge	gültig u. a. für Sowjetunion (europäischer Teil), Irak	12 ^h MEZ = 14 ^h MOSKZ MEZ + 2 h = MOSKZ

Die in den Zeitzonen tatsächlich gebräuchlichen Zeiten stimmen nicht immer mit den Zonenzeiten überein.

Sommerzeit

Eine für die Sommermonate festgelegte Zeitverschiebung um 1 h. Ihr Vorteil besteht in der besseren Ausnutzung des Tageslichtes in den Abendstunden. In den meisten mitteleuropäischen Staaten gilt von April bis September die Mitteleuropäische Sommerzeit (MESZ)

Schaltsekunde

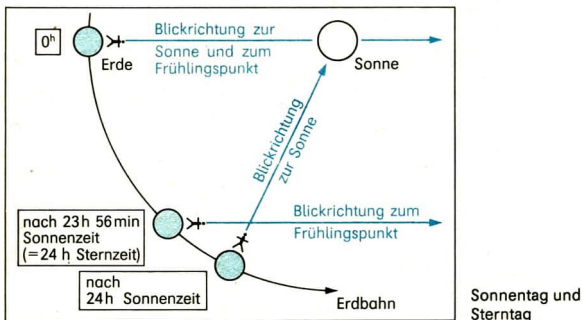
Korrektur, die die Angleichung der physikalisch (durch Atomuhren) bestimmten Zeit an die astronomisch bestimmte Zeit ermöglicht. Sie wird bei Bedarf am 30. Juni oder am 31. Dezember eingefügt oder weggelassen, wenn die Differenz zwischen beiden Zeiten 0,7 s übersteigt.

Sternzeit

In der Astronomie gebräuchliche Zeiteinteilung, die von der Rotation der Erde relativ zum Frühlingspunkt abgeleitet wird. Im Moment der oberen Kulmination des Frühlingspunktes ist 0^h Sternzeit.

Sterntag. Dauer einer Umdrehung der Erde, bezogen auf zwei aufeinanderfolgende obere Kulminationen des Frühlingspunktes. Ein Sterntag ist kürzer als ein mittlerer Sonnentag.

1 Sterntag = 24 h Sternzeit = 23 h 56 min 4,1 s Sonnenzeit,
 24 h Sonnenzeit = 24 h 3 min 56,6 s Sternzeit.
 ↗ Frühlingspunkt, S. 41



Kalender

Einteilung der Zeit durch Zusammenfassung von Vielfachen des Sonnentages. Die natürlichen astronomischen Zeiteinheiten *Monat* und *Jahr* sind nicht ganzzahlige Vielfache des Sonnentages, daher ergeben sich unterschiedliche Möglichkeiten für die Zeiteinteilung.

Jahr. Zeitspanne, die die Erde für einen Umlauf um die Sonne benötigt.

Erdumlauf		
Bezugspunkt	Dauer	Bezeichnung
Frühlingspunkt	365 d 5 h 48 min 46 s	tropisches Jahr
ein beliebiger Stern	365 d 6 h 9 min 9 s	siderisches Jahr

Die Differenz zwischen der Länge des tropischen und des siderischen Jahres ist auf die Präzession zurückzuführen.

↗ Frühlingspunkt, S. 41,
 ↗ Präzession, S. 42

Gemeinjahr. Kalenderjahr zu 365 Tagen. Es ist um etwa 6 h (einen Vierteltag) kürzer als das astronomisch definierte Jahr.

Schaltjahr. Kalenderjahr zu 366 Tagen, das im allgemeinen im Rhythmus von 4 Jahren an die Stelle eines Gemeinjahres tritt. Mit dem zusätzlichen *Schalttag* (29. Februar) wird die kalendermäßige Jahreslänge an die astronomische Jahreslänge angeglichen.

Julianischer Kalender. Vorgänger des gregorianischen Kalenders, im Jahre 46 v. u. Z. unter Julius Caesar eingeführt.

Im Julianischen Kalender folgt jeweils auf drei Gemeinjahre ein Schaltjahr.

4 tropische Jahre dauern 1460,9688 Tage,

4 Jahre nach dem Julianischen Kalender dauern 1461,0000 Tage.

Die verbleibende Differenz von 0,0312 Tagen wächst in 128 Jahren auf einen vollen Tag an. Der Julianische Kalender ist deshalb heute nicht mehr in Gebrauch.

Gregorianischer Kalender. Der heute in den meisten Ländern der Erde allgemein gebräuchliche Kalender. Er wurde im Jahre 1581 durch eine von Papst Gregor XIII. berufene Kommission vorgeschlagen.

Schaltregeln des Gregorianischen Kalenders

Alle Jahre, deren Jahreszahl durch 4 ohne Rest teilbar ist, sind Schaltjahre.
Aber: Alle Jahre, deren Jahreszahl nicht ohne Rest durch 400 teilbar ist, sind Gemeinjahre.

1800, 1900, 2100 sind Gemeinjahre,

1988, 1992, 1996, 2000, 2004 usw. sind Schaltjahre.

400 tropische Jahre dauern 146096,88 Tage,

400 Jahre nach dem Gregorianischen Kalender dauern 146097,00 Tage.

Die verbleibende Differenz kann für die nächsten Jahrtausende vernachlässigt werden.

Julianisches Datum. Eine in der Astronomie viel verwendete durchgängige Zählung der Tage, ohne Einteilung in größere Zeitabschnitte. Jeder Tag erhält somit eine Zahl; Zeitdifferenzen lassen sich dadurch bequem berechnen. Der Anfang der Zählung wurde (willkürlich) auf den 1. 1. 4713 v. u. Z. festgelegt.

Tag im Gregorianischen Kalender	Julianisches Datum
1. 9. 1980	2444484
1. 1. 1990	2447893
1. 1. 2000	2451545

1.3. Grundlegende Gesetze

Gravitationsgesetz

$F = \gamma \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$	<p>F Gravitationskraft γ Gravitationskonstante m_1, m_2 Massen 1 und 2 r Abstand der Massenmittelpunkte</p>
--	---

Die **Gravitationskonstante** ist eine universell gültige Naturkonstante:

$$\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$$

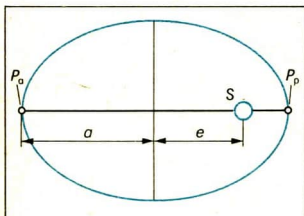
Das Gravitationsgesetz, 1687 von Isaac Newton entdeckt, gilt im gesamten Weltall. Nach ihm berechnen sich die Gewichtskraft der Körper auf der Erde ebenso wie die Bahnbewegungen der künstlichen Himmelskörper, der Planeten um die Sonne, der Doppelsterne um ihren gemeinsamen Schwerpunkt und aller anderen Himmelskörper.

➔ Gravitation, S. 7 ➔ Doppelsterne, S. 113 ➔ Flugbahnen, S. 154

Keplersche Gesetze

1. Keplersches Gesetz (Gesetz von der Bahnform; 1609)

Die Planeten bewegen sich auf Ellipsen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.



- S Sonne
- P_a Planet in Sonnenferne
- P_p Planet in Sonnennähe
- a große Halbachse
- e Exzentrizität

1. Keplersches Gesetz

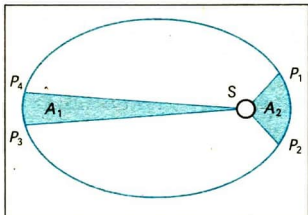
Aus dem 1. Keplerschen Gesetz folgt, daß die Planeten während eines Umlaufes um die Sonne ständig ihre Entfernung zur Sonne ändern.

- Die große Halbachse der Erdbahnelipse (mittlere Entfernung Erde–Sonne) hat $149,6 \cdot 10^6$ km. Die geringste Entfernung der Erde von der Sonne beträgt $147,1 \cdot 10^6$ km (Perihel; Anfang Januar), die größte $152,1 \cdot 10^6$ km (Aphel; Anfang Juli).

➔ Entfernungseinheiten, S. 101

2. Keplersches Gesetz (Gesetz von der Bewegung in der Bahn, Flächensatz; 1609)

Die Verbindungsgerade Sonne–Planet überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.



2. Keplersches Gesetz. Wenn $A_1 = A_2$, dann legt der Planet die Strecke P_1P_2 in derselben Zeit zurück wie die Strecke P_3P_4 . Daraus folgt: In Sonnennähe ist die Bahngeschwindigkeit größer als in Sonnenferne.

Aus dem 2. Keplerschen Gesetz folgt, daß sich die Planeten in Sonnennähe schneller als in Sonnenferne bewegen.

- Die Bahngeschwindigkeit der Erde beträgt im Aphel $29,3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, im Perihel dagegen $30,3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Das Winterhalbjahr ist (auf der Nordhalbkugel der Erde) kürzer als das Sommerhalbjahr (Differenz 7,6 Tage).

➤ Bahnen der Kometen, S. 91

➤ Dynamik des Raumfluges, S. 153

3. Keplersches Gesetz (Gesetz über den Zusammenhang von Bahngröße und Umlaufzeiten; 1619)

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$$

T_1, T_2 Umlaufzeiten der Planeten
1 und 2

a_1, a_2 große Bahnhalbachsen der Planeten
1 und 2

Aus dem 3. Keplerschen Gesetz folgt, daß die Bahngeschwindigkeit der Planeten mit wachsendem Sonnenabstand abnimmt.

In der obigen Form gilt das Gesetz nur, wenn die Masse des Zentralkörpers sehr groß gegenüber den Massen der umlaufenden Körper ist. Das ist im Falle der Planeten gegenüber der Sonne ebenso wie im Falle der Raumflugkörper gegenüber der Erde gegeben.

➤ Heliozentrische Bewegungen, S. 61

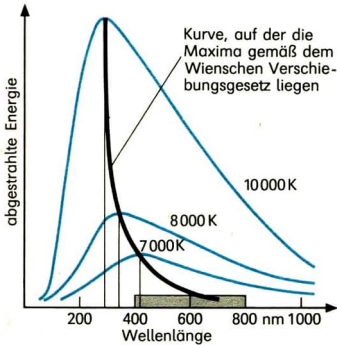
Strahlungsgesetze

Wiensches Verschiebungsgesetz (1893)

Das Maximum der Strahlungsintensität verschiebt sich mit wachsender Temperatur zu immer kleineren Wellenlängen.		$\lambda_{\max} \sim \frac{1}{T}$
λ_{\max}	Wellenlänge des Strahlungsmaximums	T Temperatur

Stefan-Boltzmannsches Gesetz (1878/84)

Die Gesamtstrahlungsenergie eines Körpers wächst mit der 4. Potenz seiner Temperatur.		$W_{\text{ges}} \sim O \cdot T^4$
W_{ges} T	Gesamtstrahlungsenergie Temperatur	O Oberfläche



Stefan-Boltzmannsches Gesetz und Wiensches Verschiebungsgesetz

2.1. Mittel zur Erkenntnisgewinnung

Beobachtung

Bewußte und zielgerichtete Wahrnehmung realer Objekte und Erscheinungen. Sie ist für die Astronomie das wichtigste Mittel, um Kenntnisse über kosmische Objekte zu gewinnen und um die Wahrheit theoretischer Aussagen zu prüfen.

Bewußtheit und Zielgerichtetheit beziehen sich auf

- Auswahl der Objekte,
- Studium der Erscheinungen,
- Auswertung der Beobachtungsergebnisse.

Bei der astronomischen Beobachtung ist es nicht möglich; durch menschliche Einwirkung einen bestimmten kosmischen Vorgang zu verändern oder zu wiederholen. Der Beobachter kann also die Beobachtungsobjekte nicht beeinflussen; er bleibt in bezug auf den Ablauf des untersuchten Vorganges passiv.

■ Untersuchung der äußeren Bereiche der Sonnenkorona

Sie können nur beobachtet werden

- während einer totalen Sonnenfinsternis,
- von einem Beobachtungsort aus, der sich in der Totalitätszone befindet,
- wenige Minuten lang,
- bei wolkenfreiem Himmel.

Diese Bedingungen muß der Beobachter bei der Planung, Durchführung und Auswertung seiner Arbeit beachten.

Wichtigste Fragen bei der astronomischen Beobachtung:

- Aus welcher Richtung kommt die beobachtete Strahlung?
- Wie groß ist die Intensität der beobachteten Strahlung?
- Wie ist die beobachtete Strahlung zusammengesetzt?

Experiment

Kontrollierte, planmäßige und absichtsvolle Einwirkung auf ein Objekt, bei der die Bedingungen bewußt geschaffen und nach Bedarf verändert werden. Experimente sind wiederholbar. Beim Experimentieren wirkt der Mensch aktiv auf die untersuchten Objekte und Erscheinungen ein. In der Astronomie sind Experimente relativ selten.

Untersuchung der chemischen Zusammensetzung eines Mondes oder Planeten (nach Rückführung von Bodenproben auf die Erde oder an Ort und Stelle durch automatische Laboreinrichtungen)

Das Untersuchungsobjekt kann jederzeit und beliebig lange

- unterschiedlichen chemischen Reaktionen,
 - unterschiedlichen physikalischen Einwirkungen
- unterworfen werden

Theorie

Systematisch geordnete Menge von Aussagen; in den Naturwissenschaften Resultat der gedanklichen Verarbeitung der Ergebnisse von Beobachtungen und Experimenten. Dabei werden diese Ergebnisse erklärt, zur *Überprüfung von Hypothesen* herangezogen sowie für die Schaffung von *Denkmodellen* und zur *Vorhersage* von Erscheinungen eingesetzt.

Modell. In der Astronomie ist ein Modell eine gedankliche – oft mathematisch formulierte – Widerspiegelung einer Klasse astronomischer Objekte im menschlichen Bewußsein, die bezüglich einer oder mehrerer Eigenschaften gleichartig sind.

Viele individuelle Eigenschaften der Objekte werden dabei vernachlässigt, andere hinzugefügt.

- Ein *Sternmodell* ist ein System von Gleichungen, die den physikalischen Zustand eines Sterns beschreiben.

Modellrechnung. Die Schaffung eines (mathematischen) Modells erfordert wegen der Kompliziertheit der mathematischen Operationen einen erheblichen Rechenaufwand.

- Eine Theorie der Sternentwicklung entstand erst, nachdem durch den Einsatz von elektronischen Rechenanlagen in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts umfangreiche und komplizierte Berechnungen im mathematischen Modell der Sternentwicklung relativ schnell ausgeführt werden konnten.

Theorie und Praxis. Wie in jeder Wissenschaft ist in der Astronomie die Praxis das Kriterium dafür, daß die Theorie die objektive Realität richtig widerspiegelt. Die Überprüfung der Theorie durch die Praxis erfolgt mit Hilfe von Beobachtungen und Experimenten.

- Die Existenz der Drei-Kelvin-Strahlung wurde 1948 von Gamow theoretisch vorausgesagt. Ihre Entdeckung – die Bestätigung der Vorhersage – gelang Penzias und Wilson im Jahre 1965.
- Die Existenz niederen Lebens auf dem Mars wurde auf Grund der dort herrschenden physikalischen und chemischen Bedingungen bis 1976 allgemein für möglich gehalten. Erst die experimentelle Untersuchung von Marsbodenproben durch die Raumsonden Viking 1 und 2 im Jahre 1976 zeigte, daß auf dem Mars wahrscheinlich keinerlei Lebensformen existieren.

2.2. Astronomische Beobachtungsinstrumente

Optische Teleskope

Beobachtungsinstrumente, mit deren Hilfe von den kosmischen Objekten

- mehr Licht gesammelt wird, als es dem menschlichen Auge möglich ist,
- vergrößerte Bilder erzeugt werden können.

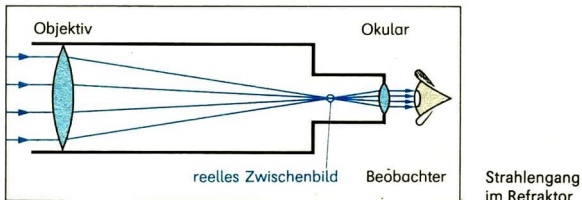
Das vom Objekt kommende Licht fällt auf eine lichtsammelnde Optik (Objektiv), die in ihrer Brennebene ein reelles, umgekehrtes, verkleinertes Bild des Objekts erzeugt.

Dieses Bild wird	
bei <i>visueller</i> Beobachtung	mittels einer Vergrößerungsoptik (Okular) betrachtet,
bei <i>photographischer</i> Beobachtung	auf einer lichtempfindlichen Schicht (Photoplatte oder Film) entworfen,
bei <i>photoelektrischer</i> Beobachtung	auf einem lichtelektrischen Empfänger (Photozelle, Sekundärelektronenvervielfacher, Bildverstärker) entworfen.

Durch den Übergang von visueller zu photographischer oder photoelektrischer Beobachtung wird die Reichweite eines Fernrohrs (das ist die Fähigkeit, immer schwächere Objekte der Beobachtung zugänglich zu machen) erheblich erhöht. Objektiv und Okular sind in einem Rohr oder in einer Gitterkonstruktion (Tubus) so montiert, daß die Entfernung zwischen beiden zur Einstellung der höchsten Bildschärfe verändert werden kann.

Refraktor (Linsenfernrohr)

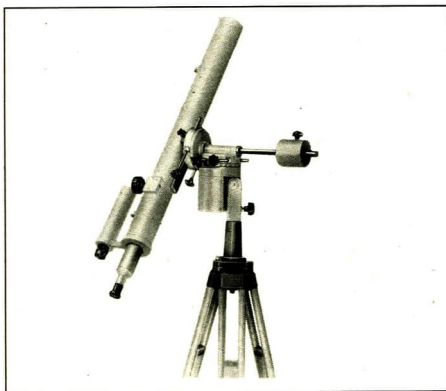
Das Objektiv ist beim Refraktor eine Sammellinse bzw. eine als Sammellinse wirkende Kombination optischer Linsen. Durch die Zusammenstellung verschiedener Linsen zu einem Objektiv kann die lichtsammelnde Wirkung des Objektivs dem Verwendungszweck des Refraktors angepaßt werden.



Instrumententyp	Beobachtung	Höchste Bildschärfe
visueller Refraktor	mit dem Auge	im grünen Spektralbereich
photographischer Refraktor (Astrograph, Astrokamera)	photographisch	im blauen Spektralbereich

Wegen der Schwierigkeiten bei der Herstellung großer optischer Linsen und bei ihrer Halterung (Gefahr des Durchbiegens) in den Objektivfassungen der Teleskope wurden Refraktoren nur bis zu einer maximalen Objektivöffnung von 1,02 m gebaut.

- Der größte *visuelle* Refraktor befindet sich im Yerkes-Observatorium in Williams Bay, Wisconsin, USA (Objektivöffnung 1,02 m).
- Der größte *photographische* Refraktor befindet sich im Astrophysikalischen Observatorium des Zentralinstituts für Astrophysik in Potsdam (Objektivöffnung 0,8 m; Tubuslänge \approx Objektivbrennweite = 12 m).
- Das Schulfernrohr *Telementor* ist ein visueller Refraktor mit einer Objektivöffnung von 63 mm und einer Objektivbrennweite von 840 mm.



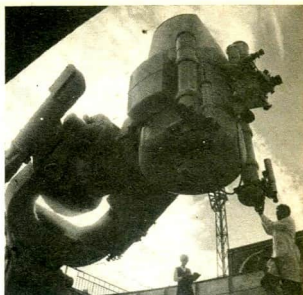
Refraktor:
Schulfernrohr
TELEMENTOR

- Ein *Feldstecher* (Fernglas) ist ein kleiner visueller Refraktor, in dem der Strahlenverlauf durch Prismen mehrfach umgelenkt wird. Dadurch weisen Feldstecher eine sehr geringe Länge auf und erzeugen – im Gegensatz zu allen astronomischen Teleskopen – aufrechte Bilder. Sie werden meist als Doppelfernrohre konstruiert.

Reflektor (Spiegelteleskop)

Das Objektiv ist beim Reflektor ein Hohlspiegel (Kugelkappe oder Paraboloid).

Reflektoren können mit weit größeren Abmessungen hergestellt werden als Refraktoren.



Reflektor: Hauptspiegel mit einem Durchmesser von 107 cm (Gissar Observatorium, Tadshikische SSR)

Refraktor	Reflektor
Objektivlinsen müssen beidseitig bearbeitet (geschliffen und poliert) werden.	Der Spiegel braucht nur auf einer Fläche bearbeitet zu werden.
Objektivlinsen müssen spannungs- und schlierenfrei sein.	Der Spiegel braucht nur eine optisch einwandfreie Oberfläche zu haben.
Objektivlinsen können nur am Rand in einer Fassung befestigt werden; sie verformen sich daher leicht.	Die gesamte Fläche der Spiegelfrückseite kann in der Spiegelfassung unterstützt werden, so daß Verformungen kaum auftreten.

- Der größte Reflektor befindet sich im Astrophysikalischen Spezial-Observatorium der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, Staniza Selentschukskaja im Kaukasus, RSFSR (Objektivdurchmesser 6 m, Brennweite 24 m).

Reflektoren werden in verschiedenen Ausführungen hergestellt. Sie unterscheiden sich darin, ob und wie das vom Hauptspiegel reflektierte Licht aus dem Tubus herausgelenkt wird (→ S.22).

Beim *Schmidt-Teleskop* (Schmidt-Spiegel), das sich durch eine hohe Abbildungsgüte über ein großes Gesichtsfeld hinweg auszeichnet, durchlaufen die Strahlen bereits vor der Reflexion am Hauptspiegel eine kompliziert geformte Linse, die Korrekptionsplatte. Schmidt-Teleskope sind nur für photographische Beobachtung geeignet.

- Das größte Schmidt-Teleskop befindet sich im Karl-Schwarzschild-Observatorium des Zentralinstituts für Astrophysik in Tautenburg bei Jena (Hauptspiegeldurchmesser 2 m, Korrekptionsplattendurchmesser 1,34 m, Brennweite 4 m).

<p>Newton-Teleskop</p> <p>Das Licht wird mittels eines planen Hilfsspiegels seitlich aus dem Tubus herausgelenkt.</p>	
<p>Cassegrain-Teleskop</p> <p>Das Licht wird mittels eines hyperbolischen Hilfsspiegels durch den (durchbohrten) Hauptspiegel aus dem Tubus herausgelenkt.</p>	
<p>Schmidt-Teleskop</p> <p>Das Licht wird nicht aus dem Tubus herausgelenkt.</p>	

Mehrspiegelteleskop. Die Vereinigung mehrerer Hauptspiegel mit gemeinsamem Brennpunkt zu einem optischen System schafft die Möglichkeit, ökonomisch vertretbar große Empfängerflächen zu realisieren. Die Einzelspiegel und die zugeordneten Hilfsspiegel werden dabei von Rechnern gesteuert; ihre gegenseitige Lage wird durch Laserstrahlen kontrolliert.

- Das erste Mehrspiegelteleskop befindet sich auf dem Mt. Hopkins (Arizona, USA). Sechs Spiegel von je 1,8 m Durchmesser ergeben ein Gerät mit der optischen Leistung eines 4,8-m-Spiegelteleskops.

Koronograph. Die Korona und die Protuberanzen der Sonne können mit einem speziell dafür konstruierten Teleskop, dem Koronographen, beobachtet und photographiert werden. Sein wichtigstes Bauelement ist eine Blende, die im Strahlengang eine „künstliche Sonnenfinsternis“ bewirkt.

Vergrößerung. Der Sehwinkel eines Objekts ist bei der Beobachtung mit einem Teleskop größer als bei der Beobachtung mit dem bloßen Auge.

$$\text{Vergrößerung } N = \frac{f_1}{f_2}$$

f_1 Objektivbrennweite
 f_2 Okularbrennweite

- Schulfernrohr Telementor; $f_1 = 840$ mm

f_2	N
40 mm	21fach
25 mm	34fach
16 mm	53fach
10 mm	84fach

Bei photographischer Beobachtung wird ein Objekt in der Brennebene um so größer abgebildet, je größer die Objektivbrennweite ist.

Teleskop	f_1	Bilddurchmesser eines Objekts von 1° Winkeldurchmesser
Schulfernrohr Telementor	840 mm	1,47 cm
2-m-Spiegelteleskop	4 m	7 cm
6-m-Spiegelteleskop	24 m	42 cm

Auflösungsvermögen

Kleinstmöglicher Winkelabstand zwischen zwei punktförmigen Lichtquellen, die mit einem Teleskop gerade noch getrennt dargestellt werden können. Es ist vom Objektivdurchmesser und von der Wellenlänge der beobachteten Strahlung abhängig.

Teleskop	Objektivdurchmesser	Auflösungsvermögen	
		theoretisches	praktisches
Schulfernrohr Telementor	63 mm	1,8"	2"
2-m-Spiegelteleskop	2 m	0,06"	0,5"
6-m-Spiegelteleskop	6 m	0,02"	0,5"

Das bloße Auge hat ein theoretisches Auflösungsvermögen von $1'$. In der Praxis wird – auch wegen der Luftunruhe – das theoretische Auflösungsvermögen nicht erreicht.

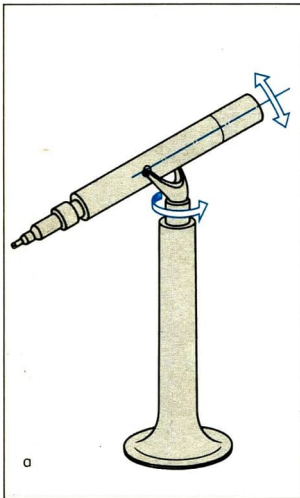
Lichtstärke. Bei der Beobachtung von Sternen und anderen punktförmig erscheinenden Lichtquellen ist die Lichtstärke vom Objektivdurchmesser abhängig, bei der Beobachtung flächenhafter Objekte (Kometen, Nebel) dagegen vom Öffnungsverhältnis $D : f_1$ (D Objektivdurchmesser; f_1 Objektivbrennweite).

Montierung

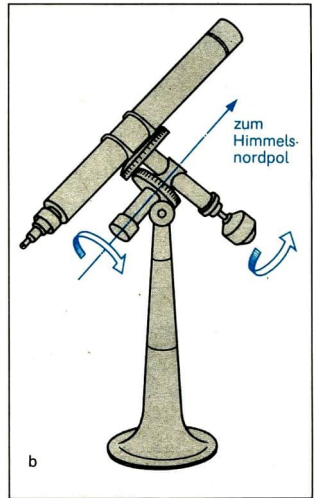
Aus Tragkonstruktion und beweglichem Achsensystem bestehender Teil eines Fernrohres. Die Montierung muß das optische System

- erschütterungsfrei in jeder beliebigen Beobachtungsrichtung fixieren können,
- gleichmäßig der Bewegung der Gestirne nachführen.

Die Tragkonstruktion ist bei kleinen Fernrohren oft ein transportables Stativ, bei größeren meist eine ortsfeste Säule. Das Achsensystem weist in der Regel zwei Achsen auf, die als *azimutales* oder als *parallaktisches* (äquatoriales) System konstruiert sein können.



Fernrohrmontierungen:
a) azimutale Montierung,



b) parallaktische Montierung

	Azimutale Montierung	Parallaktische Montierung
<i>Ortsfeste Achse</i>	Standachse	Stundenachse
weist zum	Zenit	Himmelsnordpol
Bei Drehung um die ortsfeste Achse ändert sich	das Azimut	der Stundenwinkel
<i>Bewegliche Achse</i>	Kippachse	Deklinationsachse
weist zu einem Punkt des	Horizonts	Himmelsäquators
Bei Drehung um die bewegliche Achse ändert sich	die Höhe	die Deklination

<i>Vorteil</i>	einfacher Aufbau	einfache Nachführung durch gleichmäßige Bewegung um nur eine Achse (die Stundenachse)
<i>Nachteil</i>	komplizierte Nachführung durch ungleichmäßige Bewegung um beide Achsen, dabei Drehung des Gesichtsfeldes	komplizierte Konstruktion, lageabhängige Belastung der Achsen und Lager
<i>Anwendung</i>	bei kleinen Schul- und Amateurfernrohren, bei den größten Forschungsteleskopen (mit rechnergesteuerter Nachführung)	bei den meisten mittleren und großen Teleskopen

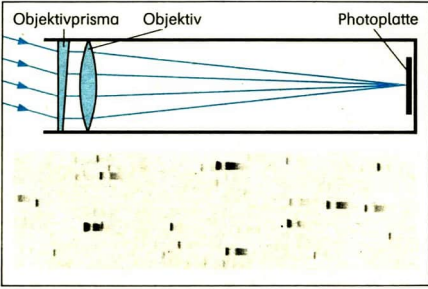
- ↗ Himmelspole, S. 34
- ↗ Himmelsäquator, S. 34
- ↗ Tägliche Bewegung der Gestirne, S. 38
- ↗ Horizontsystem, S. 45
- ↗ Ruhendes Äquatorsystem, S. 47

Coelostat. In manchen Fällen (Sonnenbeobachtung) wird das optische Teleskopsystem ortsfest aufgestellt. Die zu untersuchende Strahlung muß dann durch ein vorgesetztes Spiegelsystem, den *Coelostaten*, in den Tubus gelenkt werden.

- Turmteleskope zur Beobachtung der Sonne enthalten meist ein senkrechtes, unbewegliches Fernrohr, in das das Licht durch einen Coelostaten von oben eingespiegelt wird.

Zusatzgeräte zu optischen Teleskopen

Geräte, die in den Strahlengang vor, in oder hinter einem optischen Teleskop eingeschaltet werden und eine intensivere oder präzisere Untersuchung des Lichtes ermöglichen.

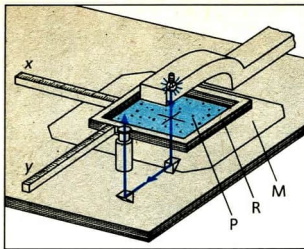
<p>Mikrometer</p>	<p>Gerät zur genauen Messung des Winkelabstandes und des Positionswinkels zweier Gestirne, meist mit dem Okular eines Teleskops bei visueller Beobachtung kombiniert</p>
<p>Photometer</p>	<p>Gerät zur Messung der scheinbaren Helligkeit eines Objekts. Am Fernrohr werden fast ausschließlich lichtelektrische Photometer benutzt; sie arbeiten auf der Grundlage des lichtelektrischen Effekts und liefern einen elektrischen Strom, dessen Stärke von der Stärke der einfallenden Strahlung abhängt. Maximale Genauigkeit: besser als 0,01 Größenklasse</p>
<p>Spektrograph</p>	<p>Gerät zur Zerlegung der Strahlung in ein Spektrum und zur photographischen oder lichtelektrischen Aufzeichnung dieses Spektrums. Das lichterzerlegende Element ist meist ein Beugungsgitter.</p>
<p>Objektivprisma</p>	 <p>Das Diagramm zeigt den optischen Aufbau eines Spektrographen. Von links nach rechts sind ein Objektivprisma, ein Objektiv und eine Photoplatte beschriftet. Parallel einfallende Lichtstrahlen werden durch das Prisma und das Objektiv so gebrochen, dass sie sich in einem Punkt auf der Photoplatte fokussieren. Darunter ist ein Foto eines Spektrogramms zu sehen, das als Reihe von horizontalen schwarzen Balken auf hellem Grund erscheint.</p>

	Dreikantprisma aus Glas mit sehr kleinem brechendem Winkel, das vor das Objektiv eines optischen Teleskops gesetzt wird (oberes Bild). Bei photographischer Beobachtung entstehen auf der Platte anstelle kreisförmiger Sternbildchen kleine Spektren, die z. B. eine Zuordnung der Sterne zu bestimmten Spektralklassen ermöglichen (unteres Bild).
Bildverstärker	Gerät, das das optische Bild durch den lichtelektrischen Effekt in ein elektronenoptisches Bild mit bis zu 100fach größerer Helligkeit umwandelt; dieses Bild wird auf photographischem Weg aufgezeichnet.

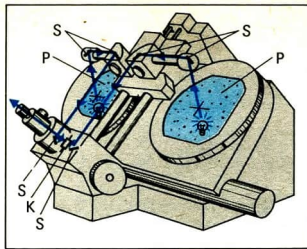
Auswertegeräte

Geräte, die der Verdichtung und Auswertung der Beobachtungsergebnisse dienen. Meist setzen sie die bildmäßige Information in Zahlenwerte um. Moderne Auswertegeräte gestatten den Anschluß von elektronischen Datenverarbeitungsanlagen und geben die Daten in entsprechender Form aus (Lochstreifen, Magnetbänder, Disketten u. ä.).

Mikrophotometer	Gerät zur Messung der Schwärzungen auf einer photographischen Platte, meist als lichtelektrisches Photometer konstruiert	Mikrophotometer und Koordinatenmeßgerät können in einem Gerät vereinigt sein.
Koordinatenmeßgerät	Gerät zur Bestimmung von Gestirnskoordinaten auf photographischen Himmelsaufnahmen. Das wesentliche Bauelement ist ein Mikroskop; die linearen gegenseitigen Abstände der Sternbildchen werden bis auf 0,0002 mm genau gemessen.	
Komparator	Gerät, mit dem zwei zu unterschiedlichen Zeitpunkten gewonnene photographische Aufnahmen der gleichen Himmelsgegend miteinander verglichen werden. Durch stereoskopische oder wechselweise Betrachtung der Platten können Objekte, die auf den Aufnahmen unterschiedliche scheinbare Helligkeiten oder unterschiedliche Positionen aufweisen bzw. neu hinzugekommen sind, aufgefunden werden.	



Prinzip eines Koordinatenmeßgerätes.
 x, y Maßstäbe,
 R Plattenrahmen,
 P auszumessende Photoplatte,
 M Meßtisch, auf dem die Photoplatte
 in x- und y-Richtung
 verschoben werden kann



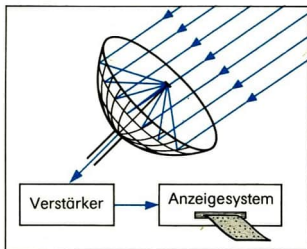
Sternplattenkomparator mit Strahlen-
 gang.
 S Spiegel,
 P zu vergleichende Photoplatten,
 K Kippspiegel, der abwechselnd Licht
 vom linken und vom rechten Strahl in das
 Okular reflektiert

Radioteleskope

Instrumente zum Empfang von Radiostrahlung, d. h. elektromagnetischen Hertzschen Wellen, aus dem Weltall. Die Erdatmosphäre schirmt Wellen mit Wellenlängen unter etwa 1 mm und über 20 m ab.

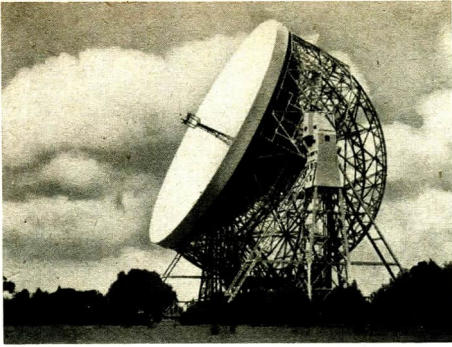
Ein Radioteleskop besteht aus einer Antenne (Reflektor und Dipol, Dipol-system), einem Verstärker und einem Registriergerät.

Hauptbaugruppen eines Radioteleskops



Parabolische Reflektoren. Ein Metall- oder Metallnetzparaboloid konzentriert wie ein Hohlspiegel die einfallende Radiostrahlung auf eine in seinem Brennpunkt befindliche Antenne (Dipol). Das Auflösungsvermögen ist wegen der im Vergleich zum Licht sehr großen Wellenlänge auch bei großen Reflektordurchmessern sehr gering.

- Der größte bewegliche Reflektor befindet sich bei Effelsberg (BRD). Sein Durchmesser beträgt 100 m, sein Auflösungsvermögen 8' (bei $\lambda = 20$ cm).
 - Der größte feststehende Reflektor hat einen Durchmesser von 600 m. Er befindet sich im Astrophysikalischen Spezial-Observatorium der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, Staniza Selentschukskaja im Kaukasus, RSFSR.
- ➔ Optische Teleskope, S. 19
 ➔ Reflektor, S. 21



100-m-Radioteleskop bei Effelsberg (BRD)

Systeme von Einzelantennen. Durch die elektronische Kopplung mehrerer Einzelantennen wird das Auflösungsvermögen radioastronomischer Beobachtungsanlagen erheblich verbessert. Dabei werden Interferenzerscheinungen der einfallenden Radiowellen genutzt. Solche Anlagen heißen *Radiointerferometer*.

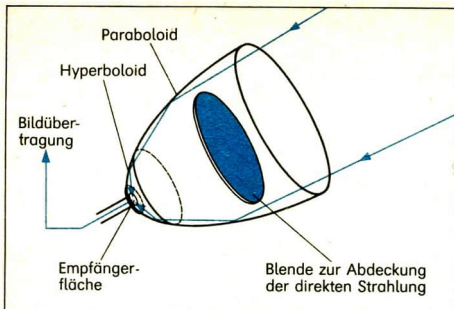
- Die durch Rechenanlagen vermittelte Kopplung von Radioteleskopen, die mehrere tausend Kilometer voneinander entfernt sind, ermöglicht Beobachtungen mit einem Auflösungsvermögen von 0,0002“.

Infrarotteleskope

Beobachtungsinstrumente zur Untersuchung der von kosmischen Objekten ausgesandten Infrarotstrahlung, einer elektromagnetischen Wellenstrahlung mit Wellenlängen zwischen 0,001 mm und 1 mm. Die Erdatmosphäre ist nur in sehr schmalen Wellenlängenbereichen für solche Strahlung durchlässig, deshalb werden Infrarotteleskope auf sehr hohen Bergen, in Flugzeugen, in Stratosphärenballons oder in künstlichen Erdsatelliten und Raumstationen installiert. Die Strahlung wird mit Hilfe tiefgekühlter Photoelemente oder Photowiderstände nachgewiesen; die Kühlung (bis auf wenige K) ist erforderlich, um die Empfindlichkeit der Detektoren zu erhöhen und um Störungen durch die Wärmebewegung der Ladungsträger in den Empfängerteilen auszuschalten.

Röntgenteleskope

Beobachtungsinstrumente zur Untersuchung der von kosmischen Objekten ausgesandten Röntgenstrahlung, einer elektromagnetischen Strahlung mit Wellenlängen zwischen 0,001 nm und 10 nm. Da Röntgenstrahlung die Erdatmosphäre nicht durchdringt, müssen Röntgenteleskope in künstlichen Erdsatelliten und Raumstationen installiert werden.



Strahlengang in einem abbildenden Röntgenteleskop. Die einfallende Strahlung wird an zwei Spiegelflächen streifend reflektiert.

<p>Nichtabbildende Röntgenteleskope</p>	<p>Nachweisgeräte, die Richtung und Stärke der Röntgenstrahlung registrieren. Sie arbeiten nach dem Zählrohr-Prinzip oder mit Halbleiterbauelementen als Strahlungsempfänger.</p>
<p>Abbildende Röntgenteleskope</p>	<p>Spezielle Spiegelteleskope, die ein Bild der Röntgenstrahlungsquelle auf eine Empfängerfläche entwerfen. Das Bild wird meist elektronisch abgetastet und weiterverarbeitet, die Bildauflösung beträgt etwa 2,5".</p>

Raumteleskope

Optische und Infrarotteleskope, die in Raumflugkörpern außerhalb der Erdatmosphäre installiert sind.

<p>Vorteile</p>	<p>Wegfall der durch die Erdatmosphäre bewirkten Behinderung und Bildverschlechterung. Mit einem Teleskop von 2,4 m Öffnung kann das theoretische Auflösungsvermögen von 0,05" erreicht werden, Objekte bis zur 29. Größenklasse werden beobachtbar.</p>
<p>Nachteile</p>	<p>hohe Kosten, schwierige automatische Ausrichtung auf die zu beobachtenden Objekte</p>

Raumteleskope befinden sich gegenwärtig in der Erprobung.

2.3. Sternwarten

Forschungsternwarten

Astronomische Beobachtungsinstitute, die der wissenschaftlichen Forschung dienen; meist Gebäudekomplexe mit Kuppelbauten für die Teleskope. Forschungsternwarten sind oft einer Akademie oder einer Universität angeschlossen. Sie befinden sich meist in großer Entfernung von Städten und industriellen Ballungsgebieten.

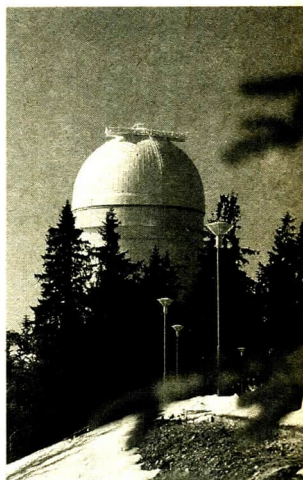
- Forschungsternwarten in der DDR

Ort	Einrichtung
Dresden	Technische Universität
Jena	Friedrich-Schiller-Universität
Potsdam Potsdam-Babelsberg Sonneberg Tautenburg	Zentralinstitut für Astrophysik der Akademie der Wissenschaften der DDR

Volkssternwarten

Astronomische Einrichtungen, die der Verbreitung astronomischer Kenntnisse in der Bevölkerung und der amateurmäßigen astronomischen Beobachtung dienen. In vielen Volkssternwarten wird neben der Popularisierung der Astronomie auch Zuarbeit für die Forschung geleistet.

- Die größte Volkssternwarte der DDR ist die Archenhold-Sternwarte in Berlin.



Forschungsternwarte
Bulgarisches Nationalobservatorium

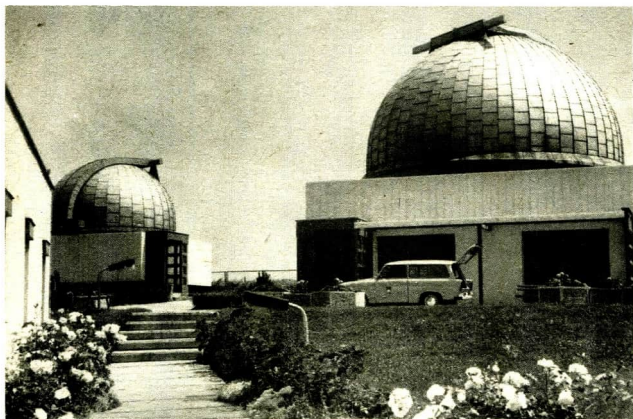
Schulsternwarten

Sternwarten für den Astronomieunterricht und die außerunterrichtliche Tätigkeit von Schülern auf dem Gebiet der Astronomie. Größere Schulsternwarten sind vielfach mit einem Planetarium verbunden.

Größere Schulsternwarten in der DDR (Auswahl).

8600 Bautzen, Czornebohstr. 82
 9630 Crimmitschau, Straße der Jugend 8
 7280 Eilenburg, Am Mansberg
 8122 Radebeul, Auf den Ebenbergen
 9706 Rodewisch, Rützengrüner Str. 41 a
 2500 Rostock, Nelkenweg
 2700 Schwerin, Weinbergstr. 17
 6000 Suhl, Hoheloh

➤ Planetarium, S. 37



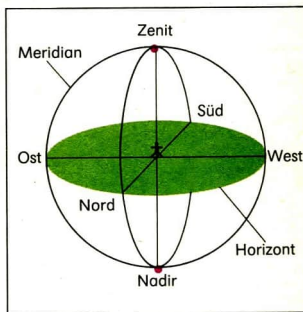
Sternwarte Johannes Franz Bautzen

3.1. Himmelskugel

Himmelskugel

Scheinbare, den Beobachter allseitig umgebende Kugel mit unendlich großem Radius, auf der die Gestirne gesehen werden. Sie ist eine Hilfsvorstellung und dient dazu, die von einem bestimmten Beobachtungsort aus sichtbaren Stellungen der Gestirne zu beschreiben.

Vielfach wird die Himmelskugel auf Abbildungen so dargestellt, daß sich der Betrachter auf einem fiktiven, außerhalb der Kugel befindlichen Standort befindet.



Himmelskugel mit Horizont und Meridian

Horizont

Trennlinie zwischen dem für einen Beobachter von einem bestimmten Beobachtungsort aus sichtbaren (oberen) und dem für diesen Beobachter nicht sichtbaren (unteren) Teil der Himmelskugel. Die *Horizontebene* ist die Ebene durch den Beobachtungsort, auf der die Lotlinie senkrecht steht. Die *Horizontlinie* entsteht durch den Schnitt der *Horizontebene* mit der Himmelskugel.

Scheinbarer Horizont. Unabhängig von Sichtbegrenzungen durch das Bodenrelief gedachte Horizontlinie in Augenhöhe des Beobachters.

Landschaftlicher (natürlicher) Horizont. Sichtbare, untere Begrenzungslinie der Himmelskugel gegen die Berge, Bäume, Häuser usw. in der Umgebung des Beobachters. Er zeigt meist einen sehr unregelmäßigen Verlauf.

Zenit

Punkt an der Himmelskugel senkrecht über dem Beobachter. Der Zenit wird als Schnittpunkt der Lotlinie mit der Himmelskugel ermittelt.

Nadir

Punkt an der unsichtbaren Hälfte der Himmelskugel senkrecht unter dem Beobachter.

Meridian

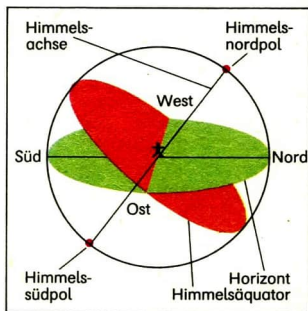
auf der Erde jeder Kugelhalbkreis, der durch beide Pole verläuft und den Äquator senkrecht schneidet;
an der Himmelskugel der größte Kreis, der durch Nordpunkt, Zenit und Südpunkt verläuft. Er teilt die Himmelshalbkugel in eine östliche und eine westliche Hälfte.

↗ Kulmination, S. 39

Himmelspole

Zwei Punkte an der Himmelskugel, die bei der scheinbaren täglichen Bewegung der Gestirne in Ruhe verbleiben. Der auf der nördlichen Hälfte der Himmelskugel befindliche *Himmelsnordpol* befindet sich im Sternbild *Kleiner Bär*; dessen Hauptstern (*Polarstern*) ist nur etwa 1° vom Pol entfernt. Der südliche Himmelspol ist von Europa aus nicht sichtbar, er liegt im Sternbild *Oktant*.

Die gedachte Gerade Himmelsnordpol – Beobachter – Himmels-südpol heißt *Himmelsachse*. Sie ist die Rotationsachse der scheinbaren täglichen Bewegung der Gestirne.



Himmelskugel mit Horizont, Himmelsäquator und Himmelsachse

Himmelsäquator

Größter Kreis an der Himmelskugel, dessen Ebene senkrecht zur Himmelsachse steht. Er teilt die Himmelskugel in eine nördliche und eine südliche Hälfte. Für einen Beobachter auf der Nordhalbkugel der Erde ist der über dem Horizont befindliche Teil des Himmelsäquators ein geneigter Halbkreis, der durch den Ost- und den Westpunkt des Horizonts verläuft und im Süden, wo er den Meridian schneidet, seine größte Höhe erreicht. (Die Höhe h des Schnittpunktes von Himmelsäquator und Meridian kann aus der geographischen Breite φ des Beobachtungsortes berechnet werden: $h = 90^\circ - \varphi$).

Wegen der Neigung des Himmelsäquators zum Horizont können Beobachter auf der Nordhalbkugel der Erde auch Teile der südlichen Himmelshalbkugel sehen.

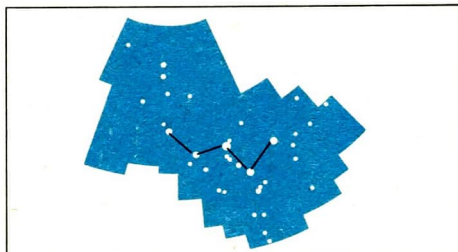
Sternnamen

Eigenamen für die helleren Sterne, zumeist aus dem arabischen, griechischen und römischen Kulturkreis stammend. In der wissenschaftlichen Literatur werden die Sterne meist nicht mit den historischen Namen, sondern mit einem (griechischen oder lateinischen) Buchstaben oder einer Katalognummer und der Abkürzung des Genitivs des lateinischen Sternbildnamens bezeichnet.

Stern und Sternbild	Ursprüngliche Form	Bedeutung	Wissenschaftliche Bezeichnung
Beteigeuze (Orion)	yad al-gaūza (arab.)	Hand des Orion	α Ori
Prokyon (Kleiner Hund)	procyon (griech.)	Vorhund	α CMi
Atair (Adler)	al-tair (arab.)	auffliegender Adler	α Aql
Antares (Skorpion)	ant-ares (griech.)	Gegen-Mars	α Sco
Kapella (Fuhrmann)	capella (lat.)	Ziegenböckchen	α Aur

Sternbilder

Willkürliche Zusammenfassung von Sternen zu Vielecken oder Linienzügen an der Himmelskugel, mit Namen aus der Mythologie (vor allem aus dem griechischen und babylonischen Kulturkreis) oder mit Phantasienamen belegt. Die Verbindungslinien zwischen den Sternen eines Sternbildes folgen zumeist historischen Traditionen. In der Wissenschaft werden Sternbilder ohne Verbindungslinien als genau abgegrenzte Bereiche der Himmelskugel definiert. Insgesamt gibt es an der Himmelskugel 88 Sternbilder.



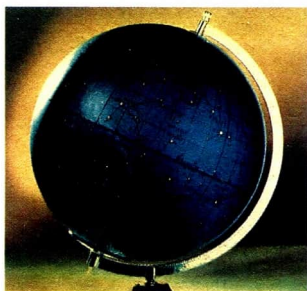
Sternbild Kassiopeia. Die bekannte W-Figur ist Teil eines wesentlich größeren gleichnamigen Bereiches an der Himmelskugel.

Die zu einem Sternbild vereinigten Sterne gehören im allgemeinen physikalisch nicht zusammen.

Einige bekannte Sternbilder		
deutscher Name	lateinischer Name	Abkürzung
Adler	Aquila	Aql
Fuhrmann	Auriga	Aur
Großer Bär	Ursa Maior	UMa
Kleiner Hund	Canis Minor	CMi
Orion	Orion	Ori

Himmelsglobus

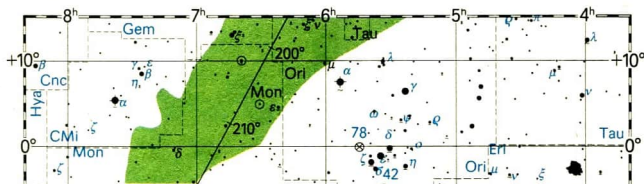
Räumliches Modell der Himmelskugel, auf dem die Sterne, die Sternbildgrenzen oder -verbindungen und meist auch Koordinatenlinien dargestellt sind. Die meisten Himmelsgloben sind so entworfen, daß sich der Betrachter eigentlich im Globusmittelpunkt befinden müßte, um den Sternhimmel in naturgetreuer Darstellung zu sehen. Von außen betrachtet, erscheinen die Sternbilder daher seitenverkehrt.



Himmelsglobus

Sternkarte

Kartenmäßige Darstellung eines Teiles der Himmelskugel mit den beobachtbaren Objekten (Sterne, Sternhaufen, Nebel, Galaxien, Milchstraße), meist im Koordinatennetz des rotierenden Äquatorsystems. Sonne, Mond und Planeten sind nicht in Sternkarten enthalten, da sie sich relativ zu den Sternen bewegen.

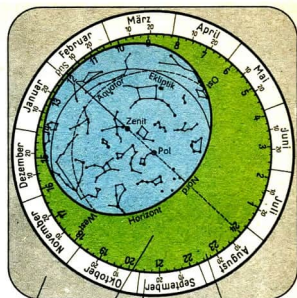


Ausschnitt aus einem Sternatlas

Drehbare Sternkarte. Darstellung des über dem Horizont eines bestimmten Beobachtungsortes befindlichen Teiles der Himmelskugel in Abhängigkeit von der jeweiligen Beobachtungszeit. Die drehbare Sternkarte kann für einen beliebigen Zeitpunkt eingestellt werden.

Sternatlas. Zusammenfassung gleichartiger Sternkarten zu einem Atlas, der entweder die gesamte Himmelskugel oder nur den von einem bestimmten Beobachtungsort aus sichtbaren Teil der Himmelskugel bis zu einer bestimmten scheinbaren Helligkeit enthält.

- Rotierendes Äquatorsystem, S. 48
- Scheinbare Helligkeit, S.100

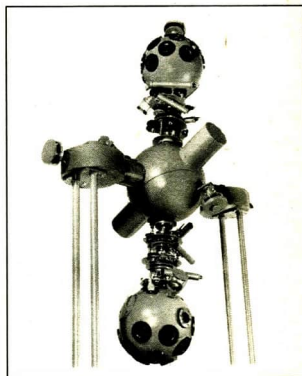


Grundscheibe
Deckscheibe
Monats- und Tageseinteilung
Stundeneinteilung

Drehbare Sternkarte

Planetarium

Projektionseinrichtung zur naturgetreuen Wiedergabe des Himmelsanblicks mit Sternen, Milchstraße, Planeten, Sonne und Mond. Das Planetarium ermöglicht die Demonstration der Bewegungen dieser Himmelskörper im Zeitrafferverfahren. Die Bilder der Himmelskörper werden an die Innenseite einer mattweißen Halbkugel (Durchmesser 5 m bis 30 m) projiziert. Die Betrachter befinden sich im Inneren des Kugelraumes.



Planetarium

Planetarien in der DDR	
Großplanetarium Raumflugplanetarium	Jena Cottbus, Halle
Außerdem befinden sich in vielen Städten Kleinplanetarien, meist in Verbindung mit einer Volks- oder Schulsternwarte.	

3.2. Scheinbare Bewegungen der Gestirne

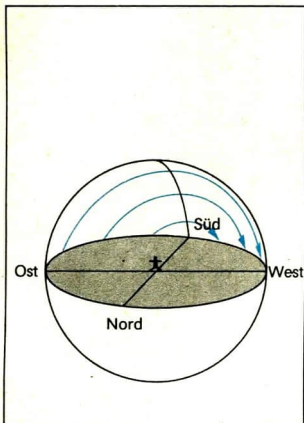
Tägliche Bewegung der Gestirne

Widerspiegelung der Erdrotation; scheinbare Rotation der Himmelskugel von Ost über Süd nach West um die Himmelsachse. Eine Umdrehung der Himmelskugel dauert einen Sterntag.

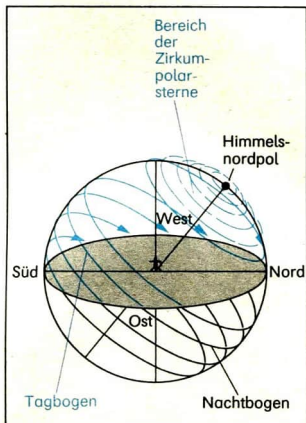
➔ Astronomische Zeitdefinition, S. 8

➔ Sternzeit, S. 11

Aufgang, Untergang. Das Erscheinen bzw. Verschwinden eines Gestirns am scheinbaren Horizont infolge der scheinbaren täglichen Bewegung des Gestirns.



Die Tagbögen dreier Gestirne aus der Sicht eines auf der Erde befindlichen Beobachters



Die Tagbögen und die Nachtbögen verschiedener Gestirne aus der Sicht eines außerhalb der Himmelskugel gedachten Beobachters

Zirkumpolarsterne. Sterne, die den Polen der Himmelskugel so nahe stehen, daß sie bei der scheinbaren täglichen Bewegung den Horizont nicht erreichen. Wie groß der Bereich der Zirkumpolarsterne ist, hängt von der Höhe des Himmelspols über dem Horizont des Beobachters und damit von der geographischen Breite des Beobachtungsortes ab.

Polhöhe = geographische Breite

Für einen Beobachtungsort auf der geographischen Breite φ sind alle Sterne, deren Abstand vom Pol kleiner ist als φ , Zirkumpolarsterne.

Ort des Beobachters	Zirkumpolarsterne um den	
	Himmelsnordpol	Himmelssüdpol
Nordhalbkugel der Erde	gehen nie unter; sind in jeder klaren Nacht sichtbar. ■ Großer Bär	gehen nie auf; sind ständig unsichtbar. ■ Kreuz des Südens
Südhalbkugel der Erde	gehen nie auf; sind ständig unsichtbar. ■ Großer Bär	gehen nie unter; sind in jeder klaren Nacht sichtbar. ■ Kreuz des Südens

- Für Beobachter auf dem Erdäquator beträgt die geographische Breite 0° ; es gibt für solche Beobachter keine Zirkumpolarsterne.

Tagbogen. Der über dem Horizont verlaufende Teil der Bahn eines Gestirns bei der scheinbaren täglichen Bewegung. Er wird im Winkelmaß angegeben.

- Zirkumpolarsterne haben Tagbögen von 360° .

Kulmination

Durchgang eines Gestirns bei der täglichen Bewegung durch den Meridian des Beobachtungsortes.

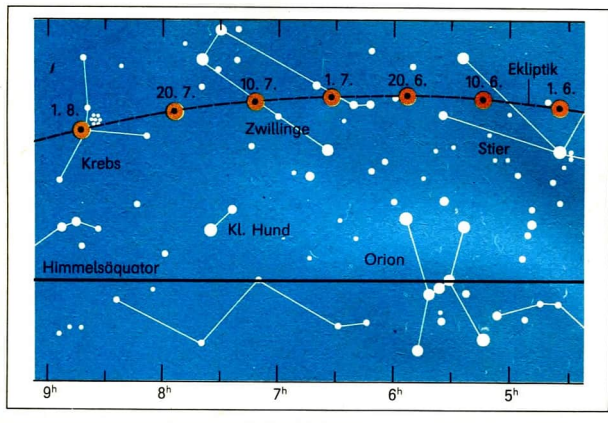
Obere Kulmination	Das Gestirn überquert den Meridian zwischen dem Himmelsnordpol und dem Südpunkt des Horizonts; es erreicht dabei seine größte Höhe über dem Horizont.
Untere Kulmination	Das Gestirn überquert den Meridian unterhalb des Himmelsnordpols (nur bei Zirkumpolarsternen beobachtbar).

- Obere Kulmination der Sonne: Mittag; 12^h wahre Sonnenzeit.
Untere Kulmination der Sonne: Mitternacht; 0^h wahre Sonnenzeit
↗ Meridian, S. 34 ↗ Horizontsystem, S. 45

Jährliche Bewegung der Sonne

Scheinbare Bewegung der Sonne relativ zu den Sternen, bei der die Sonne im Verlaufe eines Jahres alle Sternbilder des Tierkreises durchquert. Widerspiegelung der wahren Umlaufbewegung der Erde um die Sonne. Die jeweils in Richtung zur Sonne befindlichen Sternbilder sind für einen Beobachter auf der Erde 1 bis 2 Monate lang unsichtbar.

Sternbild	Unsichtbar
Stier	Mitte Mai bis Ende Juni
Zwillinge	Mitte Juni bis Anfang August
Krebs	Ende Juni bis Ende August



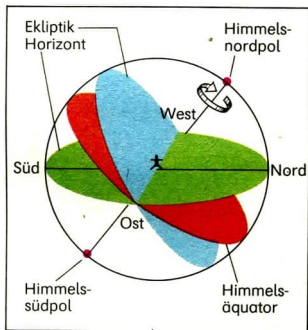
- Kalender, S. 12
- Ekliptik, S. 40

Ekliptik

Der Begriff wird in zwei Bedeutungen gebraucht:

- Scheinbare jährliche Bahn der Sonne durch die Sternbilder des Tierkreises, Schnittlinie zwischen Erdbahnebene und Himmelskugel. Größter Kreis an der Himmelskugel; seine Ebene ist um 23.4° gegen die des Himmelsäquators geneigt. Die Ekliptik schneidet den Himmelsäquator im Frühlingspunkt und im Herbstpunkt.

Himmelskugel mit Horizont, Himmelsäquator und Ekliptik. Die tägliche Bewegung erfolgt um die Himmelsachse.



● Wahre Bahn der Erde im Weltraum; Ellipse, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.

➤ Himmelsäquator, S. 34

➤ Frühlingspunkt, S. 41

Schiefe der Ekliptik. Herkömmliche Bezeichnung für die Neigung der Ekliptikebene gegen die Ebene des Himmelskörpers.

Tierkreis. Zone beiderseits der Ekliptik; sie umfaßt Sternbilder, die in der Mehrzahl Tiernamen tragen. Die Ekliptik heißt deshalb auch *Tierkreislinie*.

Tierkreiszeichen. In der antiken Astrologie wurde die Ekliptik in 12 gleichlange Abschnitte unterteilt, die nach den jeweils nächstliegenden Sternbildern benannt wurden. Diese Abschnitte heißen Tierkreiszeichen. Wegen der Präzession stimmen heute die Tierkreiszeichen und die ihnen entsprechenden Sternbilder nicht mehr überein.

Tierkreiszeichen	Symbol	Das Zeichen wird von der Sonne durchlaufen		Das Zeichen befindet sich heute im Sternbild
		von	bis	
Stier	♉	21. 4.	21. 5.	Widder
Zwillinge	♊	22. 5.	22. 6.	Stier
Krebs	♋	23. 6.	23. 7.	Zwillinge

➤ Astrologie, S. 8

➤ Präzession, S. 42

Frühlingspunkt

Schnittpunkt zwischen Himmelsäquator und Ekliptik, in dem die Sonne bei ihrer jährlichen Bewegung am 21. 3. (in manchen Jahren am 20. 3. oder 22. 3.) von der südlichen auf die nördliche Hälfte der Himmelskugel übertritt.

Symbol: ♈

Der Frühlingspunkt lag früher im Sternbild Widder, deshalb wird er auch *Widderpunkt* genannt.

Herbstpunkt

Schnittpunkt zwischen Himmelsäquator und Ekliptik, in dem die Sonne am 23. 9. von der nördlichen auf die südliche Hemisphäre übergeht (auch Waagepunkt genannt; Symbol: ♎)

➤ Himmelsäquator, S. 34

➤ Ekliptik, S. 40

Präzession

Drehbewegung der Erdachse, die vor allem durch die Gravitationskräfte des Mondes und der Sonne bewirkt wird. Die Erdachse beschreibt – ähnlich der Achse eines rotierenden Kinderkreisels – den Mantel eines Doppelkegels, dessen Spitze sich im Erdmittelpunkt befindet und dessen Achse auf den Pol der Ekliptik weist. Ein Umlauf der Erdachse auf dem Kegelmantel dauert etwa 25700 Jahre. Mit dieser Verlagerung der Erdachse ist eine Verlagerung des Himmelsäquators verbunden.

Folgen der Präzession	Im Verlaufe langer Zeiträume folgt daraus
Verlagerung der Himmelspole gegenüber den Sternen	■ „Polarstern“ ist im Jahre 2000 der Stern α im Kleinen Bären, 9000 der Stern Deneb im Schwan, 13000 der Stern Wega in der Leier.
Verlagerung des Frühlingspunktes und des Herbstpunktes auf der Ekliptik	Änderung der Koordinaten von Sternen in den Koordinatensystemen des Äquators und der Ekliptik
	Verschiebung der Tierkreiszeichen gegen die Tierkreissternbilder

- Veränderung der Koordinaten des Sterns Beteigeuze im Orion im Verlaufe von 30 Jahren

Zeitpunkt	Rektaszension	Deklination
1. 1. 1950	$5^{\text{h}}52^{\text{min}}28^{\text{s}}$	$+7^{\circ}23'58''$
1. 1. 1980	$5^{\text{h}}54^{\text{min}}05^{\text{s}}$	$+7^{\circ}24'16''$

- Rotierendes Äquatorsystem, S. 48
- Ekliptiksystem, S. 49

Jahreszeiten

Abschnitte des Jahres, die durch die wechselnde gegenseitige Stellung von Erde und Sonne charakterisiert sind. Die Entstehung der klimatischen Jahreszeitenunterschiede ist die Folge der Neigung der Erdachse gegen die Senkrechte auf der Erdbahnebene beim Umlauf der Erde um die Sonne.

Wenn die Sonne bei ihrer scheinbaren jährlichen Bewegung den Frühlingspunkt durchläuft, beginnt für die Nordhalbkugel der Erde der astronomische *Frühling*; wenn sie ihren größten nördlichen Abstand vom Himmelsäquator erreicht, ist astronomischer *Sommeranfang*. Der *Herbst* beginnt beim Durchgang der Sonne durch den Herbstpunkt, der *Winter* beim Durchgang durch den Bahnpunkt mit dem größten südlichen Abstand vom Himmelsäquator.

Tag	Stellung der Erde		Sonnenstrahlung trifft die Erdoberfläche	Zeitdauer, während der die Sonne über dem Horizont steht	Erwärmung der Erdoberfläche	Jahreszeit
22. 6.	Nordhalbkugel der Sonne zugewandt		steil	lange	stark	Sommer
	Südhalbkugel von der Sonne abgewandt		flach	kurz	gering	Winter
23. 9.	Nordhalbkugel	unter gleichem Winkel von der Sonne beschienen	mittel	mittel	mittel	Herbst
	Südhalbkugel		mittel	mittel	mittel	Frühling
22. 12.	Nordhalbkugel von der Sonne abgewandt		flach	kurz	gering	Winter
	Südhalbkugel der Sonne zugewandt		steil	lange	stark	Sommer
21. 3.	Nordhalbkugel	unter gleichem Winkel von der Sonne beschienen	mittel	mittel	mittel	Frühling
	Südhalbkugel		mittel	mittel	mittel	Herbst

Dauer der Jahreszeiten. Wegen der unterschiedlichen Geschwindigkeit der Erde beim Umlauf um die Sonne sind die Jahreszeiten nicht gleich lang.

Jahreszeit	Dauer auf der Nordhalbkugel der Erde	Jahreszeit	Dauer auf der Nordhalbkugel der Erde
Frühling	92 d 22 h	Herbst	89 d 17 h
Sommer	93 d 14 h	Winter	89 d 1 h

Polartag, Polarnacht. Wenn der Erdnordpol der Sonne zugewandt ist, verbleibt er während der Erdrotation ständig im Sonnenlicht. Für einen Beobachter am Erdnordpol geht deshalb in dieser Zeit die Sonne nicht unter, es herrscht *Polartag*. Entsprechend herrscht gleichzeitig am Südpol der Erde *Polarnacht*. Polartag und Polarnacht können – mit unterschiedlicher, von der geographischen Breite des Beobachtungsortes abhängiger Dauer – an allen Orten zwischen $66,6^\circ$ und 90° nördlicher bzw. südlicher Breite beobachtet werden.

3.3. Astronomische Koordinaten

Astronomische Koordinaten

Hilfsmittel zur Beschreibung eines Ortes auf der Himmelskugel. Für eine genäherte Orientierung am Sternhimmel sind Sternbilder eine ausreichende Hilfe. Sie genügen jedoch nicht, wenn ein Ort auf der Himmelskugel mit großer Genauigkeit angegeben werden muß.

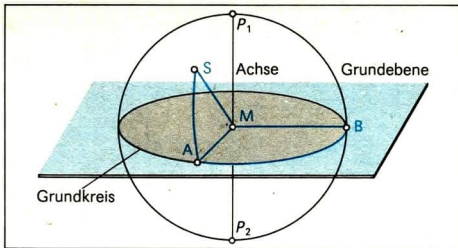
- Bestimmen der Eigenbewegung von Sternen. Auffinden sehr lichtschwacher Objekte, die mit dem bloßen Auge nicht gesehen werden können. Beobachten und Auswerten der Bewegung eines Kometen relativ zu den Sternen.

Für solche Aufgaben werden astronomische Koordinaten benutzt. Zur Beschreibung eines Ortes auf der Himmelskugel benötigt man *Kugelkoordinaten*. Der Radius der Himmelskugel wird dabei als unendlich groß betrachtet.

Kugelkoordinaten

Grundlage jedes Kugelkoordinatensystems sind *Achse* und *Grundebene*, sowie ein *Leitpunkt* auf dem Grundkreis.

Achse	Gerade durch den Kugelmittelpunkt
Grundebene	Ebene durch den Kugelmittelpunkt, senkrecht zur Achse
Grundkreis	Schnittlinie der Grundebene mit der Kugeloberfläche
Pole	Schnittpunkte der Achse mit der Kugeloberfläche

Kugel-
koordinaten

Die Koordinaten werden als Winkel (mit dem Scheitel im Kugelmittelpunkt) definiert.

1. Koordinate Abstandswinkel	Abstand von der Grundebene; Winkel AMS
2. Koordinate Richtungswinkel	Winkel BMA , gemessen auf der Grundebene von einem Leitpunkt aus

- Geographische Koordinaten sind ebenfalls Kugelkoordinaten.

Grundkreis	Erdäquator
Mittelpunkt	Erdmittelpunkt
Pole	Pole der Erde
Abstandswinkel	geographische Breite
Richtungswinkel	geographische Länge
Leitpunkt	Schnittpunkt des Meridians von Greenwich mit dem Erdäquator

Horizontsystem

Grundkreis	Horizont
Mittelpunkt	Beobachtungsort
Pole	Zenit und Nadir
Abstandswinkel	Höhe h
Richtungswinkel	Azimut a
Leitpunkt	Südpunkt des Horizonts

Höhe. Winkelabstand des Gestirns vom mathematischen Horizont.

Höhe	Gestirn befindet sich im
0° 90°	mathematischen Horizont, Zenit des Beobachters.

Negative Höhenangaben bedeuten, daß sich das Gestirn unter dem Horizont befindet.

➔ Horizont, S. 33

Die astronomische Dämmerung beginnt morgens (endet abends), wenn die Sonne eine Höhe von $h = -18^\circ$ hat.

Azimet. In Gradmaß angegebene Himmelsrichtung. Dafür sind zwei Zählweisen gebräuchlich:

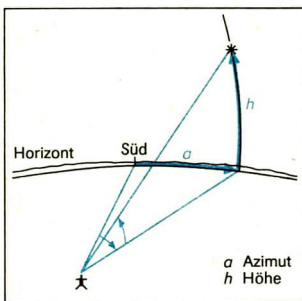
■ astronomische Zählung

■ geodätische Zählung

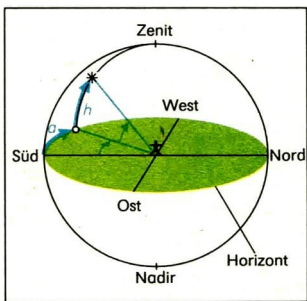
Azimet	Himmelsrichtung	Azimet	Himmelsrichtung
0° = 360°	Süd	0°	Nord
90°	West	90°	Ost
180°	Nord	180°	Süd
270°	Ost	270°	West

Die geodätische Zählung wird auch in der Raumfahrt benutzt.

Orts- und Zeitabhängigkeit. Wegen der scheinbaren täglichen Bewegung der Gestirne sind die Koordinaten Azimet und Höhe vom Ort und vom Zeitpunkt der Beobachtung abhängig.



Azimet und Höhe eines Gestirns aus der Sicht eines auf der Erde befindlichen Beobachters



Azimet und Höhe eines Gestirns aus der Sicht eines außerhalb der Himmelskugel gedachten Beobachters

Ruhendes Äquatorsystem

Grundkreis	Himmelsäquator
Mittelpunkt	Beobachtungsort
Pole	Himmelspole
Abstandswinkel	Deklination δ
Richtungswinkel	Stundenwinkel t
Leitpunkt	Schnittpunkt des Himmelsäquators mit dem Meridian

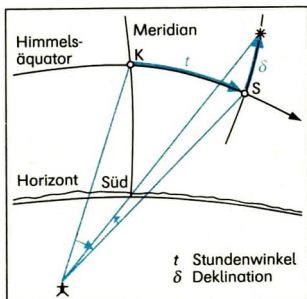
Deklination. Winkelabstand des Gestirns vom Himmelsäquator, auf dem Stundenkreis des Gestirns nach Norden (positiv) und nach Süden (negativ) gezählt.

Deklination	Gestirn befindet sich im
0°	Himmelsäquator
$+90^\circ$	Himmelsnordpol
-90°	Himmels südpol

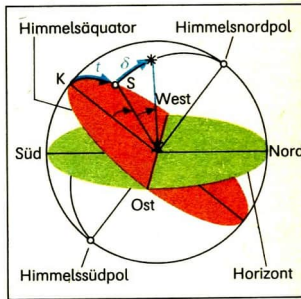
Sonne beim astronomischen Sommeranfang: $\delta = +23,4^\circ$.

Stundenkreis. Größter Kreis an der Himmelskugel, der durch das Gestirn und die beiden Himmelspole verläuft.

Stundenwinkel. Winkel zwischen dem Schnittpunkt des Himmelsäquators mit dem Meridian und dem Schnittpunkt des Himmelsäquators mit dem Stundenkreis des Gestirns. Er wird im Zeitmaß (0^h bis 24^h) oder im Gradmaß (0° bis 360°) vom Schnittpunkt des Himmelsäquators mit dem Meridian aus nach Westen gezählt.



Stundenwinkel und Deklination eines Gestirns aus der Sicht eines auf der Erde befindlichen Beobachters



Stundenwinkel und Deklination eines Gestirns aus der Sicht eines außerhalb der Himmelskugel gedachten Beobachters

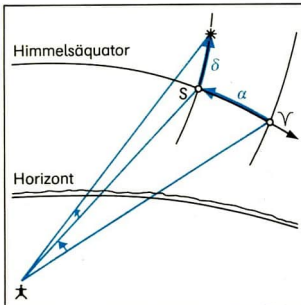
- Der Stundenwinkel eines Sterns beträgt im Moment der oberen Kulmination 0° (0^h) und durchläuft alle Werte zwischen 0° und 360° (0^h und 24^h) im Verlaufe eines Sterntages.
- Orts- und Zeitabhängigkeit.** Wegen der scheinbaren, täglichen Bewegung ist der Stundenwinkel vom Beobachtungsort und von der Zeit abhängig. Die Deklination eines Gestirns ist dagegen von beiden unabhängig.
- ➔ Sternzeit, S. 11 ➔ Tägliche Bewegung der Gestirne, S. 38
- ➔ Präzession, S. 42

Rotierendes Äquatorsystem

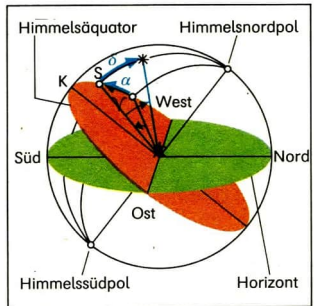
Grundkreis	Himmelsäquator
Mittelpunkt	Beobachtungsort
Pole	Himmelspole
Abstandswinkel	Deklination δ
Richtungswinkel	Rektaszension α (oder RA)
Leitpunkt	Frühlingspunkt

Das Koordinatennetz des rotierenden Äquatorsystems ergibt sich als Projektion des Koordinatennetzes der Erde (geographische Länge und geographische Breite) an die Himmelskugel, jedoch wird als Leitpunkt des rotierenden Äquatorsystems der Frühlingspunkt verwendet.

Deklination. Definition und Zählung wie beim ruhenden Äquatorsystem.
Rektaszension. Winkel zwischen dem Frühlingspunkt und dem Schnittpunkt zwischen dem Himmelsäquator und dem Stundenkreis des Gestirns. Er wird vom Frühlingspunkt aus entgegen der täglichen Bewegung der Himmelskugel im Zeitmaß (0^h bis 24^h) gemessen.
 Der Frühlingspunkt hat die Koordinaten $\alpha = 0^h$, $\delta = 0^\circ$.



Rektaszension und Deklination eines Gestirns aus der Sicht eines auf der Erde befindlichen Beobachters



Rektaszension und Deklination eines Gestirns aus der Sicht eines außerhalb der Himmelskugel gedachten Beobachters

Orts- und Zeitabhängigkeit. Die Koordinaten Deklination und Rektaszension sind unabhängig vom Beobachtungsort und von der Zeit. Deshalb wird das rotierende Äquatorsystem vorzugsweise als Grundlage für Sternkarten und Sternatlanten benutzt.

↗ Präzession, S. 42

↗ Sternkarte, S. 36

Ekliptiksystem

Grundkreis	Ekliptik
Mittelpunkt	Beobachter
Pole	nördlicher Ekliptikpol (im Sternbild Drache) südlicher Ekliptikpol (im Sternbild Schwertfisch)
Abstandswinkel	ekliptikale Breite β
Richtungswinkel	ekliptikale Länge λ
Leitpunkt	Frühlingspunkt

Das Ekliptiksystem wird vor allem für die Beschreibung der Bewegungen von Sonne, Mond und Planeten sowie anderer Körper im Sonnensystem verwendet.

Ekliptikale Breite. Winkelabstand des Gestirns von der Ekliptik, auf dem Längengreis des Gestirns nach Norden (positiv) und nach Süden (negativ) gezählt.

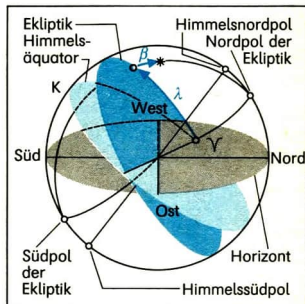
Längengreis. Größter Kreis an der Himmelskugel, der durch das Gestirn und die beiden Ekliptikpole verläuft.

Ekliptikale Länge. Winkel zwischen dem Frühlingspunkt und dem Schnittpunkt zwischen der Ekliptik und dem Längengreis des Gestirns. Er wird vom Frühlingspunkt aus in gleicher Richtung wie die Rektaszension im Gradmaß (0° bis 360°) gezählt.

↗ Ekliptik, S. 40

↗ Präzession, S. 42

↗ Rotierendes Äquatorsystem, S. 48



Ekliptikale Länge und ekliptikale Breite eines Gestirns aus der Sicht eines außerhalb der Himmelskugel gedachten Beobachters

Heliozentrische Koordinaten

Beschreibung der Positionen der Körper des Sonnensystems, von der Sonne aus gesehen.

Grundkreis	Ekliptik
Mittelpunkt	Sonnenmittelpunkt
Pole	nördlicher und südlicher Ekliptikpol
Abstandswinkel	heliozentrische Breite b
Richtungswinkel	heliozentrische Länge l

➔ Ekliptiksystem, S. 49

Galaktische Koordinaten

Beschreibung der Positionen von Objekten im Milchstraßensystem.

Grundkreis	galaktischer Äquator
Mittelpunkt	Sonnenmittelpunkt
Pole	nördlicher Pol der Galaxis (im Sternbild Haar der Berenike) südlicher Pol der Galaxis (im Sternbild Bildhauer)
Abstandswinkel	galaktische Breite b
Richtungswinkel	galaktische Länge l

Galaktischer Äquator. Größter Kreis an der Himmelskugel, der durch den Verlauf der Milchstraße definiert wird.

➔ Metagalaxis, S. 139

➔ Milchstraße, S. 121

4.1. Aufbau des Sonnensystems

Sonnensystem

Sonne und die Gesamtheit der Körper, die sich um sie bewegen sowie der Raum, in dem sich die Bahnen dieser Objekte befinden. Das Sonnensystem bezeichnet man oft auch als Planetensystem. Körper des Sonnensystems mit gemeinsamen physikalischen Merkmalen bilden Objektgruppen.

Objektgruppen im Sonnensystem	
Objektgruppe	Anzahl der Körper
Sonne	1
Planeten	9
Satelliten	mindestens 50
Planetoiden	etwa 500 000
Kometen	etwa 10^{11}

Im Raum zwischen den Planeten befinden sich Meteorite und andere Formen der interplanetaren Materie, wozu Staubteilchen und Gaspartikel gehören. Außerdem existieren im Sonnensystem Gravitations-, Strahlungs- und Magnetfelder.

➤ Meteorite, S. 92

Physikalischer Aufbau des Sonnensystems

Stoffliche Beschaffenheit der Objekte des Sonnensystems.

Man unterscheidet:

Kugelförmige Himmelskörper im gasförmigen Zustand, im festen Zustand	Sonne
	Planeten, Mehrzahl der Satelliten, einige Planetoiden

Irreguläre Körper	einige Satelliten, Mehrzahl der Planetoiden, Kometenkerne, größere Meteorite
Erscheinungsformen aus Gas, aus Staub	Sonnenwind Zodiaklicht, Mikrometeorite

Masseverteilung. Verteilung der Masse auf die einzelnen Objektgruppen des Sonnensystems. Die Sonnenmasse beträgt $2 \cdot 10^{30}$ kg. Sie vereinigt fast die gesamte Masse des Systems und bildet das Gravitationszentrum. Dieses hält das Sonnensystem zusammen und bestimmt im wesentlichen die Bahnbewegungen der Körper. Die von den kleineren Himmelskörpern (z. B. Planeten) ausgehenden Gravitationskräfte wirken sich lediglich als Störungen aus.

➔ Gravitationsgesetz, S. 14

Masseverteilung im Sonnensystem	
Objektgruppe	Masse der Erde = 1
Sonne	333000
Planeten	446,8
Satelliten	0,12
Planetoiden	0,0004
Kometen	0,1
Gesamtmasse	etwa 333447 Erdmassen

Größenverhältnisse. Die Himmelskörper des Sonnensystems besitzen unterschiedliche Größen.

Unsere Sonne als größter Himmelskörper des Systems hat einen Durchmesser von rund 1390000 km (110 Erddurchmesser). Die Durchmesser der Planeten liegen zwischen 143000 und 5000 km. Der Durchmesser des Mondes beträgt rund 3470 km (etwa $\frac{1}{4}$ des Erddurchmessers).

4.2. Sonne

Sonne

Sie ist unser nächster Stern. Die Sonne ist eine Gaskugel und wird durch die Gravitation zusammengehalten.

Physikalische Eigenschaften der Sonne		
Durchmesser	1392000 km	etwa 110 Erddurchmesser
Volumen	$1412 \cdot 10^{15} \text{ km}^3$	etwa 1 300 000 Erdvolumen
Oberfläche	$6087 \cdot 10^9 \text{ km}^2$	etwa 12000 Erdoberflächen
Masse	$1989 \cdot 10^{27} \text{ kg}$	333000 Erdmassen
Mittlere Dichte	$1,41 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$	etwa $\frac{1}{4}$ der mittleren Dichte der Erde
Gravitationsbeschleunigung an der Oberfläche	$274 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	etwa 28faches der Fallbeschleunigung an der Erdoberfläche
Oberflächentemperatur	5770 K	Siedepunkt von Eisen: 3270 K
Mittlere Rotationsdauer – siderisch – synodisch	25,4 d 27,3 d	gleiche Rotationsrichtung wie die Erde und dem Umlaufsinn der Planeten gleich
Gesamtstrahlungsleistung (Leuchtkraft)	$383 \cdot 10^{24} \text{ W}$	davon erhält die Erde etwa 0,00000005 %
Helligkeit – absolut – scheinbar	$4^m,7$ – $26^m,9$	450000mal so hell wie der Vollmond
Spektralklasse	G 2	vom gleichen Sterntyp: α Centauri A
Leuchtkraftklasse	V	

Sonnenstrahlung

Im Sonneninnern wird durch Kernfusion ($H \rightarrow He$) Energie freigesetzt, die durch Strahlung und Konvektion an die Sonnenoberfläche transportiert und in Form von elektromagnetischen Wellen und von Teilchen in den Raum abgestrahlt wird.

Verteilung der elektromagnetischen Strahlung der Sonne			
Wellenlänge	Art der Strahlung	Anteil an der Gesamtstrahlung	
> 2 μm	Wärme-, Radiostrahlung	6 %	— 4005,254
800 nm bis 2 μm	Infrarotstrahlung	38 %	
400 nm bis 800 nm	Licht	48 %	
300 nm bis 400 nm	Ultraviolettstrahlung	6,8 %	— 4030,763 — 4033,072 — 4034,492 — 4035,732
< 300 nm	kurzwellige UV-, Röntgenstrahlung	1,2 %	— 4045,825 — 4063,605 — 4071,749

- Infolge der Äquivalenz von Energie und Masse erleidet die Sonne durch ihre elektromagnetische Strahlung in jeder Sekunde einen Masseverlust von $4,3 \cdot 10^6$ t. Bei gleichbleibender Sonnenstrahlung macht das in 10 Milliarden Jahren jedoch nur 0,07% der Sonnenmasse aus.
 ↗ Energiefreisetzungsprozesse in Sternen, S. 110

Sonnenspektrum. Eine kontinuierliche elektromagnetische Strahlung, die von der Röntgenstrahlung bis in den Radiofrequenzbereich reicht. Das Sonnenspektrum ist von zahlreichen Absorptionslinien (Fraunhoferschen Linien) sowie – bei kurzen Wellenlängen ($\lambda \leq 120 \text{ nm}$) – von Emissionslinien durchsetzt. Heute sind mehr als 20000 Fraunhoferlinien bekannt.

Solarkonstante. Derjenige Teil der elektromagnetischen Strahlungsenergie der Sonne, der bei mittlerer Entfernung Erde–Sonne je Zeiteinheit senkrecht auf die Flächeneinheit fällt.

Solarkonstante $1,395 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$

Die Solarkonstante dient der Bestimmung der Leuchtkraft und der Oberflächentemperatur der Sonne.

Teilchenstrahlung. Überwiegend aus Elektronen und Protonen bestehende Strahlung der Sonne. Der die Sonne in alle Richtungen ständig verlassende Teilchenstrom heißt

Sonnenwind. Durch die hohe Temperatur in der Sonnenkorona erlangt ein Teil der Teilchen so hohe Geschwindigkeiten, daß sie die Gravitationskraft der Sonne überwinden (Entweichgeschwindigkeit an der Sonnenoberfläche $618 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$). Außerdem strahlt die Sonne einen ununterbrochenen Strom von Neutrinos ab, die von der Kernfusion im Sonneninnern stammen.

- Durch die Teilchenstrahlung verliert die Sonne in jeder Sekunde eine Masse von $1,2 \cdot 10^6 \text{ t}$.

➔ Energiefreisetzungsprozesse in Sternen, S. 110

Innerer Aufbau der Sonne

Mittlere chemische Zusammensetzung der Sonne		
Elemente	Zentralgebiet	Übrige Bereiche
Wasserstoff	36%	71%
Helium	62%	27%
schwerere Elemente	2%	2%

Physikalische Größen im Zentralgebiet der Sonne	
Temperatur	$16 \cdot 10^6 \text{ K}$
Dichte	$160 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
Druck	10^{16} Pa

➔ Energiefreisetzung in Sternen, S. 110

Äußere Schichten der Sonne: *Photosphäre, Chromosphäre, Korona.*

Photosphäre

- Schicht der Sonnenoberfläche, von der der größte Teil des Sonnenlichtes abgestrahlt wird,
- Dicke etwa 400 km ($< \frac{1}{1000}$ des Sonnendurchmessers),
- Temperaturabnahme von innen nach außen von etwa 7500 K auf 4500 K,
- Randverdunkelung der Sonnenscheibe, weil Licht vom Sonnenrand aus höheren und damit kühleren Schichten stammt als jenes, das uns von der Mitte der Sonnenscheibe erreicht,
- Störgebiete: Flecken und Fackeln,
- Feinstruktur: Granulation (Ursache: vertikale Strömungen in der Wasserstoffkonvektionszone; die aufwärts gerichteten – heißen – Gasströme erscheinen heller als ihre Umgebung.)

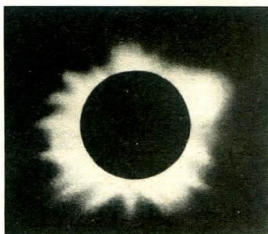
Chromosphäre

- Schicht über der Photosphäre,
- Dicke etwa 10000 km,
- Temperatur an der unteren Grenze etwa 4500 K, an der oberen Grenze etwa 10^6 K,
- Dichte nach außen stark abnehmend,
- flockige Struktur infolge starker Turbulenz,
- Störgebiete: Fackeln, Eruptionen, Protuberanzen,
- sichtbar bei verdeckter Photosphäre



Korona

- äußerste Schicht, die allmählich in den interplanetaren Raum übergeht,
- extrem geringe Dichte,
- hohe Temperatur (etwa 10^6 K),
- Veränderung von Form und Struktur in Abhängigkeit von der Sonnenaktivität,
- nur sichtbar, wenn helle Sonnenscheibe verdeckt ist (z. B. bei totaler Sonnenfinsternis)



Aktivität

Gesamtheit der periodischen veränderlichen Erscheinungen auf der Sonne, vor allem *Flecken*, *Fackeln*, *Eruptionen*, *Protuberanzen*.

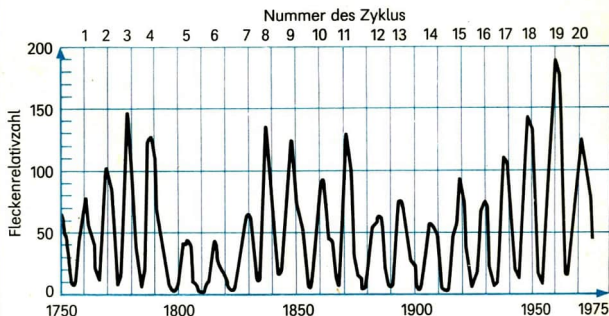
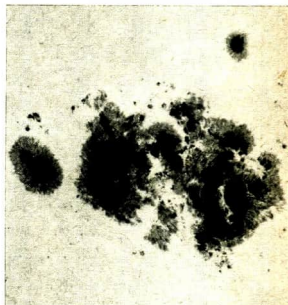
Die Erscheinungen der Sonnenaktivität zeigen räumliche und zeitliche Gemeinsamkeiten, die auf gleiche Ursachen (Magnetfeldkonzentrationen) hindeuten.

Flecken

- Störgebiete in der Photosphäre in Form einzelner dunkler Flecken oder -gruppen in geringen heliographischen Breiten,
- Temperaturen 1000 K bis 2500 K niedriger als in der ungestörten Photosphäre,
- Durchmesser können 200000 km überschreiten (16facher Erddurchmesser),
- große Flecken besitzen dunklen Kern (Umbra) und hellen Hof (Penumbra) mit strahlenförmiger Struktur (rechtes Bild); Erscheinung deutet auf starke radiale Strömungen hin,
- Verbindung mit starken Magnetfeldern, die die 1000fache Stärke des allgemeinen Magnetfeldes der Sonne erreichen,
- Häufigkeit weist auf eine etwa 11jährige Periode hin (Sonnen-

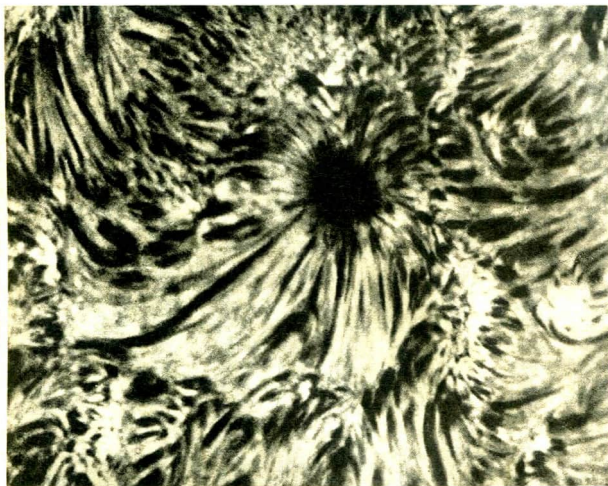
fleckenzyklus, unteres Bild); wird die Richtung des Magnetfeldes berücksichtigt, ergibt sich eine 22jährige Periode.

■ 1975 war das letzte Sonnenfleckenminimum, das letzte Sonnenfleckenmaximum war 1980.



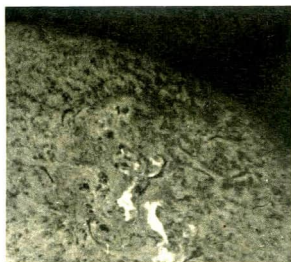
Fackeln

- Störgebiete in der Photosphäre und der unteren Chromosphäre, etwa 1000 K heißer als ihre Umgebung,
- existieren meist bei Flecken; mittlere Lebensdauer ist höher als die der Flecken.



Eruptionen

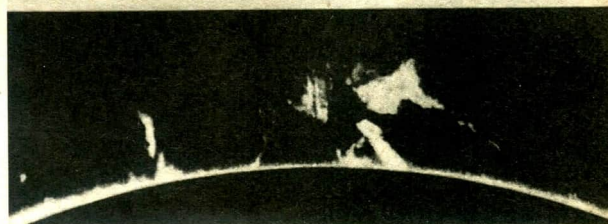
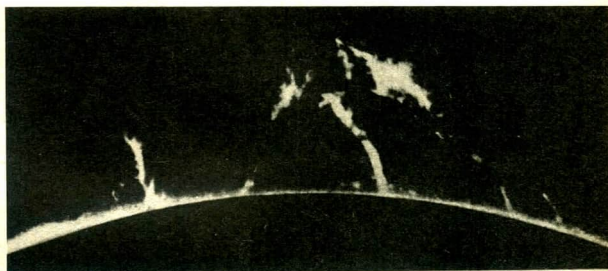
- kurzzeitige, extrem rasche Helligkeitsausbrüche in begrenzten Bereichen der Photosphäre und der Chromosphäre,
- große Eruptionen setzen Energien bis zu 10^{20} kWh frei, wobei die Intensität der Radio-, UV- und Röntgenstrahlung der Sonne ansteigt,
- Lebensdauer von wenigen Minuten bis eineinhalb Stunden, treten meist in der Nähe großer Fleckengruppen auf.





Protuberanzen

- Gaswolken unterschiedlicher Größe und Gestalt, ragen aus der Chromosphäre in die Korona,
- mittlere Werte: Dicke etwa 10000 km, Länge der Bögen etwa 200000 km, Höhe etwa 50000 km,
- Temperaturen 10000 K bis 20000 K,
- Lebensdauer teilweise mehrere Sonnenrotationen,
- einzelne Protuberanzen können sich mit wachsender Geschwindigkeit bis 10^6 km über den Sonnenrand erheben, fallen dann zurück oder entweichen als Teilchenwolke in die Korona oder in den interplanetaren Raum,
- treten meist zusammen mit Fackeln und Flecken auf, zeigen die gleiche 11jährige Häufigkeitsperiode,
- Sichtbarkeit am Sonnenrand (Bild) bei totalen Sonnenfinsternissen bzw. mit speziellen Fernrohren



Solar-terrestrische Beziehungen

Erscheinungen auf der Erde und in der Erdatmosphäre, die durch die Störstrahlung der Sonnenaktivität verursacht werden.

<p>Erscheinungen und Wirkungen</p>	<p>Veränderungen des elektrischen Zustandes und Verhaltens der Ionosphäre (Funkstörungen), Beeinflussung des Erdmagnetfeldes (magnetische Stürme), Leuchterscheinungen in der Hochatmosphäre (Polarlichter)</p>
<p>Vermutete meteorologische und biologische Wirkungen</p>	<p>Gewitterhäufigkeit, Wettergeschehen, Jahreswachstum der Bäume, Ernteerträge, Herzinfarkthäufigkeit</p>

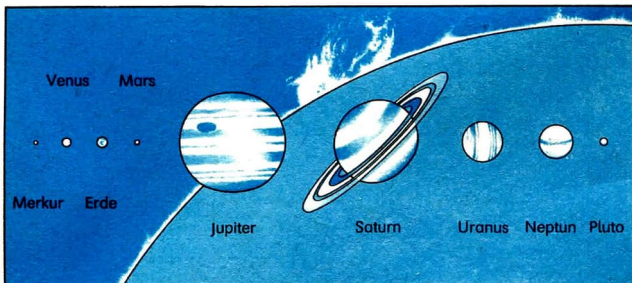
Die vermuteten Wirkungen sind umstritten, weil es schwierig ist, bei der Fülle der diese Erscheinungen bewirkenden Faktoren den Einfluß eines einzelnen Faktors (der Störstrahlung der Sonne und ihrer elektrischen und magnetischen Auswirkungen) abzuheben.

4.3. Planeten

Planeten

Relativ große kugelförmige Himmelskörper, die einen Stern umlaufen und einen Teil des Sternlichtes reflektieren.

Im Sonnensystem sind 9 Planeten bekannt. Man vermutet, daß sich auch um andere Sterne Planeten bewegen.



Größe der Planeten relativ zur Sonne

Name des Planeten	Astronomisches Symbol	Bezeichnung, bezogen auf Bahnlage zur Erde
Merkur Venus	☿ ♀	innere Planeten (untere Planeten)
Erde	♁ oder ⊕	
Mars Jupiter Saturn Uranus Neptun Pluto	♂ ♃ ♄ ♅ ♆ ♁ ♇	äußere Planeten (obere Planeten)

Heliozentrische Bewegungen

Bahnbewegungen der Planeten um die Sonne. Der rechtläufige Umlauf vollzieht sich nach den Keplerschen Gesetzen.

➤ Keplersche Gesetze, S. 14

Umlaufzeit. Zeit, in der sich ein Planet um die Sonne bewegt. *Siderische Umlaufzeit* ist die Zeit, nach der ein Planet, von der Sonne aus gesehen, wieder die gleiche Stellung, bezogen auf die Sterne, einnimmt. *Synodische Umlaufzeit* ist die Zeit, nach der ein Planet, von der Erde aus gesehen, wieder die gleiche Stellung, bezogen auf die Sonne, einnimmt.

■ Eine synodische Umlaufzeit ist z. B. die Zeit zwischen zwei unteren Konjunktionen eines inneren Planeten.

Umlaufzeiten und Bahngeschwindigkeiten der Planeten			
Name des Planeten	Umlaufzeit		Mittlere Geschwindigkeit in $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$
	siderisch in a	synodisch in d	
Merkur	0,24	115,9	47,90
Venus	0,62	583,9	35,05
Erde	1,00	–	29,80
Mars	1,88	779,9	24,13
Jupiter	11,86	398,9	13,06
Saturn	29,46	378,1	9,64
Uranus	84,02	369,7	6,81
Neptun	164,79	367,5	5,43
Pluto	247,7	366,7	4,74

a Jahre; d Tage

Titius-Bodesche Reihe

Empirische Gleichung, mit der sich näherungsweise die mittleren Entfernungen der Planeten von der Sonne (a) berechnen lassen.

Planet	n	Entfernung a in AE	
		berechnete Entfernung	wahre Entfernung
Merkur	$-\infty$	0,4	0,39
Venus	0	0,7	0,72
Erde	1	1,0	1,00
Mars	2	1,6	1,52
Planetoiden	3	2,8	2,9
Jupiter	4	5,2	5,20
Saturn	5	10,0	9,54
Uranus	6	19,6	19,18
Neptun ¹⁾	7	38,8	30,06
Pluto ¹⁾	8	77,2	39,44

1) Die Bahnen von Neptun und Pluto entsprechen diesen Beziehungen nicht.

Abstände der Planeten von der Sonne sind nach der folgenden Gleichung angeben:

$$a = 0,4 + 0,3 \cdot 2^n$$

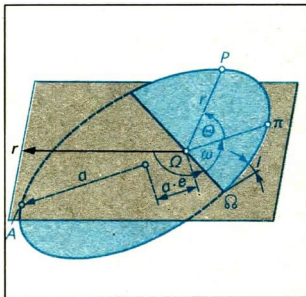
Eine ursprüngliche Lücke zwischen Mars und Jupiter wurde durch die Auffindung der Planetoiden, für die man $n=3$ einsetzte, geschlossen.

Bahnelemente

Bestimmungstücke, mit deren Hilfe Form, Lage und Größe der Bahn sowie der Ort eines Planeten (und jedes anderen Himmelskörpers) zu einer bestimmten Zeit berechnet werden können.

Zur Berechnung benötigt man folgende Größen:

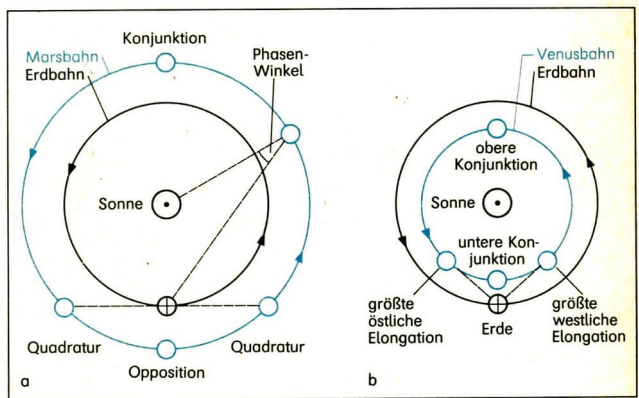
- Ω Knotenlänge
- i Bahnneigung
- ω Abstand des Perihels vom aufsteigenden Knoten
- e Exzentrizität
- a große Halbachse
- T Perihelzeit



Mittlere Bahnelemente der Planeten					
Planet	mittlere Entfernung von der Sonne (große Halbachse) in AE	Exzentrizität der Bahn	Neigung zur Ekliptik	Länge des	
				aufsteigenden Knotens (1970)	Perihels
Merkur	0,39	0,2056	7,00	48	77
Venus	0,72	0,0068	3,39	76	131
Erde	1,00	0,0167	0,00	—	103
Mars	1,52	0,0934	1,85	49	336
Jupiter	5,20	0,0485	1,30	100	14
Saturn	9,54	0,0556	2,49	113	93
Uranus	19,18	0,0472	0,77	74	170
Neptun	30,06	0,0086	1,77	132	44
Pluto	39,44	0,2450	17,2	110	223

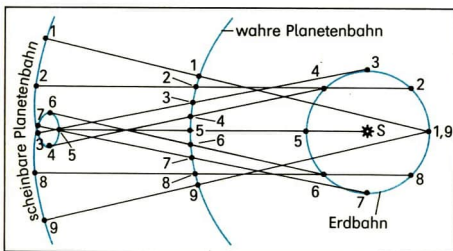
Geozentrische Bewegungen

Scheinbare Bewegungen der Planeten an der Himmelskugel aus der Sicht des Erdbeobachters. Sie sind eine Folge der heliozentrischen Bewegung der Erde und der Planeten. Bezogen auf die Sonne, kann ein Planet für den Erdbeobachter verschiedene ausgezeichnete Stellungen (Konstellationen) einnehmen.



Bahn a) eines äußeren Planeten (Mars), b) eines inneren Planeten (Venus)

Für den Erdbeobachter bewegen sich die Planeten im allgemeinen rechtläufig (W → O) durch die Sternbilder des Tierkreises. In der Zeit ihrer größten Erdnähe (d. h. bei inneren Planeten um die untere Konjunktion und bei äußeren Planeten um die Opposition) wird ihre Bewegung für eine bestimmte Zeit rückläufig. Infolge der Neigung der Planetenbahn zur Ekliptik ändert sich der scheinbare Abstand des Planeten von der Ekliptik. Es kommt zu Schleifenbewegungen des Planeten, die mehr oder weniger ausgeprägt sind.



Entstehung der Schleifenbewegung eines Planeten

Innere Planeten (Merkur, Venus) haben nur einen kleinen Winkelabstand von der Sonne. Ihre größte östliche oder westliche Elongation (Unterschied in der ekliptikalen Länge zwischen der Sonne und einem Planeten) beträgt für Merkur höchstens 27° und für Venus höchstens 47° .

- In östlicher Elongation ist Venus für uns am westlichen Abendhimmel als „Abendstern“ und in westlicher Elongation am Morgenhimmel als „Morgenstern“ sichtbar.
➔ Ekliptik, S. 40

Physikalische Einteilung der Planeten

Zustandsgröße	Erdartige Planeten Merkur, Venus, Erde, Mars	Jupiterartige Planeten Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun
Radius	relativ klein	relativ groß
Masse	relativ klein	relativ groß
Dichte	relativ groß	relativ klein

Die jupiterartigen Planeten werden in Riesenplaneten (Jupiter, Saturn) und in Großplaneten (Uranus, Neptun) untergliedert. Der Planet Pluto ist bisher in diese Einteilung nicht einbezogen, weil vorliegende Beobachtungsdaten noch zu unsicher sind.

Wichtige physikalische Größen der Planeten			
Planet	Äquatorradius in km	Masse m in Erdmassen ($5,976 \cdot 10^{24}$ kg)	mittlere Dichte in $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
Merkur	2425	0,056	5,44
Venus	6052	0,815	5,23
Erde	6378	1,000	5,52
Mars	3393	0,107	3,95
Jupiter	71820	317,82	1,31
Saturn	60335	95,11	0,68
Uranus	25900	14,52	1,21
Neptun	24600	17,22	1,67
Pluto ¹⁾	1400	0,002	?

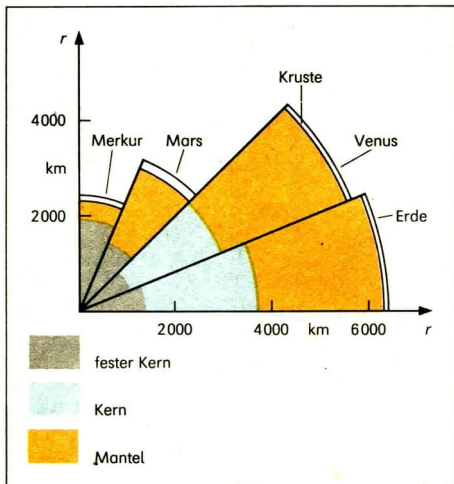
1) Werte sind noch unsicher.

Wichtige physikalische Größen der Planeten (Fortsetzung)						
Planet	Schwere- beschleunigung an der Oberfläche in g_{Erde}	Flucht- geschwindigkeit in $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	Rotationsdauer			
			d	h	min	s
Merkur	0,39	4,3	58	15		
Venus	0,90	10,3	224	3	40	
Erde	1,00	11,2		23	56	4
Mars	0,38	5,0		24	37	23
Jupiter	2,51	59,5		9	50	
Saturn	1,06	35,6		10	14	
Uranus	0,88	21,2		10	49	
Neptun	1,16	23,4		15	40	
Pluto ¹⁾			6	9	17	

1) Werte sind noch unsicher.

Merkmale erdartiger Planeten

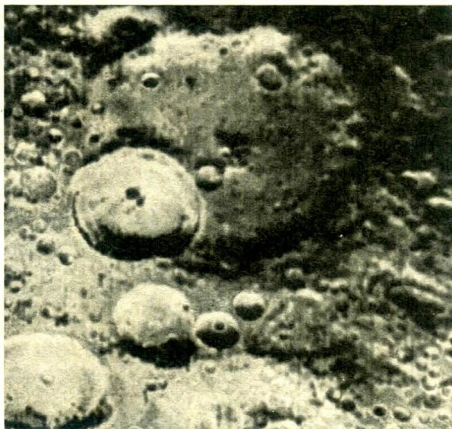
Sonnenabstand	0,39 AE bis 1,52 AE
Masse	0,056 Erdmasse bis 1 Erdmasse
Radius	2438 km bis 6378 km
Dichte	$3,95 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ bis $5,52 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
Rotation	23 h 56 min 4 s bis 224 d 3 h 40 min
Atmosphäre (wenn vorhanden)	relativ dünn, vor allem Kohlendioxid, Stickstoff, Sauerstoff
stofflicher Aufbau	vorherrschend Eisen, schwere Oxide, Silikate
innerer Aufbau	Schalenaufbau (Bild unten)
Satelliten	selten oder fehlen



Innerer Aufbau
der erdartigen
Planeten

Merkur

Besitzt keine nachweisbare Atmosphäre. Auf seiner Oberfläche gibt es Krater, in denen sich oft Zentralberge befinden, Täler, steile Böschungen (bis 3000 m Höhe und mehrere 100 km Länge) und Ebenen. Merkur ist mit einer Sand- und Staubschicht sowie mit Geröll- und Schuttmassen bedeckt. Die Oberflächentemperatur beträgt auf der Tagseite etwa 700 K und auf der Nachtseite rund 90 K. Wahrscheinlich befindet sich im Innern des Planeten ein großer Eisenkern (vermutete Abmessungen: 50% des Planetenvolumens, 80% des Planetenradius).



Oberflächen-
ausschnitt
des Planeten
Merkur

Venus

Nach Größe und Masse der Erde sehr ähnlich. Die übrigen physikalischen Merkmale haben bestimmte Gemeinsamkeiten mit der Erde und mit dem Mars.

Atmosphäre

Merkmale: relativ dicht, gelbliche undurchdringliche Wolkendecke aus Schwefelsäuretropfen, obere Wolkengrenze bei etwa 70 km, untere Wolkengrenze bei etwa 50 km

Druck an der Planetenoberfläche: 9 MPa

Zusammensetzung: 96,4% Kohlendioxid, 3,4% Stickstoff, 0,2% hauptsächlich Kohlenmonoxid, Sauerstoff, Schwefeldioxid, Schwefelsäure, Helium, Wasserdampf, Neon, Argon

Oberflächengestalt	
<p><i>Grobstruktur:</i> geringere Reliefunterschiede als auf der Erde, kraterähnliche Strukturen (bis über 20 km Durchmesser), kuppelförmige Erhebungen (Ähnlichkeit mit irdischen Schildvulkanen), aktive Vulkane, Bergmassive mit einer Höhe bis zu etwa 13 km, einzelne Grabensysteme von geringerer Tiefe</p> <p><i>Feinstruktur:</i> felsig-steiniger Untergrund</p>	
Oberflächentemperatur	Innerer Aufbau
zwischen 730 K und 750 K	wahrscheinlich große Ähnlichkeit mit Erdinnern

Erde

Einziger Planet im Sonnensystem, auf dem sich hochentwickeltes Leben befindet.

Magnetosphäre	
<p>Bereich der oberen Erdatmosphäre und des angrenzenden interplanetaren Raumes, in dem geladene Teilchen durch das Magnetfeld der Erde beeinflusst werden, Strahlungsgürtel (Van-Allen-Gürtel); zwei um die Erde angeordnete Gürtel elektrisch geladener Teilchen; Höhe über Erdäquator 1000 km bis 6000 km und 15000 km bis 25000 km</p>	
Atmosphäre	
<p><i>Merkmale:</i> vertikale Gliederung <i>Zusammensetzung:</i> 75,53% Stickstoff, 23,14% Sauerstoff, 1,33% Argon und andere Edelgase, Kohlendioxid, Wasserdampf</p>	

Oberflächengestalt

Wasserhülle

(Hydrosphäre),

Fläche:

$3,61 \cdot 10^{18} \text{ cm}^2$,

mittlere Tiefe der

Ozeane:

3990 m,

Gesteinshülle

(Lithosphäre),

Fläche:

$1,49 \cdot 10^{18} \text{ cm}^2$,

mittlere Erhebung

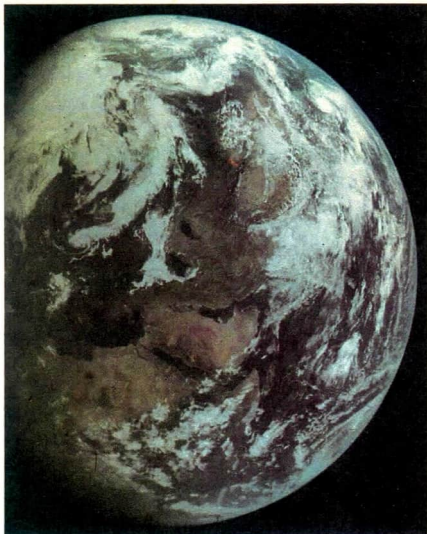
der Landmasse:

860 m;

Kontinente:

Pflanzendecke,

Erosionseinfluß

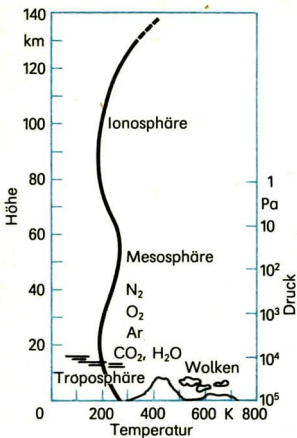


Druck- und Temperaturverlauf im Innern

km		Temperatur	Druck
	<i>Gesteinshülle</i>		
	fest	$\approx 1200^\circ\text{C}$ bis 1500°C	$\approx 5 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$
	plastisch	$\approx 1500^\circ\text{C}$ bis 2000°C	$\approx 1,0$ bis $1,5 \cdot 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$
	flüssig	$\approx 3000^\circ\text{C}$ bis 3500°C	$\approx 3 \cdot 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$
	fest(?)	$\approx 5000^\circ\text{C}$ bis 6000°C	$\approx 3,6 \cdot 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$
	80 bis 100		
	200 bis 300		
	5000 bis 5100		
	6370		

Druck- und Temperaturzunahme

Druck und Temperaturverlauf in der Atmosphäre



Schalenaufbau der Erde

Schale	Dichte in $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	häufige Elemente
obere Kruste	2,7	Silizium Aluminium – Sial
untere Kruste	3,0	Silizium Magnesium – Sima
oberer Mantel	3,4 bis 4,5	Magnesium Eisen
unterer Mantel	4,5 bis 5,5	
äußerer Kern	9,5 bis 12,0	Nickel Eisen – Nife
innerer Kern	12,0 bis 16,0	
	Gesamterde 5,52	

Atmosphäre

Merkmale: äußerst geringe Dichte, starke Zirkulation (Staubstürme), mittlere Windgeschwindigkeit $2,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, Zusammensetzung der Wolken: Kohlendioxid-Eiskristalle

Druck an der Planetenoberfläche: etwa 700 Pa

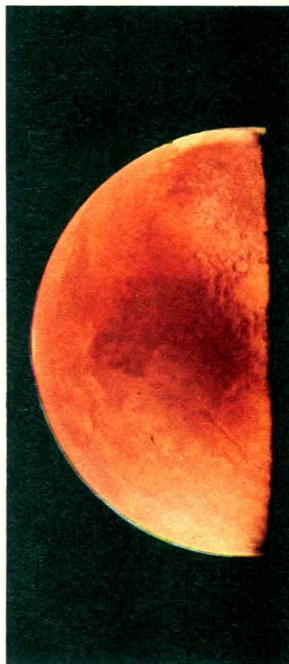
Zusammensetzung: 94,9% Kohlendioxid, 2,7% Stickstoff, 1,6% Argon, 0,8% Kohlenmonoxid, Sauerstoff, Wasserstoff, Wasserdampf

Oberflächengestalt

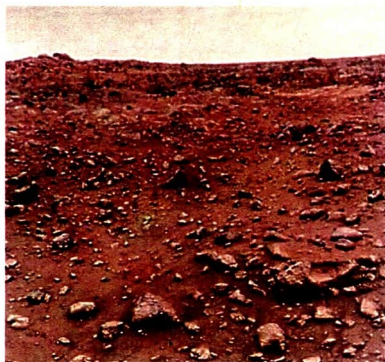
Grobstruktur: flache verwitterte Einschlagkrater (40% der Oberfläche), vulkanische Landschaften mit großen erloschenen Vulkanen

■ Olympus Mons: Höhe 27 km, Basisdurchmesser 600 km, Cañons (Tiefe bis etwa 6 km, Breite zwischen 100 km und 200 km, Länge etwa 4000 km), Trockentäler (Spuren ehemaliger Wassererosionen), Polkappen mit Eis aus Kohlendioxid und Wasser.

Das nebenstehende Bild zeigt den Mars aus einer Entfernung von 520000 km.



Feinstruktur: Steinblöcke, Sanddünen, Staubkörner, hoher Eisengehalt (etwa 16%), deshalb rotbraune Färbung des Marsbodens, Schwefelgehalt von 2% bis 5%. Das nebenstehende Bild zeigt die Marsoberfläche um die Landestelle von Viking 1.

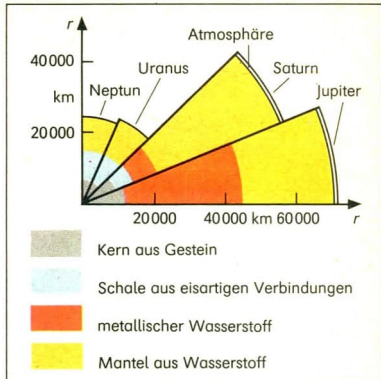


Mittlere Oberflächentemperatur	Innerer Aufbau
etwa 230 K	kleiner schwerer Metallkern (etwa 6% des Marsvolumens)

Merkmale jupiterartiger Planeten

Sonnenabstand	5,20 AE bis 30,06 AE
Masse	14,54 Erdmassen bis 318 Erdmassen
Radius	24600 km bis 71820 km
mittlere Dichte	$0,7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ bis $1,7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
Rotation	9 h 50 m bis 15 h 48 m
Atmosphären	große Ausdehnung, dichte Wolkenschicht
stofflicher Aufbau	Wasserstoff, Helium, leichtflüchtige Wasserstoffverbindungen
Ringsysteme	Ringe, die vor allem aus Staub bestehen und die Planeten umgeben
Satelliten	meist Satellitensysteme

Innerer Aufbau



Jupiter

Magnetosphäre

Räumliche Ausdehnung etwa 90 Jupiterradien, zehntausendmal intensiverer Strahlengürtel als in irdischer Magnetosphäre

Atmosphäre

Merkmale: dichte und ausgedehnte Gashölle, starke Zirkulation, Zonen verschiedener Strömungsverhältnisse, Windgeschwindigkeiten bis zu $150 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$,



Großer Roter Fleck, relativ beständiges Wirbelgebiet (Länge etwa 15000 km, Breite etwa 40000 km)



Temperatur in oberer Atmosphäre: etwa 140 K

Chemische Zusammensetzung: 88% Wasserstoff, 11% Helium, 1% Ammoniak, Methan und andere Wasserstoffverbindungen

Oberfläche

„Wasserstoffozean“ unter hohem Druck (flüssiger molekularer Wasserstoff)

Innerer Aufbau

Allmählicher Übergang vom flüssigen Wasserstoff zu Wasserstoff im festen Zustand

Kern: etwa 20% des Planetenradius, wahrscheinlich meteoritisches Material aus Eisen und Silikaten mit Wasserstoff im festen Zustand umgeben, Zentraltemperatur zwischen $3 \cdot 10^4$ K und $5 \cdot 10^4$ K, Dichte etwa $4 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,

Wärmeabstrahlung etwa doppelt so hoch wie Wärmezufuhr.

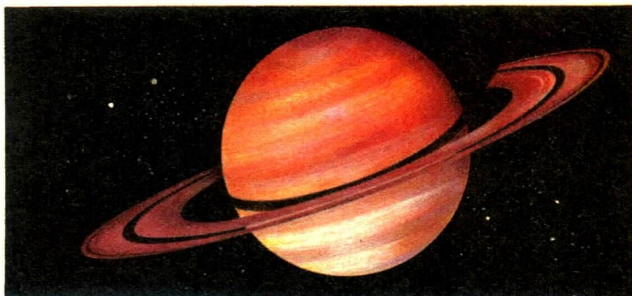
Damit verbundene Prozesse sind noch nicht bekannt.

Jupiterring

Dicke etwa 30 km, Breite etwa 6500 km, Entfernung von oberer Wolken-
grenze am Äquator 57000 km, (Werte noch unsicher)

Saturn

Der Planet ähnelt im Aufbau dem Jupiter. Wegen seiner größeren Sonnenentfernung besitzt er niedrigere Temperaturen. In der oberen Atmosphäre betragen sie rund 100 K. Im Zentrum herrscht eine Temperatur von etwa $2 \cdot 10^4$ K. Der Saturn hat das auffälligste Ringsystem.



Ringsystem

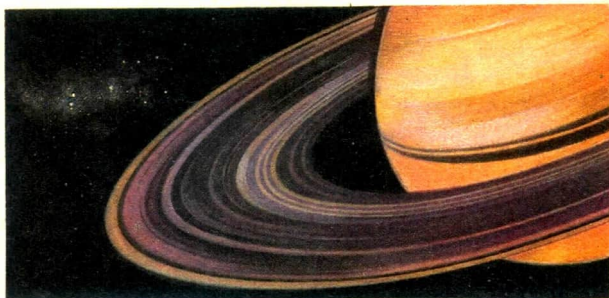
Durchmesser: 278 000 km

Dicke: kleiner als 3 km

Masse: ungefähr $\frac{1}{27\,000}$ der Saturnmasse

Zusammensetzung: meteoritenähnliche, unregelmäßig geformte Körper (wahrscheinlich eisbedecktes Silikatgestein)

Herkunft: Restprodukte der Planetenentstehung oder Material eines ehemaligen zerstörten Saturnsatelliten

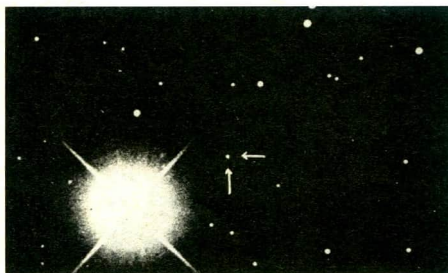


Uranus und Neptun

Beide Planeten ähneln Jupiter und Saturn. Jedoch ist in ihren Atmosphären der Methananteil höher als bei den Riesenplaneten. Wegen der größeren Sonnenentfernung betragen die Temperaturen an der oberen Wolkengrenze des Uranus etwa 57 K und an der von Neptun etwa 55 K. Die Planetenkerne bestehen möglicherweise aus silikatischem Material, welches von Eis umgeben ist. Uranus besitzt ein Ringsystem.

Pluto

Der äußerste bekannte Planet des Sonnensystems. Da Pluto die stärkste Bahnexzentrizität unter allen Planeten besitzt, liegt ein Teil der Plutobahn noch innerhalb der Neptunbahn. Man vermutet, Pluto sei ein ehemaliger Satellit des Neptun. Es gibt jedoch auch Annahmen, Pluto sei hellstes Objekt eines Planetoidengürtels, der sich außerhalb der Neptunbahn befindet. Physikalisch läßt er sich weder in die Gruppe der erdartigen noch in die der jupiterartigen Planeten einordnen. Pluto besitzt keine nennenswerte Atmosphäre. Die Oberfläche, auf der die Temperaturen bei etwa 45 K liegen, besteht möglicherweise aus gefrorenen Gasen. Spektroskopisch wies man festes Methan nach.



Entdeckungsaufnahmen des Pluto aus dem Jahre 1930

4.4. Mond

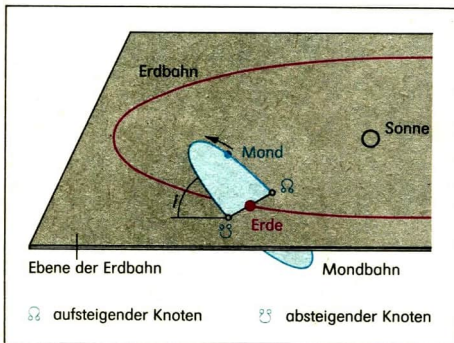
Satelliten

Meist kugelförmige Himmelskörper, die sich um einen Planeten bewegen und einen Teil des Lichtes der Sonne reflektieren. Der Satellit der Erde wird als Mond bezeichnet. Auch die Satelliten anderer Planeten werden – historisch bedingt – Monde genannt.

Wichtige Daten des Mondes	
Entfernung von der Erde	
mittlere	384 400 km
größte (Apogäum)	406 740 km
kleinste (Perigäum)	356 410 km
Bahnexzentrizität	0,055
Bahnneigung gegen Ekliptik	5° 9'
Umlaufzeit um die Erde	
siderische	27,32 d
synodische	29,53 d
mittlere tägliche siderische Bewegung	13,18°
mittlere Bahngeschwindigkeit	1,02 km · s ⁻¹
Radius	
mittlerer scheinbarer	15' 33''
wahrer	1738 km = 0,27 des Erdradius
Masse	$7,350 \cdot 10^{22} \text{ kg} = \frac{1}{81}$ der Erdmasse
Volumen	$2,192 \cdot 10^{25} \text{ cm}^3$
mittlere Dichte	$3,34 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} = 0,60$ der mittleren Erddichte
Schwerebeschleunigung an der Oberfläche	$1,62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 16,6\%$ des irdischen Wertes
Fluchtgeschwindigkeit an der Oberfläche	$2,38 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$
Helligkeit (Vollmond)	- 12 ^m ,7
mittlere Albedo	0,07
Oberflächentemperatur	
Tagseite	etwa 400 K
Nachtseite	etwa 130 K

Bewegungen des Mondes

Bewegt sich auf elliptischer Bahn mit geringer Exzentrizität um die Erde. Die Mondbahnebene ist gegenüber der Erdbahnebene um $5^{\circ}9'$ geneigt. Die beiden Schnittpunkte der Erdbahnebene mit der Mondbahn nennt man auf- und absteigender Knoten. Die Verbindungslinie zwischen den beiden Knoten heißt Knotenlinie.



Mondbahn
und
Erdbahn

Siderische Umlaufzeit (siderischer Monat). Zeitspanne zwischen zwei aufeinanderfolgenden Vorbeigängen des Mondes am gleichen Stern, d. h. durch den gleichen Stundenkreis des Sterns. Sie beträgt 27,32 Tage.

Synodische Umlaufzeit (synodischer Monat). Zeitspanne zwischen zwei aufeinanderfolgenden gleichen Mondphasen (z. B. Vollmondphasen). Sie beträgt 29,53 Tage, weil der Umlauf des Mondes von der Bewegung der Erde um die Sonne überlagert wird. Der aus der Umlaufzeit des Mondes abgeleitete Monat ist eine wichtige Zeiteinheit in der Kalendertheorie.

Bewegungen des Mondes für den Erdbeobachter	
Widerspiegelung der Erdrotation	Widerspiegelung der Mondbewegung um die Erde
Teilnahme des Mondes an der täglichen scheinbaren Bewegung der Himmelskugel von Ost über Süd nach West	tägliche Bewegung des Mondes an der Himmelskugel im Mittel um $13,5^{\circ}$ von West über Süd nach Ost

Durch die entgegengesetzten Bewegungsabläufe geht der Mond von Tag zu Tag etwa 50 min später auf.

➔ Tägliche Bewegung der Gestirne, S. 38

Rotation

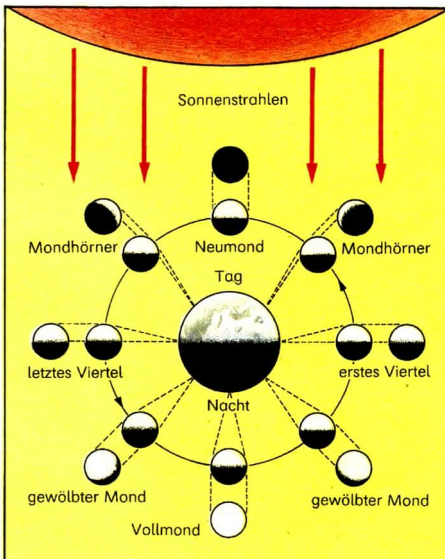
Bezeichnung für die Drehung des Mondes um seine Achse. Sie dauert genau solange, wie sein Umlauf um die Erde (gebundene Rotation). Deshalb ist für einen Erdbeobachter stets dieselbe Seite des Mondes sichtbar. Da die Lage der Mondknoten kleinen Schwankungen unterliegt, sind von der Erde aus insgesamt 59% der Mondoberfläche zu sehen. Durch den Einsatz von Raumsonden ist auch das Aussehen des ständig erdabgewandten Teils des Mondes bekannt. Er wurde 1959 erstmals von der sowjetischen Sonde Luna III fotografiert.

Mondphasen

Lichtgestalten des Mondes als Folge der periodischen Ortsveränderung, die er bei seiner Bewegung um die Erde relativ zur Sonne und Erde einnimmt. Dadurch wird die der Erde zugewandte Seite des Mondes unterschiedlich beleuchtet.

Alter des Mondes. Zeit, die seit dem letzten Neumond vergangen ist.

Aschgraues Licht. Ein schwaches, aschgraues Licht, in dem als Folge des von der Erde reflektierten Sonnenlichtes die Nachtseite des Mondes wenige Tage nach oder vor Neumond erscheint.



Entstehung der
Mondphasen
(Schema)

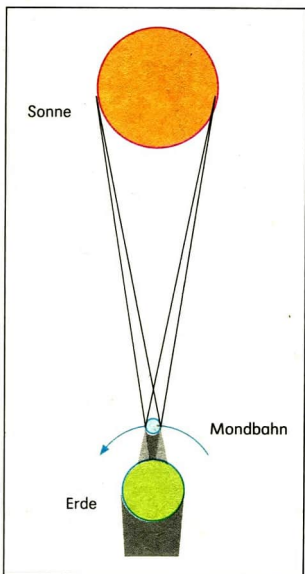
Finsternisse

Schattenwirkungen der Erde und des Mondes. Sie entstehen, wenn Sonne, Erde und Mond sich in der gleichen Ebene befinden. Diese Bedingung ist gegeben, wenn sich der Mond auf seiner Bahn um die Erde in der Nähe der beiden Knoten befindet.

➤ Bewegungen des Mondes, S. 78

Sonnenfinsternisse. Sie entstehen, wenn bei Neumond der Mond für kurze Zeit die Sonne verdeckt.

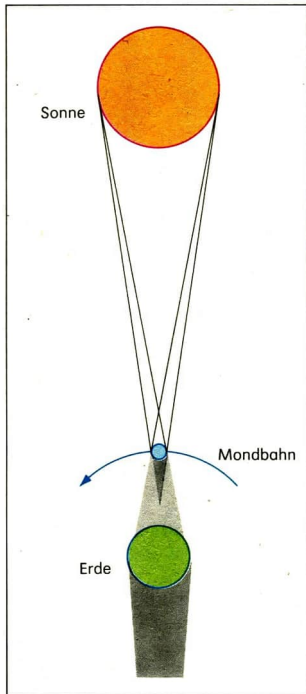
Bei einer *totalen Sonnenfinsternis* erscheint für einen Erdbeobachter die gesamte Sonne durch den Mond verdeckt. Da der die Erdoberfläche bedeckende Teil des Kernschattens maximal nur 300 km breit ist und mit einer Geschwindigkeit im Mittel von $35 \text{ km} \cdot \text{min}^{-1}$ von West nach Ost über die Erdoberfläche wandert, kann eine totale Sonnenfinsternis nur in einem sehr kleinen Gebiet der Erde für kurze Zeit (maximal 7,6 min) beobachtet werden.



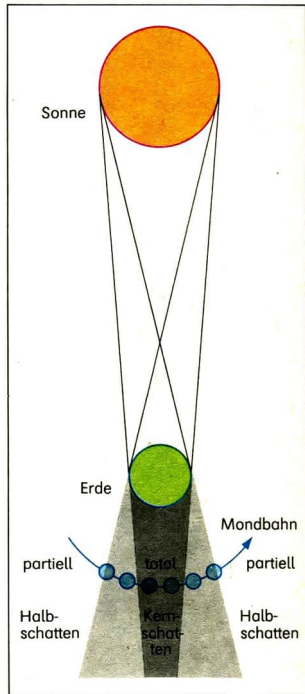
Bei einer *partiellen Sonnenfinsternis* erscheint für einen Erdbeobachter nur ein Teil der Sonne vom Mond verdeckt. Da der Halbschatten zu beiden Seiten der Totalitätszone entsteht, ist sie meist in einem relativ großen Gebiet sichtbar.

Eine *ringförmige Sonnenfinsternis* tritt ein, wenn der Kernschattenkegel des Mondes die Erdoberfläche nicht erreicht. In diesem Fall erscheint die Mondscheibe kleiner als die der Sonne.

Die Entfernung des Mondes von der Erde unterliegt Schwankungen.



Ringförmige Sonnenfinsternis



Mondfinsternis

Mondfinsternisse. Sie entstehen bei Vollmond, wenn sich der Mond im Schattenkegel der Erde befindet. Solche Finsternisse sind auf der ganzen Nachthälfte der Erde sichtbar. Ihre Gesamtdauer beträgt bis zu 3,5 h. Der Kernschatten der Erde ist aufgehellt und zeigt eine rötliche Färbung. Diese Erscheinung entsteht durch Wirkungen der Erdatmosphäre auf das Sonnenlicht. Befindet sich der Mond in einer größeren Entfernung zu seinen Knoten, wird nicht der gesamte Vollmond vom Erdschatten erfaßt. Es entsteht eine partielle Mondfinsternis.

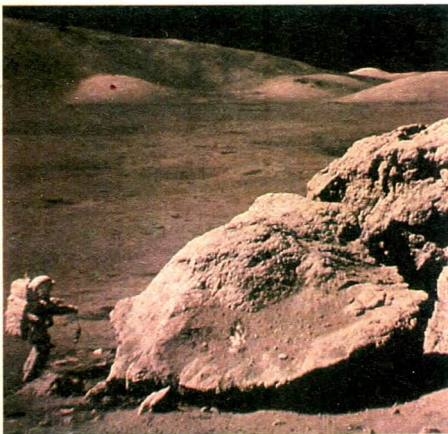
Physikalische Eigenschaften des Mondes

Sie sind wegen der kleinen Masse des Mondes wesentlich anders als auf der Erde.

Was es auf dem Mond nicht gibt	<ul style="list-style-type: none"> – Atmosphäre – Streulicht – Wasser – Wettererscheinungen – Verwitterung durch Wasser und Wind – Sedimentation – Schall
--------------------------------	--

Oberflächengestalt des Mondes

Helle und dunkle Gebiete auf der Mondoberfläche sind bereits mit bloßem Auge sichtbar. Sie deuten unterschiedliche Strukturen an. Die hellen Gebiete sind Gebirge, und dunkle Flächen zeigen sich im Fernrohr als Ebenen. Da der Mond der nächste Himmelskörper ist und keine Atmosphäre besitzt, sind dem Erdbeobachter viele Details seiner Oberfläche bekannt.

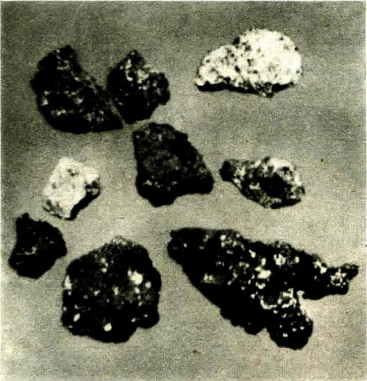


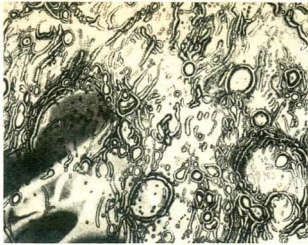
Menschen auf dem Mond (Schmitt 1972)

- Mit großen Fernrohren können noch Einzelheiten mit einer Ausdehnung von 100 m bis 200 m beobachtet werden. Raumflugkörper befördern Mondgestein zur Erde. Durch die Landung von Astronauten auf dem Mond konnten erstmals begrenzte Gebiete des benachbarten Himmelskörpers von Menschen direkt untersucht werden.

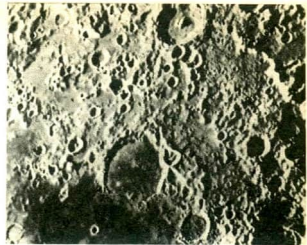
Oberflächenformen des Mondes

Form	Merkmale
Grobstruktur	
Mondmeere, Mareflächen, Maria (lat. Meere)	<p>Große Ebenen nehmen etwa $\frac{3}{10}$ der Vorderseite und $\frac{1}{10}$ der Rückseite der Mondoberfläche ein.</p> 
Hochländer, Kontinente oder Terraflächen	Zerklüftete Gebiete bedecken $\frac{7}{10}$ der Vorderseite und $\frac{9}{10}$ der Rückseite des Mondes.
Kettengebirge	Gebirgszüge, ähnlich irdischen Kettengebirgen, am Rande der Maria (Höhen bis 6000 m)
Krater (verbreitete Erscheinungsform auf der Oberfläche, besonders in Hochländern)	<p>kreisförmige Mulden unterschiedlicher Größe mit oft sehr ebenem Boden, der tiefer liegt als bei benachbarten Gebieten, umgeben vom Ringwall, manchmal in der Mitte ein Zentralberg</p> 

Form	Merkmale
Grobstruktur	
Ringgebirge	Großkrater mit Ringwall (mehrere Kilometer hoch), Durchmesser bis zu 300 km
Strahlensysteme	helle Streifen, die geringen Schatten zeigen und Maria und Hochflächen durchlaufen, größte Ausdehnung beträgt etwa 1800 km
Rillen	grabenartige Gebilde in den Maria und an ihren Rändern (Breite bis 5 km und Tiefen bis 100 m, oft mehrere hunderte Kilometer lang)
Feinstruktur	
Mondboden	Trümmerschicht (Regolith), etwa 6 bis 12 m dick, bestehend aus <ul style="list-style-type: none"> – fein- und grobkörnigen Brocken, – Staub, – Breccien (mechanisch verfestigte Gesteinskörnchen), – Glaspartikel (Glaskügelchen, Kondensationsprodukte verdampfter Gesteine)
Mondgestein	Ähnlichkeit mit irdischen Mineralien 



Karte von J. F. J. Schmidt (Ausschnitt)

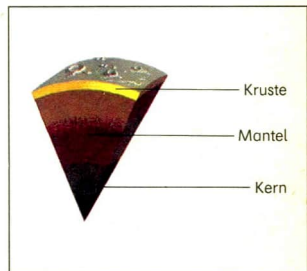
Aufnahme dieser Gegend
mit 2,5-m-Spiegel

Die Entstehung der Oberflächenformen Exogene Kräfte (Meteoriteneinschläge) und endogene Vorgänge (Vulkanismus) formten die Mondoberfläche. Maria und Krater entstanden wahrscheinlich in der Frühzeit des Mondes durch Aufschlag von riesigen Massen hoher Dichte. Später wurden die Maria mit basaltischer Lava, welche möglicherweise als Folge von Schmelzprozessen aus dem Mondinnern emporquoll, gefüllt. Die Anhäufung von dichteren Gesteinen in den Mareflächen führte zu Massenkonzentrationen (Mascons), die als ortsbegrenzte Schwereanomalien in Erscheinung treten. Außer Gasausbrüchen gibt es gegenwärtig auf dem Mond keine vulkanische Tätigkeit mehr. Die in der Frühzeit des Mondes gebildete Oberfläche wurde wahrscheinlich von Mikrometeoriten, kosmischer Strahlung und Sonnenwind in Regolith umgewandelt.

➤ Moderne kosmogonische Vorstellungen, S. 97

Innerer Aufbau des Mondes

Schalenförmiger Aufbau, ähnlich wie der der Erde. Er besteht vor allem aus einer starren Gesteinshülle (Litosphäre). Ob der Mondkern flüssig ist oder Eisen enthält, ist noch nicht geklärt.



Innerer Aufbau des Mondes

Mondbeben. Erschütterungen des Mondkörpers, die hauptsächlich durch tektonische Vorgänge entstehen. Auch Meteoritenaufschläge können Ursache solcher Beben sein. Sie dauern oft über eine Stunde und häufen sich, wenn sich der Mond im Perigäum befindet.

4.5. Satelliten bei anderen Planeten

Außer bei Merkur und Venus bewegen sich um alle Planeten des Sonnensystems Satelliten.

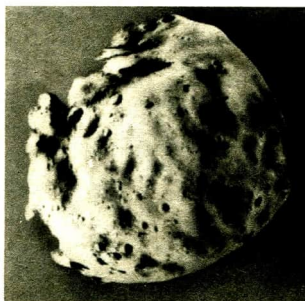
➔ Satelliten, S. 77

Satelliten des Mars			
Name	mittlerer Abstand vom Planeten in 10^3 km	Umlaufzeit in d	Durchmesser in km
Phobos	9,4	0,32	18 bzw. 22 ¹⁾
Deimos	23,5	1,26	13 ¹⁾

1) Werte sind noch unsicher.

Die Umlaufzeit von Phobos ist kleiner als die Rotationsperiode des Mars. Phobos geht – vom Mars aus gesehen – im Westen auf und im Osten unter.

Phobos ist ein irregulärer geometrischer Körper mit zahlreichen Kraterstrukturen. Der größte Krater hat einen Durchmesser von 6 km.



Phobos

Satelliten der jupiterartigen Planeten

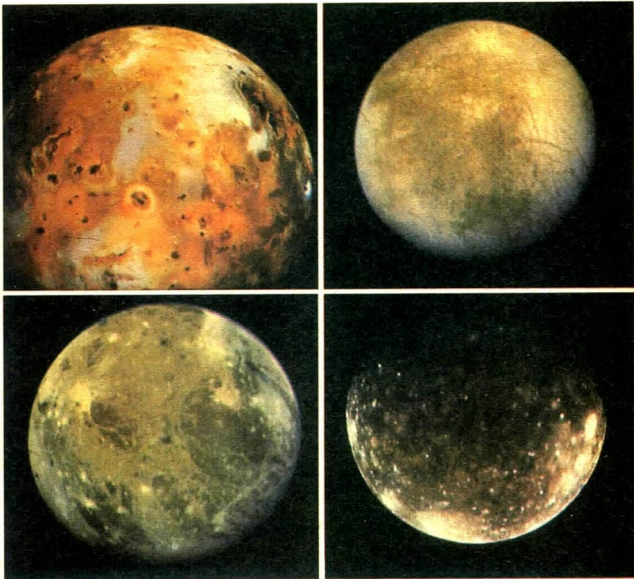
Bisher sind 50 Satelliten bekannt, die sich um Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun bewegen.

Name der Planeten	Anzahl der Satelliten
Jupiter	mindestens 16
Saturn	mindestens 17
Uranus	mindestens 15
Neptun	mindestens 2

Satelliten mit großen Radien entstanden sicherlich gleichzeitig mit den jeweiligen Planeten und bilden mit ihnen ein geordnetes System. Satelliten mit kleinen Radien sind wahrscheinlich ehemalige planetare Kleinkörper, sie wurden durch Gravitationswirkungen der Planeten eingefangen. Sie haben teilweise irreguläre Formen.

Jupitersatelliten

Jupiter besitzt ein Satellitensystem. Die bekanntesten und größten Satelliten sind Io, Europa, Ganymed und Callisto. Sie wurden bereits von Galilei um 1600 entdeckt und werden deshalb auch als „Galileische Monde“ bezeichnet.



Die „Galileischen Monde“ Io, Europa, Ganymed und Callisto

Größen der „Galileischen Monde“ des Jupiter					
Name	Entfernung von Jupiter in 10^3 km	Umlaufzeit in d	Durchmesser in km	Masse in Mondmassen	mittlere Dichte in Dichte des Wassers
Io	350,2	1,77	3638 (± 10)	1,21	3,53
Europa	599,5	3,55	3126 (± 10)	0,66	3,03
Ganymed	998,6	7,16	5266 (± 10)	2,03	1,93
Callisto	1808,6	16,69	4848 (± 10)	1,45	1,79

Physikalische Merkmale der „Galileischen Monde“

Io. Intensive vulkanische Tätigkeit (1979 wurden 6 bis 8 aktive Vulkane beobachtet). Lavaströme mit Längen von über 100 km, vermutlich nur Schwefel

Europa. Wassereis bildet Eisozeane (Dicke möglicherweise 100 km) mit Spalten (Eis- und Gesteinsmaterial?). Kaum Niveauunterschiede, ideale Kugelform

Ganymed. 50% der Masse Wassereis. Unter Wassereis wahrscheinlich ehemalige kraterreiche Urkruste

Callisto. Schlammkruste aus silikatischem Meteoritenmaterial. Vielzahl von Einschlagkratern

Saturnsatelliten

Wie Jupiter besitzt auch Saturn ein Satellitensystem.

Größen und Merkmale einiger Saturnsatelliten				
Name	Entfernung vom Planeten in 10^3 km	Umlaufzeit um Saturn in d	Durchmesser in km	physikalische Merkmale
Titan	1221,8	15,95	5150	dichte Atmosphäre; molekularer Stickstoff, Argon, Methan; Bodentemperatur etwa 90 K
Mimas	185,7	0,942	390	Krater bis zu 100 km Durchmesser
Tethys	294,0	1,888	1050	Einschlagkrater
Dione	377,5	2,737	1120	Einschlagkrater
Rhea	527,1	4,518	1530	Einschlagkrater

4.6. Planetoiden

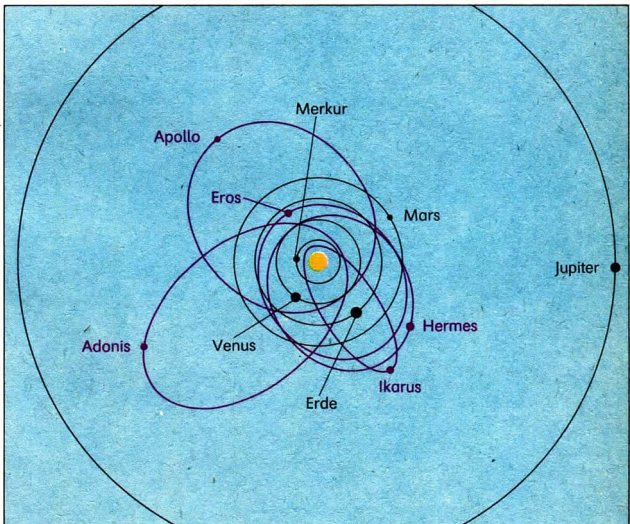
Merkmale der Planetoiden

Kleine Planeten, auch Asteroiden genannt, von meist unregelmäßiger Gestalt (Ähnlichkeit mit Felsblöcken), die sich vor allem in einem Gürtel zwischen der Mars- und der Jupiterbahn um die Sonne bewegen.

Anzahl und Größe. Schätzungsweise existieren etwa 500000 Planetoiden. Davon sind annähernd 5000 registriert. Von 2200 Kleinplaneten sind die Bahnelemente genau bekannt. Die meisten der bestimmten Planetoidendurchmesser liegen zwischen 20 km und 40 km. Es gibt ungefähr 100 Kleinplaneten mit Durchmessern von über 50 km. Der Durchmesser der zuerst entdeckten Ceres (1802) beträgt etwa 700 km.

Verteilung und Bahnen der Planetoiden

Planetoiden bewegen sich auf Ellipsenbahnen mit allgemein geringer Exzentrizität um die Sonne. Ihr mittlerer Abstand von der Sonne beträgt etwa 2,9 AE, und die mittlere Umlaufzeit liegt zwischen 3,2 Jahren und 7 Jahren. Die meisten Bahnen der Planetoiden befinden sich zwischen Mars und Jupiter. Es gibt auch Kleinplaneten, welche die Erdbahn kreuzen.



Bahnen einiger Planetoiden

4.7. Kometen

Merkmale der Kometen

Himmelskörper, die aus einer mit einer Gashülle umgebenen Meteoritenwolke bestehen.

➔ Sonnensystem, S. 51



Komet Benett (1970)

Aufbau der Kometen			
Teile	Material, Vorgänge	chemische Zusammensetzung	Erscheinungen
Kern	feste Teilchen (Staub), gefrorenes Gas, Dichte: $1,5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, Masse: 10^{16} bis 10^{20} g, Durchmesser: 1 km bis etwa 50 km	vor allem Ammoniak, Methan, Dilyan, Kohlenmonoxid	punktförmige oder scheibenförmige Erhellung, Leuchten im reflektierten Sonnenlicht
Koma	Gaswolke mit meteoritischen Teilchen, Folge der Entgasung des Kerns bei Annäherung des Kometen an die Sonne, Durchmesser: 10^3 km bis 10^4 km	vor allem Kohlenstoff, Stickstoff, Wasserstoff, Sauerstoff	faseriger Nebelfleck, dessen Helligkeit nach außen zu abnimmt
Schweif	aus Koma durch Sonnenwind und den Strahlungsdruck der Sonne „fortgeblasene“ ionisierte Moleküle (Ionenschweif) und feste Teilchen (Staubschweif); Schweiflänge 10^6 km bis 10^8 km	vor allem Kohlenmonoxid, Stickstoff, Kohlenwasserstoff, Wasser	von der Sonne abgewandte schweif förmige Leuchterscheinung

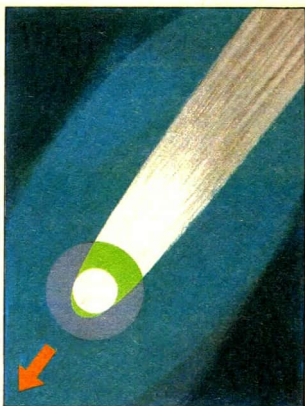
Bahnen der Kometen

Meist langgestreckte Ellipsen mit großer Exzentrizität. Nach der Zeitdauer des Umlaufs um die Sonne unterscheidet man zwischen langperiodischen (Umlaufzeiten über 200 Jahre) und kurzperiodischen (Umlaufzeiten unter 200 Jahre) Kometen. Die Bahnen der langperiodischen Kometen reichen wahrscheinlich teilweise bis in den interstellaren Raum.

Kometenfamilien. Gesamtheit jener Kometen, deren Bahnen bis zu bestimmten Planetenbahnen reichen.

- Die Jupiterfamilie umfaßt etwa 68 Kometen mit Umlaufzeiten von 5 Jahren bis 11 Jahren.

Schematischer Aufbau eines Kometen mit Kern, Koma und Schweif. Der Pfeil gibt die Richtung zur Sonne an.



Auflösung

Beobachtete Kometen sind relativ kurzlebige, in Auflösung befindliche Himmelskörper. Ihre chemische Zusammensetzung weist auf den gemeinsamen Ursprung mit dem Sonnensystem hin.

4.8. Meteore, Meteorite

Meteore

Leuchterscheinungen, meist zwischen 90 km und 110 km Höhe über dem Erdboden, die durch die Wechselwirkung zwischen der Erdatmosphäre und den aus dem Weltraum eindringenden Meteoriten erzeugt werden.

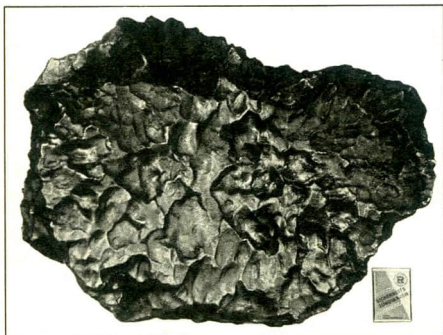
Bei einer scheinbaren Helligkeit schwächer als -4 . Größe werden sie als *Sternschnuppen* bezeichnet. Hellere Meteore nennt man *Feuerkugeln* (Bolide). Täglich können auf der Erde etwa 100 Millionen Meteore beobachtet werden.

Feuerkugel



Meteorite

Kleinstkörper des Sonnensystems, die unterschiedliche Größe besitzen und beim Eindringen in die Erdatmosphäre meistens verdampfen. Sie stammen wahrscheinlich aus Kometen, sehr große auch aus zerstörten Planetoiden. Große Meteorite können die Erdoberfläche erreichen.



Eisenmeteorit

Einige Daten der Meteorite und durch sie entstehende Erscheinungen			
Erscheinung	Durchmesser in mm	Masse	Gesamtmasse je Tag in t auf Erdoberfläche
Feuerkugeln, Meteoritenfälle	> 10	> 2 g	1
Sternschnuppen bis 6 ^m	1 bis 10	2 mg bis 2 g	5
teleskopische Meteore	0,1 bis 1	0,002 mg bis 2 mg	20
Mikrometeore	< 0,1	< 0,002 mg	10 ³ bis 10 ⁴

Gleichmäßig verteilt auf die gesamte Erdoberfläche ergibt sich je nach Schätzung durch das meteoritische Material je Quadratkilometer ein jährlicher Massenzuwachs von 0,7 kg bis 7 kg.

Arten und chemische Zusammensetzung der Meteorite						
Art und Häufigkeit der Funde in % ¹⁾	chemische Zusammensetzung in % der Gesamtmasse					
	Eisen	Nickel	Silizium	Magnesium	Sauerstoff	Kobalt
Eisenmeteorite (66)	90,8	8,6	–	–	–	0,6
Steinmeteorite (26,5)	20,5	1,1	20,6	15,8	42	–
Stein-Eisen-Meteorite (7,5)	55,7	5,4	8,0	12,3	18,6	–

1) Die Angaben beziehen sich auf Häufigkeit der Funde. In Wirklichkeit gehen mehr Steinmeteorite (93,5%) als Eisenmeteorite (5%) nieder. Jedoch verwittern Steinmeteorite schnell, Eisenmeteorite kaum.

Meteorströme

Ausgedehnte Meteoritenschwärme, die sich auf einander parallelen Bahnen bewegen. Wenn die Erdbahn einen Meteorstrom schneidet, nimmt für den Erdbeobachter die Meteorhäufigkeit zu. Die Bahnen der Objekte eines Meteorstromes gehen scheinbar von einem bestimmten Punkt der Himmelskugel, dem Radianten (Ausstrahlungspunkt), aus. Seine Lage wird durch die Bewegungsrichtung des Meteorstromes und durch die Bewegungsrichtung der Erde auf ihrer Bahn bestimmt. Die Bezeichnung der Meteorströme erfolgt oft nach dem lateinischen Namen des Sternbildes, in dem der Radiant liegt.

Einige bekannte Meteorströme			
Name	etwaige Dauer der Sichtbarkeit	Zeit des Maximums	Meteoranzahl je Stunde (visuell)
Quadrantiden	1. 1. bis 4. 1.	3. 1.	30
Lyriden	20. 4. bis 23. 4.	21. 4.	5
Perseiden	29. 7. bis 17. 8.	12. 8.	40
Leoniden	14. 11. bis 20. 11.	17. 11.	6
Germiniden	7. 12. bis 15. 12.	14. 12.	55

Alter: Zeit, die seit der Verfestigung des Meteoriten vergangen ist.

Das Alter der Steinmeteorite beträgt etwa $4 \cdot 10^9$ Jahre bis $5 \cdot 10^9$ Jahre.

Bestrahlungsalter ist der Zeitraum, in dem der Körper kosmischer Strahlung ausgesetzt ist.

Es beträgt bei


- Eisenmeteoriten 10^8 Jahre bis 10^9 Jahre,
- Steinmeteoriten 10^6 Jahre bis 10^8 Jahre.

➔ Sonnensystem, S. 51

Meteoritenfunde

Bei der Suche nach Meteoriten auf der Erde wurden Steinmeteorite mit einer Masse bis zu 1 t gefunden. Der größte bekannte Eisenmeteorit hat eine Masse von etwa 60 t. Meteorite mit einer Masse von über 100 t verdampfen beim Aufschlag. Es bleiben nur kleine Mengen meteoritischen Materials übrig.

Einige Fundorte für Eisenmeteorite	
Ort	Masse in t
Campo de Cielo (Argentinien)	13
Mundrabilla (Australien)	12
Bacuberito (Mexiko)	27

Große Meteoritenkrater	
Ort	Fakten, Vermutungen
Arizona-Krater (Cannon Diablo)	<p>Durchmesser 1265 m, Tiefe 174 m; etwa 30 t meteoritisches Material gefunden; vermutliche Gesamtmasse des Meteoriten etwa 10^7 t, Durchmesser etwa 150 m. Meteoritenaufschlag erfolgte vermutlich vor etwa 20000 Jahren.</p> 

Nördlinger Ries-Kessel (BRD)	Durchmesser 25 km, Meteoritenfall vor etwa $1,5 \cdot 10^7$ Jahren
Tunguska (UdSSR)	1908 Niedergang eines Himmelskörpers (Meteorit, Kometenkern?); Explosion über der Erdoberfläche; Waldbestand im Umkreis von 65 km von der Explosionsstelle total vernichtet

4.9. Entstehung des Sonnensystems

Alter des Sonnensystems

Zeitraum, der seit Entstehung des Sonnensystems verflossen ist.

Bestimmung aus den

- Halbwertzeiten des radioaktiven Zerfalls chemischer Elemente (z. B. Uran, Thorium),
- Analysen irdischer Gesteine, des Mondgesteins und von Meteoriten.

Ergebnisse der Untersuchungen: Alter des Sonnensystems etwa $4,6 \cdot 10^9$ Jahre.

Kosmogonie des Sonnensystems

Vorstellungen über Prozesse, die zur Bildung des Sonnensystems führten. Da im Sonnensystem unterschiedliche Himmelskörper existieren, sind Aussagen über den Entstehungsprozeß sehr schwierig. Außerdem steht der Beobachtung kein ähnliches System zur Verfügung. Es existiert eine Vielzahl von Hypothesen, aber keine gesicherte Theorie. Je nach Ausgangsposition lassen sich die vorliegenden Hypothesen in zwei Gruppen einteilen:

Evolutionshypothesen	Katastrophenhypothesen
Sonne und planetare Körper entstanden gemeinsam aus gleichem Baumaterial (Sonnennebel). Ergebnis eines Entwicklungsprozesses	Planetare Körper entstanden durch Wechselwirkung der bereits existierenden Sonne mit anderen Himmelskörpern (Kollision). Resultat eines Zufalls

Katastrophenhypothesen besitzen heute kaum noch Anhänger.

Klassische Vorstellungen	
Meteoritenhypothese (Kant, um 1755)	Nebularhypothese (Laplace, um 1796)
Kontraktion einer großen Staubwolke, Entstehung der Ursonne im Zentrum	Kontraktion einer langsam rotierenden Gaswolke, zu einer Nebelscheibe (Ursonne)
Zusammenstoß und Verdichtung der Staubteilchen in äußeren Gebieten der Staubwolke	Zunahme der Rotationsgeschwindigkeit der Ursonne, Gravitationswirkung reicht nicht mehr aus, Abspaltung gasförmiger Ringe infolge Fliehkraft
Entstehung örtlicher Klumpen, Gravitationswirkungen lassen diese zu Planeten anwachsen	Verdichtung der Gasringe zu Planeten
Baumaterial hat relativ niedrige Temperaturen	Baumaterial hat relativ hohe Temperaturen

Kosmogonische Gesetzmäßigkeiten

Erkannte Gesetzmäßigkeiten des Sonnensystems, die sich nur aus seiner Entstehung erklären lassen.

Die fast kreisförmigen Bahnen der Planeten liegen nahezu in einer Ebene.
Die meisten Planeten und ihre Satelliten haben gleichen Umlaufsinn, der mit der Rotation der Sonne übereinstimmt.
Die Sonne vereinigt fast die gesamte Masse des Systems, auf planetare Körper entfallen nur $\frac{1}{750}$ der gesamten Masse.
Die Sonne besitzt nur 2% des Drehimpulses des Systems, 98% des gesamten Drehimpulses befinden sich in den Umlaufbewegungen der Planeten um die Sonne.
Planeten mit großen Massen, großen Radien und geringen Dichten bewegen sich im äußeren Bereich und Planeten mit kleinen Massen, kleinen Radien und großen Dichten im inneren Bereich des Sonnensystems.
Die zahlenmäßige Beziehung zwischen den Abständen der Planeten von der Sonne wird durch die Titius-Bodesche-Reihe annähernd erfaßt.

➔ Titius-Bodesche-Reihe, S. 62

Moderne Vorstellungen

Gegenwärtige Auffassungen über die Entstehung des Sonnensystems, die besonders durch Ergebnisse der Raumfahrt erweitert wurden.

Erscheinungsformen	Vorgänge, Prozesse, Folgen
Ursonne mit solarer Scheibe	<ul style="list-style-type: none"> – Kontraktion einer interstellaren Gas-Staub-Wolke, – Bildung eines Protosterns (Ursonne) im Zentrum, der immer schneller rotiert, – Abgabe von Masse, scheibenförmige Anordnung um Ursonne (solare Scheibe), – Magnetfelder übertragen zunehmend Drehimpuls von Ursonne auf solare Scheibe.
Planetesimale (Kleinkörper, aus denen sich Planeten bilden)	<ul style="list-style-type: none"> – Temperaturgefälle und Dichteschwankungen in solarer Scheibe, – Kondensation des Nebelgases infolge chemischer Reaktionen, – Entstehung fester, sich immer vergrößernder Partikel (Planetesimale), – unterschiedliche chemische Zusammensetzung und Dichte der Kondensationsprodukte in Abhängigkeit von Sonnenentfernung
Protoplaneten	<ul style="list-style-type: none"> – Kollisionen und Verschmelzungen benachbarter Planetesimale, – schnelles Wachstum einzelner Brocken, Bildung eines eigenen Gravitationsfeldes, – Gravitationsfeld der großen Brocken zieht kondensierte Materie der Umgebung an, – Anwachsen der Brocken zu Protoplaneten, – Aufschlag von Planetesimalen auf Oberflächen der Protoplaneten, – energetische Prozesse führen im neu entstandenen Planeten zur Umschichtung des Baumaterials in Abhängigkeit von seiner Dichte
Sonne	<ul style="list-style-type: none"> – Einsetzen von Kernprozessen, – Kondensation der Ursonne kommt zum Stillstand, – Wellen- und Teilchenstrahlung der Sonne befördern restliche Kondensationsprodukte aus solarer Scheibe.

Erscheinungsformen	Vorgänge, Prozesse, Folgen
Planeten	<ul style="list-style-type: none"> – Planetenevolution beginnt in Abhängigkeit von jeweiligen Bedingungen, – heutige Erdatmosphäre kein Restprodukt des solaren Nebels, sondern Resultat der Entgasung der Erdrinde und vulkanischer Tätigkeit, – Auftreten von freiem Sauerstoff in Erdatmosphäre, Entwicklung der Lebewesen
Satelliten	<ul style="list-style-type: none"> – Entstehung der Satellitensysteme von Jupiter, Saturn und Uranus verlief wahrscheinlich auf ähnliche Art und Weise wie die Entstehung der Planeten. Einige Satelliten wurden durch Gravitationskräfte der Planeten eingefangen. – Vermutungen zur Entstehung des Mondes: <ul style="list-style-type: none"> ● Entstehung aus Staubwolke der Urerde, ● Abspaltung von der Urerde, ● Entstehung unabhängig von der Erde, wurde von ihr später eingefangen
Planetoiden	Planetesimale, deren Wachstum durch Gravitationskräfte des Jupiters verhindert wurde
Kometenkerne	Kondensationsprodukte des Urgases der äußeren Gebiete des Sonnennebels. (Kometenkerne, die erstmals in Sonnennähe kommen, sind Zeugnisse des solaren Nebels.)
Meteoriten	Produkte von durch Kollisionen zertrümmerten Planetesimalen und Planetoiden, Restprodukte sich auflösender Kometen

5.1. Benennung der Sterne

Sterne

Selbstleuchtende Himmelskörper, die ihre Energie während des größten Teiles ihrer Entwicklung aus Kernfusionen gewinnen. Gaskugeln großer Masse und hoher Temperatur, die durch die Eigengravitation zusammengehalten werden.

Art der Benennung	■ linker Schulterstern des Orion
Durch die Sternkoordinaten	Rektaszension: $\alpha = 5^{\text{h}} 52^{\text{min}} 27^{\text{s}} \cdot 822$ Deklination: $\delta = +7^{\circ} 23' 58'' \cdot 00$
Durch die Nummer in einem Sternkatalog	Nummer im Henry-Draper-Katalog: HD 39 801
Durch einen kleinen griechischen oder lateinischen Buchstaben in Verbindung mit dem Sternbildnamen (für Sterne heller als etwa 4. Größe)	α Orionis = α ori (= Stern α im Sternbild Orion)
Durch einen Eigennamen (für die hellsten und auffälligsten Sterne)	Beteigeuze

5.2. Helligkeit und Entfernung der Sterne

Helligkeit

Maß für die von einem Himmelskörper empfangene Strahlungsintensität. Einheit *Größenklasse* ($^{\text{m}}$).

Gemäß Definition entspricht einer Helligkeitsdifferenz von 1 Größenklasse ($m_1 - m_2$) ein Verhältnis der Strahlungsintensitäten von $10^{0,4} : 1 = 2,512$.

$m_1 - m_2 = 1 \text{ mag}$	Helligkeitsdifferenzen werden in mag (von lat. <i>magnitudo</i> = Größe) gemessen.
-----------------------------	--

Einer Helligkeitsdifferenz von 2,5 mag entspricht ein Verhältnis der Strahlungsintensitäten von $10^{0,4 \cdot 2,5} : 1 = 10^1 : 1 = 10 : 1$.

Festlegung: Kleinen Zahlenwerten der Größenklassen entsprechen große Helligkeiten und umgekehrt.

- Atair hat eine scheinbare Helligkeit $m = 0^m,77$; Wega hat eine Helligkeit $m = 0^m,03$. Wega ist um 0,74 mag heller als Atair.

Es ist zwischen *scheinbarer* und *absoluter Helligkeit* zu unterscheiden.

Scheinbare Helligkeit ist die beobachtete Helligkeit. Sie hängt vor allem von der Strahlungsleistung und der Entfernung der Himmelskörper von der Erde ab. Formelzeichen: m .

Scheinbare Helligkeiten einiger heller Sterne	
Sternname	scheinbare Helligkeit
Aldebaran	$0^m,80$
Arctur	$-0^m,05$
Atair	$0^m,77$
Capella	$0^m,09$
Deneb	$1^m,25$
Rigel	$0^m,11$
Sirius	$-1^m,44$
Wega	$0^m,03$

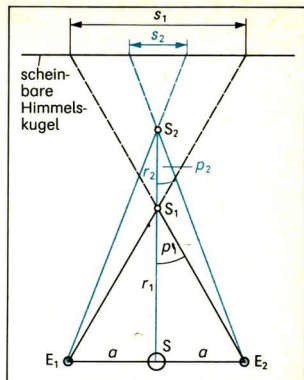
Absolute Helligkeiten einiger Sterne	
Sternname	absolute Helligkeit
Aldebaran	$-0^m,6$
Arctur	$+0^m,2$
Atair	$+2^m,39$
Capella	$-0^m,5$
Deneb	$-7^m,0$
Rigel	$-6^m,5$
Sirius	$+1^m,5$
Wega	$+0^m,6$

Absolute Helligkeit. Stünden alle Sterne in einer Einheitsentfernung, so wäre ihre Helligkeit direkt ein Maß für ihre Strahlungsleistung. Die Helligkeit, die ein Stern in einer Entfernung von 10 pc hätte, heißt *absolute Helligkeit M*.

Entfernungsbestimmung

Kenntnisse über die Entfernung der Sterne und Sternsysteme sind von grundlegender Bedeutung für viele Bereiche der Astronomie, z. B. für die Ermittlung der Struktur kosmischer Systeme oder für die Gewinnung astrophysikalischer Aussagen. Entfernungen der Sterne können *trigonometrisch* oder *photometrisch* ermittelt werden. Diese Methoden sind auf unterschiedlich entfernte Objekte oder bestimmte Gruppen von Himmelskörpern anwendbar.

- S Ort der Sonne
 E_1, E_2 Orte der Erde im Abstand eines halben Jahres
 a große Halbachse der Erdbahn = 1 AE
 S_1, S_2 Sternörter
 r_1, r_2 Entfernungen der Sterne S_1, S_2
 ρ_1, ρ_2 Parallaxen der Sterne S_1, S_2
 s_1, s_2 Widerspiegelung der Erdbahn durch Verschiebung der Sterne S_1, S_2 gegenüber dem Himmelshintergrund



Trigonometrische Parallaxe

Trigonometrische Entfernungsbestimmung. Ermittlung der Sternentfernung mittels Winkelmessung, wobei als Basis der Durchmesser der Erdbahn (2 AE ; $\approx 300\,000\,000 \text{ km}$) genommen wird. Gemessen wird die scheinbare Verschiebung des beobachteten Sterns gegenüber Sternen, von denen man annimmt, daß sie wesentlich weiter entfernt sind als der untersuchte Stern. Der Winkel, unter dem der Erdbahnradius vom Stern aus erscheint, heißt *Parallaxe* p . Die Parallaxen aller Sterne sind kleiner als 1 Bogensekunde.

Entfernungsbestimmung durch Ermittlung der trigonometrischen Parallaxen ist anwendbar auf Sterne, deren Entfernung kleiner als 100 pc ist ($p \geq 0,01''$).

Photometrische Entfernungsbestimmung. Zwischen der scheinbaren Helligkeit m , der absoluten Helligkeit M und der Entfernung r (in pc) der Sterne besteht die Beziehung

$$M - m = 5 - 5 \cdot \lg r$$

Gelingt es, die absolute Helligkeit (oder die ihr äquivalente Leuchtkraft) zu bestimmen (z. B. durch Untersuchung des Sternspektrums oder bei Kenntnis des Sterndurchmessers und der Oberflächentemperatur), so kann die Entfernung r berechnet werden.

Entfernungseinheiten

In der Astronomie werden die Einheiten *Astronomische Einheit*, *Parsec* und *Lichtjahr* verwendet.

Astronomische Einheit (AE). Mittlere Entfernung Erde–Sonne; fundamentale Einheit der Astronomie.

$$1 \text{ AE} = 149,598 \cdot 10^6 \text{ km}$$

Parsec (pc). Entfernung, aus der der mittlere Abstand Erde–Sonne (1 AE) unter einem Winkel von 1 Bogensekunde erscheint.

Vielfache: 1 kpc = 1000 pc

1 Mpc = 1000000 pc

Lichtjahr (ly). Strecke, die das Licht in einem Jahr zurücklegt (Lichtgeschwindigkeit $300000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$).

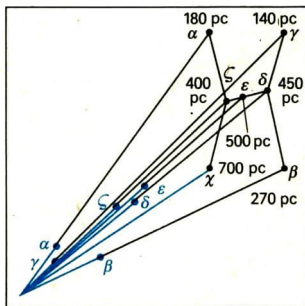
Einheit	km	AE	pc	ly
1 AE	$149,598 \cdot 10^6$	1	$4,8481 \cdot 10^{-6}$	$15,8129 \cdot 10^{-6}$
1 pc	$30,857 \cdot 10^{12}$	206266	1	3,2617
1 ly	$9,4605 \cdot 10^{12}$	63239	0,3066	1

Zwischen der Parallaxe p und der Entfernung r besteht die Beziehung

$$r = \frac{1}{p}$$

Parallaxe und Entfernung einiger sonnennaher Sterne

Stern	Parallaxe	Entfernung
Proxima Cen	0,76''	1,31 pc
α Cen	0,785''	1,32 pc
Sirius (α CMa)	0,37''	2,69 pc
Atair (α Aql)	0,21''	4,8 pc
Wega (α Lyr)	0,13''	8,0 pc
Arctur (α Boo)	0,091''	11,0 pc



Räumliches Modell des Sternbildes Orion

5.3. Zustandsgrößen der Sterne

Zustandsgrößen

Beobachtete oder aus Beobachtungen ermittelte Größen, die in ihrer Gesamtheit den physikalischen Zustand eines Sterns beschreiben. Zu ihnen gehören *Leuchtkraft*, *Temperatur*, *Durchmesser*, *Masse*, *mittlere Dichte*, *Gravitationsbeschleunigung* und *Spektralklasse*.

Leuchtkraft

Gesamtstrahlungsleistung eines Sterns; eine der absoluten Helligkeit äquivalente Größe. Formelzeichen L .

Leuchtkräfte können bestimmt werden:

- aus scheinbarer Helligkeit m und Entfernung r (mit nachfolgender Umrechnung aus absoluter Helligkeit M),
- aus der Stärke bestimmter Absorptionslinien im Spektrum,
- aus der Oberflächentemperatur T und dem Durchmesser D .

Die Leuchtkräfte der Sterne streuen in einem sehr weiten Bereich; sie reichen von 10^{-4} Sonnenleuchtkräften bis zu 10^5 Sonnenleuchtkräften.

↗ Strahlungsgesetze, S. 16

↗ Entfernungsbestimmung, S. 100

↗ Helligkeit, S. 99

↗ Hertzsprung-Russell-Diagramm, S. 112

Temperatur

Die Temperatur an der Oberfläche der meisten Sterne liegt zwischen 2500 K und 50000 K.

Die Temperatur der Sterne wird vor allem durch *Bestimmung der ausgestrahlten Energiemenge* oder durch *Messung der Strahlungsintensität in einem Wellenlängenintervall* ermittelt.

Bestimmung der Sterntemperatur durch Bestimmung der ausgestrahlten Energiemenge:

Aus dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz ergibt sich

$T \sim \sqrt[4]{\frac{L}{D^2}}$	<p>T Temperatur L Leuchtkraft D Durchmesser</p>
----------------------------------	--

Die auf diesem Wege bestimmte Temperatur heißt *effektive Temperatur*. Sie läßt sich für Sterne ermitteln, deren Leuchtkraft und Durchmesser bekannt sind.

↗ Strahlungsgesetze, S. 16

Wird statt der Strahlungsenergie im gesamten Spektrum nur die eines ausgewählten Wellenlängenintervalls untersucht, so erhält man die *Strahlungstemperatur*.

Bestimmung der Sterntemperatur durch Messung der Strahlungsintensität in einem Wellenlängenintervall:

Der Vergleich der *Strahlungsintensität* des Sterns mit der eines Schwarzen Körpers in einem bestimmten Wellenlängenintervall ergibt die *Farbtemperatur*.

Temperaturen der Sonne (nach verschiedenen Bestimmungsmethoden)	
Art der ermittelten Temperatur	Wert
effektive Temperatur	5770 K
Strahlungstemperatur	
visueller Bereich	6050 K
photographischer Bereich	5895 K
Farbtemperatur	
300 nm bis 400 nm	4850 K
410 nm bis 950 nm	7140 K

Effektive Temperatur von Hauptreihensternen verschiedener Spektralklassen	
Spektralklasse	effektive Temperatur
M 3	2900 K
K 5	4700 K
G 2	5800 K
F 2	7300 K
A 2	10900 K
B 3	21800 K
B 0	32500 K
O 5	41000 K

↗ Hertzsprung-Russell-Diagramm, S. 112

Durchmesser

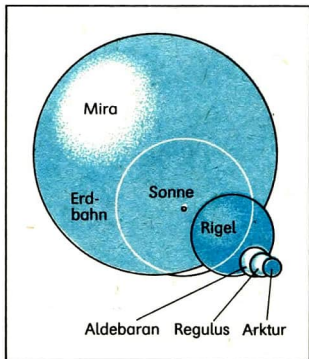
Die Sterndurchmesser reichen von 1000 bis zu 0,00001 Sonnendurchmessern. Sterndurchmesser können *interferometrisch*, durch Beobachtung von *Bedeckungsveränderlichen* oder aus dem *Stefan-Boltzmannschen Gesetz* bestimmt werden

↗ Strahlungsgesetze, S. 16

↗ Veränderliche, S. 114

Interferometrische Bestimmung der Sterndurchmesser:

Mit besonderen interferometrischen Beobachtungsmethoden gelang es, die Durchmesser der größten nahen Sterne zu ermitteln.



Größenvergleich einiger Sterne

Einige interferometrisch ermittelte Sterndurchmesser			
Stern	Entfernung	Durchmesser	
		scheinbarer in "	wahrer in Vielfachen von D_0
Beteigeuze	180 pc	0,034	730
Mira	50 pc	0,056	390
Rigel	250 pc	0,00255	120
Regulus	26 pc	0,00138	38
Arctur	11 pc	0,022	28
Sirius	2,7 pc	0,0068	2

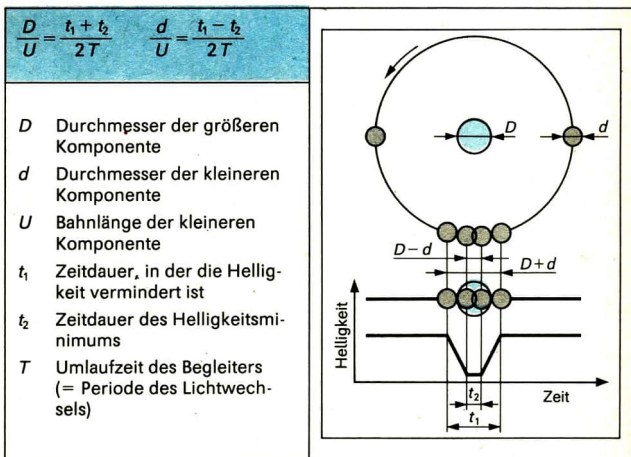
D_0 Durchmesser der Sonne

Bestimmung von Sterndurchmessern aus der Beobachtung von Bedeckungsveränderlichen:

Bei Bedeckungsveränderlichen kann der Durchmesser aus der Lichtkurve ermittelt werden (Bild).

↗ Veränderliche, S. 114 ↗ Doppelsterne, S. 113

Die Auswertung der Lichtkurve ergibt die Durchmesser beider Doppelsternkomponenten im Verhältnis zur Bahnlänge des Begleiters:



D und d können in linearem Maß errechnet werden, wenn die mittlere Bahngeschwindigkeit des Begleiters aus periodischen Linienverschiebungen im Spektrum ermittelt werden kann (bei etwa 100 Bedeckungssternen verwirklicht).

Bestimmung von Sterndurchmessern aus dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz:

$D \sim \frac{\sqrt{L}}{T^2}$	<p>D Sterndurchmesser L Leuchtkraft T Temperatur</p>
-------------------------------	---

Auf diese Weise ist der Durchmesser D bei allen Sternen bestimmbar, deren Leuchtkraft L und Oberflächentemperatur T unabhängig vom Durchmesser ermittelt werden können.

➔ Strahlungsgesetze, S. 16

Masse

Nach bisheriger Erkenntnis streuen Sternmassen nur über einen relativ geringen Bereich von etwa 0,1 bis 60 Sonnenmassen.

Sternmassen können aus *Doppelsternbeobachtungen* und aus der *Masse-Leuchtkraft-Beziehung* ermittelt werden.

Massenbestimmung bei Doppelsternen:

Die Komponenten eines Doppelsternsystems bewegen sich entsprechend den Keplerschen Gesetzen um den gemeinsamen Schwerpunkt. Aus der beobachteten Bahnbewegung kann mittels des 3. Keplerschen Gesetzes die Summe der Massen m_1 und m_2 berechnet werden:

$m_1 + m_2 = \frac{a^3}{T^2}$	<p>T Umlaufzeit (in a) a große Halbachse der Bahn des Begleiters relativ zum Hauptstern (in AE) $m_1; m_2$ Sternmassen der beiden Komponenten des Doppelsternsystems (in Einheiten der Sonnenmasse)</p>
-------------------------------	--

Wenn außerdem die großen Halbachsen a_1 und a_2 beider Bahnen bezüglich des Schwerpunkts des Systems ermittelt werden können, erhält man das Verhältnis der beiden Massen:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}$$

Aus den Gleichungen für $(m_1 + m_2)$ und $\frac{m_1}{m_2}$ lassen sich die Einzelmassen bestimmen. Auf diese Weise wurden die Massen in etwa 40 Doppelsternsystemen ermittelt.

➔ Keplersche Gesetze, S. 14 ➔ Doppelsterne, S. 113

Massenbestimmung mittels Masse-Leuchtkraft-Beziehung:

Für Hauptreihensterne gilt

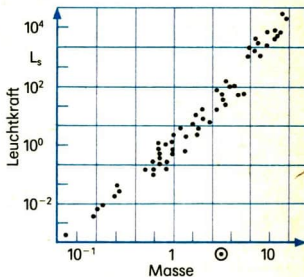
$$L \sim m^{3,5}$$

Mit wachsender Masse steigt die Leuchtkraft sehr stark an.

 L Leuchtkraft m Masse

Die Massenbestimmung auf diesem Wege gelingt bei Hauptreihensternen, deren Leuchtkraft ermittelt werden konnte.

- Verhalten sich die Massen dreier Hauptreihensterne wie 1:2:3, so verhalten sich ihre Leuchtkräfte etwa wie 1:11:47.



Masse-Leuchtkraft-Beziehung bei Hauptreihensternen

Mittlere Dichte

Wenn die Masse m und der Durchmesser D eines Sterns bekannt sind, läßt sich die mittlere Dichte $\bar{\rho}$ berechnen.

$$\bar{\rho} = \frac{6 \cdot m}{\pi \cdot D^3}$$

Die mittlere Dichte der Sterne reicht von $0,0000001 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (d. i. etwa $\frac{1}{10000}$ der Dichte der Luft an der Erdoberfläche!) bis zu $1000000000000000 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

- Volumen je 1000 Megatonnen (10^{12} kg) Masse bei verschiedenen Sternklassen

Sternklasse	Mittlere Dichte	Volumen je 10^{12} kg
Neutronenstern	$10^{15} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$	1 cm^3
Weißer Zwerg	$10^5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$	10000 m^3
sonnenähnlicher Stern	$1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$10^9 \text{ m}^3 = 1 \text{ km}^3$
Überriese	$10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$	10^7 km^3

Gravitationsbeschleunigung

Beschleunigung eines frei beweglichen Körpers unter Einwirkung der Gravitationskraft in Richtung auf den Mittelpunkt eines Himmelskörpers. Berechnet sich aus

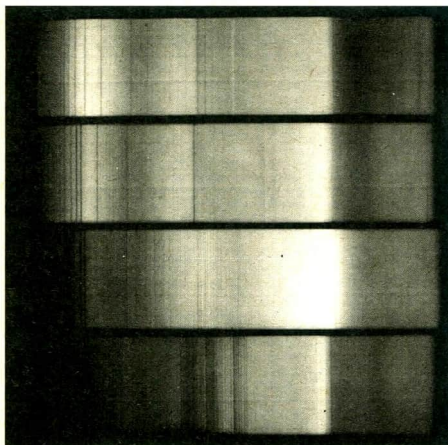
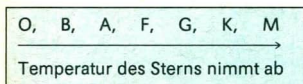
$a = \gamma \cdot \frac{m}{r^2}$	<p>γ Gravitationskonstante m Masse des Himmelskörpers r Abstand des fallenden Körpers vom Mittelpunkt des Himmelskörpers</p>
----------------------------------	--

Spektralklasse

Die Spektren der Sterne unterscheiden sich hinsichtlich der Strahlungsintensität, die von der Wellenlänge abhängt, und ihrer inneren Struktur (Anzahl, Lage, Stärke und Form der Absorptionslinien). Die verschiedenen Spektren spiegeln die unterschiedlichen physikalischen Bedingungen in den Sternatmosphären und deren chemische Zusammensetzung wider.

➤ Sonnenstrahlung, S. 54

Die Sternspektren werden nach abnehmender Temperatur des Sterns in Hauptklassen eingeteilt, die mit Buchstaben bezeichnet werden:



Objektivprismenaufnahmen von einigen hellen Sternen. Die Abbildung zeigt von oben nach unten die Spektren von Spica, Prokyon, Arktur und Beteigeuze, den hellsten Sternen der Sternbilder Jungfrau, Kleiner Hund, Bärenhüter und Orion.

Jede dieser Hauptklassen (ausgenommen die Klasse O) wird in 10 Unterklassen eingeteilt, die durch Anhängen der Ziffern 0, 1, ..., 9 gekennzeichnet werden.

Spektralklassen einiger Sterne			
Stern	Spektralklasse	Stern	Spektralklasse
Wega	A 0	Sonne	G 2
Deneb	A 2	Arktur	K 2
Atair	A 7	Aldebaran	K 5
Polarstern	F 8	Beteigeuze	M 2

5.4. Innerer Aufbau der Sterne

Gleichgewichtszustand der Sterne

Sterne befinden sich im *mechanischen* und im *thermischen Gleichgewicht*.

Mechanisches Gleichgewicht

Für jeden Punkt der Gaskugel „Stern“ gilt: Der nach innen gerichtete Schweredruck ist absolut gleich der nach außen gerichteten Summe von Gasdruck und Strahlungsdruck.

Thermisches Gleichgewicht

Die im Sterninnern freigesetzte Energie ist gleich der von der Sternoberfläche in den Weltraum abgestrahlten Energie. Im Stern staut sich nirgendwo Energie an.

Masseverteilung

Die Sternmasse ist nicht gleichmäßig im Sterninnern verteilt, sondern in Richtung zum Sternzentrum konzentriert.

Dichteverlauf

Infolge der ungleichen Verteilung der Masse im Stern wächst die Dichte von außen nach innen stark an.

- Sonne: Mittlere Dichte: $1,41 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
Dichte im Zentrum: $160 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

Temperaturverlauf

Die Temperatur steigt im Sterninnern in Richtung Sternzentrum stark an (bis auf 10^7 K bis 10^9 K, Sonne ungefähr $16 \cdot 10^6$ K).

Unter diesen Bedingungen werden Kernverschmelzungsprozesse möglich, bei denen Energie freigesetzt wird.

Energiefreisetzungsprozesse in Sternen

Sterne strahlen über lange Zeiträume sehr große Energiebeträge ab. Nur atomare Prozesse sind in der Lage, über Milliarden Jahre Energie dieser Größenordnung freizusetzen.

In den Sternen verschmelzen bei hohen Temperaturen leichte Atomkerne zu schwereren. Dabei ist die Masse der gebildeten Kerne etwas geringer als die Summe der Massen der verbrauchten Atomkerne. Dieser *Massendefekt* wird entsprechend der Einsteinschen Äquivalenzbeziehung als Strahlung freigesetzt.

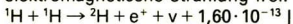
Die Art der Kernverschmelzung (Kernfusion) hängt von den physikalischen Verhältnissen im Stern, insbesondere von der Temperatur und von der Art der vorhandenen Teilchen ab. Die drei wichtigsten Prozesse sind

- die *Proton-Proton-Reaktion*,
- die *Helium-Reaktion*,
- der *C-N-O-Zyklus*.

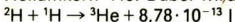
Proton-Proton-Reaktion, pp-Reaktion

Bei Temperaturen $\geq 5 \cdot 10^6$ K wird der gesamte Sternkern zu einem „Fusionsreaktor“. Dabei läuft folgendes ab:

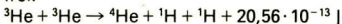
2 Wasserstoffkerne ^1H (Protonen) vereinigen sich zu einem Deuteriumkern ^2H . Dabei entstehen noch ein Positron e^+ und ein Neutrino ν , außerdem wird elektromagnetische Strahlung frei:



Der Deuteriumkern ^2H vereinigt sich mit einem weiteren Proton zu einem Heliumkern ^3He . Dabei wird wiederum elektromagnetische Strahlung frei:



Jeweils 2 der auf diese Weise gebildeten ^3He -Kerne vereinigen sich zu einem ^4He -Kern. Dabei werden zwei Protonen und elektromagnetische Strahlung frei:



Hinweis: Die beiden ersten Reaktionsstufen müssen jeweils zweimal ablaufen, damit die für die letzte Reaktionsstufe benötigten Teilchen zur Verfügung stehen!

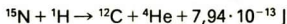
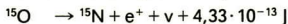
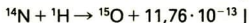
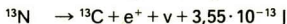
Gesamtbilanz dieses Prozesses:

- Vier Protonen vereinigen sich zu einem ^4He -Kern.
- Eine Energie von $41,32 \cdot 10^{-13}$ J je ^4He -Kern wird in Form von Strahlung frei.

- Bei der Umwandlung von 1 g Wasserstoff ($6 \cdot 10^{23}$ Protonen) werden $62 \cdot 10^{10} \text{ J} = 172000 \text{ kWh}$ frei.
- Die pp-Reaktion spielt bei der Energiefreisetzung in der Sonne eine entscheidende Rolle.

C-N-O-Zyklus, Bethe-Weizsäcker-Zyklus

Bei Temperaturen $\geq 10^7 \text{ K}$ tritt neben die pp-Reaktion ein zweiter Prozeß, dessen Ergiebigkeit bei Temperaturen > 16 Millionen K größer als der des pp-Prozesses ist:

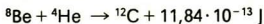


Gesamtbilanz dieses Prozesses:

- Aus 4 Protonen entsteht ein He-Kern (N- und O-Kerne sind Zwischenprodukte; der für die erste Reaktion benötigte ^{12}C -Kern steht am Ende wieder zur Verfügung).
 - Eine Energie von $40,0 \cdot 10^{-13} \text{ J}$ je ^4He -Kern wird frei (abgezogen ist die Energie der den Stern verlassenden Neutrinos).
- Der C-N-O-Zyklus spielt im Sonnenkern eine Rolle.

Helium-Reaktion, Salpeter-Prozeß

Bei Zentraltemperaturen $\geq 10^8 \text{ K}$ beginnt die Umwandlung von Helium in Kohlenstoff:



Gesamtbilanz dieses Prozesses:

- Aus drei ^4He -Kernen (= α -Teilchen) wird ein ^{12}C -Kern.
- Eine Energie von $11,69 \cdot 10^{-13} \text{ J}$ je ^{12}C -Kern wird frei.

➤ Sternentstehung, S. 117

➤ Sternentwicklung, S. 117

➤ Sonnenstrahlung, S. 54

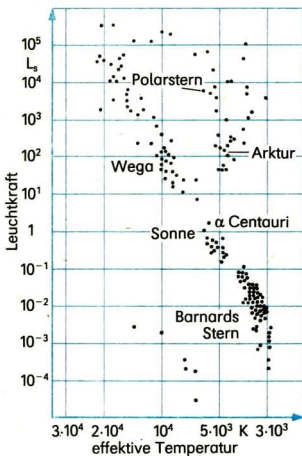
5.5. Hertzsprung-Russell-Diagramm – Sternarten

Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD)

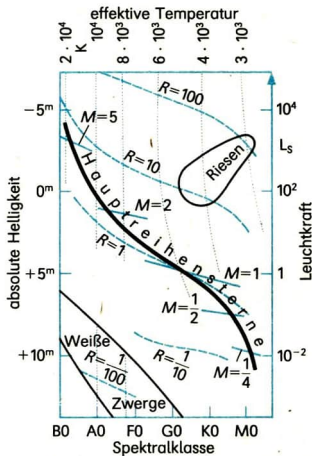
Zustandsdiagramm der Sterne, in dem auf der Ordinate Leuchtkraft und/oder absolute Helligkeit und auf der Abszisse Temperatur und/oder Spektralklasse aufgetragen sind.

Der physikalische Zustand bestimmt die Lage des Sterns im HRD. Häufungsstellen der Sterne im HRD widerspiegeln langdauernde, relativ stabile Zustände in der Sternentwicklung.

Quer durch das HRD vom Bereich großer Leuchtkraft und hoher Temperatur bis zum Bereich geringer Leuchtkraft und niedriger Temperatur verläuft die *Hauptreihe*, auf der sich der überwiegende Teil der Sterne findet.



HRD für die hellsten und die nächsten Sterne



HRD mit Linien gleicher Temperatur, Masse und Durchmesser

Sterne im HRD	
<i>Hauptreihensterne</i>	Auf der Hauptreihe liegende Sterne
<i>Riesen</i>	Sterne der Spektralklassen G bis M, die sich von den Hauptreihensternen gleicher Spektralklassen (bzw. Temperatur) durch größere Leuchtkraft und größeren Durchmesser unterscheiden; sie liegen oberhalb der Hauptreihe

<i>Überriesen</i>	Sterne sehr großer Leuchtkraft und sehr großen Durchmessers; liegen oberhalb der Hauptreihe und des Gebietes der Riesen
<i>Weißer Zwerge</i>	Sterne geringer Leuchtkraft mit etwa Sonnenmasse und Planetendurchmesser (↗ mittlere Dichte, S. 107); liegen etwa 8 mag bis 12 mag unterhalb der Hauptreihe im Bereich der Spektralklassen B bis G

↗ Sternentwicklung, S. 117

Neutronensterne, Pulsare

Überdichte Sterne von etwa 1,4 bis 2 Sonnenmassen und Durchmessern von nur wenigen Kilometern. Sie strahlen vor allem im Radiobereich in regelmäßigen Pulsen mit Perioden von 10^{-2} s bis 10^1 s.

Sie sind wegen ihrer sehr geringen Leuchtkräfte im HRD nicht verzeichnet und wurden 1967 entdeckt.

↗ Mittlere Dichte, S. 107

↗ Sternentwicklung, S. 117

Leuchtkraftklasse

Größe, die in Verbindung mit der Spektralklasse die Leuchtkraft eines Sterns kennzeichnet.

Das Symbol für die Leuchtkraftklasse wird der Spektralklasse hinzugefügt.

- Die Sonne ist ein Stern der Spektralklasse G 2 und der Leuchtkraftklasse V: G 2 V

Leuchtkraftklassen der Sterne	
Symbol	Sternklasse
I	Überriesen
II	helle Riesen
III	normale Riesen
IV	Unterriesen
V	Hauptreihensterne
VI	Unterzwerge

Doppelsterne

Arten von Doppelsternen	
<i>Physische Doppelsterne</i>	<i>Optische Doppelsterne</i>
Sternpaar, das sich um einen gemeinsamen Schwerpunkt bewegt	zufällig in fast derselben Blickrichtung stehende Sterne mit ganz unterschiedlichen Entfernungen

Von astronomischem Interesse sind nur die *physischen Doppelsterne*.

Arten physischer Doppelsterne	
<i>Visuelle Doppelsterne</i>	können in Fernrohren getrennt wahrgenommen werden
<i>Spektroskopische Doppelsterne</i>	können auch mit den besten optischen Hilfsmitteln nicht getrennt wahrgenommen werden; werden durch periodische Verschiebungen der Linien in ihrem gemeinsamen Spektrum als Doppelsterne erkannt.
<i>Photometrische Doppelsterne</i>	werden durch charakteristische Helligkeitsänderungen als Doppelsterne erkannt.
<i>Astrometrische Doppelsterne</i>	werden aus der „Schlingerbewegung“ der Bahn eines Sterns als Doppelsterne erkannt, durch die auf die Existenz eines nicht beobachtbaren Begleiters geschlossen werden kann.

Mehrfachsterne

Mehr als zwei Sterne, die infolge der gegenseitigen Anziehung eine physikalische Einheit bilden. Oft sind einzelne Komponenten eines Mehrfachsystems *Doppelsterne*.

Veränderliche, veränderliche Sterne

Sterne mit zeitlich veränderlicher Helligkeit, die eine Folge mehr oder weniger periodischer Veränderungen der Zustandsgrößen (*physische Veränderliche*) oder von Bedeckungseffekten (*optische Veränderliche, Bedeckungsveränderliche*) ist.

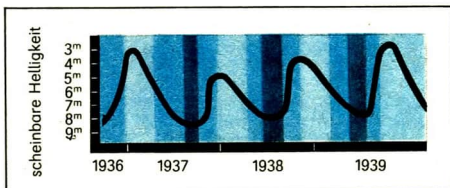
Hauptgruppen veränderlicher Sterne	
<i>Physische Veränderliche</i>	<i>Optische Veränderliche</i>
Sterne in bestimmten Entwicklungsstadien, bei denen sich Zustandsgrößen – darunter die Helligkeit – regelmäßig, halbregelmäßig oder unregelmäßig verändern	Physische Doppelsterne, deren Bahnebene in Blickrichtung verläuft, so daß sich die Komponenten periodisch bedecken (Bedeckungsveränderliche). Jede der beiden Komponenten besitzt im allgemeinen konstante Helligkeit.

➔ Sternentwicklung, S. 117

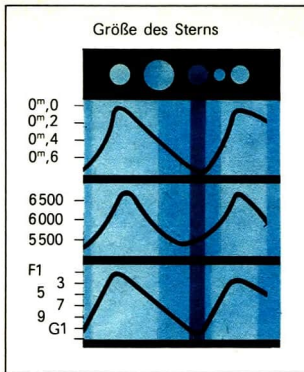
➔ Masse, S. 106

Arten von physischen Veränderlichen	
<i>Pulsations- veränderliche</i>	Pulsationen der äußeren Sternschichten verändern die Zustandsgrößen Radius, mittlere Dichte, Temperatur, Helligkeit, Spektraltyp; befinden sich in einem späten Entwicklungsstadium; liegen im HRD oberhalb der Hauptreihe.
RR-Lyrae-Sterne δ -Cephei-Sterne Mira-Sterne	periodisch veränderliche Riesen mit Perioden von wenigen Stunden bis zu etwa 1 Tag und Helligkeitsschwankungen von 0,5 mag bis 1,5 mag periodisch veränderliche Riesen und Überriesen mit Perioden von 1 bis 100 Tagen und Helligkeitsschwankungen von etwa 1 mag periodisch veränderliche Riesen und Überriesen mit Perioden von 80 bis 1000 Tagen sowie Helligkeitsschwankungen von 2,5 mag bis 10 mag
<i>Eruptions- veränderliche</i>	Eruptiver Abwurf äußerer Sternschichten führt zu ein- oder mehrmaligem Helligkeitsanstieg; befinden sich in einem sehr frühen oder sehr späten Stadium ihrer Entwicklung ↗ Sternentwicklung, S. 117
T-Tauri-Sterne Novae Supernovae	unregelmäßig Veränderliche mit raschen Helligkeitsänderungen bis 4 mag; befinden sich im Vor-Hauptreihenstadium Veränderliche mit plötzlicher Helligkeitsänderung bis zu 20 mag; befinden sich wahrscheinlich in einem späten Entwicklungsstadium selten auftretende massereiche Veränderliche mit extremen Helligkeitsänderungen von ≥ 20 mag; im Milchstraßensystem zuletzt 1604 beobachtet; nach dem Ausbruch entwickeln sich diese Sterne wahrscheinlich zu Neutronensternen oder Schwarzen Löchern

↗ Sternentwicklung, S. 117



Lichtkurve von Mira



Änderung einiger Zustandsgrößen eines δ -Cephei-Sterns während einer Periode.
Oben: Helligkeitsänderung
Mitte: Temperatur (in K)
Unten: Spektraltyp

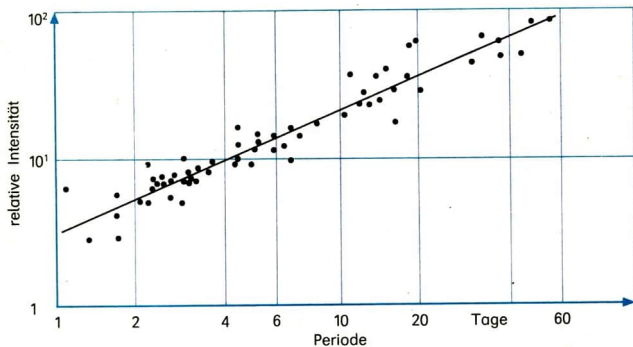
Perioden-Helligkeits-Beziehung

Für δ -Cephei-Sterne gilt: Je länger die Periode, desto größer die absolute Helligkeit (bzw. die Leuchtkraft).

Aus der beobachteten Periode kann auf die absolute Helligkeit (bzw. Leuchtkraft) geschlossen werden. Aus absoluter und beobachteter Helligkeit kann die Entfernung berechnet werden.

Da δ -Cephei-Sterne Riesen mit großen absoluten Helligkeiten sind, können sie auch in extragalaktischen Sternsystemen beobachtet werden. Auf diese Weise konnte die Entfernung von Sternsystemen ermittelt werden.

➔ Entfernungsbestimmung, S. 100



Perioden-Helligkeits-Beziehung für δ -Cepheiden

5.6. Kosmogonie der Sterne

Sternentstehung

Sterne entstehen unter bestimmten Bedingungen in interstellaren Wolken, wenn Teile der Wolke unter der Wirkung der Eigengravitation zu kontrahieren beginnen. Dabei wird potentielle in kinetische Energie umgewandelt. Mit wachsender Dichte steigen die Temperatur und der Gasdruck in der kontrahierenden Gasmasse, insbesondere in ihren Zentralgebieten.

Die *Kontraktionsphase* ist umso kürzer, je größer die kontrahierende Gasmasse ist.

Erreicht die Temperatur im Zentralgebiet etwa $5 \cdot 10^6$ K, so setzen Kernreaktionen ein.

Der entstandene Himmelskörper hat sich zu einem Hauptreihenstern entwickelt. Im HRD liegt sein Bildpunkt an der Stelle der Hauptreihe, die seiner Masse entspricht.

↗ Gleichgewichtszustand der Sterne, S. 109

↗ Energiefreisetzungsprozesse in Sternen, S. 110

↗ Hertzsprung-Russell-Diagramm, S. 112

↗ Interstellare Materie, S. 126

Abhängigkeit der Dauer der Kontraktion, der erreichten Oberflächentemperatur und der Spektralklasse bei der Sternentstehung von der Masse			
Masse (in Sonnenmassen)	ungefähre Zeitdauer bis zur Entwicklung zum Hauptreihenstern (in 10^6 Jahren)	ungefähre Oberflächentemperatur	Spektralklasse
		des entstehenden Sterns	
0,65	150	4400 K	K 3
1,00	30	5850 K	G 1
1,55	8	7500 K	F 0
2,29	3	9300 K	A 3

Sternentwicklung

Die Energiefreisetzung führt zu irreversiblen Veränderungen im Stern. Er durchläuft 3 Entwicklungsphasen:

- das *Hauptreihenstadium*,
- das *Riesenstadium* und
- ein *Spätstadium*.

↗ Energiefreisetzungsprozesse in Sternen, S. 110

↗ Hertzsprung-Russell-Diagramm, S. 112

Hauptstadien der Sternentwicklung	
<i>Hauptreihenstadium</i>	<p>Energiefreisetzung durch Umwandlung von Wasserstoff in Helium im Kerngebiet des Sterns (pp-Reaktion, C-N-O-Zyklus) längste Entwicklungsphase jedes Sterns; Verweilzeit auf der Hauptreihe hängt von der Masse (d. h. vom Wasserstoffvorrat im Kerngebiet) und von der Leuchtkraft ab.</p> <p>Nach Erschöpfung des Wasserstoffvorrates im Zentralgebiet Schrumpfung des Kerns, Temperaturanstieg auf ungefähr 10^8 K infolge Umwandlung von potentieller in kinetische Energie</p>
<i>Riesenstadium</i>	<p>Energiefreisetzung durch Umwandlung von Helium in Kohlenstoff und andere Elemente im Kerngebiet des Sterns (Helium-Reaktion), Fortsetzung der pp-Reaktion in einer Kugelschale um den an Wasserstoff ausgebrannten Kern, Aufblähen der äußeren Hülle, Verweilzeit im Riesenstadium kürzer als im Hauptreihenstadium, Durchlauf von Phasen, in denen der Stern als Veränderlicher in Erscheinung tritt</p>
<i>Spätstadien</i>	<p>Nach Erschöpfen aller Kernenergiequellen wird der Stern in Abhängigkeit von seiner Restmasse zu einem <i>Weißer Zwerg</i>, einem <i>Neutronenstern</i> oder einem <i>Schwarzen Loch</i>.</p>

- ➔ Masse, S. 106
- ➔ Energiefreisetzungprozesse in Sternen, S. 110
- ➔ Hertzsprung-Russell-Diagramm, S. 112
- ➔ Veränderliche, S. 114

Schwarzes Loch

Vermuteter Himmelskörper mit extrem hoher Dichte und einem sehr hohen Gravitationsfeld in seiner Umgebung. An der Oberfläche herrscht eine so starke Schwerebeschleunigung, daß weder Teilchen noch elektromagnetische Strahlung das Objekt verlassen können. Schwarze Löcher können auf direktem Wege nicht nachgewiesen werden.

Nach der Theorie entstehen solche Gebilde im Spätstadium der Sternentwicklung. Sie gehen aus Sternen hervor, die mindestens eine Masse von etwa 2,5 Sonnenmassen besitzen.

Alter der Sterne

Zeit, die seit dem Erreichen des *Hauptreihenstadiums* vergangen ist.

Altersbestimmung bei Sternen

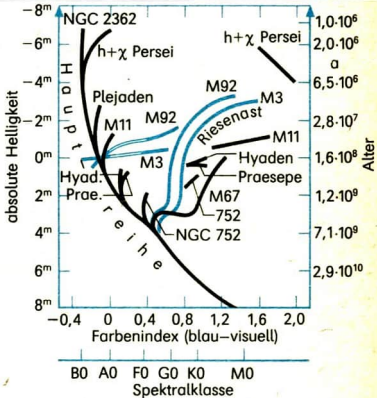
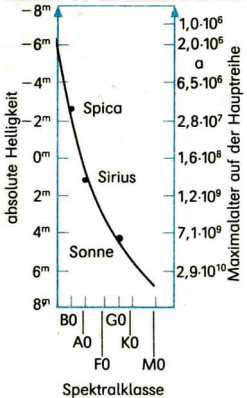
Vergleich von Leuchtkraft und Masse ergibt eine obere Grenze für die Dauer des Aufenthaltes im Hauptreihenstadium (t_{HR}). Befindet sich der Stern noch auf der Hauptreihe des HRD, so hat er dieses Grenzalter noch nicht erreicht. (Um wieviel jünger er ist, kann nicht festgestellt werden.) Hat er die Hauptreihe bereits verlassen, ist sein Alter größer als t_{HR} .

Jeder Sternmasse entspricht eine maximale Verweilzeit t_{HR} auf der Hauptreihe. Sie ist umso kleiner, je größer die Sternmasse ist.

→ Masse, S. 106

- Die Sonne hat ein Alter von 4 bis 5 Milliarden Jahren. Massereichere Sterne, die sich noch im Hauptreihenstadium befinden (z. B. Spica), müssen später als die Sonne entstanden sein, da die ihrem Bildpunkt im HRD zugehörige Verweilzeit auf der Hauptreihe kleiner als das Alter der Sonne ist.

Die Sternentstehung ist kein einmaliger Prozeß, sondern dauert im Milchstraßensystem seit mehreren Milliarden Jahren an.



HRD mit Hauptreihe und Linien gleichen Alters sowie mit einigen eingezeichneten Hauptreihensternen

HRD von Sternhaufen

Altersbestimmung bei Sternhaufen

Die Mitgliedsterne von Sternhaufen sind praktisch gleichzeitig und mit gleicher chemischer Zusammensetzung entstanden und befinden sich in nahezu gleicher Entfernung von uns. Da sie unterschiedliche Massen besitzen, entwickeln sie sich unterschiedlich rasch. Die massereichsten Sterne verlassen die Hauptreihe bereits, während sich die masseärmeren noch auf der Hauptreihe befinden. Die Grenzstelle zwischen den bereits von der Hauptreihe abgewanderten und den noch auf der Hauptreihe befindlichen Sternen eines Haufens heißt *Abknickpunkt*.

Das dem Abknickpunkt entsprechende Alter t_{HR} ist gleich dem Alter aller Sterne des Haufens.

Alter von Sternhaufen		
Bezeichnung	Art des Haufens	ungefähres Alter
h und χ Per	offener Sternhaufen	$3 \cdot 10^6$ a
Plejaden	offener Sternhaufen	10^8 a
Hyaden	offener Sternhaufen	$1,2 \cdot 10^9$ a
M 92	Kugelsternhaufen	5 bis $7 \cdot 10^9$ a
M 3	Kugelsternhaufen	6 bis $8 \cdot 10^9$ a

➔ Sternhaufen, S. 124

Alle Altersbestimmungen führten zu dem Ergebnis, daß zwar viele Himmelskörper jünger, keiner jedoch älter als etwa $12 \cdot 10^9$ bis $15 \cdot 10^9$ Jahre ist.

➔ Weltalter, S. 144

➔ Altersbestimmung kosmischer Prozesse, S. 144

➔ Urknall, S. 145

6.1. Milchstraßensystem

Milchstraßensystem, Galaxis

Das Sternsystem, in dem sich die Sonne als einer von etwa 100 Milliarden Sternen befindet.

Milchstraße

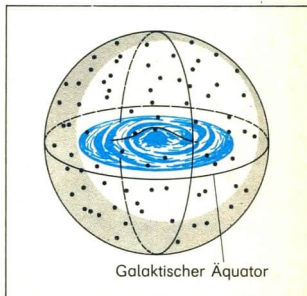


Milchstraße im Bereich des Sternbildes Schütze

Schwach leuchtendes Band mit unregelmäßiger Begrenzung, das die Himmelskugel längs eines größten Kreises umspannt. Bei Beobachtung mit einem Fernrohr löst sich die Milchstraße in eine Vielzahl von Sternen auf.

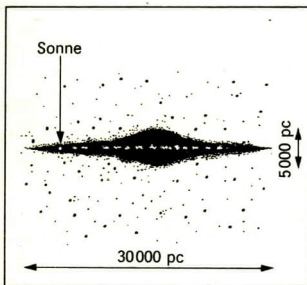
Alle Objekte der Milchstraße gehören dem Milchstraßensystem an.

Aufbau des Milchstraßensystems. Ein sehr kompakter Kern wird von der Scheibe umgeben. Beide sind in den Halo eingebettet.

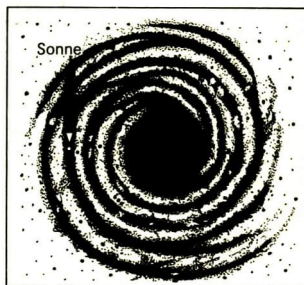


Aufbau des Milchstraßensystems

Kern	Durchmesser ≈ 5 kpc, intensive Radio- und Infrarotquelle, optisch wegen vorgelagerter Dunkelwolken unbeobachtbar
Scheibe (umschließt den Kern)	Durchmesser ≈ 30 kpc, Dicke in Kernnähe ≈ 5 kpc, Dicke in den äußeren Bereichen ≈ 1 kpc. Besteht aus mehreren, in nahezu einer Ebene angeordneten Spiralarmen, die durch helle, heiße Sterne, offene Sternhaufen und inter- stellare Materie markiert werden. Zwischen den Spiralarmen befinden sich Sterne mit ge- ringerer Leuchtkraft.
Halo (umschließt Kern und Scheibe)	fast kugelförmig, Durchmesser ≈ 50 kpc. Besteht vor allem aus kugelförmigen Stern- haufen und veränderlichen Sternen vom Typ RR Lyrae.



Seitenansicht des Milchstraßensystems



Draufsicht auf das Milchstraßensystem

Spiralstruktur. Von der Erde aus kann die Spiralstruktur des Milchstraßensystems nur zu einem kleinen Teil visuell überschaut werden, da sich der Beobachter selbst innerhalb des Systems befindet und große Bereiche des Systems durch interstellare Dunkelwolken optisch unbeobachtbar sind. Wesentliche Erkenntnisse über die Spiralstruktur des Milchstraßensystems wurden durch Beobachtungen im Radiobereich gewonnen.

Bisher wurden drei in Sonnennähe verlaufende Teile von Spiralarmen festgestellt.

Sagittariusarm	In Richtung zum Sternbild Schütze (lat. Sagittarius); er verläuft zwischen der Sonne und dem Kern des Milchstraßensystems.
Orionarm	An seinem Rande befindet sich die Sonne, etwa 10 kpc vom Zentrum des Milchstraßensystems entfernt.
Perseusarm	Er verläuft etwa 2 kpc außerhalb des Orionarms.

Der mittlere Abstand der Spiralarme voneinander beträgt (in Sonnenentfernung vom Zentrum des Milchstraßensystems) 1,5 kpc.

Ort der Sonne im Milchstraßensystem	
Entfernung vom Zentrum	etwa 10 kpc
Entfernung von der Milchstraßen-ebene	15 pc nördlich
Richtung von der Sonne zum Zentrum	zu den Sternbildern Schlangenträger und Schütze
Richtung von der Sonne entgegen dem Zentrum	zu den Sternbildern Fuhrmann und Stier

Angaben zum Milchstraßensystem		
Durchmesser	Halo Scheibe Kern	etwa 50 kpc etwa 30 kpc etwa 5 kpc
Masse	Sterne interstellare Materie	etwa $2 \cdot 10^{11}$ Sonnenmassen etwa 10^{10} Sonnenmassen
Mittlere Dichte		etwa 0,15 Sonnenmassen je pc^3 $\cong 10^{-23} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
Gesamtleuchtkraft		etwa $2,5 \cdot 10^{10}$ Sonnenleuchtkräfte $= 10^{37} \text{ W}$
Absolute Helligkeit		$-20^m,5$

Sternhaufen

Ansammlung von Sternen annähernd gleichen Alters und gleichen Entstehungsortes im Raum; an der Himmelskugel in vielen Fällen durch ihre hohe Sterndichte leicht zu erkennen. Sternhaufen finden sich im Milchstraßensystem und in anderen Galaxien.

Einteilung der Sternhaufen:

- Sternassoziationen,
- Bewegungssternhaufen,
- offene Sternhaufen,
- kugelförmige Sternhaufen, Kugelhaufen.

Sternassoziationen

Sternhaufen mit sehr geringer Sterndichte. Die Zusammengehörigkeit ihrer Sterne ist an der Übereinstimmung der Sternspektren zu erkennen. Sternassoziationen gehören zu den jüngsten Objekten im Milchstraßensystem.

Typ	Mitglieder	Alter
T-Assoziationen	veränderliche Sterne vom Typ T Tauri	10^5 bis 10^7 Jahre
O-Assoziationen	junge O- und B-Sterne	10^6 bis 10^7 Jahre

- Die drei „Gürtelsterne“ im Sternbild Orion gehören zu einer ausgedehnten O-Assoziation.

Bewegungssternhaufen

Sterne, deren Zusammengehörigkeit an ihrer gemeinsamen (gleich schnellen und gleich gerichteten) Bewegung im Raum erkennbar ist. Sie erscheinen wegen zu geringer Sterndichte meist äußerlich nicht als Sternhaufen.

- Die Sterne des Ursa-Maior-Haufens erscheinen wegen der geringen Entfernung dieses Haufens über die ganze Himmelskugel verteilt. Zu ihm gehören 5 Sterne des Sternbildes Großer Bär.

Offene Sternhaufen

Ansammlung von bis zu einigen hundert gleichalten Sternen. Sie fallen an der Himmelskugel durch eine erhöhte Sterndichte auf, zeigen aber eine geringe Konzentration wegen des Haufenzentrums.

Masse	100 bis 1000 Sonnenmassen
Wahrer Durchmesser	1 pc bis 20 pc

Scheinbarer Durchmesser	0,5' bis 1° (Ausnahmen: Plejaden 1,7°; Hyaden 7°)
Räumliche Sterndichte	2 bis 500 Sonnenmassen je pc ³
Gesamtanzahl im Milchstraßensystem	etwa 18000 (vermutet)

Die offenen Sternhaufen befinden sich fast ausnahmslos sehr nahe der Mittelebene des Milchstraßensystems. Sie sind nicht stabil, sondern lösen sich allmählich auf. Die heute existierenden offenen Sternhaufen können im allgemeinen nur zwischen 10^8 und 10^9 Jahre alt sein; sie gehören zu den jüngsten Objekten im Milchstraßensystem.

- Bekannte offene Sternhaufen befinden sich in den Sternbildern Stier (Plejaden – auch Siebengestirn genannt – und Hyaden) und Krebs (Praesepe – auch Krippe genannt).

➔ Aufbau des Milchstraßensystems, S. 122



Zwei offene Sternhaufen
im Sternbild Perseus



Kugelförmiger Sternhaufen im Sternbild
Jagdhunde

Kugelförmige Sternhaufen, Kugelhaufen

Ansammlungen von 10^5 bis 10^8 Sternen, die an der Himmelskugel als Gebiete sehr hoher Sterndichte zu sehen sind. Sie sind kugelsymmetrisch und stark gegen das Haufenzentrum konzentriert.

Wahrer Durchmesser	10 pc bis 200 pc
Scheinbarer Durchmesser	0,4' bis 25'
Räumliche Sterndichte im Zentrum	bis 10^4 Sonnenmassen je pc^3
Gesamtanzahl im Milchstraßensystem	mehr als 120
Leuchtkraft	etwa 10^5 Sonnenleuchtkräfte = $4 \cdot 10^{31}$ W

Die kugelförmigen Sternhaufen umgeben in Form einer nahezu kugelförmigen Wolke (Halo) das Milchstraßensystem. Sie gehören zu den ältesten Gebilden im Milchstraßensystem; ihr Alter liegt zwischen $10 \cdot 10^9$ und $15 \cdot 10^9$ Jahren.

Auch in anderen, außergalaktischen Sternsystemen wurden kugelförmige Sternhaufen gefunden.

- Ein unter günstigen Beobachtungsbedingungen mit dem bloßen Auge sichtbarer kugelförmiger Sternhaufen befindet sich im Sternbild Herkules.
➔ Aufbau des Milchstraßensystems, S. 122

Interstellare Materie

Stoffe und Felder im Raum zwischen den Sternen in einem Sternsystem. Im engeren Sinne versteht man unter interstellarer Materie Gas- und Staubmassen unterschiedlicher Dichte und Ausdehnung. Gas und Staub kommen in der interstellaren Materie meist gemeinsam vor, der Staubanteil beträgt im Mittel 1 Massenprozent.

- Im Milchstraßensystem ist die interstellare Materie in einer nur 300 pc mächtigen, also relativ dünnen Schicht in der Mittelebene der Scheibe angeordnet und in den Spiralarmen konzentriert. Auch in außergalaktischen Sternsystemen ist interstellare Materie vorhanden.
➔ Aufbau des Milchstraßensystems, S. 122

Interstellares Gas

Teil der interstellaren Materie.

Zusammensetzung	Elektronen, Ionen, Atome (etwa 75% Wasserstoff, etwa 23% Helium); an manchen Stellen auch Moleküle (u. a. H_2 , H_2O , SO_2 , CO , HCN , H_2S , $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)
Dichte	im Mittel 1 Teilchen je cm^3 ; in dichten Wolken 10^4 Teilchen je cm^3

Zustandsformen	<p><i>neutraler Wasserstoff</i> (Anteil etwa 85%). Die mittlere Teilchengeschwindigkeit entspricht einer Temperatur von 20 K bis 200 K.</p> <p><i>Zwischenwolken-Gas</i>. Die mittlere Teilchengeschwindigkeit entspricht einer Temperatur von 2000 K.</p> <p><i>ionisierter Wasserstoff</i>. Die mittlere Teilchengeschwindigkeit entspricht einer Temperatur von etwa 8000 K.</p>
Erscheinungsformen	<p><i>Optisch leuchtend</i>, wenn die Gasatome durch energiereiche Strahlung benachbarter heißer Sterne zum Aussenden von Licht angeregt werden. Man beobachtet einen <i>leuchtenden Nebel</i> (<i>Emissionsnebel</i> genannt, weil die Zerlegung seines Lichtes ein <i>Emissionslinienspektrum</i> ergibt).</p> <p><i>Optisch nicht leuchtend</i>, jedoch nachweisbar durch Absorptionslinien in den Spektren dahinter befindlicher Sterne und beobachtbar mit Radioteleskopen, da der Wasserstoff und die meisten Moleküle Radiostrahlung aussenden</p>



Gasnebel: Rosettennebel

Gasnebel und Dunkelwolke:
Konusnebel im Sternbild Einhorn

Interstellarer Staub

Teil der interstellaren Materie.

Zusammensetzung	noch unbekannt, wahrscheinlich zum Teil Silikateilchen
Mittlere Dichte	$10^{-26} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
Mittlere Teilchengröße	0,1 μm
Temperatur	10 K bis 20 K
Erscheinungsformen	<p><i>Optisch leuchtend</i>, wenn die Staubteilchen durch das Licht benachbarter kühler Sterne angestrahlt werden.</p> <p>Man beobachtet einen <i>leuchtenden Nebel (Reflexionsnebel)</i>; bei Zerlegung seines Lichtes ergibt sich das Spektrum des Sternlichtes, also ein <i>kontinuierliches Spektrum mit Absorptionslinien</i>.</p> <p><i>Optisch nichtleuchtend</i>. Sehr dichte und ausge dehnte Staubwolken absorbieren so viel Licht der dahinter befindlichen Sterne, daß sie als <i>Dunkelwolken</i> in Erscheinung treten. Staubmassen geringerer Ausdehnung streuen und röten das hindurchtrende Licht. Von Staubmassen in der Umgebung eines Sterns ausgesandte <i>Infrarotstrahlung</i> kann beobachtet werden.</p>

Kosmische Strahlung

Teil der interstellaren Materie.

Zusammensetzung	90% Protonen, 9% Heliumkerne, 1% andere Atomkerne
Herkunft	zum Teil von der Sonne, zum Teil von Supernova-Ausbrüchen, zum Teil möglicherweise aus anderen (außergalaktischen) Sternsystemen
Besondere Eigenschaften	außerordentlich hohe Teilchenenergien (10^3 MeV bis $10^{14} \text{ MeV} = 10^{-4} \text{ J}$ bis 10^7 J) je Teilchen)

Beobachtungsmöglichkeiten	Die <i>Primärstrahlung</i> (eigentliche kosmische Strahlung) ist nur außerhalb der dichten Schichten der Erdatmosphäre (von künstlichen Erdsatelliten und Raumstationen aus) zu beobachten. Beim Zusammenstoß eines Teilchens mit einem Teilchen der Erdatmosphäre entsteht eine <i>Sekundärstrahlung</i> , die zum Teil bis zur Erdoberfläche gelangt und hier registriert werden kann.
---------------------------	---

Felder im interstellaren Raum

Teil der interstellaren Materie.

Art	Objekt
Gravitationsfelder	Sterne, Gas- und Staubmassen
Magnetfeld	Milchstraßensystem
Strahlungsfelder	Sterne

Bewegungen der Sterne

Veränderungen der Lage der Sterne im Milchstraßensystem.

Bewegungen der Sterne		
Individualbewegung		Bewegung um das Zentrum des Milchstraßensystems
unregelmäßig	geordnet	

Beobachtung der Bewegungen der Sterne

Die Bewegungen können nicht unmittelbar gemessen werden. Man kann nur die Eigenbewegung und die Radialgeschwindigkeit messen.

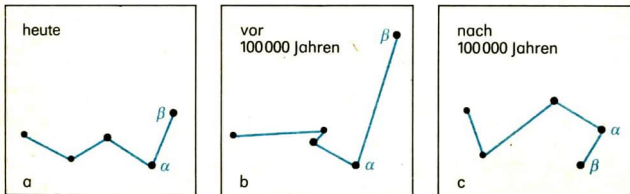
Eigenbewegung	Projektion der wahren räumlichen Bewegung auf die Himmelskugel, beobachtet als zeitliche Ortsveränderung des Sterns an der Himmelskugel senkrecht zur Blickrichtung; gemessen in Bogensekunden je Jahrhundert
---------------	---

<p>Radialgeschwindigkeit</p>	<p>der in der Blickrichtung verlaufende Anteil der wahren räumlichen Bewegung; bewirkt eine Verschiebung der Spektrallinien im Sternspektrum (<i>Doppler-Effekt</i>). Die Radialgeschwindigkeit wird in $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ gemessen. (Positives Vorzeichen bedeutet zunehmende, negatives Vorzeichen abnehmende Entfernung von der Erde.)</p>
------------------------------	---

■ Die Eigenbewegung des Polarsterns beträgt $4,6''$ je Jahrhundert, seine Radialgeschwindigkeit $-13 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

Pekuliarbewegung ist die Bewegung eines Sterns im Raum relativ zu den Sternen seiner Umgebung. Geschwindigkeiten und Richtungen der Pekuliarbewegungen der Sterne sind statistisch verteilt. Eine Ausnahme bilden die Bewegungsternhaufen, deren Mitglieder gleiche Bewegungsrichtungen und gleiche Geschwindigkeiten aufweisen.

➤ Bewegungsternhaufen, S. 124

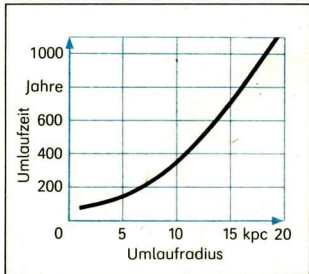


Eigenbewegungen der Sterne des Sternbildes Kassiopeia

Rotation des Milchstraßensystems



Rotation des Milchstraßensystems



Umlaufzeit T_U in Abhängigkeit vom Umlaufradius r eines Sterns im Milchstraßensystem

Den Pekuliarbewegungen der Sterne ist eine großräumige Umlaufsbewegung um das Zentrum des Milchstraßensystems überlagert. Die Sterne beschreiben dabei annähernd elliptische Bahnen mit nach außen abnehmenden Winkelgeschwindigkeiten. Der Kern des Milchstraßensystems rotiert jedoch wie ein starrer Körper.

- Die Sonne umläuft das Zentrum des Milchstraßensystems mit einer Geschwindigkeit von $250 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Sie benötigt für einen Umlauf etwa $2,5 \cdot 10^8$ Jahre.

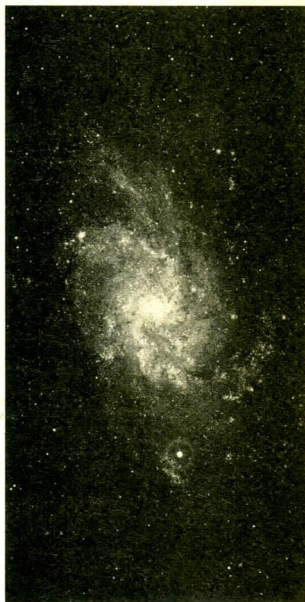
➔ Aufbau des Milchstraßensystems, S. 122

6.2. Andere Sternsysteme

Galaxie

Außerhalb des Milchstraßensystems befindliches Sternsystem (außergalaktisches, extragalaktisches Sternsystem). Nahegelegene und relativ leicht beobachtbare Galaxien werden nach dem Sternbild benannt, in dessen Grenzen sie sich an der Himmelskugel befinden.

Einteilung der Galaxien	
Wichtigste Formen	Häufigkeit
Spiralsysteme	} 60%
Balkenspiralen	
elliptische Systeme	25%
irreguläre Systeme	4%
Sonderformen	11%



Spiralsystem M 33

Galaxien erscheinen im Fernrohr als verwaschene, lichtschwache Gebilde, zum Teil mit erkennbaren Strukturen. Sie sind sehr zahlreich; bis zur scheinbaren Helligkeit von 20^m sind über $2 \cdot 10^6$ Galaxien an der Himmelsskugel beobachtbar. In einem 20° bis 40° breiten Streifen längs der Milchstraße werden sie durch den im Milchstraßensystem befindlichen interstellaren Staub verdeckt.

- Das einzige von Europa aus mit dem bloßen Auge beobachtbare außergalaktische Sternsystem ist der Andromedanebel. (Die irreführende Bezeichnung „Nebel“ stammt aus einer Zeit, in der die wahre Natur der Sternsysteme noch unbekannt war.)

Spiralsysteme

Sternsysteme, ähnlich dem Milchstraßensystem, die beim Blick auf die Scheibenebene eine Spiralstruktur erkennen lassen. Die Spiralarme befinden sich in einer sehr dünnen, ebenen Schicht in der Mittelebene des Systems. Radiobeobachtungen zeigen, daß sich die Spiralstruktur vielfach bis weit über das optisch beobachtbare Gebiet hinaus fortsetzt.

Zusammensetzung der Spiralarme:

- leuchtende interstellare Materie,
- junge Sterne,
- Sternassoziationen,
- offene Sternhaufen.

Diese Objekte sind jünger als etwa 10^8 Jahre. Obgleich sie nur einen kleinen Teil der Gesamtmasse eines Sternsystems enthalten, fallen sie durch ihre hohe Leuchtkraft auf. Viele Spiralsysteme werden, wie das Milchstraßensystem, von einem Halo aus kugelförmigen Sternhaufen umgeben. Bei der Rotation der Spiralsysteme werden die Spiralarme nachgeschleppt; die äußeren Bereiche der Spiralsysteme rotieren langsamer als die inneren. Das Spiralmuster ist wahrscheinlich keine stoffliche, dauerhafte Struktur, sondern entsteht durch eine Dichtewelle, die zur Bildung von Sternen aus der interstellaren Materie führt.

Spiralsysteme	
Massen	im Mittel 10^{11} Sonnenmassen
absolute Helligkeiten	– 18^m bis – 21^m
Anteil an interstellarer Materie	1% bis 5%

➔ Aufbau des Milchstraßensystems, S. 121

Balkenspiralen. Sternsysteme mit Spiralstruktur, deren Spiralarme nicht am Kerngebiet beginnen, sondern an den Enden eines den Kern durchquerenden Balkens von 5 kpc bis 10 kpc Länge.



Balkenspirale M 83

Spiralsystem M 31
(„Andromedanebel“)

Elliptische Systeme

Sternsysteme ohne erkennbare innere Struktur, meist von sehr symmetrischer Gestalt. Charakteristisch ist, daß sie nahezu keine interstellare Materie besitzen und daß heiße O- und B-Sterne in ihnen nicht vorhanden sind. Elliptische Galaxien enthalten einen hohen Prozentsatz an Sternen geringer Leuchtkraft.

Elliptische Systeme	
Massen	im Mittel 10^{11} Sonnenmassen; bei elliptischen Zwerggalaxien nur einige 10^5 Sonnenmassen, bei elliptischen Riesengalaxien bis 10^{13} Sonnenmassen
absolute Helligkeiten	bei elliptischen Zwerggalaxien -10^m , bei elliptischen Riesengalaxien -22^m
Anteil der interstellaren Materie	weniger als 0,01%

In den elliptischen Sternsystemen findet keine Sternentstehung mehr statt.

Irreguläre Systeme

Sternsysteme von chaotischer, unsymmetrischer Form und Struktur, häufig ohne erkennbaren Kern. Sie enthalten von allen Sternsystemen den größten Anteil an interstellarer Materie und sehr viele junge Sterne. In ihnen findet eine sehr intensive Sternentstehung statt.

Irreguläre Systeme	
Massen	im Mittel 10^9 bis 10^{10} Sonnenmassen
absolute Helligkeiten	- 15 ^m bis - 19 ^m
Anteil der interstellaren Materie	im Mittel 30%



Irreguläre Galaxie:
Große Magellansche Wolke

- Die nächstgelegenen irregulären Galaxien sind die – von Europa aus nicht sichtbaren – Magellanschen Wolken am südlichen Sternhimmel.

Aktive Galaxien

Sternsysteme, die durch besondere Eigenschaften auffallen. In vielen Fällen sind vor allem die Kerne dieser Systeme aktiv; die Zeitdauer der Aktivität ist auf einige Millionen Jahre begrenzt.

Aktive Galaxien:

- Galaxien mit intensiver Radiostrahlung (Radiogalaxien),
- Galaxien mit aktiven Kernen,
- Galaxien mit ausgeschleuderten Schweifen

Radiogalaxien

Sternsysteme, die einen großen Prozentsatz der insgesamt freigesetzten Energie in Form von Radiowellen abstrahlen. Ihre Leuchtkräfte im Radiofrequenzbereich (Radioleuchtkräfte) übersteigen die Radioleuchtkräfte normaler



Radioquelle
Cygnus A.
Die beiden Teilquellen haben an der Himmelskugel einen Abstand von 2'; die Farbtiefe gibt die Intensität der Radiostrahlung an.

Sternsysteme zum Teil um das Millionenfache. Viele Radiogalaxien sind optisch nicht nachweisbar, möglicherweise wegen ihren extrem großen Entfernungen.

Die Quellgebiete der Radiostrahlung befinden sich bei den auch optisch beobachtbaren Systemen häufig beiderseits der optischen Galaxie; wahrscheinlich ist das die Folge von explosionsartigen Vorgängen im Kerngebiet der Galaxie.

Galaxien mit aktiven Kernen

Sternsysteme mit sehr kleinen, sternähnlichen Kernen, in denen Strahlungsausbrüche, Veränderungen der Helligkeit sowie Radio-, Röntgen- und Infrarotstrahlung beobachtet werden. In ihren Spektren treten auffällige Emissionslinien auf. Die Ursachen der Kernaktivität sind noch nicht bekannt.

Ungelöste Probleme der aktiven Galaxien: Herkunft der extrem großen Energien, Art der Energieumwandlungsprozesse, Ursache von Doppelstrukturen bei Radioquellen.

Quasare

Kosmische Objekte, die bei optischer Beobachtung sternförmig erscheinen, deren Spektrallinien weit zum roten Ende des Spektrums verschoben sind und die eine starke Radiostrahlung aussenden. Die großen Rotverschiebungen der Spektrallinien deuten auf sehr große Entfernungen hin. Einige Quasare weisen veränderliche Helligkeiten auf.

Quasare	
Leuchtkräfte	bis 10^{14} Sonnenleuchtkräfte = 10^{40} W
Entfernungen von der Erde	bis 5000 Mpc

Die Natur der Quasare ist noch ungeklärt, insbesondere wegen der Kleinheit des energiefreisetzenden Gebietes (Durchmesser zum Teil geringer als 0,1 pc) und den extrem großen freigesetzten Energien. Bisher sind außer der Umwandlung potentieller Energie in Strahlung keine energiefreisetzungsprozesse bekannt, die die Quasarerscheinungen befriedigend erklären können. Möglicherweise sind Quasare Galaxien mit besonders aktiven Kernen.

Bewegungen der Sternsysteme

Sternsysteme bewegen sich im Raum. Dabei überlagern sich zwei Bewegungsarten.

Bei relativ nahen Sternsystemen überwiegt der Anteil der ungeordneten Bewegung. Weiter entfernte Systeme lassen im wesentlichen nur noch den Anteil der „Fluchtbewegung“ erkennen.

Bewegungen der Sternsysteme	
unregelmäßig	geordnet
Individualbewegung (Pekuliarbewegung); Geschwindigkeit im Mittel $200 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$	„Fluchtbewegung“; Geschwindigkeit wächst mit der Entfernung.

Beobachtung der Bewegungen. Wegen der großen Entfernungen der Sternsysteme ist es nicht möglich, Ortsveränderungen an der Himmelskugel festzustellen. Man beobachtet deshalb keine Eigenbewegung, sondern ausschließlich die Bewegung in der Gesichtslinie (Radialgeschwindigkeit) mit Hilfe des Doppler-Effekts in den Spektren der Sternsysteme. Die Verschiebung der Spektrallinien zum roten (langwelligen) Bereich des Spektrums bedeutet, daß sich das Sternsystem vom Milchstraßensystem entfernt.

- ➔ Bewegungen der Sterne, S. 129
- ➔ Expansion der Metagalaxis, S. 142
- ➔ Fluchtgeschwindigkeit, S. 143

Entfernungen der Sternsysteme

Die Entfernungen der Sternsysteme vom Milchstraßensystem werden nach unterschiedlichen Methoden bestimmt, je nachdem, ob Einzelobjekte in dem betreffenden Sternsystem beobachtbar sind oder nicht.

Bestimmung der Entfernung des Sternsystems	
Einzelobjekte sind beobachtbar	aus den Perioden-Helligkeits-Beziehungen beobachteter Delta-Cephei- und RR-Lyrae-Sterne und anderer Objekte
Einzelobjekte sind nicht beobachtbar	aus scheinbarer und absoluter Helligkeit des gesamten Sternsystems (absolute Helligkeit folgt aus speziellen Untersuchungen), aus der Rotverschiebung der Spektrallinien: $r = \frac{v}{H}$ (v „Flucht“geschwindigkeit, H Hubble-Konstante)

- Der Andromedanebel ist $7 \cdot 10^5 \text{ pc}$, die fernsten mit heutigen Teleskopen beobachtbaren Sternsysteme sind etwa $5 \cdot 10^9 \text{ pc}$ vom Milchstraßensystem entfernt.
- Sternsysteme sind im Mittel $3 \cdot 10^6 \text{ pc}$ voneinander entfernt; das ist das 150fache des Durchmessers eines durchschnittlichen Sternsystems.
 - ➔ Bewegungen der Sternsysteme, S. 135
 - ➔ Fluchtgeschwindigkeit, S. 143

Galaxienhaufen

Ansammlung von Sternsystemen in einem eng begrenzten Volumen; größte gegenwärtig erkennbare Systeme im Weltall, gleichmäßig über den gesamten überschaubaren Raum verteilt. Möglicherweise sind alle Sternsysteme Mitglieder von Galaxienhaufen.

Galaxienhaufen	
Durchmesser	im Mittel 1 Mpc
Anzahl der Sternsysteme in einem Haufen	10 bis 10000
Räumliche Dichte der Sternsysteme in einem Haufen	bis 10^4 mal so groß wie bei einzeln stehenden Sternsystemen

Einteilung der Galaxienhaufen	
Regelmäßige Haufen	kugelsymmetrisch, mit zentraler Konzentration (wie bei kugelförmigen Sternhaufen); enthalten vor allem elliptische Sternsysteme
Unregelmäßige Haufen	ohne Symmetrie und zentrale Konzentration (wie bei offenen Sternhaufen); enthalten Sternsysteme aller Typen



Galaxienhaufen:
Coma-Haufen

Viele Galaxienhaufen senden Radiostrahlung und Röntgenstrahlung aus. Die große räumliche Dichte der Sternsysteme in den Galaxienhaufen führt dazu, daß in ihnen die Sternsysteme miteinander zusammenstoßen können. Dies könnte das bevorzugte Auftreten elliptischer Sternsysteme in den regelmäßigen Haufen erklären, da bei solchen Kollisionen die interstellare Materie aus den beteiligten Sternsystemen herausgefegt wird.

Galaxienhaufen werden nach dem Sternbild benannt, in dessen Grenzen sie an der Himmelskugel zu beobachten sind.

- Virgo-Haufen im Sternbild Jungfrau (lat. Virgo)
- Das Milchstraßensystem gehört mit mehr als 20 weiteren Systemen (darunter dem Andromedanebel und den beiden Magellanschen Wolken) zu einem kleinen Galaxienhaufen, der als *Lokale Gruppe* bezeichnet wird.

Intergalaktische Materie

Auf das Vorhandensein von Gasansammlungen im Raum zwischen den Sternsystemen weisen Radio- und Röntgenbeobachtungen hin. Der gasförmige Anteil müßte, um die beobachtete Röntgenstrahlung zu erklären, sehr heiß sein (10^7 K bis 10^8 K).

Entstehung der Sternsysteme

Die Entstehung der Sternsysteme ist mit der Geschichte des Kosmos eng verbunden. Solange sich der Kosmos nicht durch die Expansion unter 10^4 K abgekühlt hatte, war eine Entstehung von Sternsystemen nicht möglich. Die Bildung eines Sternsystems begann vermutlich mit einer Inhomogenität im sonst weitgehend homogenen Universum.

Ausgangsmaterial (Protogalaxie)	Wasserstoff-Helium-Wolke, vermutete Temperatur: einige 1000 K, vermutete Dichte: im Mittel 10^{-21} g · cm ⁻³
---------------------------------	--

Die Protogalaxie kontrahierte unter dem Einfluß der Gravitationskraft, dabei entstanden die ersten Sterne (in kugelförmigen Sternhaufen und als Einzelsterne). Raschere Kontraktion der zentralen Bereiche führte zur Ausbildung des Kerns; Wechselwirkungen mit benachbarten Protogalaxien können Rotation und Turbulenz bewirkt haben.

Entstehung eines Spiralsystems. Infolge der Rotation plattete sich die noch nicht in Sternen gebundene Materie ab und bildete die Scheibe, in der weitere Prozesse zur heutigen Zusammensetzung führten. In der Scheibe können Dichtewellen aufgetreten sein, die zu einem Spiralmuster führten.

Entstehung eines elliptischen Systems. Sehr schnelle und ergiebige Sternentstehung bei langsamer Rotation führte dazu, daß das gesamte vorhandene Material in Sternen gebunden wurde und die Gesamtheit dieser Sterne eine weitgehend symmetrische Anordnung einnahm, bevor die Abplattung einen wesentlichen Betrag erreichen konnte.

Weitere Entwicklung der Sternsysteme

Wesentliche Vorgänge bei der Entwicklung eines Sternsystems:

- Bildung von Sternen aus interstellarer Materie,
- Rückfluß eines Teils der in den Sternen veränderten Materie in den interstellaren Raum,
- Bewegung der Sterne im Sternsystem.

7.1. Struktur des Kosmos

Hierarchie des Weltalls

Vorstellungen von einem stufenförmigen Aufbau des Weltalls, bei dem sich gesetzmäßig kleinere kosmische Systeme zu immer größeren Systemen zusammenschließen, z. B. Galaxien zu Galaxiengruppen und Galaxienhaufen. Man vermutet, daß noch großräumigere Zusammenballungen kosmischer Objekte als sogenannte Superhaufen existieren. Als größtes bekanntes Objekt wird vielfach die Metagalaxis angenommen. Ob es sich dabei um ein echtes System handelt, ob es auch übergeordnete Systeme gibt und welche Gesetzmäßigkeiten diesem Aufbau zugrunde liegen, ist den Astronomen noch nicht bekannt. Das hierarchische Weltall ist räumlich unendlich. Moderne theoretische Vorstellungen sprechen gegen ein solches Modell.

➔ Raumstruktur des Kosmos, S. 140

Metagalaxis

Gesamtheit der Galaxien im von der Erde aus überschaubaren Raum. Mit fortschreitender Beobachtungstechnik erfassen astronomische Geräte immer größere Raumbereiche und damit mehr Sternsysteme der Metagalaxis.

- Der dem Fernrohr gegenwärtig zugängliche Teil der Metagalaxis hat einen Radius von etwa 10^9 pc. Darin befinden sich über $2 \cdot 10^6$ Sternsysteme. Radioteleskope empfangen noch Strahlung von kosmischen Objekten, die 10^{11} pc entfernt sind.

Kosmologisches Prinzip

Grundannahmen über die Struktur des Weltalls. Sie gehen davon aus, daß in dem zur Zeit beobachtbaren Teil des Weltalls überall die gleichen physikalischen Bedingungen existieren.

Das Weltall ist in allen Punkten und in allen Richtungen gleichmäßig mit Materie ausgefüllt.

- Kein Punkt ist vor dem anderen ausgezeichnet (Homogenität).

- Keine Richtung ist vor der anderen ausgezeichnet (Isotropie).

Das Weltall hat keine ausgezeichnete Stellung und keinen Mittelpunkt.

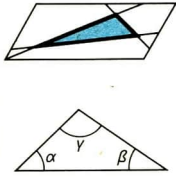
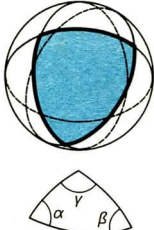
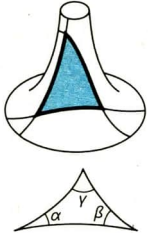
Nach gegenwärtigen Erkenntnissen neigen die meisten Galaxien zur Haufenbildung. Wahrscheinlich gehört die Mehrzahl der Galaxienhaufen sogenannten Superhaufen an. Trotzdem nimmt man an, daß das Weltall in genügend großen Raumbereichen homogen und isotrop aufgebaut ist.

➔ Gravitationsgesetz, S. 14

Raumstruktur des Kosmos

Geometrie des kosmischen Raumes. Alle modernen Raumvorstellungen beruhen auf der Allgemeinen Relativitätstheorie von A. Einstein (1879 bis 1955). Danach wird die Geometrie des Raumes durch die Gravitation der in ihm enthaltenen Masse bestimmt. Infolge der Gravitationswirkung der gesamten kosmischen Materie ist das Weltall großräumig gekrümmt. Da die Metagalaxis expandiert, ändert sich die Raumkrümmung mit der Zeit.

Mögliche Raumkrümmungen

Euklidisch	Sphärisch	Hyperbolisch
Krümmung 0	Krümmung positiv	Krümmung negativ
<p>Das Weltall ist ein unendlicher und offener Raum.</p> 	<p>Das Weltall ist ein endlicher und geschlossener Raum. Er hat einen endlichen Radius und eine endliche Masse.</p> 	<p>Das Weltall ist ein unendlicher und offener Raum.</p> 

Die Raumkrümmung läßt sich nicht direkt beobachten. Deshalb wird die Geometrie des Weltalls auf der Grundlage der kosmologischen Prinzipien durch seine *mittlere Massendichte* und durch die *Hubble-Konstante* bestimmt. Da weder die Massen der Sternsysteme noch ihre Entfernungen genau bekannt sind, besitzen wir noch keine sicheren Kenntnisse über den Betrag der mittleren Massendichte. Für ihn wird ein Bereich von 10^{-31} bis 10^{-29} $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ angegeben.

- Den genannten Betrag kann man aus der Masse der Galaxien in der Umgebung des Milchstraßensystems berechnen.

Raumflugkörper gewannen in jüngster Zeit neue Meßdaten über die Masse der intergalaktischen Materie. Danach ist die Massendichte wahrscheinlich etwas größer als bisher angenommen.

Sphärisch gekrümmter Kosmos. Er ist ein geschlossener und endlicher, jedoch unbegrenzter Raum mit einer endlichen Anzahl von kosmischen Objekten. Es wäre objektiv real, wenn die mittlere Massendichte der kosmischen Materie größer als $10^{-29} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ist und der Wert der Hubble-Konstante $50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ beträgt.

Das zweidimensionale Analogon eines sphärisch gekrümmten Raumes wäre eine Kugeloberfläche. Sie ist „endlos“, d. h. ohne Grenzen, aber nicht unendlich groß. Sie besitzt eine endliche Fläche.

Bei einer geradlinigen Wanderung auf einer solchen Kugeloberfläche käme man an den Ausgangspunkt zurück. Man könnte um eine solche Welt „herumsehen“. Wenn das Weltall die genannte Geometrie hätte, wäre das „Herumsehen“ einem Beobachter heute nicht möglich, weil sich das Weltall schneller ausdehnt, als das Licht dieses All umwandern kann.

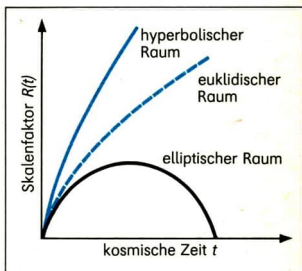
➔ Fluchtgeschwindigkeit, S. 143

Weltmodelle

Idealisierte Vorstellungen über den Aufbau und die Entwicklung des überschaubaren Weltalls. Ob Weltmodelle die Wirklichkeit richtig widerspiegeln, läßt sich nur durch Beobachtungen entscheiden. Sicher sind Aussagen der Weltmodelle nicht auf das gesamte Weltall übertragbar. Moderne Weltmodelle lassen sich meist nicht veranschaulichen. Sie gehen von gekrümmten Räumen aus, die eine endliche oder unendliche Ausdehnung haben und dynamischen Charakter tragen.

Der sowjetische Mathematiker Alexander Friedmann (1880 bis 1925) konstruierte verschiedene mathematische Modelle eines dynamischen Kosmos. Danach ist es z. B. möglich, daß ein anfänglich expandierendes Weltall nach endlicher Zeit zur Kontraktion umkehrt oder daß die Expansion des Weltalls ständig langsamer wird und der Kosmos in unendlicher Zeit einen stabilen Zustand erreicht. Das Weltall kann auch aus einer unendlichen Vergangenheit bis zu einem kleinsten Wert kontrahieren, um dann wieder zu expandieren.

➔ Expansion der Metagalaxis, S. 142



Verschiedene Friedmannsche Weltmodelle

Welthorizont

Grenze des kosmischen Raumes, welche prinzipiell von einem Beobachter erreichbar ist. Je weiter eine Galaxie entfernt ist, desto länger braucht das Licht, ehe es für den Erdbeobachter sichtbar wird. Deshalb gibt die Beobachtung entfernter Sternsysteme Einblick in den physikalischen Zustand, welchen diese Objekte in der Vergangenheit hatten. Das Licht von Galaxien, die hinter dem Welthorizont des Milchstraßensystems liegen, konnte bisher noch nicht zu uns gelangen. Diese Objekte sind heute grundsätzlich nicht beobachtbar. Der Radius des Welthorizontes wächst aber mit der Zeit. Deshalb werden immer größere Gebiete des Weltalls beobachtbar.

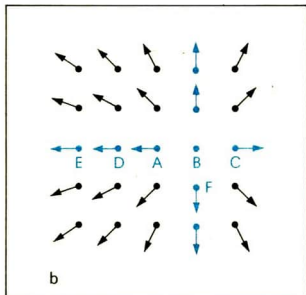
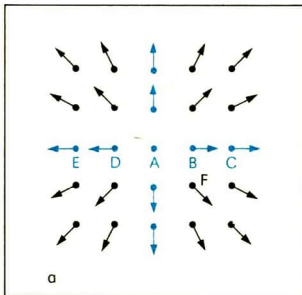
- Das Licht vom Andromedanebel erreicht uns nach $2 \cdot 10^6$ Jahren. Wir beobachten den physikalischen Zustand dieses Sternsystems, den es vor $2 \cdot 10^6$ Jahren hatte.

➔ Weltalter, S. 144

7.2. Geschichte des Kosmos

Expansion der Metagalaxis

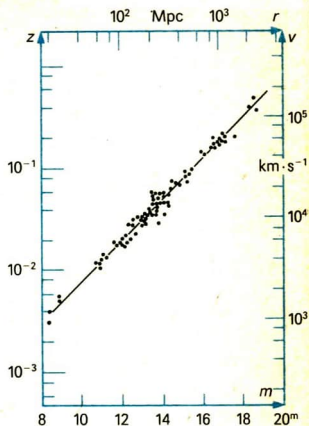
Eine radial vom Milchstraßensystem weg gerichtete Bewegung ferner Sternsysteme. Die Expansion wird aus der Rotverschiebung, d. h. der Wellenlängenverschiebung der Spektrallinien im Spektrum dieser Objekte physikalisch erklärt. Alle Beobachtungsdaten führen zu dem Schluß, daß sich das gegenwärtig überschaubare Weltall – *die Metagalaxis* – ausdehnt, expandiert. Die Tatsache, daß sich alle Sternsysteme von uns fortbewegen, bedeutet nicht, daß unsere Galaxis das Zentrum der Expansion ist. In jedem anderen Sternsystem würde ein Beobachter den gleichen Effekt wahrnehmen. Die Auffassung, daß der Anblick des Weltalls nicht vom Beobachtungsort abhängt, bezeichnet man als ein Weltpostulat.



Beobachtung der Expansion aus zwei verschiedenen Galaxien (links Beobachter A, rechts Beobachter B)

Fluchtgeschwindigkeit (Radialgeschwindigkeit)

Geschwindigkeit, mit der sich die Galaxien vom Milchstraßensystem entfernen. E. Hubble entdeckte 1929, daß die Fluchtgeschwindigkeit der Sternsysteme proportional der Entfernung zunimmt.



Beziehungen zwischen scheinbarer Helligkeit und Rotverschiebung sowie zwischen Entfernung und Fluchtgeschwindigkeit für hellste Sternsysteme einiger Galaxienhaufen

Hubble-Konstante H

Wert für die Zunahme der Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien je Megaparsec (Mpc) Entfernung. Durch immer genauere Entfernungsbestimmungen der Galaxien wurde der Wert von H ständig korrigiert.

Jahr	H in $\text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$
1929	530
1950	180
1958	75
1975	60

Heute wird der Wert zwischen 40 bis $75 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ angegeben. Meist wird mit $H = 55 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ gerechnet.

Mit Hilfe der Hubble-Konstante läßt sich die Fluchtgeschwindigkeit eines Sternsystems wie folgt berechnen:

$$v = H \cdot r$$

- v Fluchtgeschwindigkeit des Sternsystems in $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$
- H Hubble-Konstante in $\text{km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$
- r Entfernung des Sternsystems in Mpc

- Ein Sternsystem, das 10 Mpc vom Milchstraßensystem entfernt ist, hat eine Fluchtgeschwindigkeit von $550 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. In einer Entfernung von 2500 Mpc beträgt seine Fluchtgeschwindigkeit $138000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Die größten bisher bei kosmischen Objekten ermittelten Fluchtgeschwindigkeiten liegen bei $270000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

Weltalter t

Zeitraum, der seit Expansionsbeginn verflossen ist und in dem sich der heutige Zustand der Metagalaxis herausbildete. Falls die Expansion weder gebremst noch beschleunigt wurde, wäre das Weltalter t , auch *Expansionsalter* genannt, gleich dem Kehrwert der Hubble-Konstanten. Bei einem angenommenen Wert von $H = 55 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ ist

$$t = \frac{t}{H} = \frac{1}{55 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}} = 16,3 \cdot 10^9 \text{ Jahre.}$$

Da der Wert von H heute mit 40 bis $75 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ angegeben wird, ergibt sich für t ein Unsicherheitswert von $10 \cdot 10^9$ bis $20 \cdot 10^9$ Jahren.

Bei gebremster Expansion wäre das Weltalter kleiner und bei beschleunigter Expansion größer. Da die mittlere Massendichte der Sternsysteme nicht genau bekannt ist, läßt sich darüber noch keine Entscheidung treffen. Es wird jedoch vermutet, daß eine Bremsung der Expansion vorhanden ist.

➔ Expansion der Metagalaxis, S. 142

Altersbestimmung kosmischer Prozesse

Methoden, die Einblick in Zeiträume der kosmischen Evolution geben.

Zeitskalen	Methoden zur Bestimmung der Werte
Expansionsalter der Metagalaxis	Berechnung auf der Grundlage der Hubble-Konstante unter Beachtung der mittleren Massendichte der Galaxien, gegenwärtig angenommener Wert: $16 \cdot 10^9$ Jahre
Entstehungsalter der schweren Elemente (schwerere als H + He)	Bestimmung der Zerfallszeiten radioaktiver Isotope bei schweren Elementen, Wert: $7 \cdot 10^9$ Jahre
Sternalter	Berechnung aus der Kenntnis von Leuchtkraft und Masse eines Sterns, Wert: $15 \cdot 10^9$ Jahre für die ältesten Sterne

➔ Expansion der Metagalaxis, S. 142

➔ Evolution der Metagalaxis, S. 145

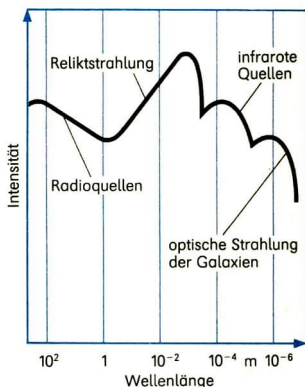
Urknall

„Explosionsartiger“ Beginn der Expansion der Metagalaxis. Zu diesem Zeitpunkt hatte die Metagalaxis extreme Materiedichte und sehr hohe Temperaturen. Es existierte eine intensive, energiereiche elektromagnetische Strahlung. Zur Beschreibung dieses Zustandes, den man häufig auch als „Strahlungskosmos“, „Heißes Weltall“ oder „Heiße Frühphase der Metagalaxis“ bezeichnet, reichen die uns gegenwärtig bekannten Naturgesetze nicht aus, da wesentlich andere physikalische Bedingungen herrschten als heute. Der genannte Zustand hielt nur kurze Zeit an. Mit einsetzender Expansion nahmen Massendichte und Temperatur rasch ab, wobei die Energiedichte der Strahlung schneller sank als die Massendichte. Aus naturwissenschaftlicher Sicht war der Urknall ein qualitativer Sprung im ewigen Entwicklungsprozeß der kosmischen Materie.

➤ Expansion der Metagalaxis, S. 142

Drei-Kelvin-Strahlung

Intensive kosmische Strahlung im radiofrequenten Bereich, deren Temperatur der eines Schwarzen Körpers von 2,7 K entspricht. Ihre Dichte beträgt 10^3 Photonen je Kubikzentimeter. Diese Strahlung fällt aus allen Richtungen des Weltalls mit gleicher Intensität auf uns ein. Sie ist an keine kosmischen Körper gebunden. Nach den gegenwärtigen Vorstellungen ist die Drei-Kelvin-Strahlung, auch *Relikt- oder Hintergrundstrahlung* genannt, ein Restprodukt aus der Zeit von etwa 10^5 Jahren nach dem Urknall, als sich die kosmische Materie in einem extrem heißen Zustand befand. Durch die Expansion der Metagalaxis kühlte sich die Strahlung auf den heutigen Wert von 2,7 K ab.



Spektrum der elektromagnetischen Strahlung im Universum, einschließlich der Drei-Kelvin-Strahlung

Evolution der Metagalaxis

Entwicklungsprozesse, die seit Expansionsbeginn zum heutigen physikalischen Zustand des überschaubaren Weltalls führten. In den ersten Sekunden und Minuten verliefen diese Prozesse extrem schnell. Temperatur und Massendichte nahmen rasch ab, was zu Veränderungen des physikalischen Zustandes der kosmischen Materie führte. Auf der Grundlage von Beobachtungsdaten und der Urknall-Theorie unterscheidet man verschiedene Evolutionsphasen.

Einige Evolutionsphasen der Metagalaxis			
Alter in s	Temperatur in K	Massendichte in $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	Prozesse
0	Wert nicht bekannt	Wert nicht bekannt	Beginn der Expansion
10^{-35}	10^{11}	10^{14}	Teilchenerzeugung
$1,8 \cdot 10^2$	10^9	10^4	erste Elementenentstehung
10^8	10	10^{-24}	Entstehung der ältesten Galaxien und Sterne
10^{13}	5	10^{-29}	Entstehung des Sonnensystems
10^{17}	3	$\approx 10^{-30}$	heutiger Zustand der Metagalaxis
Werte werden in der Literatur sehr unterschiedlich angegeben.			

➔ Urknall, S. 145

➔ Expansion der Metagalaxis, S. 142

Steady-State-Theorie

Kosmologische Theorie, die im Gegensatz zur Theorie vom Urknall davon ausgeht, daß, obwohl die Metagalaxis expandiert, die mittlere Materiedichte zu jeder Zeit gleich ist. Damit die Materiedichte trotz Expansion konstant bleibt, sollen nach dieser Theorie ständig neue Materieteilchen erzeugt werden. Da die Entstehungsrate unwahrscheinlich klein sei, könne die Erzeugung der Teilchen experimentell nicht nachgewiesen werden. Alle gegenwärtigen Beobachtungsbefunde, insbesondere die Entdeckung der Drei-Kelvin-Strahlung, sprechen gegen die Steady-State-Theorie.

8.1. Zum Wesen der Raumfahrt

Raumfahrt

- kosmonawtika (russ.), astronautics (engl.) –
 Durchquerung des Raumes außerhalb der dichteren Erdatmosphäre mit unbemannten und bemannten Flugkörpern (Raumflugkörper) auf vorausberechneten Bahnen, um vielfältige und komplizierte Aufgaben zu lösen. Raumfahrt ist ein Ergebnis vieler Errungenschaften von Wissenschaft und Technik, wozu Gelehrte zahlreicher Völker seit Jahrhunderten beitragen.

<p>Voraussetzungen</p>	<p>Hoher Entwicklungsstand der Produktivkräfte, seine Widerspiegelung in der sich vollziehenden wissenschaftlich-technischen Revolution, deren Wesen in der organischen Verbindung von Wissenschaft, Technik und Produktion besteht;</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Anwendung wesentlicher Erkenntnisse zahlreicher Zweige von Wissenschaft und Technik, ● Zusammenwirken einer Vielzahl wissenschaftlich-technischer Disziplinen zur Lösung komplexer Aufgaben, ● Nutzung einer leistungsstarken industriellen Basis
<p>Bedeutung</p>	<p>Wesentlicher Einfluß auf Beschleunigung, Ausweitung und Bestimmung der Entwicklungsrichtung verschiedener Bereiche des wissenschaftlich-technischen Fortschritts, Zunehmend wichtiges Forschungsmittel für zahlreiche Zweige von Wissenschaft und Technik, Nutzung der Bedingungen des Weltraums für wissenschaftlich-technische Experimente, steigender Einfluß auf die Befriedigung der ständig wachsenden materiellen und kulturellen Bedürfnisse der Erdbewohner unter der Bedingung der Sicherung des friedlichen Charakters der Raumfahrt, neue Lösungen für die irdische Produktion durch Anwendung der Raumfahrttechnik und Raumfahrttechnologie, Möglichkeiten zur Verlagerung technischer und industrieller Anlagen in den Weltraum als Aufgabe für eine fernere Zukunft</p>

8.2. Arten der Raumflugkörper

Raumflugkörper

Komplizierte technische Apparate mit wissenschaftlichen Ausrüstungen, die von Menschen konstruiert und mit vielseitigen Aufgabenstellungen für Raumflüge benutzt werden. Raumflugkörper müssen eine hohe Präzision und Zuverlässigkeit sowie eine möglichst lange Funktionsdauer besitzen. Ferner müssen sie den extremen physikalischen Bedingungen des Weltraumes widerstehen. Raumflugkörper werden nach verschiedenen Gesichtspunkten eingeteilt.

Grobeinteilung	
unbemannte Flugkörper	wissenschaftliche Geräte, Pflanzen und Tiere an Bord
bemannte Flugkörper	Lebenserhaltungsbereiche und Menschen an Bord
aktive Flugkörper	im Einsatz befindliche Raumflugkörper mit bestimmten Aufgabenstellungen
passive Flugkörper	ausgediente Raumflugkörper, Trägerraketenteile, ausgebrannte Brennstufen von Raketen usw.

Künstliche Satelliten

Raumflugkörper, die sich auf Umlaufbahnen um einen Himmelskörper (z. B. Erde, Mond) bewegen. Falls der Satellit mit einem Landeapparat ausgerüstet ist, kann der Apparat auf dem Himmelskörper landen, um den sich der Satellit bewegt. Die meisten Satelliten befinden sich auf Erdumlaufbahnen. Je nach Aufgabenstellung unterscheidet man bestimmte Arten, z. B.:

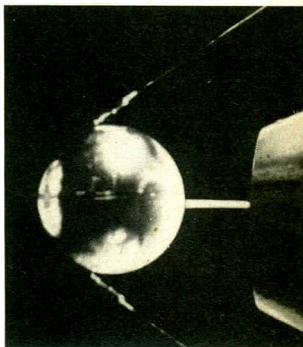
Erprobungs-satelliten	Prüfung der Funktionstüchtigkeit bestimmter technischer Systeme des Raumflugkörpers, z. B. der Sendeanlage, der Steuerungssysteme usw.
Forschungs-satelliten	Messen physikalischer Größen und Prozesse im erdnahen Raum, astronomische Beobachtungen, Fernerkundung der Erde aus dem Weltraum

Nutzanwendungs- satelliten

Übertragung von Telefongesprächen, Rundfunk- und Fernsehsendungen (Nachrichtensatelliten), großräumige Wetterbeobachtung (Wettersatelliten), Navigationssatelliten, Rettungssatelliten

Die UdSSR verwirklicht unter der Bezeichnung *Kosmos-Serie* ein vielfältiges Forschungsprogramm mit Hilfe von Satelliten, woran sich die Länder der *Interkosmos-Gemeinschaft* beteiligen. Bis 1984 wurden über 1500 Kosmos-Satelliten mit unterschiedlichen Nutzmassen gestartet, um unter den Bedingungen des erdnahen Raumes vielseitige naturwissenschaftliche und technische Messungen sowie Experimente durchzuführen.

Der erste künstliche Erdsatellit „Sputnik 1“ (Modell)



Raumsonden

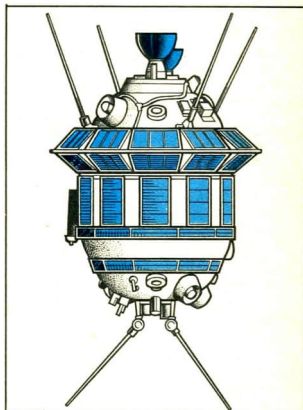
Unbemannte Raumflugkörper, welche die zweite kosmische Geschwindigkeit erreichen und deshalb Flüge im interplanetaren Raum durchführen, um z. B. andere Himmelskörper zu erforschen.

Raumsonden sind u. a. mit Meßgeräten und Fernsehkameras ausgerüstet, werden von der Erde ferngesteuert und arbeiten nach einem automatischen Programm.

Raumsonden der UdSSR landeten u. a. auf dem Mond, auf der Venus und auf dem Mars. Raumsonden der USA fertigten Nahaufnahmen von Merkur, Mars, Jupiter, Saturn und ihren Satelliten an.

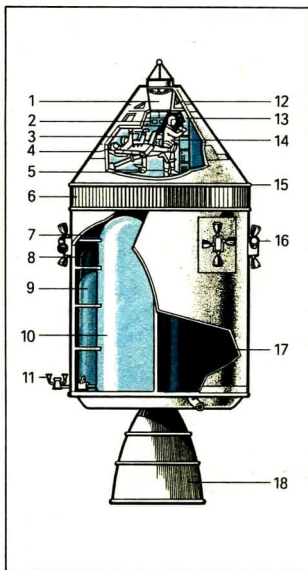
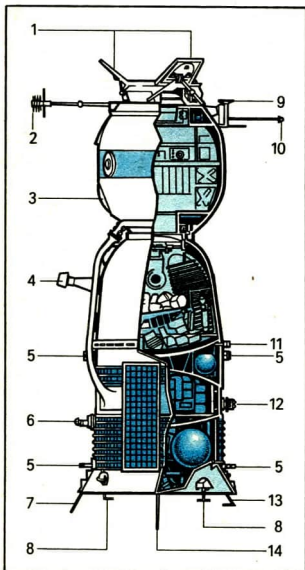
➔ Bahngeschwindigkeiten, S. 156

Mondsonde „Lunik 3“



Raumfahrzeuge

Bemannte Raumflugkörper, die im Weltraum manövrierfähig sind, wozu z. B. Bahnkorrekturen, Übergänge auf andere Umlaufbahnen und Rendezvous-Kopplungen gehören.



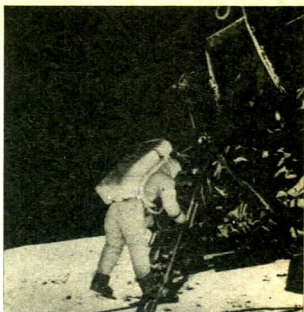
Das „Soyuz“-Raumfahrzeug

- (1) Leitplatten des Kopplungsaggregats,
- (2) UKW-Antenne,
- (3) Einstiegs Luke,
- (4) optisches Visier,
- (5) Andock- und Lageregelungs-triebwerk,
- (6) Infrarotsensor,
- (7) UKW-Antenne,
- (8) Meßgeber für Bremsmanöver,
- (9) Kopplungszielscheibe,
- (10) UKW-Antenne,
- (11) Antenne der Kommandofunk-verbinding,
- (12) Sonnensensor,
- (13) Telemetrieantenne,
- (14) KW-Antenne

Das „Apollo“-Raumfahrzeug

- (1) Umsteigetunnel,
- (2) Hauptinstrumentenbrett,
- (3), (4), (14) Astronauten,
- (5) Sesselgestell,
- (6) Heliumtank,
- (7) Brennstoffzellen,
- (8) Sauerstofftank,
- (9) Wasserstofftank,
- (10) Oxydatortank,
- (11) Antenne,
- (12) Landefallschirm,
- (13) Steuerstand,
- (15) Adaptergürtel,
- (16) Lageregelungstriebwerk,
- (17) Brennstoffbehälter,
- (18) Düse des Haupttriebwerkes

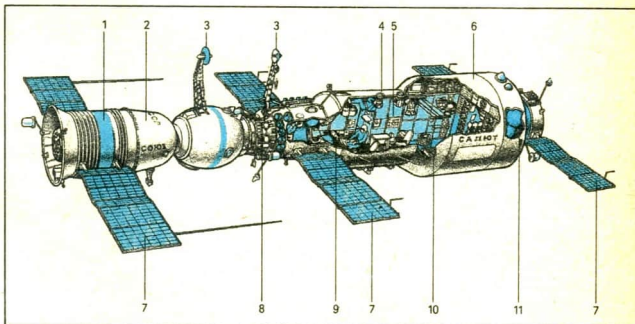
- „Sojus“ bzw. „Sojus T“ (UdSSR), „Apollo“, „Space Shuttle“ (USA) sind gegenwärtig die wichtigsten Raumfahrzeuge, die mit Trägerraketen gestartet werden.
- 1969 stiegen die Astronauten Neil Armstrong und Edwin Aldrin aus einem „Apollo“-Raumfahrzeug, das sich auf einer Mondumlaufbahn befand, in eine Landefähre um und landeten als erste Erdbewohner auf der Mondoberfläche.



Astronaut E. Aldrin
auf der Mondoberfläche (1969)

Raumstationen (Weltraumstationen, Orbitalstationen)

Komplizierte technische Anlagen, die sich auf einer Erdumlaufbahn befinden. Raumstationen werden als ein Komplex mit Hilfe einer Rakete auf eine Umlaufbahn um die Erde gebracht oder im Weltraum montiert und haben meist lange Betriebszeiten. Sie dienen zur Lösung vielfältiger wissenschaftlicher und praktischer Aufgaben, wozu u. a. technische, biologische und medizinische Experimente sowie die Erderkundung gehören. In Raumstationen können wechselnde Besatzungen langfristig mit verschiedenen Arbeitsprogrammen tätig sein.



Raumstation „Salut 6“ mit gekoppeltem „Sojus“-Raumfahrzeug

- (1) „Sojus“-Raumfahrzeug, (2) Kommandokabine,
- (3) Annäherungsradarantennen, (4) Beobachtungsbullauge, (5) wissenschaftlicher Apparateteil,
- (6) Orbitalblock, (7) Sonnenbatterien, (8) Ankopplungssektion, (9) zentrales Steuerpult,
- (10) Laufband, (11) Korrekturtriebwerk, (12) Orientierungtriebwerk

- 1971 wurde die erste sowjetische Raumstation „Salut 1“ auf eine Erdumlaufbahn gebracht. Bis 1984 kamen sieben „Salut“-Raumstationen zum Einsatz. Darin arbeiteten bisher 27 Besatzungen mit insgesamt 60 Kosmonauten. Von 1973 bis 1979 befand sich die USA-Raumstation „Skylab“ auf einer Erdumlaufbahn.

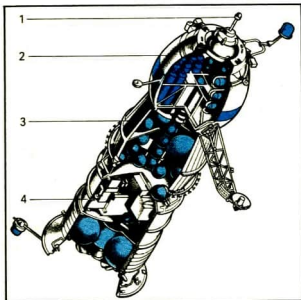
Raumstationen

Typ	Land	Einsatzzeitraum	Anzahl der		Gesamtdauer der Besetzung	Gesamt-Mann-Stunden ¹⁾
			Besatzungen	Raumfahrer		
Salut 1	UdSSR	1971	1	3	23 Tage	1656
Skylab	USA	1973/79	3	9	171 Tage	12312
Salut 3	UdSSR	1974	1	2	14 Tage	672
Salut 4	UdSSR	1974/75	2	4	90 Tage	4320
Salut 5	UdSSR	1976/77	2	4	65 Tage	3120
Salut 6	UdSSR	1977/81	16	33	741 Tage	35856
Salut 7 ²⁾	UdSSR	seit 1982	5	14	371 Tage	18135

1) Anzahl der Raumfahrer mal Stunden an Bord (gerundet)

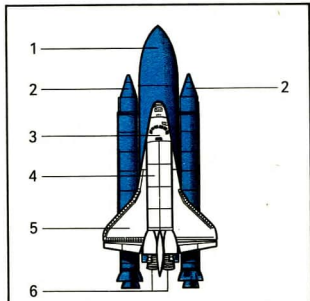
2) Stand 30. 6. 1984

Raumtransporter



Transporterraumschiff „Progreß“

- (1) Kopplungsaggregate,
- (2) Lastensektion,
- (3) Sektion mit Behältern zum Nachtanken,
- (4) Geräte-sektion



Raumtransporter „Space Shuttle“

- (1) Haupttreibstofftank,
- (2) Feststoffraketen (Starthilfen).
- (3) Pilotenkabine,
- (4) Frachtraum,
- (5) Tragfläche,
- (6) Flüssigkeitsraketen-triebwerk

Es gibt unbemannte und bemannte Raumtransporter. Sie dienen zum Transport von wissenschaftlichen Ausrüstungen, Nahrungsgütern, Treibstoff und anderen Gegenständen. Raumtransporter können für Flüge zu Raumstationen eingesetzt werden.

Bemannte Raumtransporter landen nach Zünden der Bremsraketen im aerodynamischen Abstieg im Gleitflug auf der Erdoberfläche.

Unbemannte Raumtransporter werden auch *Transportraumschiffe* genannt.

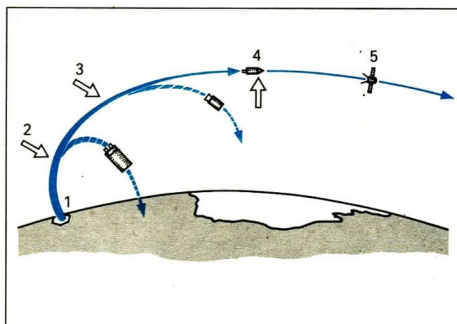
- Das erste Transportraumschiff „Progreß 1“ (UdSSR) beförderte 1978 Materialien zur Raumstation „Salut 6“. 1981 wurde in den USA der erste bemannte Raumtransporter „Columbia“ gestartet.

8.3. Dynamik des Raumfluges

Bahnen der Raumflugkörper

Weg, den ein Raumflugkörper nach seinem Start zurücklegt. Man unterscheidet zwischen *Antriebs-* und *Freiflugbahn*.

Antriebsbahn aktive Flugbahn	<ul style="list-style-type: none"> – Flugbahn vom Start bis zum Brennschluß der letzten Raketstufe – Antrieb erfolgt durch Arbeit der Raketentriebwerke
Freiflugbahn passive Flugbahn	<ul style="list-style-type: none"> – Flugbahn nach Brennschluß der letzten Raketstufe – Bahnbewegung unterliegt den Gesetzen der Himmelsmechanik



- (1) Start,
- (2) Brennschluß und Abtrennung der 1. Stufe,
- (3) Brennschluß und Abtrennung der 2. Stufe,
- (4) Brennschluß und Abtrennung der 3. Stufe der Trägerrakete,
- (1)–(4) Antriebsbahnen der einzelnen Stufen,
- (4)–(5) Freiflugbahnen

Die Bahnelemente werden vor dem Start eines Raumflugkörpers in Abhängigkeit von der zu erfüllenden Aufgabe festgelegt. Sie unterliegen dann jedoch verschiedenen bahnverändernden Einwirkungen. So werden z. B. Satelliten auf erdnahen Umlaufbahnen durch die Erdatmosphäre und andere Einwirkungen gebremst.

Flugbahnen für Erdsatelliten

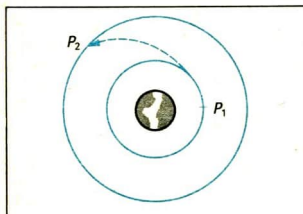
Bahnen für Erdsatelliten, die nach den zu lösenden Aufgaben ausgewählt werden.

Bahnlage bzw. Bahnhöhe	Aufgaben
Bahnen über Erdpole	■ Wetterbeobachtungen über gesamter Erdoberfläche
Bahnen mit geringer Höhe 150 km bis 500 km	■ Bemannte und unbemannte Raumflüge zur Erderkundung
Sonnensynchronbahnen	■ Sonnenbeobachtungen
geostationäre Synchronbahnen bei etwa 36000 km Höhe und zum Äquator geneigte Flugbahnen bei etwa 65°, die über bewohnte Gebiete der Erde führen	■ Nachrichtenübermittlung, Wetterbeobachtung, Schiffs- und Flugzeugnavigation

Synchronbahnen. Bahngeschwindigkeit und Bahnebene des Raumflugkörpers stimmen mit der Rotationsgeschwindigkeit der Erde und der Äquator ebene überein. Der Raumflugkörper befindet sich in diesem Fall immer über dem gleichen Punkt des Erdäquators. Er ist quasi stationär.

Interplanetare Flugbahnen

Bahnen von Raumflugkörpern zu anderen Himmelskörpern des Sonnensystems, wobei ein gradliniger Flug von der Erde zum Zielobjekt nicht möglich ist. Sollen mehrere Objekte erreicht werden, wird der *Swing-by-Effekt* angewandt.



Klassische Übergangsbahn (Hohmann-Bahn) – gestrichelt – von einer erdnahen zu einer erdferneren Umlaufbahn (Kreisbahn) P_1 Abflugimpuls, P_2 Anpassungsimpuls (Bahnkorrekturen)

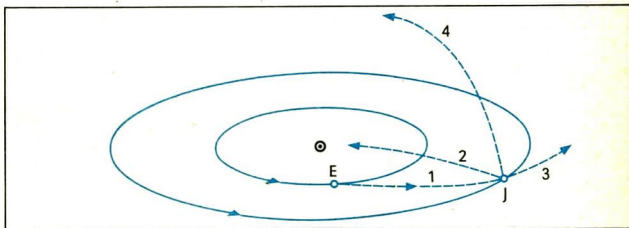
Hohmann-Bahnen. Um das Zielobjekt mit geringer Flugdauer und niedrigem Energieverbrauch zu erreichen, muß der Raumflugkörper z. B. auf eine elliptische Bahn gebracht werden, die mit der Erdbahn tangential verläuft und die Bahn des Zielobjektes berührend erreicht (Berührungselipse).

- Der Flug zum Planeten Mars auf einer Hohmann-Bahn dauert etwa 260 Tage. Für die Rückkehr wird die gleiche Zeit benötigt. Da aber zwischen Start und Ankunft auf der Erde die Erde bei ihrer Bewegung um die Sonne eine bestimmte Strecke zurückgelegt hat, dauert der Flug länger als 520 Tage.
 - Swing-by-Effekt, S. 155
 - Heliozentrische Bewegungen, S. 61
 - Bahnelemente, S. 62

Swing-by-Effekt

Ausnutzung der Gravitationskräfte und der Bahngeschwindigkeit eines Himmelskörpers zum Zwecke der Bahn- und Geschwindigkeitsänderung eines Raumflugkörpers. Die Bahnänderung hängt von der Masse des Himmelskörpers, der Entfernung während des Vorbeifluges und der Richtung des Anfluges des Raumflugkörpers ab.

Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> – Bahnänderung ohne Treibstoffverbrauch, – Verkürzen interplanetarer Flugzeiten, – Erreichen zusätzlicher Ziele möglich
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> – Einengung der Startzeiten, da günstige Position zwischen Start- und Zielobjekt erforderlich, – kleinste Ungenauigkeiten bei notwendigen Korrekturen führen zum Fehlschlag des Vorhabens



Bahnänderungen durch den Swing-by-Effekt

- (1) Primäre Übergangsbahn Erde (E) – Planet, z. B. Jupiter (J)
- (2) Sekundäre Übergangsbahn in das innere Sonnensystem und zur Sonne
- (3) Sekundäre Übergangsbahn in das äußere Sonnensystem und in den interstellaren Raum
- (4) Bahn, die aus der Ebene des Planetensystems hinausführt

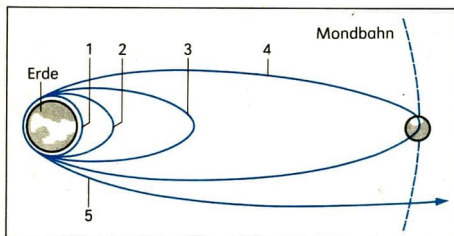
- Erstmals wurde der Swing-by-Effekt 1959 beim Flug der Sonde „Luna 3“ zum Mond genutzt. Durch den Mond-Swing-by flog die Sonde in Richtung Erde zurück.

Bahngeschwindigkeiten

Geschwindigkeiten, die Raumflugkörper nach Brennschluß der letzten Stufe der Trägerrakete erreichen. Von der Bahngeschwindigkeit eines Raumflugkörpers hängt seine Bahnform ab, die den Gesetzen der Himmelsmechanik unterliegt. Für das Erreichen verschiedener Flugbahnen von der Erdoberfläche aus sind folgende Bahngeschwindigkeiten charakteristisch:

Bahnform und Geschwindigkeit	Anwendungsbereich
Kreis ($v = 7,9 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$)	Nur für ideale Kreisbahnen unmittelbar über der Erdoberfläche unter Vernachlässigung des Luftwiderstandes gültig. Deshalb für Raumfahrt keine praktische Bedeutung. Mit zunehmender Entfernung von der Erdoberfläche hat die Kreisbahngeschwindigkeit geringere Werte. Da sich Raumflugkörper kaum auf Kreis-, sondern auf Ellipsenbahnen bewegen, verändert sich ihre Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Höhe über der Erdoberfläche.
Parabel ($v = 11,2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$)	Mindestgeschwindigkeit für einen Raumflugkörper, der das Gravitationsfeld der Erde verlassen soll (Fluchtgeschwindigkeit)
Hyperbel ($v = 16,7 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$)	Mindestgeschwindigkeit für einen Raumflugkörper, der das Sonnensystem verlassen soll

➔ Keplersche Gesetze, S. 14 ➔ Gravitationsgesetz, S. 14



Bahngeschwindigkeiten

- (1) Kreisbahn
 $v_0 = 7,9 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$
- (2) Ellipsenbahn
 $v_0 = 10,0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$
- (3) Ellipsenbahn
 $v_0 = 11,0 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$
- (4) Ellipsenbahn
 $v_0 = 11,1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$
- (5) Parabelbahn
 $v_0 = 11,2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$

8.4. Raumfahrt für die Erde

Nutzen der Raumfahrt

Nutzung des Weltraumes, der Raumfahrttechnik, der Raumfahrtforschung und ihrer Ergebnisse im Interesse der irdischen Wissenschaft, Technik, Produktion, Volkswirtschaft und anderer Bereiche des gesellschaftlichen Lebens mit dem Ziel, die wachsenden Bedürfnisse der Erdbewohner immer besser zu befriedigen. Diese Zielstellung läßt sich jedoch nur verwirklichen, wenn der friedliche Charakter der Raumfahrt gesichert wird.

Primärer und sekundärer Nutzen	
primärer Nutzen ■ Ergebnisse biologisch-medizinischer Experimente im Weltraum	Resultate, die sich aus der Durchführung bestimmter Raumfahrtunternehmen ergeben
sekundärer Nutzen ■ Einsatz von Technologien und Geräten der Raumfahrt in der irdischen Produktion	Anwendung von Methoden und Verfahren der Raumfahrttechnik für irdische Zwecke
Im sozialistischen Gesellschaftssystem dienen die wissenschaftlichen, ökonomischen und auch militärischen Potenzen der Raumfahrt ausschließlich dem Wohle der Menschen zur allseitigen Bereicherung ihres Lebens, was auch ihren Schutz einschließt.	Im kapitalistischen Gesellschaftssystem sind Ziele und Nutzung der Resultate der Raumfahrt den politischen und ökonomischen Interessen der Monopole untergeordnet, wozu auch die Einbeziehung der Raumfahrt zur Realisierung aggressiver Ziele auf der Erde gehört.

Forschungsmittel für die Wissenschaft

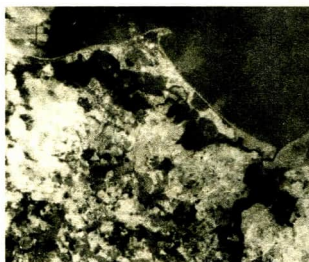
Einsatz der Raumfahrttechnik in zahlreichen Wissenschaftsbereichen zu Forschungs- und Anwendungsaufgaben.

Weltraum als physikalisches Laboratorium und Forschungsfeld der Wissenschaft ■ Untersuchung von extrem hochenergetischen nuklearen Prozessen ■ Studium der Wechselwirkung zwischen Teilchen hochenergetischer kosmischer Strahlung und Atomkernen	Durchführung von Experimenten unter extremen physikalischen Bedingungen, die sich in irdischen Laboratorien nicht nachvollziehen lassen, zum Zwecke der Gewinnung neuer Erkenntnisse und zur Überprüfung theoretischer Vorstellungen
---	--

<p>Fernerkundung der Erde</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Studium des Strahlungsgürtels und des Magnetfeldes der Erde ■ Informationen über Wolkenstrukturen, Bilder von der Schneedecke und von Eisfeldern auf der Erdoberfläche ■ Registrierung negativer Veränderungen der Umwelt, z. B. Verschmutzung der Erdatmosphäre oder der Ozeane 	<p>Erkundung der Magnetosphäre, der Erdatmosphäre, der Erdoberfläche und des Erdinnern mit Hilfe spezieller Fernseh- und Photokameras mit einem hohen Auflösungsvermögen, mit Infrarotteleskopen und dazugehörigen empfindlichen Empfangsgeräten sowie anderen komplizierten Instrumenten</p>
<p>Erforschung des Weltraums und anderer Himmelskörper</p>	<p>Messungen im Weltraum, direkte und indirekte Erkundung benachbarter Himmelskörper</p>

Multispektralaufnahmen. Anwendung einer Aufnahmetechnik, die gleichzeitig in mehreren schmalen Bändern des sichtbaren Spektrums und des nahen Infrarot fotografiert. In einem Arbeitsgang entstehen viele Aufnahmen über ein großes Gebiet der Erdoberfläche in verschiedenen Spektralbereichen.

Farbsynthesebild einer MKF 6-Satellitenaufnahme der DDR-Ostseeküste (Ausschnitt)



Forschungsmittel der Astronomie

Ergänzung astronomischer Forschungsmöglichkeiten durch raumflugtechnische Mittel. Meßgeräte und Teleskope werden mit Hilfe von Raumflugkörpern im Weltraum und auf anderen Himmelskörpern eingesetzt. Gewonnene Beobachtungsdaten sind funktechnisch zur Erde übertragbar. Es entwickelte sich ein neuer Forschungszweig, die extraterrestrische Astronomie.

<p>Aufgaben der extraterrestrischen Astronomie</p>
<ul style="list-style-type: none"> ● Astronomische Beobachtungen außerhalb der Erdatmosphäre, ● Erforschung des erdnahen und des interplanetaren Raumes, ● direkte Erkundung von Himmelskörpern des Sonnensystems




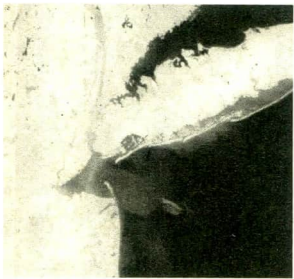
Einige Verfahren und Arbeitsgebiete der extraterrestrischen Astronomie	
Verfahren	Arbeitsgebiete
Messen der Strahlung im gesamten elektromagnetischen Spektrum (Allwellenastronomie)	Studium der Gamma-, Röntgen-, Ultraviolett- und Infrarotwellenbereiche im Sonnenspektrum, Suche nach kosmischen Infrarot- und Röntgenquellen
Messen der Teilchenstrahlung	Untersuchung der Dichte und der Geschwindigkeit des Sonnenwindes
Nah- und Direkterkundung von Himmelskörpern des Sonnensystems <ul style="list-style-type: none"> ■ Bodenuntersuchungen auf der Mondoberfläche, Analyse des Mondgesteins ■ Nahaufnahmen von Planeten und ihren Satelliten 	Erforschung der Magnetosphären, Atmosphären, Oberflächen sowie des inneren Aufbaus benachbarter Himmelskörper
optische Beobachtungen außerhalb der Erdatmosphäre	Studium lichtschwacher Objekte, Erweiterung des Beobachtungshorizontes

Wirkungen auf das irdische Leben

Förderung des Zusammenwirkens von Wissenschaft, Technik, Produktion und Volkswirtschaft mit qualitativ neuen Aufgabenstellungen, Nutzung der Raumfahrttechnik und von Ergebnissen der Raumfahrt in den genannten Bereichen.

Anforderungen an Technikwissenschaften und Produktion

Technikwissenschaften <ul style="list-style-type: none"> ■ Mikroelektronik, elektronische Rechenteknik, Operationsforschung, Systemtechnik 	Entwicklung von Techniken und Technologien für extreme Belastungen beim Start und bei der Landung von Raumflugkörpern
Produktion <ul style="list-style-type: none"> ■ Halbleiterelemente und schnelle elektronische Bordrechner 	Entwicklung von Bauelementen und Geräten mit geringer Masse, kleinem Volumen, die hitzebeständig und hochbelastbar sind

Wissenschaft	Arbeitsmöglichkeiten (Beispiele)
<p>Kartographie</p> 	<p>Aufnahmen von schwer zugänglichen Gebieten, Aktualisierung bereits vorhandener Landkarten, besonders von Gebieten mit raschen Veränderungen (Industrie, Besiedlung, Verkehrsverbindungen)</p> <p>■ Aufnahme der Nordküste Afrikas mit der Halbinsel Sinai und einem Teil Arabiens aus etwa 625 km Höhe.</p>
<p>Ozeanologie</p> 	<p>Studium kurzfristiger Veränderungen der Küstenformen, Messen der Meeresoberflächentemperaturen, Erkundung der Meeresströmungen, Überwachung der Meeresverschmutzung</p> <p>■ Einleitung von Industrieabwässern in die Bucht von New York; im Norden der Einleitung liegt Long Island, westlich die Küste von New York</p>
<p>Medizin</p>	<p>Entwicklung von Geräten zur Fernüberwachung der Lebensfunktionen, Herstellung superreiner Impfstoffe unter den Bedingungen der Schwerelosigkeit, Feststellen der Grenzen des physischen und psychischen Leistungsvermögens der Menschen</p>

Nutzen für die Produktion

Anwendung von Werkstoffen der Raumfahrt, z. B. Schutzanstriche, Isolationsmaterialien, Plaste
Nutzung metallurgischer Verfahren der Raumfahrt, z. B. Schweißarbeiten unter Bedingungen des Vakuums
Einsatz der Mikroelektronik und der Robotertechnik im Produktionsprozeß
Verwendung von Präzisionsinstrumenten der Raumfahrt zur Qualitätskontrolle bei Fertigerzeugnissen
Miniaturisierung produzierter Gebrauchswaren, z. B. Kleinstradios
Anwendung von Raumfahrt-Steuerungsprozessen in Industrie und Verkehrswesen

Nutzen für die Volkswirtschaft

Vorteile	Globale und territoriale Übersichten mittels dokumentarischer Aufnahmen über Erscheinungen und Vorgänge in der Erdatmosphäre, auf der festen Erdoberfläche und in der Hydrosphäre
	Erleichterung des erdumspannenden Verkehrs und Erhöhung seiner Sicherheit
	Komplexe Überwachung der irdischen Ökosphäre zur Unterstützung des Umweltschutzes
	Fernerkundung der Erdkruste zum Zwecke der Erschließung vorhandener Rohstoffreserven
	Datengewinnung aus Gebieten, die Erdbewohnern nur unter großen Schwierigkeiten zugänglich sind, z. B. Ozeane, Urwälder, Polgebiete
	detaillierte Datenauswertung eines großen Gebietes in kürzester Frist
	rasche Datenauswertung und Interpretation der Ereignisse; Voraussetzung: leistungsfähige Geräte und Technologien
	schnelle, weltweite Datenübermittlung.

Anwendungsgebiete in der Volkswirtschaft (Auswahl)	Vorteile bzw. Nutzen
<p>Nachrichtentechnik</p> <p>■ Einige Länder, z. B. die UdSSR, die USA und Indien haben Nachrichtensatelliten gestartet. Damit können globale Nachrichtennetze aufgebaut werden. Das Bild zeigt den Nachrichtensatelliten „Molnija 1“</p> 	<p>Sofortverständigung über große Entfernungen, globale Fernsehübertragungen, Telefongespräche, Mitteilungen über Fernschreiber und Bildfernseher</p>
<p>Wetterdienst</p> 	<p>globale Beobachtungen steigern die Zuverlässigkeit kurzfristiger Wettervorhersagen, frühzeitiges Erkennen der Ausbildung bestimmter Wetterlagen, z. B. Tiefdruckgebiete (Bild), regenreiche Wolkenformationen, rechtzeitige Warnung der Bevölkerung vor Unwetterkatastrophen, z. B. Wirbelstürmen</p>

Wasserwirtschaft	Erforschen des Gewässernetzes und der Grundwasserreserven, rechtzeitiges Erkennen des Steigens der Wasserhöhe, Warnung vor drohenden Überschwemmungen, Erfassen der Verschmutzung von Gewässern und ihrer thermischen Belastung durch Abwässer
Fischereiwirtschaft	Ortung von Fischschwärmen, Lenkung von Fangflotten
Landwirtschaft	Ermittlung landwirtschaftlicher Nutzflächen, Datengewinnung über ihre Art und Beschaffenheit, Erfassen der Ausdehnung und Stärke des Krankheits- und Schädlingsbefalls landwirtschaftlicher Flächen, Registrieren der Verbreitung und der Dichte von Unkrautgemeinschaften, Schätzen der Ernteerträge
Forstwirtschaft <ul style="list-style-type: none"> ■ Kosmonauten an Bord von „Soyuz 9“ übermittelten u. a. folgende Information: „Etwas nördlich vom Baikalsee in etwa 5 km Entfernung brennt der Wald. Es sind drei Brandherden zu erkennen. Jetzt fliegen wir über diese Stelle, bestimmt die Koordinaten!“ 	Entdecken und Überwachen von Waldbränden, Informationen über Art und Dichte des Waldes sowie über die Abnahme bewaldeter Flächen, Feststellen von Baumschädlingen und Baumkrankheiten
Energiewirtschaft	Suche nach Erdöl- und Erdgaslagerstätten
Verkehrswirtschaft	Navigation für Flugzeuge und Schiffe, Nutzung photographischer Aufnahmen zur Projektierung von Straßen und Eisenbahnen

➤ Forschungsmittel für die Wissenschaft, S. 157

Kooperation der UdSSR mit sozialistischen Ländern

Interkosmos (1965)	Programm sozialistischer Länder zur Zusammenarbeit bei der Erforschung und Nutzung des Weltraums für friedliche Zwecke
Mitgliedstaaten	VR Bulgariens, Ungarische VR, UdSSR, VR Polen, SR Rumänien, ČSSR, Republik Kuba, SR Vietnam, Mongolische VR, DDR
Prinzipien	gleichberechtigte Beteiligung aller Mitgliedstaaten an der Ausrüstung der Flugprogramme sowie an der Nutzung damit verbundener Ergebnisse
Arbeitsgebiete	fünf ständige Arbeitsgruppen: <ul style="list-style-type: none"> ● Kosmische Physik, ● Kosmische Meteorologie, ● Kosmisches Nachrichtenwesen, ● Kosmische Medizin und Biologie, ● Fernerkundung der Erde mit aerokosmischen Mitteln
Intersputnik (1971)	Internationale Organisation für gemeinsame Entwicklung und Nutzung von Nachrichtensatelliten (RGW-Länder)

DDR im Interkosmosprogramm

Einsatz des wissenschaftlich-technischen Potentials der DDR bei Raumfahrtunternehmen innerhalb des Interkosmos (Bereitstellung von Bordgeräten) und Nutzung damit verbundener Ergebnisse für die Volkswirtschaft und andere Bereiche des gesellschaftlichen Lebens.

Raumfahrtaktivitäten der DDR

Bereitstellung eines Lyman-Alpha-Photometer zur Messung der Sonnenstrahlung
Entwicklung von Datengewinnungs- und -verarbeitungsanlagen
Bau von Satelliten-Bodenempfangsstationen
Bereitstellung eines Infrarot-Fourier-Spektrometers für meteorologische Satellitenforschung und zum Studium des Temperaturprofils der Venusatmosphäre

Herstellung von vier- und sechskanaligen Multispektralkameras zur vielseitigen Anwendung bei der aerokosmischen Fernerkundung der Erde

Entwicklung eines ganzen Erderkundungssystems bis hin zur Produktion von Farbmischprojektoren und digitalen Bildverarbeitungsanlagen

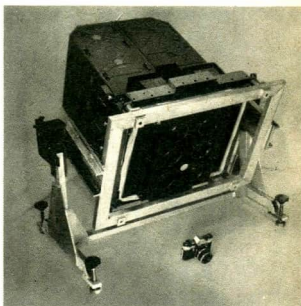
Teilnahme eines DDR-Kosmonauten an Raumfahrtunternehmen der UdSSR zu Salut 6

Beteiligung an medizinisch-biologischen Weltraumexperimenten

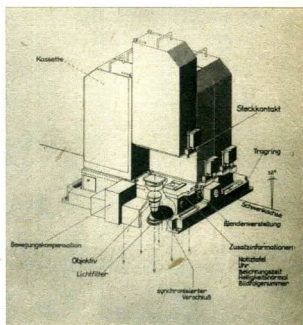
Durchführung von Experimenten zur Materialherstellung unter Weltraumbedingungen, z. B. Züchtung von Kristallen, Produktion von Werkstoffen, Schmelzen und Erstarren von Metallen



Sigmund Jähn



Multispektralkamera MKF 6



Schema der MKF 6

Das Kombinat VEB Carl-Zeiss-Jena entwickelte in Zusammenarbeit mit Wissenschaftlern der UdSSR und DDR die Multispektralkamera MKF 6 (Weiterentwicklung MKF 6 M), die langfristig an Bord sowjetischer Raumstation eingesetzt wird. Ihre Aufnahmen erfassen die Erdoberfläche in sechs Spektralbereichen mit höchster Genauigkeit.

Eine Anwendungsgebiete: Kartographie, Geologie, Land- und Forstwirtschaft, Ozeanologie.

➔ Forschungsmittel für die Wissenschaft, S. 157

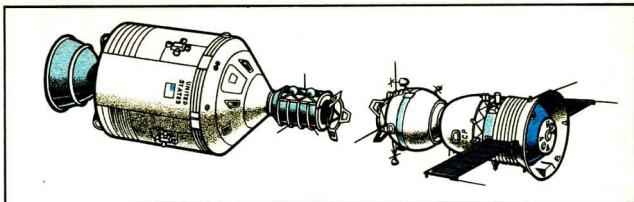
Zusammenarbeit der UdSSR mit kapitalistischen Ländern und jungen Nationalstaaten

- Regierungsabkommen mit Frankreich (1966)

Hauptaufgaben	Einige Aktivitäten
<p>Studium des erdnahen und interplanetaren Raumes sowie benachbarter Himmelskörper mit französischen Ausrüstungen, die in sowjetischen Raumflugkörpern installiert sind, Einsatz französischer Satelliten, die mit sowjetischen Trägerraketen gestartet werden</p>	<p>Installierung französischer Laserreflektoren in „Lunochod 1“ und „2“ (1970/73) zum Zwecke genauer Entfernungsbestimmungen auf der Mondoberfläche, Herstellung einer stabilen Funkverbindung zwischen Moskau und Paris über sowjetische Nachrichtensatelliten „Moluiga“; Gemeinsamer Raumflug sowjetischer Kosmonauten mit einem französischen Kosmonauten</p>

- Abkommen der UdSSR mit den USA über die Zusammenarbeit bei der Erforschung und Nutzung des Weltraumes für friedliche Zwecke (1972). Die 1982 fällige Erneuerung des Abkommens wurde durch die Reagan-Administration verhindert.

Hauptaufgaben	Wichtige Ergebnisse
<p>Zusammenarbeit bei der Erforschung des erdnahen Raumes, des Mondes und der Planeten, gemeinsame Experimente zur kosmischen Biologie und Medizin, Entwicklung und Erprobung einheitlicher Kopplungssysteme für Raumflugkörper</p>	<p>gemeinsamer Flug von „Sojus“ (UdSSR) und „Apollo“ (USA), Annäherung und erfolgreiche Koppelung beider Raumflugkörper, gegenseitiges Überwechseln der Besatzungen (1975)</p>



Vor Kopplung der Raumfahrzeuge „Soyuz“ und „Apollo“

- Vereinbarung zwischen der Sowjetunion und der Republik Indien

Hauptaufgaben	Einige Ergebnisse
Erforschung der Hochatmosphäre der Erde und des erdnahen Raumes, Fernerkundung der Republik Indien, Entwicklung der indischen Raumfahrt	Hilfe sowjetischer Spezialisten bei Errichtung eines indischen Zentrums zur Untersuchung der Hochatmosphäre der Erde durch Raketen Start mehrerer indischer Satelliten mit sowjetischen Raketen, gemeinsamer Raumflug eines indischen und sowjetischen Kosmonauten (1984)

Zusammenarbeit kapitalistischer Staaten

-

Bezeichnung	Ziele und Aufgaben
EUROSPACE Europäische Industriegruppe für Raumfahrtstudien (1961)	Zusammenschluß von Monopolen europäischer kapitalistischer Staaten zur Forcierung der Raumfahrtindustrie aus Gründen des Profitstrebens
ESRO Europäische Organisation für Weltraumforschung (1962)	Zusammenarbeit europäischer kapitalistischer Staaten bei der Erforschung der Hochatmosphäre der Erde und des Weltraums
ELDO Europäische Organisation zur Entwicklung von Satellitenträgern (1964)	wissenschaftlich-technische Zusammenarbeit kapitalistischer Staaten Europas bei der Entwicklung und dem Bau von Trägerraketen

Bezeichnung	Ziele und Aufgaben
ESA Europäische Weltraumbehörde (1975)	Zusammenlegung von ESRO und ELDO bei etwa gleicher Aufgabenstellung, Entwicklung, Bau und Erprobung der Trägerrakete „Ariane“, Start einer großen Anzahl von Satelliten mit unterschiedlicher Aufgabenstellung
INTELSAT Internationales Nachrichtensatelliten-Konsortium (1965)	Zusammenschluß kapitalistischer Länder zum Betrieb gewinnbringender kommerzieller Nachrichtensatelliten, bestimmender Einfluß der USA durch großen finanziellen Anteil, Bereitstellung von Startplätzen und Trägerraketen, Vergabe von Dienstleistungsverträgen
EUTELSAT Europäisches Nachrichtensatelliten-Konsortium (1979)	Nachrichtensatelliten-System europäischer kapitalistischer Staaten

Weltraumrecht

Gesamtheit juristischer Normen, die entsprechend den Grundsätzen der friedlichen Koexistenz die Beziehungen der Staaten bei der Erforschung und Nutzung des Weltraums und der Himmelskörper regeln. Das Weltraumrecht ist ein Teil des Völkerrechts.

- Unmittelbar nach dem Start von Sputnik 1 schlug die UdSSR den Abschluß eines internationalen Vertrages über die Nutzung des Weltraums für friedliche Zwecke vor.

Weltraumausschuß der UNO (1961). Gremium der UNO, welches sich vor allem mit internationalen Grundsätzen der Raumfahrt, der Nutzung des Weltraums und anderer Himmelskörper befaßt.

Weltraumvertrag

Ein von der UNO verfaßter Vertrag über internationale Normen und Prinzipien für die Raumfahrt und für Aktivitäten im Weltraum (1967). Er ist die wichtigste Grundlage des Weltraumrechts. Bisher unterzeichneten diesen Vertrag über 90 Staaten.

Bedeutende Inhalte des Weltraumvertrages

Gleichheit und Gleichberechtigung der Staaten im Weltraum, Freiheit der friedlichen (nichtmilitärischen) Erforschung des Weltraums, internationale Zusammenarbeit und Unterstützung bei der Erforschung und Nutzung des Weltraums und der Himmelskörper, Okkupationsverbot im Weltraum und auf Himmelskörpern, Bindung der Staaten bei ihren Aktivitäten im Weltraum an das Völkerrecht und die UN-Charta, Verbot der Stationierung von Kernwaffen und Massenvernichtungswaffen, Hilfeleistungen für Besatzungen von Raumflugkörpern, Verantwortlichkeit der Staaten für nationale Aktivitäten im Weltraum und auf Himmelskörpern

Rechtsverträge über Raumfahrt im Weltraum

Internationale Vereinbarungen, die durch Aktivitäten des UNO-Weltraumausschusses zustande kamen.

1968	Abkommen über Pflichten zur Rettung von Raumfahrern und zur Rückführung von Menschen und Objekten, die in den Weltraum entsandt wurden
1972	Vereinbarung über die Regelung des Schadenersatzes bei unkontrollierten Abstürzen von Raumflugkörpern oder deren Reste auf die Erdoberfläche

- Es ist u. a. festgelegt, daß das Land, welches einen Raumflugkörper startet, uneingeschränkt für alle Schäden auf der Erdoberfläche und in der Luft haftet, die durch den Flugkörper ausgelöst werden.

Aufgaben, die noch zu lösen sind:

Regelung über Rechte und Pflichten der Staaten bei Nachrichtenübertragungen durch Satelliten,
Vertrag über den Einsatz von Satelliten zur Erdbeobachtung,
Nutzung von Daten der Fernerkundung fremder Staaten

Zu diesem Vorhaben vertreten die USA aus politischen und ökonomischen Motiven Positionen, die im scharfen Gegensatz zu den Normen des Völkerrechts stehen. Eine rechtliche Lösung der genannten Aufgaben wird mitbestimmt durch die Entwicklung des internationalen Kräfteverhältnisses zugunsten des Friedens und des Sozialismus.

Weitere internationale Grundlagen des Weltraumrechts

Moskauer Vertrag von 1963 über das Verbot von Kernwaffenversuchen in der Atmosphäre, im Weltraum und unter Wasser. Vertragspartner sind verpflichtet, nukleare Explosionen im Weltraum zu unterlassen.

Angesichts der Aktionen und Pläne der derzeitigen USA-Regierung, Raumfahrt und Weltraum in die Aufrüstung einzubeziehen, unterbreitete die UdSSR in jüngster Zeit eine Reihe von Vorschlägen zum Abschluß von Verträgen, die den ausschließlich friedlichen Charakter der Raumfahrt sichern sollen. Dazu gehören u. a.

- ein Vertragsentwurf über das „Verbot der Stationierung von Waffen jeglicher Art im Weltraum“ (1981)
- ein Vorschlag zur radikalen Lösung des Problems der Satellitenabwehrsysteme durch die Beseitigung bereits vorhandener und das Verbot der Entwicklung neuer Systeme (1983)
- ein Vertragsentwurf über das „Verbot der Anwendung von Gewalt im Weltraum und vom Weltraum aus gegen die Erde“ (1983)
- ein Vorschlag an die USA zur Aufnahme bilateraler Verhandlungen zur Verhinderung einer Militarisierung des Weltraums (1984)
- ein Vorschlag, das Thema „Über die Nutzung des Weltraums zu ausschließlich friedlichen Zwecken für das Wohl der Menschheit“ in die Tagesordnung einer UNO-Vollversammlung aufzunehmen und Unterbreitung eines entsprechenden Resolutionsentwurfes (1984).

Zeittafel zur Geschichte der Astronomie

Die Astronomie ist eine der ältesten Naturwissenschaften. Bereits die alten Völker, wie Babylonier, Ägypter, Chinesen, Inder und Mayas, betrieben Astronomie vorwiegend zu praktischen Zwecken, aber auch aus religiösen Motiven. Für sie waren die Gestirne Götter oder der Sitz von Göttern. Die Bewegungen der Himmelskörper galten als Folgen des Willens der Götter. Deshalb schloß man aus der Stellung der Gestirne auf einen Einfluß der Götter auf irdische Ereignisse. In dieser Zeit entstand auch die Astrologie (Sterndeutung), eine Irrlehre, die zwischen den Vorgängen am Sternhimmel und dem Geschehen auf der Erde einen Zusammenhang sieht. Sie versucht z. B. aus der Stellung der Gestirne Vorhersagen über den Charakter und den Lebensweg eines Menschen abzuleiten. Bis zum Mittelalter war die Astrologie eng mit der Astronomie verknüpft und trug dadurch zur Entwicklung der Vorstellungen vom Weltall bei.

In der folgenden Zeittafel wird an ausgewählten Beispielen die Entwicklung unserer heutigen Vorstellungen über das Weltall vor allem an Leistungen einzelner Wissenschaftler dargestellt.

um 450 v. u. Z.	Philolaos von Kroton verbreitet die Ansicht, daß der Mittelpunkt der Welt ein Zentralfeuer ist, um das sich Sonne, Erde und Planeten bewegen.
um 370 v. u. Z.	Eudoxos von Knidos konstruiert eine Theorie der homozentrischen Sphären zur Erklärung der Planetenbewegung.
um 350 v. u. Z.	Aristoteles begründet die Kugelgestalt der Erde damit, daß der Erdschatten bei Mondfinsternis stets kreisförmig ist.
um 265 v. u. Z.	Aristarch von Samos vertritt das heliozentrische Weltbild und versucht, die Entfernung von Sonne und Mond aus geometrischen Konstruktionen zu bestimmen
um 220 v. u. Z.	Eratosthenes bestimmt erstmals den Erdumfang und findet die Neigung der Ekliptik.
um 150 v. u. Z.	Hipparch stellt in Sternkatalogen Positionen und Helligkeiten der Sterne zusammen und entdeckt u. a. die Präzession.

um 150	Claudius Ptolemäus faßt das astronomische Wissen der Antike in seinem Werk „Syntaxis mathematica“, das später den Namen „Almagest“ erhielt, zusammen und begründet das geozentrische Weltbild.
1252	Im Auftrag Alfons X. von Kastilien werden auf der Grundlage des geozentrischen Weltbildes die bekanntesten Planetentafeln des Mittelalters berechnet.
1420	Ulugh Beg errichtet in Samarkand eine Sternwarte und beobachtet die Sterne des Ptolemäischen Katalogs.
um 1460	Georg Purbach (1423 bis 1476) und Johannes Müller (Regiomontanus 1436 bis 1476) äußern Zweifel an der Richtigkeit des geozentrischen Weltbildes. Müller sucht nach besseren Grundlagen der Kalenderrechnung, berechnet die Ephemeriden von Sonne, Mond und Planeten und strebt nach exakter Bestimmung der Planetenörter.
1543	Das Hauptwerk des Nicolaus Copernicus (1473 bis 1543) erscheint mit dem Titel „De revolutionibus orbium coelestium“ (Über die Umläufe der himmlischen Kreise). Darin wird das heliozentrische Weltbild begründet, welches den Aufbau des Sonnensystems im Prinzip richtig widerspiegelt.
1588	Tycho Brahe (1546 bis 1601) veröffentlicht eine Planetentheorie, die einen Kompromiß zwischen dem geozentrischen und heliozentrischen Weltbild darstellt, jedoch keine praktische Bedeutung erlangt. Brahe gilt als größter Beobachter der vor-teleskopischen Zeit.
1600	Giordano Bruno (1543 bis 1600) wird von der Inquisition als Ketzer verurteilt und auf dem Scheiterhaufen verbrannt. Bruno zieht aus dem heliozentrischen Weltbild weitreichende Schlüsse. Für ihn ist das Weltall grenzenlos und hat unendlich viele Sonnen, um die sich Planeten bewegen, auf denen teilweise Leben existiert.
1609	Johannes Kepler (1571 bis 1630) stellt in seinem Buch „Astronomia Nova“ zwei mathematisch formulierbare Gesetze für die Planetenbewegungen vor. Das dritte von Kepler gefundene Gesetz wird 1619 in seinem Werk „Harmonices mundi“ veröffentlicht.

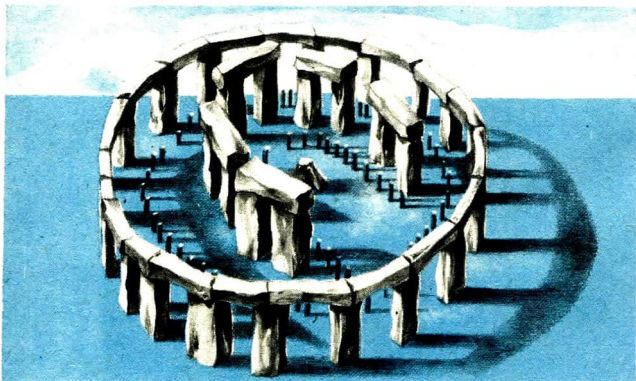
1609	Galileo Galilei (1564 bis 1630) führt die erste Himmelsbeobachtung mit einem Fernrohr durch und entdeckt unter anderem Mondgebirge, vier Jupitermonde, Sonnenflecken und den Phasenwechsel der Venus. In Wort und Schrift vertrat Galilei standhaft das heliozentrische Weltsystem, was zu seiner Verurteilung durch die Inquisition führte.
1633	René Descartes (1596 bis 1650) beschreibt in seiner Wirbeltheorie das Weltall als Ergebnis eines geschichtlichen Entwicklungsprozesses.
1676	Olaf Römer (1644 bis 1710) bestimmt die Lichtgeschwindigkeit aus der Verfinsterung der Jupitermonde.
1687	Isaac Newton (1643 bis 1727) begründet in seinem Hauptwerk „Philosophiae naturalis principia mathematica“ mit dem Gravitationsgesetz die Ursache der Planetenbewegungen.
1706	Edmund Halley (1656 bis 1742) berechnet erstmalig die Bahnen von Kometen um die Sonne, wobei er die Umlaufzeit des nach ihm benannten Kometen findet.
1718	Halley entdeckt die Eigenbewegung der Fixsterne.
1728	James Bradley (1692 bis 1726) findet auf der Suche nach Fixsternparallaxen die Aberration.
1750	Thomas Wright (1711 bis 1786) veröffentlicht eine erste Darstellung über den Bau des Weltalls.
1755	Immanuel Kant (1724 bis 1804) begründet in seiner „Allgemeinen Naturgeschichte und Theorie des Himmels“ auf der Grundlage des Gravitationsgesetzes die natürliche Entstehung und gesetzmäßige Entwicklung der Himmelskörper.
1781	Friedrich Wilhelm Herschel (1738 bis 1822) entdeckt den Planeten Uranus.
1784	Herschel gibt erste, auf Beobachtungen beruhende Untersuchungen über den Aufbau des Milchstraßensystems bekannt und begründet damit die Stellarstatistik.
1794	Ernst Lorenz Friedrich Chladni (1756 bis 1827) erkennt den kosmischen Ursprung der Meteoriten.
1796	Pierre Simon Laplace (1749 bis 1827) erklärt die Entstehung der Planeten als von der Sonne abgestoßene Gasringe.

1801	Guiseppe Piazzi (1746 bis 1826) findet den ersten Planetoiden, die Ceres.
1803	Herschel erkennt die physische Natur der Doppelsterne.
1814	Joseph von Fraunhofer (1787 bis 1826) findet im Spektrum der Sonne über 500 Absorptionslinien.
1838	Friedrich Wilhelm Bessel (1784 bis 1846) bestimmt die Parallaxe des Sterns 61 Cygni. Gleichzeitig werden Sternparallaxen von W. Struve (1793 bis 1864) und Th. Henderson (1798 bis 1844) bestimmt. Damit wird die unterschiedliche räumliche Anordnung der Sterne nachgewiesen.
1846	Johann Gottfried Galle (1812 bis 1910) gelingt die optische Entdeckung des Planeten Neptun auf der Grundlage des aus der Störung der Uranusbahn vorausberechneten Ortes. Die Rechnungen dazu führte Urbain Jan Leverrier (1811 bis 1877) aus.
1853	Herman Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821 bis 1894) versucht erstmalig, die Energiequellen der Sonne zu erklären.
1859	Gustav Robert Kirchhoff (1824 bis 1887) und Robert Wilhelm Bunsen (1811 bis 1899) finden das Prinzip der Spektralanalyse. Seine Anwendung in der Astronomie eröffnete Möglichkeiten zur Erforschung der physikalischen Beschaffenheit der Himmelskörper.
1861	Karl-Friedrich Zöllner (1834 bis 1882) erfindet das Astrophotometer zur Messung der Intensität des Sternlichts. Zöllner gehört mit seinen wissenschaftlichen Arbeiten zu den Begründern der Astrophysik.
1864	William Huggins (1824 bis 1910) bemerkt als erster Emissionslinien in Spektren von Nebeln.
1866	Angelo Secchi (1818 bis 1878) führt die erste Klassifikation der Sternspektren ein, die von Hermann Carl Vogel (1841 bis 1907), Edward Charles Pickering (1846 bis 1917) und anderen ergänzt und erweitert wird.
1868	Huggins führt erste Messungen von Radialgeschwindigkeiten der Sterne durch.
1887	Max Wolf (1863 bis 1932) fertigt die ersten photographischen Himmelsaufnahmen an.

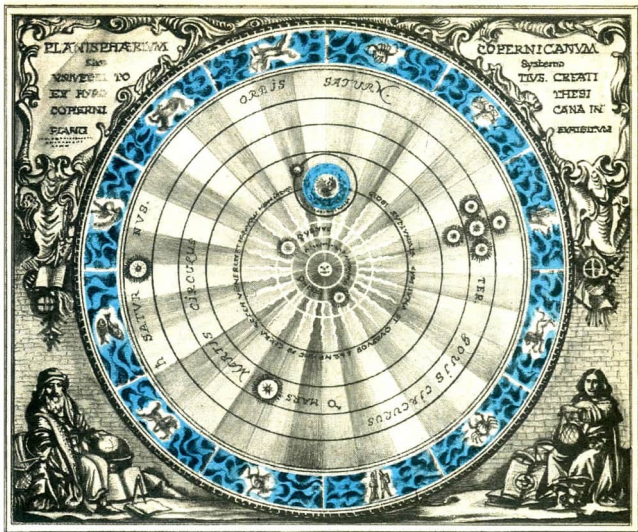
1906	Karl Schwarzschild (1873 bis 1916) veröffentlicht eine Theorie über die Sternatmosphären.
1913	Henry Norris Russell (1877 bis 1957) kombiniert in einem Diagramm Zustandsgrößen der Sterne (Hertzsprung-Russell-Diagramm).
1915	Albert Einstein (1879 bis 1955) veröffentlicht die Allgemeine Relativitätstheorie, welche wissenschaftliche Grundlage für die moderne Kosmologie ist.
1918	Harow Shapley (1885 bis 1972) untersucht die räumliche Verteilung der Kugelsternhaufen und ermittelt dabei die wahren Dimensionen des Milchstraßensystems.
1920	Wolf beweist aus Sternzählungen die Existenz von Dunkelwolken und erbringt den Nachweis, daß es zwischen den Sternen absorbierende Materie gibt.
1920	McGhnad Saha (1893 bis 1956) entwickelt eine Theorie der Ionisation der Sternatmosphären.
1922	Alexander Friedmann (1888 bis 1925) entwirft auf der Grundlage der Allgemeinen Relativitätstheorie das Bild eines Entwicklungskosmos.
1923	Edwin Powell Hubble (1889 bis 1955) gelingt es, die Entfernungen anderer Sternsysteme zu messen. Hubble gilt als der Begründer der extragalaktischen Astronomie.
1926/27	John Hendrik Oort und B. Lindblad finden die differentielle Rotation unserer Galaxis.
1927	Arthur Stanley Eddington (1882 bis 1944) gibt eine Theorie über den inneren Aufbau der Sterne.
1927	Georges Lemaitre (1894 bis 1966) veröffentlicht seine Theorie über die Entstehung des heutigen Weltalls aus einem Uratom.
1929	Hubble entdeckt in den Spektren ferner Sternsysteme eine Rotverschiebung, die mit der Expansion des Weltalls erklärt wird.
1930	Clyde William Tombaugh findet den Planeten Pluto auf einer photographischen Aufnahme.
1932	Karl Guthe Jansky (1905 bis 1950) empfängt Radiofrequenzstrahlung von kosmischen Objekten und öffnet damit der Astronomie ein weiteres Beobachtungsfenster.

1938	Hans Albrecht Bethe und Carl Friedrich von Weizsäcker geben kernphysikalische Prozesse an, die Quellen der Energiefreisetzung der Sterne sind.
1947	Viktor Ambarzumjan findet Sternassoziationen. 1958 entwirft er eine Theorie über die Entstehung der Sternsysteme.
1951	Purcell und Ewen finden die von H. C. van de Hulst und Jossit S. Schklowski vorhergesagte 21-cm-Linie des neutralen Wasserstoffs.
1952	Martin Schwarzschild und Allan Rex Sandage weisen durch Berechnungen nach, daß rote Riesensterne eine Folge der Sternentwicklung sind.
1963	Maarten Schmidt entdeckt den ersten Quasar.
1965	Arno Penzias und Robert Woodrow Wilson entdecken die 3-K-Strahlung.
1967	Antony Hewish und Jocelyn Bell finden den ersten Pulsar.
1969	Durch radioastronomische Beobachtungen werden erstmals organische Molekülarten im interstellaren Raum nachgewiesen.

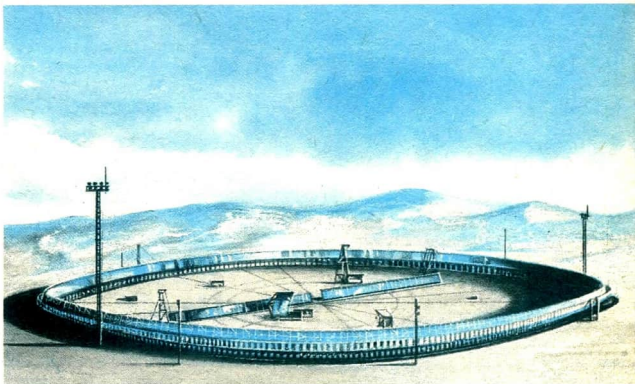
Bilder zur Geschichte der Astronomie



Kultstätte Stonehenge, wie sie einmal ausgesehen haben mag



Heliozentrisches Weltsystem



Größtes Radioteleskop, RATAN 600, (600 m Durchmesser, Kaukasus, UdSSR)

Zeittafel zur Geschichte der Raumfahrt

Die Vorgeschichte der Raumfahrt reicht bis in das Altertum. Von jeher wurden Gedanken zur Raumfahrt geäußert. Dazu gehören unter anderen die Sage vom Himmelflug des sumerischen Königs Etan (320 v. u. Z.) sowie die phantastischen Erzählungen „Reise durch die Sonnenwelt“ von Bruno (1590), „Somnium“ (Mondreisetraum) von Kepler (1630) und „Von der Erde zum Mond“ von J. Verne (1865).

Bereits im Altertum nutzte man Raketen als Feuerwerkskörper für Volksbelustigungen und insbesondere als kriegerische Brandwaffen mit relativ großer Reichweite. Die Raketentechnik entwickelte sich vor allem aus militärischen Gründen.

Auch der astronomische Erkenntnisprozess förderte die Entwicklung der Raumfahrt. Die Keplerschen Gesetze und das Newtonsche Gravitationsgesetz sind beispielsweise wichtige wissenschaftliche Grundlagen für die Theorie des Raumfluges.

Der Werdegang der Raumfahrt wurde auch durch die Entwicklung anderer Wissenschaftszweige, wie Physik und Chemie, sowie durch Bereiche der Technik beeinflusst.

Die folgende Zeittafel stellt an einigen ausgewählten Beispielen den geschichtlichen Werdegang der Raumfahrt dar. Zu beachten ist, daß in verschiedenen Ländern Raumfahrtpioniere unabhängig voneinander zu gleichen oder ähnlichen theoretischen Lösungen gelangten, die später teilweise in die Praxis umgesetzt wurden.

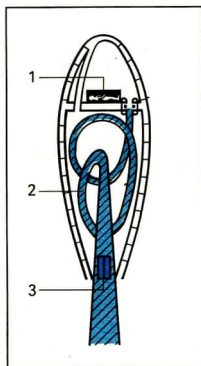
1881	Nikolai Kibaltschitsch (1853 bis 1881) verbreitet in Rußland die Idee, durch Raketenantrieb in den Weltraum vorzustoßen.
ab 1885	Konstantin Ziolkowski (1857 bis 1935) führt wissenschaftliche Untersuchungen durch, in deren Ergebnis über 500 zum Teil grundlegende Arbeiten zur Theorie und Praxis der Raumfahrt erscheinen. Ziolkowski schlägt unter anderem den Bau von Flüssigkeitsraketen vor, beschäftigt sich mit dem Stufenprinzip und mit dem Bau von Raumstationen.
1891	Hermann Ganswindt (1856 bis 1934) äußert Gedanken zum Rückstoßantrieb für den Weltraumflug.
1925	Walter Hohmann (1880 bis 1945) veröffentlicht sein Buch „Die Erreichbarkeit der Himmelskörper“, das ausführliche Untersuchungsergebnisse über interplanetare Flugbahnen enthält.
1926	Robert Hutschings Goddard (1882 bis 1945) startet in den USA seine erste Flüssigkeitsrakete. Bereits seit 1912 befaßte er sich mit Antrieben für Raumflüge.

1928	Robert Ésnault-Peltérie (1881 bis 1957) gibt ein grundlegendes Werk zu Raumfahrtproblemen heraus.
1929	Fritz von Opel startet mit einem Flugzeug, das von Raketen angetrieben wird.
1929	Hermann Oberth (geb. 1894) gibt das Werk „Wege zur Raumschiffahrt“ heraus. Oberth beteiligte sich an der Raketenentwicklung im faschistischen Deutschland. Nach Kriegsende führt er Entwicklungsarbeiten zur Raumfahrt für verschiedene Staaten, unter anderem für die USA, durch.
1929	Juri Kondratjuk (1897 bis 1942) veröffentlicht Untersuchungsergebnisse über die Raketendynamik und den Raketenbau.
1930	Friedrich Zander (1887 bis 1933) baut und erprobt das erste Flüssigkeitstriebwerk in der UdSSR.
1930	Rudolf Nebel (1894) führt sein erstes Raketenantriebswerk in der Öffentlichkeit vor.
1931	Johannes Winkler (1897 bis 1947) gelingt der erste Start einer Flüssigkeitsrakete in Deutschland.
1932	Goddard erprobt erfolgreich eine flugfähige Raketensteuerung.
ab 1931	Wernher von Braun (1912 bis 1977) beschäftigt sich mit Fragen der Raketentechnik und Raumfahrt. Unter seiner Leitung entwickelt das faschistische Deutschland Flüssigkeitsgroßraketen, die im zweiten Weltkrieg unter der Bezeichnung „V 2“ gegen die Zivilbevölkerung in Westeuropa eingesetzt werden. Nach Kriegsende geht Braun nach den USA, ist hier zunächst in militärischen Diensten tätig und beteiligt sich dann maßgebend an der Entwicklung der US-Raumfahrt.
1933	Eugen Sänger (1905 bis 1964) veröffentlicht sein Buch „Raketenflugtechnik“. Im faschistischen Deutschland befaßt sich Sänger vor allem mit dem Bau von Raketenflugzeugen und entwickelt später Pläne für Raum-Transporter. Nach 1945 wendet sich Sänger den Problemen des Staustrahlantriebs und des Photonenstrahlantriebs zu.
1933	In der UdSSR startet eine von Michail Tichonrawow (1900) entworfene Flüssigkeitsrakete.

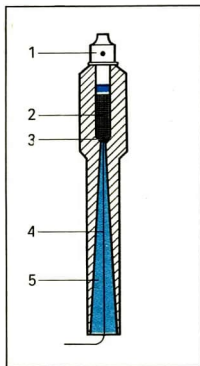
1934	Sergej Koroljow (1907 bis 1966) veröffentlicht seine Arbeit „Der Raketenflug in die Stratosphäre“. Koroljow wird später einer der bedeutendsten Konstrukteure für Trägerraketen und Raumflugkörper der UdSSR.
1947	Leonid Sedow (geb. 1907) veröffentlicht eine Arbeit zu Problemen der Aerodynamik und zum Verhalten zähflüssiger und kompressibler Flüssigkeiten.
1957	Der erste künstliche Himmelskörper „Sputnik I“ wird von der UdSSR gestartet.
1959	Photos von der Rückseite des Mondes („Luna 3“, UdSSR) werden aufgenommen.
1961	Juri Gagarin (UdSSR) fliegt als erster Mensch mit einem Raumflugkörper um die Erde.
1965	Nahaufnahmen von der Marsoberfläche („Mariner 4“, USA) werden gemacht.
1965	Alexej Leonow (UdSSR) verläßt erstmals einen Raumflugkörper und hält sich 10 Minuten im Weltraum auf.
1966	Weiche Landung einer Raumsonde („Luna 9“, UdSSR) auf der Mondoberfläche
1967	Weiche Landung einer Raumsonde („Venus 4“, UdSSR) auf der Venusoberfläche
1969	Neil Armstrong und Edwin Aldrin (USA) betreten mit Hilfe eines Landeapparates („Apollo 11“) als erste Menschen die Mondoberfläche.
1970	Ein ferngesteuertes Mondfahrzeug („Lunochod 1“, UdSSR) arbeitet erstmals auf der Mondoberfläche.
1971	Die erste Orbitalstation („Salut 1“, UdSSR) befindet sich auf einer Erdumlaufbahn.
1971	Weiche Landung einer Raumsonde („Mars 3“, UdSSR) auf der Marsoberfläche
1973	Nahaufnahmen von der Merkuroberfläche („Mariner 10“, USA)
1974	Nahaufnahmen von Jupiter („Pioneer 11“, USA)

1975	Kopplung der Raumflugkörper „Sojus“ (UdSSR) und „Apollo“ (USA)
1978	Gemeinsamer Raumflug von Kosmonauten der UdSSR und der DDR
1979	Nahaufnahmen vom Planeten Saturn („Pioneer 11“, USA)
1979/ 1980	Nahaufnahmen von Jupiter- und Saturnsatelliten („Voyager 1“, USA)
1981	Ein wiederverwendbarer Raumtransporter („Space Shuttle“, USA) wird gestartet (neben wissenschaftlich-technischen vorwiegend militärische Aufgaben).
1982	Beresowoj und Lebedew (UdSSR) führen einen Langzeitflug von 211 Tagen in einer Orbitalstation („Salut 7“) durch.

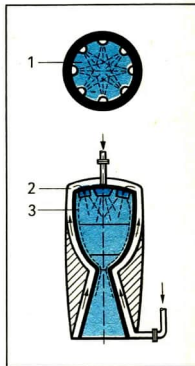
Bilder zur Geschichte der Raumfahrt



Raketenentwurf von Ziolkowski aus dem Jahr 1914
 1 Passagier, in einem Wasserbehälter liegend
 2 gekrümmte Düse
 3 Strahlruder



Feststoffraketenantriebswerk für Meßversuche von Goddard aus den Jahren 1914/1915
 1 Verschlussstück
 2 Treibsatz
 3 Zündkapsel
 4 Zünddraht
 5 Ausströmdüse



Prallzerstäuber und Schleierkühlung nach Oberth
 1 Prallzerstäubung
 2 Gegenstromkühlung
 3 Kühlschleier

Standardträgerrakete für „Sojus“-Raumfahrzeuge

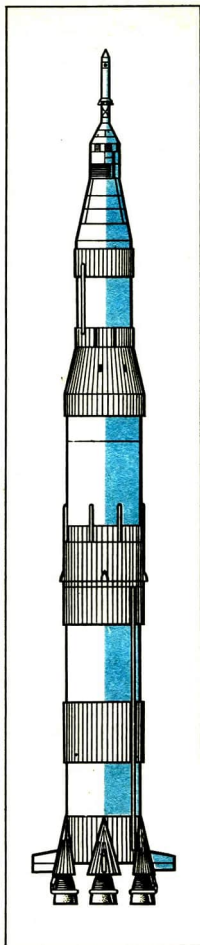
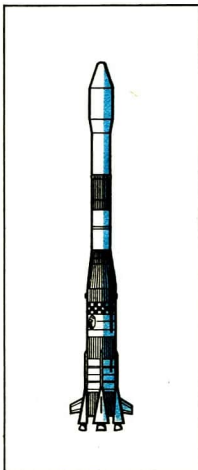
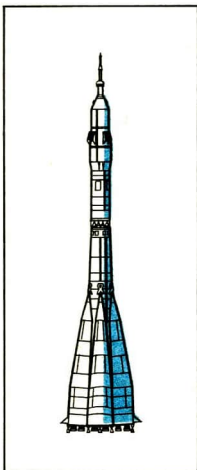
Anzahl der Stufen: 3
 Gesamthöhe: etwa 49 m
 maximaler Durchmesser: 10,3 m
 Startmasse: etwa 300 t
 Masse des Sojus-Raumfahrzeuges: 6,5 t

Dreistufige Trägerrakete „Ariane“

Anzahl der Stufen: 3
 Gesamthöhe: 47,4 m
 maximaler Durchmesser: 3,8 m
 Startmasse: 208 t
 Nutzmasse für Synchronbahnen: 1500 kg
 Volumen der Nutzlast: 35 m³

Saturn V für Apollo Mondflüge

Anzahl der Stufen: 3
 Gesamthöhe: 110,6 m
 maximaler Durchmesser: 10 m
 Startmasse: 2928 t
 Besatzungskabine: 5,6 t
 Gerätesektion: 23,2 t



Standardträgerrakete der UdSSR für „Sojus“ (links)
 Dreistufige Trägerrakete „Ariane“ (Mitte)
 Saturn V Apollo-Mondflüge (rechts)

A

Abknickpunkt 120
absolute Helligkeit 100
Abstandswinkel 45f.
Achse 44f.
aktive Flugbahn 153
– Galaxien 134
Aktivität der Sonne 57
Allwellenastronomie 159
Alter der Sterne 119
Altersbestimmung bei Sternen 119
– – Sternhaufen 120
– kosmischer Prozesse 144
Antriebsbahn 153
Äquator, galaktischer 50
Äquatorsystem, rotierendes 48
–, ruhendes 47f.
Arizona-Krater 94
Astrograph 20
Astrokamera 20
Astrologie 8
Astronomie 5
–, extraterrestrische 158
–, klassische 6
–, Methoden und Instrumente 17ff.
–, nichtoptische 6
–, optische 6
–, Zeittafel 171
astronomische Beobachtung 17
– Beobachtungsinstrumente 19ff.
– Doppelsterne 114
– Einheit 101
– Koordinaten 44
– Zeitdefinition 8
Astrometrie 6
Astrophysik 7
Atmosphäre der Sonne 56
Aufgang eines Gestirns 38

Auflösungsvermögen 23f.
Auswertegeräte 27
Azimut 46
azimutale Montierung 24f.

B

Bahnelemente 62
Bahngeschwindigkeit 156
Balkenspirale 132
Bedeckungsveränderliche 114
Beobachtungsinstrumente, astronomische 19ff.
Bewegungen des Mondes 78
–, geozentrische 63
–, heliozentrische 61
Bewegungsternhaufen 124
Bildverstärker 27

C

Callisto 88
Cassegrain-Teleskop 22
Chromosphäre 56
C-N-O-Zyklus 110
Coelostat 26

D

Dauer der Jahreszeiten 44
Deimos 86
Deklination 47f.
Dichteverlauf im Stern 109
Doppelsterne 106, 113f.
Doppler-Effekt 130
drehbare Sternkarte 37
Drei-Kelvin-Strahlung 145

Dunkelwolke 128
 Durchmesser der Sterne 104
 Dynamik des Raumfluges 153

E

effektive Temperatur 103
 Eigenbewegung der Sterne 129
 Einheit, astronomische 101
 Ekliptik 40f.
 ekliptikale Breite 49
 – Länge 49
 Ekliptiksystem 49
 ELDO 167
 elliptische Systeme 133, 138
 Energiefreisetzungprozesse in Sternen 110
 Entfernungsbestimmung 100
 –, photometrische 101
 –, trigonometrische 101
 Entfernungseinheiten 101f.
 Emissionsnebel 127
 erdartige Planeten 66
 Erde 68
 Erdumlauf 12
 Erprobungssatelliten 148
 Eruption 57f.
 Eruptionsveränderliche 115
 ESA 168
 ESRO 167
 Evolution der Metagalaxis 145f.
 Evolutionshypothesen 95
 Evolutionsphasen 146
 Expansion der Metagalaxis 142
 Expansionsalter 144
 Experiment 17
 extraterrestrische Astronomie 158
 Europa 88
 EUROSPACE 167
 EUTELSAT 168

F

Fackeln 57f.
 Farbtemperatur 104
 Feldstecher 20
 Feuerkugel 92
 Finsternisse 80f.

Flecken 57
 Fluchtgeschwindigkeit 143
 Flugbahn, aktive 153
 – für Erdsatelliten 154
 –, interplanetare 154
 –, passive 153
 Flugkörper 148
 –, aktive 148
 –, bemannte 148
 –, passive 148
 –, unbemannte 148
 Forschungsgegenstand 5
 Forschungssatelliten 148
 Forschungsternwarte 31
 Freiflugbahn 153
 Frühlingspunkt 41

G

galaktischer Äquator 50
 galaktische Koordinaten 50
 Galaxie 131
 –, aktive 134
 – mit aktiven Kernen 135
 Galaxienhaufen 137
 –, Einteilung 137
 Galaxis 121
 Galileische Monde 88
 Ganymed 88
 Gas, interstellares 126
 gedachte mittlere Sonne 9
 Gemeinjahr 12
 geozentrische Bewegung 63
 Gesetze, Keplersche 14f.
 Gesetzmäßigkeiten, kosmogonische 96
 Gleichgewicht, mechanisches 109
 –, thermisches 109
 Gleichgewichtszustand der Sterne 109
 Gravitation 7f.
 Gravitationsbeschleunigung 108
 Gravitationsgesetz 14
 Gravitationskonstante 14
 Gregorianischer Kalender 13
 Grundebene 44f.
 Grundkreis 44f.

H

Hauptklasse 108f.
 Hauptreihenstadium 117f.
 Hauptreihenstern 112
 heliozentrische Bewegung 61
 – Koordinaten 50
 Helium-Reaktion 110f.
 Helligkeit 99f.
 –, absolute 100
 –, scheinbare 100
 Herbstpunkt 41
 Hertzprung-Russell-Diagramm
 112ff.
 Hierarchie des Weltalls 139
 Himmelsachse 34
 Himmelsäquator 34f.
 Himmelsglobus 36
 Himmelskörper 7
 Himmelskugel 33ff.
 Himmelsmechanik 7
 Himmelsnordpol 34
 Himmelspol 34
 Hohmann-Bahnen 154
 Horizont 33
 –, landschaftlicher 33
 –, natürlicher 33
 –, scheinbarer 33
 Horizontebene 33
 Horizontlinie 33
 Horizontsystem 45f.
 Höhe 46
 Hubble-Konstante 143

I

Infrarotastronomie 6
 Infrarotteleskop 29
 innerer Aufbau der Sterne 109f.
 INTELSAT 168
 intergalaktische Materie 138
 Interkosmos 164
 Interkosmosprogramm 164
 interplanetare Flugbahn 154
 Intersputnik 164
 interstellare Materie 126
 interstellarer Raum 129
 interstellares Gas 126

interstellarer Staub 128
 Io 88
 irreguläre Systeme 133

J

Jahreszeit 42f.
 jährliche Bewegung
 der Sonne 39f.
 Julianischer Kalender 13
 Julianisches Datum 13
 Jupiter 73
 jupiterartige Planeten 72
 Jupiterring 74
 Jupitersatelliten 87f.

K

Kalender 12
 –, Gregorianischer 13
 –, Julianischer 13
 Katastrophenhypothese 95
 Keplersche Gesetze 14f.
 Kernfusion 110
 Kettengebirge 83
 klassische Astronomie 6
 Kometen 90
 –, Aufbau 90
 –, Auflösung 91
 –, Bahn 91
 Kometenfamilien 91
 Kometenkerne 98
 Kometen, Merkmale 90
 Komparator 27f.
 Kontraktionsphase 117
 Koordinaten,
 –, astronomische 44
 –, galaktische 50
 –, heliozentrische 50
 Koordinatenmeßgerät 27f.
 Korona 56
 Koronograph 22
 kosmische Prozesse 144
 – Strahlung 128
 Kosmogonie 7
 – der Sterne 117
 kosmogonische Gesetzmäßigkeiten
 96

Kosmogonie, moderne Vorstellungen 97
 Kosmologie 7, 139ff.
 kosmologisches Prinzip 139f.
 Kosmos 7
 –, Geschichte 142
 –, Raumstruktur 140
 –, sphärisch gekrümmter 141
 –, Struktur 139ff.
 Krater 83
 kugelförmige Sternhaufen 125
 Kugelhaufen 125
 Kugelkoordinaten 44
 Kulmination 39
 künstliche Satelliten 148f.

L

landschaftlicher Horizont 33
 Längenkreis 49
 Leitpunkt 45f.
 Leuchtkraft der Sterne 103
 Leuchtkraftklasse 113
 Lichtjahr 102
 Lichtstärke 24
 Linsenfernrohr 19f.
 Loch, Schwarzes 118
 Lokale Gruppe 138

M

Mareflächen 83
 Maria 83
 Mars 71
 Marssatelliten 86
 Masse der Sterne 106
 Massenbestimmung bei Doppelsternen 106f.
 Massendefekt 110
 Masseverteilung in Sternen 109
 Materie, intergalaktische 138
 –, interstellare 126
 mechanisches Gleichgewicht 109
 Mehrfachsterne 114
 Mehrspiegelteleskop 22
 Meridian 34
 Merkur 67
 Metagalaxis 139

–, Evolution 145f.
 –, Expansion 142
 Meteore 91
 –, teleskopische 92
 Meteorite 91, 98
 –, Arten 93
 –, chemische Zusammensetzung 93
 Meteoritenfunde 94
 Meteoritenhypothese 96
 Meteoritenkrater 94
 Meteorströme 93
 Mikrometeore 92
 Mikrometer 26
 Mikrophotometer 27
 Milchstraße 121
 Milchstraßensystem 121ff.
 –, Angaben 123
 –, Aufbau 122
 –, Rotation 130f.
 –, Spiralstruktur 122
 mittlere Dichte 107
 Mittelpunkt 45f.
 mittlerer Sonnentag 9
 mittlere Sonnenzeit 9f.
 Modell 18
 Modellrechnung 18
 Mond 77ff.
 –, Alter 79
 Mondbeben 85
 Mond, Bewegungen 78
 –, Eigenschaften 82
 Mondfinsternis 81
 Mondgestein 84
 Mond, innerer Aufbau 85
 Mondmeer 83
 Mond, Oberflächenformen 83
 –, Oberflächengestalt 82
 Mondphasen 79
 –, physikalische Eigenschaften 77
 –, Rotation 79
 Montierung 24
 Multispektralaufnahmen 158
 Multispektralkamera 166

N

Nachrichtensatelliten 149
 Nadir 34
 natürlicher Horizont 33
 Navigationssatelliten 149
 Nebularhypothese 96
 Neptun 76
 Neutrinoastronomie 6
 Neutronensterne 113
 Newton-Teleskop 22
 nichtoptische Astronomie 6
 Nördlinger Ries-Kessel 95
 Novae 115
 Nutzenanwendungssatelliten 149

O

Objektivprisma 26
 offener Sternhaufen 124
 optische Astronomie 6
 – Doppelsterne 113
 – Teleskope 19f.
 – Veränderliche 114
 Orbitalstationen 151
 Orionarm 123
 Ortsabhängigkeit 48
 Ortszeit 10

P

parabolische Reflektoren 28
 parallaktische Montierung 24f.
 Parallaxe 101f.
 Parsec 102
 partielle Sonnenfinsternis 80
 passive Flugbahn 153
 Pekuliarbewegung 130
 Penumbra 57
 Perioden-Helligkeits-Beziehung 116
 Perseusarm 123
 Phobos 86
 photographischer Refraktor 20
 Photometer 26
 photometrische Doppelsterne 114
 – Entfernungsbestimmung 101
 Photosphäre 56
 physikalische Zeitdefinition 8

physische Doppelsterne 113
 – Veränderliche 114
 Planetarium 37
 Planeten 60ff.
 –, erdartige 66
 –, physikalische Einteilung 64
 –, Größen 65
 Planetesimale 97
 Planetoiden 89, 98
 –, Anzahl 89
 –, Bahnen 89
 –, Größe 89
 –, Merkmale 89
 –, Verteilung 89
 Pluto 76
 Pol 44f.
 Polarnacht 44
 Polarstern 34
 Polartag 44
 Positionsastronomie 6
 Präzession 42
 Prinzip
 –, kosmologisches 139f.
 Protogalaxie 138
 Proton-Proton-Reaktion 110
 Protoplaneten 97
 Protuberanzen 57ff.
 Pulsare 113
 Pulsationsveränderliche 115

Q

Quasare 135

R

Radialgeschwindigkeit 143
 – der Sterne 130
 Radioastronomie 6
 Radiogalaxien 134f.
 Radiointerferometer 29
 Radioteleskop 28
 Raumfahrt 147ff.
 –, Nutzen 157f.
 –, Wesen 147
 –, Zeittafel 178
 Raumfahrzeuge 150
 Raumflug, Dynamik 153ff.

Raumflugkörper 148ff.
 –, Bahnen 153
 Raumkrümmungen 140
 Raumsonden 149
 Raumstruktur des Kosmos 140
 Raumstationen 151f.
 Raumteleskope 30
 Raumtransporter 152f.
 Reflektor 21ff.
 –, parabolischer 28
 Reflexionsnebel 128
 Refraktor 19f.
 –, photographischer 20
 –, visueller 20
 regelmäßige Haufen 137
 Rektaszension 48
 Rettungssatelliten 149
 Richtungswinkel 45f.
 Riesen 112
 Riesenstadium 117f.
 Rillen 84
 ringförmige Sonnenfinsternis 81
 Ringgebirge 84
 Ringsystem des Saturn 75
 Rotation des Mondes 79
 rotierendes Äquatorsystem 48
 Röntgenastronomie 6
 Röntgenteleskop 29f.
 ruhendes Äquatorsystem 47f.

S

Sagittariusarm 123
 Salpeter-Prozeß 111
 Satelliten 77, 98
 –, künstliche 148f.
 Saturn 75
 Saturnsatelliten 88
 Schaltjahr 12
 Schaltsekunde 11
 Schalttag 12
 scheinbare Bewegung der Gestirne 38ff.
 scheinbare Helligkeit 100
 scheinbarer Horizont 33
 Schiefe der Ekliptik 41
 Schmidt-Teleskop 21f.
 Schulsternwarte 32

Schwarzes Loch 118
 siderisches Jahr 12
 siderische Umlaufzeit 61, 78
 solare Scheibe 97
 Solarkonstante 55
 solar-terrestrische Beziehungen 60
 Sommerzeit 11
 Sonne 53ff.
 –, innerer Aufbau 55
 Sonnenfinsternis 80f.
 –, partielle 80
 –, ringförmige 81
 –, totale 80f.
 Sonnenfleckenzyklus 57
 Sonnenspektrum 55
 Sonnenstrahlung 54
 Sonnensynchronbahnen 154
 Sonnensystem 51
 –, Alter 95
 –, Aufbau 51
 –, Entstehung 95ff.
 –, Größenverhältnisse 52
 –, Kosmogonie 95
 –, Masseverteilung 52
 Sonntag
 –, mittlerer 9
 –, wahrer 8
 Sonnenuhren 9
 Sonnenwind 55
 Sonnenzeit 8
 –, mittlere 9f.
 –, wahre 8
 Spätstadium 117f.
 Spektrograph 26
 Spektralklasse 108f.
 spektroskopische Doppelsterne 114
 sphärische Astronomie 6
 sphärisch gekrümmter Kosmos 141
 Spiegelteleskop 21ff.
 Spiralstruktur des Milchstraßensystems 122
 Spiralsystem 138
 Spiralsysteme 132
 Staub, interstellarer 128
 Steady-State-Theorie 146
 Stefan-Boltzmannsches Gesetz 16
 Stellarstatistik 7

Stern 99ff.
 –, Alter 119, 144
 –, Altersbestimmung 119
 Sternarten 112
 Sternassoziation 124
 Sternatlas 37
 Stern, Benennung 99
 –, Bewegung 129
 Sternbild 35f.
 Stern, Dichteverlauf 109
 Sterndurchmesser 104ff.
 Sterne, Gleichgewichtszustand 109
 –, im HRD 112
 –, innerer Aufbau 109f.
 –, Kosmogonie 117
 –, Leuchtkraft 103
 –, Masse 106
 –, Masseverteilung 109
 –, mittlere Dichte 107
 –, Energiefreisetzungsprozesse 110
 Stern, Entfernungsbestimmung 100
 Sternentstehung 117
 Sternentwicklung 117f.
 Sternhaufen 124
 –, Altersbestimmung 120
 Stern, Helligkeit 99f.
 Sternkarte 36f.
 –, drehbare 37
 Sternname 35
 Sternschnuppen 92
 Sternsysteme 121ff., 131ff.
 –, Bewegungen 135f.
 –, Entfernungen 136
 –, Entstehung 138
 –, Entwicklung 138
 Sterntag 11f.
 Stern, Temperatur 103
 –, Temperaturverlauf 110
 Sternwarten 31f.
 Sternzeit 11f.
 Stern, Zustandsgröße 103
 Strahlung, kosmische 128
 Strahlungsgesetze 16
 Strahlungstemperatur 103
 Stundenkreis 47
 Stundenwinkel 47f.
 Supernovae 115
 Synchronbahn, geostationäre 154

synodische Umlaufzeit 61, 78
 Systeme, elliptische 133
 –, irreguläre 133
 Swing-by-Effekt 155

T

Tagbogen 39
 tägliche Bewegung der Gestirne 38
 Teilchenstrahlung der Sonne 55
 Telementor 20
 Teleskope, optische 19f.
 Temperatur der Sterne 103
 Temperaturverlauf im Sterninnern 110
 Theorie 18
 thermisches Gleichgewicht 109
 Tierkreis 41
 Tierkreislinie 41
 Tierkreiszeichen 41
 Titius-Bodische Reihe 62
 totale Sonnenfinsternis 80f.
 trigonometrische Entfernungsbestimmung 101
 tropisches Jahr 12
 Tunguska 95

U

Ultraviolettastronomie 6
 Umbra 57
 Umlaufzeit 61
 –, siderische 61, 78
 –, synodische 61, 78
 Universum 7
 unregelmäßiger Haufen 137
 Untergang eines Gestirns 38
 Unterklasse 109
 Uranus 76
 Urknall 145
 Ursonne 97
 Überriesen 113

V

Venus 67f.
 Veränderliche 114
 veränderliche Sterne 114

➔ R

Vergrößerung 22f.
visuelle Doppelsterne 114
visueller Refraktor 20
Volkssternwarte 31

W

wahrer Sonnentag 8
wahre Sonnenzeit 8
weiße Zwerge 113
Weltall 7
Weltalter 144
Welthorizont 142
Weltmodelle 141
Weltraumrecht 168
Weltraumstationen 151
Weltraumvertrag 168f.

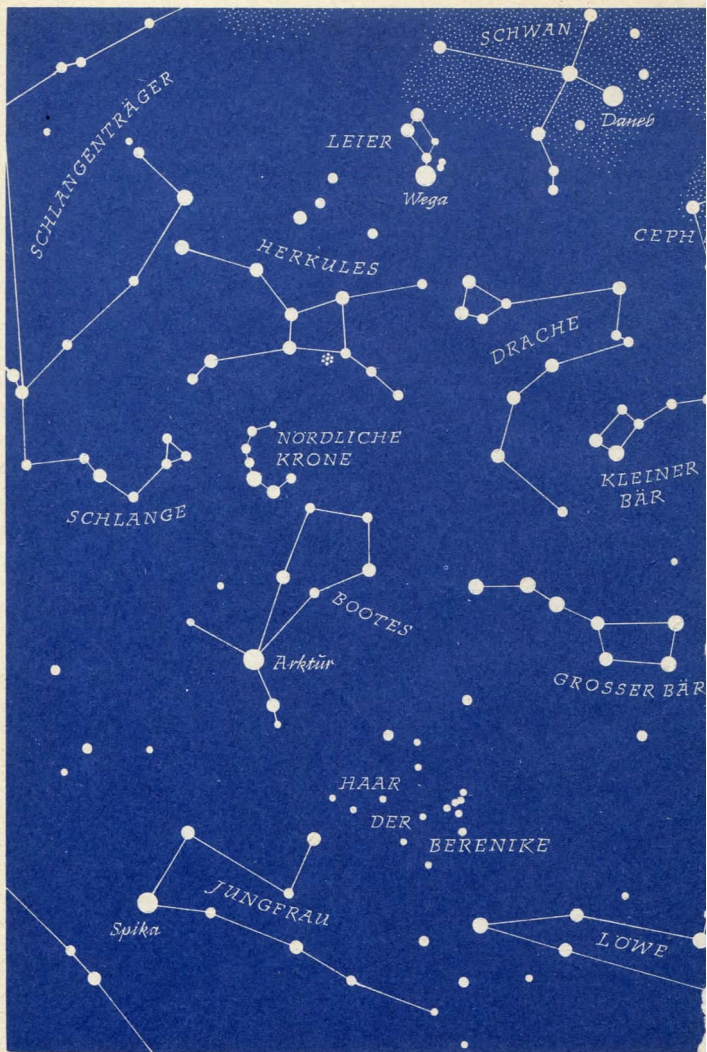
Wettersatelliten 149
Widderpunkt 41
Wiensches Verschiebungsgesetz 16
Wissenschaftsbereiche 6

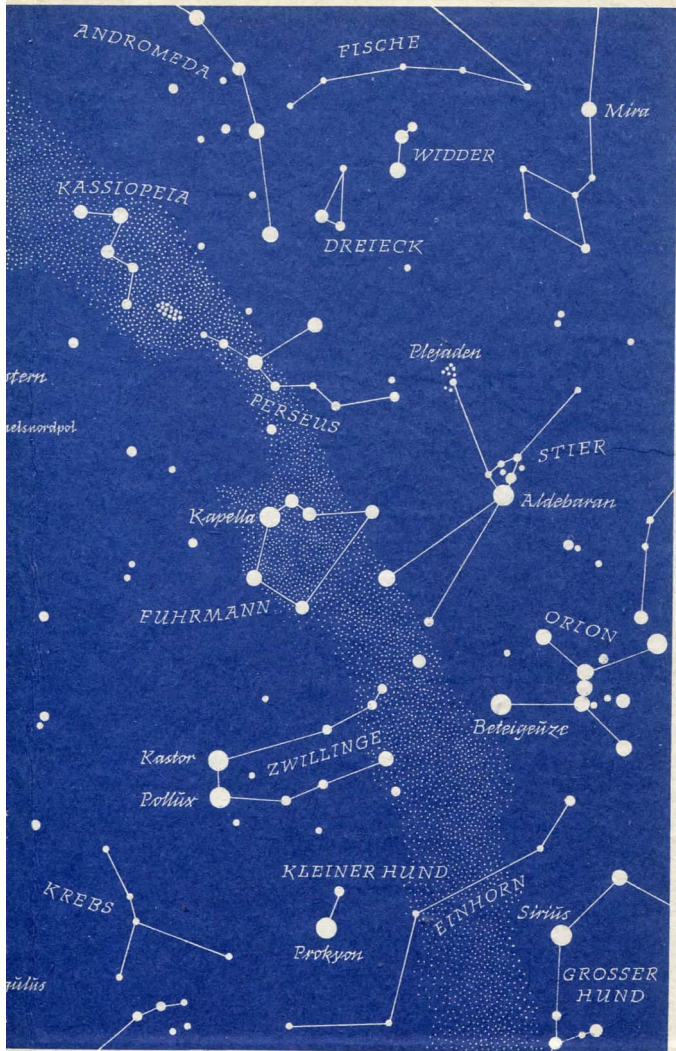
Z

Zeitabhängigkeit 48
Zeitdefinition
–, astronomische 8
–, physikalische 8
Zeitgleichung 10
Zeitzone 10
Zenit 33
Zirkumpolarsterne 38
Zonenzeit 10f.
Zustandsgröße 103

Quellennachweis der Abbildungen

J. Dorschner, Ch. Friedmann, Jena: S. 108 A. Grünberg, Dresden: S. 92 Lyot-Observatorium, Pic du Midi: S. 59 Marx/Pfau, Sternatlas: S. 36 (unten) Mount Wilson and Palomar Observatories, Pasadena: S. 85, 133 (links) National Aeronautics and Space Administration, Washington: S. 71, 72, 82, 83 (unten), 87 (4) H. J. Nitschmann, Bautzen: S. 32 Presseagentur Nowosti: S. 21, 69 VEB Rätigloben-Verlag Leipzig, Werkfoto: S. 36 (oben) J. Rendtel, Potsdam: S. 91 Reproduktion aus der Zeitschrift „Die Sterne“; Verlag Johann Ambrosius Barth, Leipzig: S. 29 Sacramento Peak Observatory Air Force Cambridge Research Laboratories: S. 56 (oben) W. Schwinge, Bautzen: S. 83 (oben) Sternwarte Sonneberg (W. Götz): S. 133 (rechts) Sternwarte Sonneberg (C. Hoffmeister): S. 121, 134 Sternwarte Sonneberg (G. Richter) S. 125 (links) transpress, VEB Verlag für Verkehrswesen Berlin: S. 160 (unten), 162 (unten) Urania-Verlag (Archiv), Leipzig · Jena · Berlin: S. 57, 94 Volk und Wissen (Archiv): S. 56 (unten) VEB Carl Zeiss Jena: S. 31, 37, 127 (links), 127 (rechts) Zentralbild Berlin: S. 84, 86, 149, 151, 158, 160 (oben), 165 (3) Zentralinstitut für Astrophysik der Akademie der DDR, Karl-Schwarzschild-Observatorium Tautenberg: S. 125, 131, 137 (Archiv): S. 26, 76 (2) (F. Börngen) S. 60 Zentralinstitut für solarerterrestrische Physik der Akademie der Wissenschaften der DDR, Sonnenobservatorium Einsteinurm, Potsdam: S. 20, 54





Kurzwort: 081702 Wissenssp. Astronom
ISBN 3-06-081702-2