

Renatus Ziegler

Grundbegriffe der Geometrischen Astronomie

Vorstellungsübungen zu den Bewegungen
von Fixsternen, Sonne, Erde und Mond

Version 1: Dornach: Mathematisch-Astronomischen Sektion am Goetheanum in Dornach
(Schweiz) 1995

Version 2: Bearbeitet und erweitert 2012

Version 3: Neu formatiert und durchgesehen, mit Index 2026

© Renatus Ziegler, Dornach, nur als Internetpublikation auf meiner Webseite:

<https://www.reinesdenken.ch/renatus-ziegler/buecher/>

r.ziegler@reinesdenken.ch

Inhalt

Vorwort 7

1. Einführung 9
 - 1.1 Vorbemerkungen 9
 - 1.2 Gesichtspunkte zur Deutung astronomischer Erscheinungen 10
 - 1.2.1 Geometrisch-kinematischer Gesichtspunkt 10
 - 1.2.2 Mechanisch-physikalischer Gesichtspunkt 10
 - 1.2.3 Weitere mögliche Gesichtspunkte 10
 - 1.3 Welt- oder Kosmos-Anschauungen: Weltbilder 11
 - 1.3.1 Beobachterzentriertes Weltbild 11
 - 1.3.2 Geozentrisches Weltbild 11
 - 1.3.3 Heliozentrisches Weltbild 11
 - 1.3.4 Lunazentrisches Weltbild 12
 - 1.3.5 Planetozentrisches Weltbild 12
 - 1.3.6 Galaktozentrisches Weltbild 12
 - 1.3.7 Azentrisches Weltbild 12
 - 1.4 Erdkörper als Kugel 14
 - 1.4.1 Geographische Erdkugel 14
 - 1.4.2 Magnetische Erdkugel 15
2. Beobachterzentrierte und geozentrische Phänomenologie von Fixsternen und Sonne 19
 - 2.1 Beobachterzentrierte astronomische Phänomenologie 19
 - 2.1.1 Himmelskugeln 19
 - 2.1.2 Ursprünglicher Lichtrhythmus 19
 - 2.1.3 Tagesbewegungen der Fixsterne 19
 - 2.1.4 Übergang vom beobachterzentrierten zum geozentrischen Gesichtspunkt 22
 - 2.2 Form und Rotation des Erdkörpers 25
 - 2.2.1 Form des Erdkörpers 25
 - 2.2.2 Rotation des Erdkörpers 25
 - 2.2.3 Rotationsgeschwindigkeit des Erdkörpers oder des Fixsternhimmels 27
 - 2.3 Sonnenbewegungen 28
 - 2.3.1 Sonnenbahn 28
 - 2.3.2 Geometrie der Bewegungen der Ekliptikebene 28
 - 2.3.3 Ekliptikkugel 28
 - 2.3.4 Der Tierkreis und seine Bewegungen 29
 - 2.3.5 Bewegungen des höchsten Punktes der Ekliptik 32
 - 2.3.6 Der Tierkreis an verschiedenen Orten der Erde 34
 - 2.3.7 Sonnenbewegungen auf der Sonnenbahn 34
 - 2.3.8 Wanderung des Frühlingspunktes durch den Tierkreis 37
 - 2.3.9 Zusammenfassung der Sonnenrhythmen 41

2.4	Kalenderordnung	42
2.4.1	Grundlagen des Kalenders	42
2.4.2	Julianischer Kalender	42
2.4.3	Gregorianischer Kalender	42
2.5	Astronomische Zeitbestimmungen	44
2.5.1	Sonnenzeit	44
2.5.2	Astronomische und physikalische Zeitbestimmungen	45
2.5.3	Entstehung und Veränderungen der Zeitgleichungselemniskate	47
2.6	Zusammenfassung: Relative Kugelbewegungen der Fixsterne und der Sonne in geozentrischer Auffassung	51
2.7	Eigenbewegungen der Sonne	52
2.7.1	Differentielle Rotation der Sonne	52
2.7.2	Sonnenstellung und Ekliptikebene: Phänomenologische Präzession der Sonnenachse	52
3	Geozentrische Mondbewegungen	55
3.1	Mondbahn und Ekliptik	55
3.1.1	Mondbahn	55
3.1.2	Mondbewegung auf der Mondbahn	56
3.1.3	Bewegung der Mondbahn relativ zur Ekliptik	57
3.2	Sonne und Mond	61
3.2.1	Mond-Sonne-Rhythmen	61
3.2.2	Gleichläufige und gegenläufige Perioden	61
3.2.3	Sonnen- und Mondfinsternisse	63
3.2.4	Zusammenfassung der Mondrhythmen	64
3.2.5	Ausgleich zweier Rhythmen	65
3.2.6	Sarosperiode und Saroszyklus	66
3.3	Eigenbewegungen des Mondes	69
3.3.1	Parallaktische Bewegungen des Mondes	69
3.3.2	Rotation und Libration	69
3.3.3	Phänomenologische und absolute Präzession der Mondachse	71
3.3.4	Perioden der Libration	72
3.3.5	Veranschaulichung der Libration	73
3.3.6	Zusammenfassung: Eigenrotation und Bahnbewegung des Mondes	75
3.4	Einige Feinheiten der Mondbewegung	76
3.4.1	Schwankungen der großen Halbachse	76
3.4.2	Schwankungen der Exzentrizität	76
3.4.3	Schwankungen der Drehung der Knotenlinie	76
3.4.4	Schwankungen der Bahnneigung	76
3.4.5	Schwankungen der Drehung der Apsidenlinie	76
3.4.6	Evektion	77
3.4.7	Variation	77
3.4.8	Jährliche Gleichung	77
3.4.9	Parallaktische Gleichung	77

- 4. Vom geozentrischen zum heliozentrischen Weltbild 79
 - 4.1 Verlauf der Sonnenlichtgrenzen 79
 - 4.1.1 Verlauf der Jahreslichtgrenzen 79
 - 4.1.2 Verlauf der Tageslichtgrenzen 81
 - 4.1.3 Zusammenschau der Sonnen- und Erdbewegungen 84
 - 4.2 Vom geozentrischen zum heliozentrischen Gesichtspunkt 86
 - 4.2.1 Bewegung der Erde um die Sonne: Jahresbahn und Präzession 86
 - 4.2.2 Wie sieht man die Jahresbewegung der Erde von der Sonne aus? 89
 - 4.2.3 Wie sieht man die Bewegung der Erde von der rotierenden Sonne aus? 90
 - 4.2.4 Momentane Bewegung der Erde an einem festen Erdort 90
 - 4.2.5 Nutation der Erdachse 91
 - 4.2.6 Bewegungen des Mondes 91
 - 4.3 Zusammenfassung: Relative Kugelbewegungen in heliozentrischer Auffassung 94

- 5. Lunazentrisches Weltbild 95
 - 5.1 Bewegungen des Mondfixsternhimmels und der Sonne 95
 - 5.1.1 Mondsterntage 95
 - 5.1.2 Mondsonnentage 95
 - 5.1.3 Rhythmen im Mondsonnenjahr 96
 - 5.1.4 Phänomenologische Präzession der Sonnenachse 97
 - 5.2 Bewegungen der Erde 98
 - 5.2.1 Erdphasen 98
 - 5.2.2 Schwankungen der Erdscheibe: Libration 98
 - 5.2.3 Drehung der Erdachse: Phänomenologische Präzession der Erdachse 100
 - 5.2.4 Erd- und Sonnenfinsternisse 100
 - 5.3 Knotenbewegungen 102
 - 5.3.1 Verschiebung der Knoten von Erd- und Sonnenbahn 102
 - 5.3.2 Bewegungen der Erdachse 102
 - 5.3.3 Absolute Präzession der Erdachse 102

Anhang

- A.1 Kugelgeometrie 107
 - A.1.1 Kugeloberfläche in Beziehung zu Geraden und Ebenen 107
 - A.1.2 Natürliches sphärisches Koordinatensystem 109
 - A.1.3 Rotation 109
 - A.1.4 Absolute Präzession 109
 - A.1.5 Phänomenologische Präzession 111
 - A.1.6 Kombination von absoluter und phänomenologischer Präzession 113
- A.2 Astronomische Abkürzungen und Symbole 115
- A.3 Literaturlauswahl 116
 - A.3.1 Phänomenologische Grundlagen 116
 - A.3.2 Hilfsmittel zur Beobachtung 116

A.3.3 Weiterführende Fachliteratur	117
A.3.4 Digitale Ressourcen	117
A.4 Nachweis der Abbildungsvorlagen	119

Index	121
-------	-----

Vorwort

Die vorliegende Einführung in die geometrische Astronomie ist aus verschiedenen Kursen und Seminaren zur elementaren Astronomie entstanden. Das grundlegende Textbuch zu diesen Kursen war und ist jeweils das unübertroffene Buch von Joachim Schultz über die «Rhythmen der Sterne». Dieses soll durch die vorliegenden Ausführungen nicht ersetzt, sondern ergänzt werden.

Großer Wert wird auf geometrische Begriffsbildungen anhand beobachtbarer Bewegungserscheinungen gelegt. Dabei wird an die zu erübende Bereitschaft appelliert, sich auch in schwierigere Raumvorstellungen einzuarbeiten. Die eingefügten Figuren betonen jeweils die räumlich-anschaulichen Aspekte und sind für diesen Zweck meist nicht maßstabsgetreu, geben aber qualitativ die Bewegungsverhältnisse exakt wieder.

Was ist neu an dieser Darstellung? Dem astronomischen oder mathematischen Gehalt nach nichts. Hier steht jedoch weniger die Positionsastonomie mit ihrem Blick auf Konjunktionen, Oppositionen etc. im Vordergrund, sondern mehr die konkreten räumlich-dreidimensionalen Bewegungsverläufe, insbesondere mit Einbezug der sich in mannigfaltiger Weise bewegenden Bahnen und der drehenden Körper selbst. Der hier dargestellte Weg ist sicher auch von anderen schon gegangen worden. Aber mir ist außer bei Schultz oder sich an diesen anlehrenden Betrachtungen bisher keine begrifflich und mathematisch befriedigende Darstellung bekannt, die auf ihrem Weg in die Phänomene der Astronomie zunächst sowohl auf physikalische oder anderweitige *Deutungen* als auch auf die *Voraussetzung* des kopernikanisch-keplerschen Weltbildes verzichtet. Hier soll letzteres Weltbild nicht als bereits bekannter Erklärungsgrund der beobachtbaren Phänomene dienen, sondern es sollen zunächst diejenigen phänomenologischen Fakten aufgesucht und dargestellt werden, welche nach geeigneter begrifflicher Durchdringung eben zu diesem Weltbild *hinführen*.

Grundsätzlich setzt diese Einführung keine Vorkenntnisse in Astronomie voraus. Die Darstellung der Phänomene ist zwar möglichst vollständig, aber meist sehr knapp gehalten, sodass für den allerersten Einstieg vielleicht auf andere Literatur oder einen Einführungskurs in die Sternkunde, das heißt zum Beispiel in die Lage und Gestalt der Fixsternbilder, hilfreich sein könnte.

An geometrischen Vorkenntnissen werden nur elementare Tatsachen aus der ebenen Schulgeometrie vorausgesetzt, wie etwa elementare Eigenschaften des Kreises und der Ellipse. Die hier vor allem verwendete *Kugelgeometrie* wird, soweit sie gebraucht wird, in ihren anschaulichen Grundlagen dargestellt (Anhang 1). Von den wenigen in den Text eingearbeiteten Formeln soll sich niemand abschrecken lassen. Sie sind für ein geometrisch orientiertes Verständnis der dargestellten Tatsachen nicht notwendig. Sie sollen nur zeigen, dass auch einige weitergehende Zusammenhänge durch elementare Berechnungen nachvollzogen werden können.

Es versteht sich von selbst, dass in einer solchen kurzen Einführung nicht alles bis in Einzelheiten verfolgt werden kann. Deshalb werden an verschiedenen Stellen Hinweise und Stichworte auf weitere Aspekte gegeben, die meist auf physikalische Bereiche hindeuten, aber hier nicht näher erläutert werden können. Mit Hilfe der im Literaturverzeichnis (Anhang 3) angeführten Bücher und Aufsätze kann aber in den meisten Fällen die entstandene Lücke ausgefüllt werden.

Die rein geometrische Darstellung astronomischer Bewegungserscheinungen kann als Grundlage dienen für über das rein Geometrische hinausgehende Deutungen. Die hier entwickelten phänomenologischen und geometrischen Verhältnisse liegen den meisten *Interpretationen* oder *Weltbildern*, insofern sich diese überhaupt in ein Verhältnis zu den konkreten räumlichen Bewegungsrhythmen setzen lassen, zugrunde, ohne solchen Interpretationen etwas vorwegzunehmen. Eine Entscheidung darüber, welches der verschiedenen Weltbilder für welchen Gesichtspunkt das wirklichkeitsgemäße ist, übersteigt den Rahmen der vorliegenden Darstellung.

Die mit dieser Darstellung vorgelegten geometrischen Deutungen astronomischer Erscheinungen sind natürlich nicht die einzig möglichen. Wie die Geschichte astronomischer Weltbilder zeigt, gibt es mannigfache andere geometrische *Interpretationen derselben Bewegungsverhältnisse*. Aber die hier im

Anschluss an und im Geiste von Kopernikus und Kepler entwickelten Bewegungsbilder sind sicher die einfachsten, und vor allem solche, die in dieser oder jener Weise in allen anderen Systemen auch vorkommen.

Zur Version 2

Der Text der ersten Auflage wurde gründlich überarbeitet, stellenweise ergänzt und mit einigen expliziten elementaren Berechnungen versehen. Neu hinzugekommen ist Abschnitt 2.7 über die Eigenbewegung der Sonne sowie insbesondere das Kapitel 3 über die geozentrischen Mondbewegungen und die entsprechenden Abschnitte zur heliozentrisch betrachteten Mondbewegung.

Die wesentlichste Ergänzung betrifft jedoch das Kapitel 4 über das lunazentrische Weltbild. Ich hoffe, dass es den Leserinnen und Lesern Freude macht, sich gedanklich über die Erde hinauszubewegen und sich zeitweise in die Lage zu versetzen, ein den Himmel beobachtender Mondbewohner zu werden. Das kann kaum im ersten Anlauf gelingen. Bei fortwährender Übung zeigt sich jedoch, dass man dadurch auch die geozentrischen und heliozentrischen Bewegungen besser verstehen und nachvollziehen kann, ja vielleicht sich überhaupt erst gründlicher klar machen und aneignen muss – ganz abgesehen von der dabei erlernbaren Geschmeidigkeit des Vorstellens und Denkens. Denn mit dieser Darstellung verbinde ich keinerlei Behauptungen zur Möglichkeit oder Wirklichkeit irgendwelcher mit menschlichen Sinnen ausgestatteten Mondbewohner: Mir geht es allein um die Übung erhöhter Aufmerksamkeit, begrifflicher Tiefe und konkreter Vorstellungskraft.

Für eine Durchsicht des Textes danke ich Eckart und Wolfgang Grundmann.

Renatus Ziegler, Basel, im Sommer 2012

Zur Version 3

Das Kapitel über die Kugelgeometrie wurde in den Anhang verlegt. Neben Anpassungen an die neue deutsche Rechtschreibung wurden kleinere Formatierungsänderungen gemacht, ein Index wurde eingefügt.

Renatus Ziegler, Dornach, im Frühjahr 2026

1. Einführung

1.1 Vorbemerkungen

Die hier verfolgte Methode geht aus von astronomisch-geometrischen Begriffsbildungen anhand unmittelbar sinnlich-sichtbar zugänglicher Phänomene. Die Verwendung von Begriffen aus der Mathematik, insbesondere der Geometrie, dient zur gesetzmäßig-exakten Bestimmung und Darstellung rhythmischer Prozesse und dreidimensionaler Bewegungsabläufe astronomischer Phänomenreihen. Dadurch können vereinzelte Beobachtungsinhalte und -folgen in einen klar und deutlich erfassbaren, mathematisch-begrifflichen Gesamtzusammenhang eingebettet werden. In zusätzlichen Schritten werden Resultate aus Präzisionsmessungen und Langzeitbeobachtungen mit einbezogen.

Im Vordergrund stehen vor allem die qualitativen, das heißt hier die geometrisch und arithmetisch gesetzmäßigen Raumproportionen und Bewegungskonfigurationen und weniger die genauen numerischen Werte der jeweiligen Bewegungen und Raumdistanzen. Dies ist insbesondere bei den hinzugefügten Abbildungen zu beachten, die meist nicht bis in alle Details maßstabsgetreu, also quantitativ nicht exakt sind. Sie zeigen jedoch in verlässlicher Weise die *relativen* Bewegungen und Raumkonfigurationen in ihren jeweiligen Grundstrukturen. Es wurde auch kein Wert auf die jeweils neusten Daten oder Messungen gelegt, da sich diese ohnehin immer weiter ändern und leicht im Internet oder teilweise auch in astronomischen Jahrbüchern abrufbar sind. Soweit möglich wird jedoch auf qualitative Aspekte und langfristige Tendenzen hingewiesen.

Die Grundelemente der astronomischen Phänomene sind *Licht, Richtung* und *Bewegung*. Aus der Verbindung von Licht, Richtung und Bewegung ergeben sich *Lichtrhythmen* und *Bewegungsrhythmen*. Es gibt in *erster Näherung* kein von bloßem Auge erfassbares Entfernungs- oder Entfernungsänderungserlebnis: alles scheint gleich weit entfernt zu sein, oder zumindest seine Entfernung nicht zu ändern. Folglich werden *zunächst* Entfernungen und Entfernungsveränderungen vernachlässigt. Als primäres Orientierungsmittel dienen in diesem Zusammenhang nur Raumesrichtungen. Als naturgemäß ausgezeichnete Richtung am Beobachtungsort gilt die Richtung oben-unten oder Zenit-Nadir.

Ausgangspunkt und bleibendes Fundament astronomischer Begriffsbildungen ist die Untersuchung erdfester und beobachterzentrierter Bewegungspänomene. Sie stehen hier im Vordergrund und es werden keine physikalischen Deutungen der Bewegungen (Himmelsmechanik) oder physikalische Deutungen des Lichtes (Astrophysik) vorgenommen.

Es geht hier jedoch nicht in erster Linie um reine Positionsastonomie mit ihrer Untersuchung von Himmelsobjekt-Orten sowie deren Konstellationen und Rhythmen, sondern letztlich um die konkrete dreidimensionale Erfassung der Raumbewegungen. Deshalb ist ein *Hauptziel dieser Darstellung* der mit sachgemäßer Sorgfalt vollzogene Übergang von einer standort- oder beobachterzentrierten Phänomenologie (topozentrischer Gesichtspunkt) zur erdbezogenen astronomischen Erscheinungslehre (geozentrischer Gesichtspunkt) und schließlich zur sonnenbezogenen Bewegungslehre in ihrem Zusammenhang mit den erdzentrierten Erscheinungen (heliozentrischer Gesichtspunkt). Es wird also nicht von vornherein auf die «tatsächlichen» heliozentrischen Bewegungen hingeschickt, um den komplizierten «scheinbaren Bewegungen» eine einfache Deutung zu unterlegen. Es soll vielmehr alles dasjenige an konkreten astronomischen Bewegungserscheinungen aufgesucht und begrifflich verarbeitet werden, was die genannten Übergänge überhaupt erst sachgemäß vollziehbar macht.

Das im Kapitel 4 skizzierte lunazentrische Weltbild kann zwar aus den geozentrischen und heliozentrischen Bewegungen abgeleitet werden, es setzt jedoch das *Verständnis* derselben auf einen Prüfstand. Daran kann man sein Einsichts- und Vorstellungsvermögen in herausfordernder Weise weiterentwickeln und zugleich die ursprünglichen Bewegungen in einem klareren und differenzierteren Licht sehen lernen.

1.2 Gesichtspunkte zur Deutung astronomischer Erscheinungen

1.2.1 Geometrisch-kinematischer Gesichtspunkt

Geometrische und rhythmologische Darstellung der sinnlich-sichtbaren Bewegungsphänomene und Raumverhältnisse. Absehung von allen Interpretationen und Erklärungsversuchen der auf diese Weise charakterisierten Bewegungsabläufe.

1.2.2 Mechanisch-physikalischer Gesichtspunkt

Mechanisch-physikalische Analyse und Deutung des Verhaltens der Gestirne und des umgebenden Kosmos: Planeten als starre oder elastische Körper im Newtonschen oder Einstein'schen Gravitationsfeld (Himmelsmechanik), Planeten als Fest- und/oder Flüssigkörper mit gasiger Atmosphäre, Sonne und Fixsterne als leuchtende Gaskörper (Astrophysik). Theorien zur Entstehung und Entwicklung des physikalisch gedachten Weltalls (astrophysikalische Kosmologie, Evolution des physikalischen Kosmos).

1.2.3 Weitere mögliche Gesichtspunkte

Ohne genauere Spezifizierung, Wertung und/oder Bevorzugung sei hier erwähnt, dass noch weitere Gesichtspunkte zur Deutung astronomischer Bewegungsphänomene möglich sind: Erde und Planetensystem, eventuell einschließlich des ganzen Kosmos, als Lebewesen (Gaia-Hypothese); Planetenbewegungen und -konstellationen sowie Fixsternregionen (insbesondere Tierkreis) als Ausdruck für und/oder von Bestimmungen (Einfluss, Verursachung, Anregung, Veranlassung etc.) seelisch-geistiger Erscheinungen, Prägungen, Ausrichtungen, Entwicklungen, Stimmungen, insbesondere des Menschen (Astrologie, Astrosophie); Entstehung und Konfiguration des Sonnensystems und des umgebenden Kosmos als Folge von Entwicklungszuständen und Relationen rein geistiger Wesen, insbesondere im Hinblick auf die Evolution der Naturreiche und des Menschen auf der Erde (anthroposophische Kosmologie).

1.3 Welt- oder Kosmos-Anschauungen: Weltbilder

Im Folgenden werden fünf verschiedene, sich gegenseitig ergänzende Welt- oder Kosmos-Anschauungen in Bezug auf die in Abschnitt 1.2 genannten Gesichtspunkte stichwortartig charakterisiert. Es wird dabei weder Vollständigkeit in der Aufzählung noch Endgültigkeit in der Zuordnung beansprucht.

1.3.1 Beobachterzentriertes Weltbild

Das beobachterzentrierte Weltbild ist lokal geozentrisch oder topozentrisch, das heißt standortzentriert, mit einem festen Bezugspunkt auf der Erde.

Geometrisch-kinematisch: Standortzentrierte Bewegungs- und Lichtrhythmen, Tageskugel (Himmelsäquator, Nordpol), wahre und mittlere Sonnenzeit, Theorie und Praxis der Sonnenuhren, Jahreszeiten, Auf- und Untergangphänomene (heliakischer Auf- und Untergang), Kulminationen, Sichtbarkeitsdauer, konkrete Sichtbarkeit von Sonnenfinsternissen, Sichtbarkeit von geozentrischen Konstellationen, ausgezeichnete Blickrichtungen zu Auf- und Untergangsorten bei Kultstätten (Newgrange, Stonehenge usw.), scheinbarer mathematischer Horizont, Horizontkoordinatensystem.

Mechanisch-physikalisch: Standortbezogene Messbedingungen (atmosphärische Refraktion und Extinktion, tägliche Aberration, tägliche Parallaxe), ortsspezifische Gravitation, lokale Topographie der Erde, orts- und jahreszeitenspezifische atmosphärische Erscheinungen (Polarlicht).

1.3.2 Geozentrisches Weltbild

Das geozentrische Weltbild ist erdzentriert und auf Sonnensystem beschränkt.

Geometrisch-kinematisch: Zeitgleichungslemniskate, Ekliptik als Sonnenbahn, Ekliptikkugel (Sonnenbahn, Ekliptikpole), geozentrisches Weltsystem (Ptolemäus) mit Planetenbewegungen, Aphel und Perihel, Mondbahn, Mondknoten, Apogäum und Perigäum, Libration des Mondes, Sonnen- und Mondfinsternisse, Präzession und Nutation als Bewegungen der Ekliptikkugel relativ zur Tageskugel, geozentrische Konstellationen, wahrer mathematischer Horizont, festes und bewegliches Äquatorkoordinatensystem.

Mechanisch-physikalisch: Geozentrische Mechanik (beschleunigtes Bezugssystem, Raketen- und Satellitenberechnungen), Mechanik des Erdkörpers (Präzession, Nutation, Polwanderung), Form des Erdkörpers (Kugel, Ellipsoid, Geoid), Magnet- und Gravitationsfeld der Erde, erdphysikalische Erscheinungen im Verhältnis zum übrigen Sonnensystem (Verhalten der Atmosphäre, Höhenstrahlung, Gezeiten). Messbedingungen: jährliche Aberration und jährliche Parallaxe, Ephemeridenzeit, Atomzeit, terrestrische dynamische Zeit.

1.3.3 Heliozentrisches Weltbild

Das heliozentrische Weltbild ist sonnenzentriert und im Wesentlichen auf Sonnensystem und dessen nähere Umgebung beschränkt.

Geometrisch-kinematisch: Fixsternkugel der Sonne mit Sonnenhimmelsachse (Rotationsachse der Sonne) und Sonnenhimmelsäquator, Erdbahn relativ zum Sonnenhimmelsäquator und zur Sonnenfixsternkugel, heliozentrisches Weltsystem (Kopernikus, Kepler), Aphel und Perihel, Präzession und Nutation als Bewegungen der Erdbachse, heliozentrische Konstellationen, Ekliptikkoordinaten.

Mechanisch-physikalisch: Himmelsmechanik (Newton, Lagrange, Laplace), Gravitationstheorie (Einstein), Magnet- und Gravitationsfeld der Sonne, energetische Prozesse in und auf der Sonne, Physik des Raum-Zeit-Kontinuums: Geometrodynamik, baryzentrische dynamische Zeit.

1.3.4 Lunazentrisches Weltbild

Auf Mond zentrierter Gesichtspunkt mit Beschränkung auf Sonnensystem.

Geometrisch-kinematisch: Fixsternkugel des Mondes mit Mondhimmelsachse (Rotationsachse des Mondes) und Mondhimmelsäquator, Sonnenbahn und Erdbahn relativ zum Mondhimmelsäquator und zum Fixsternhintergrund (Mondfixsternhimmel), Bewegungen der Erd- und Mondknoten, Präzession und Nutation der Mondachse, Erd- und Sonnenfinsternisse, Bewegung von Apogäum und Perigäum des Mondes, Bewegungen der Erd- und Sonnenachse aus Mondperspektive, Mondperspektive auf Planeten.

Mechanisch-physikalisch: Gravitationsfeld und Magnetfeld des Mondes, Himmelsmechanik des Mondkörpers, Gezeiten und Mondbewegung, Störungen der Kepler-Mondbahn durch Erde und Planeten, Atmosphäre des Mondes, allgemeine Geologie und alter Vulkanismus des Mondes, Entstehung des Mondes, weitere Entwicklung des Mondes.

1.3.5 Planetozentrisches Weltbild

Auf die jeweiligen Planeten zentrierter Gesichtspunkt mit Beschränkung auf Sonnensystem.

Geometrisch-kinematisch: Fixsternkugel aus Planetenperspektive mit Planetenhimmelsachse (Rotationsachse des jeweiligen Planeten) und Planetenhimmelsäquator, Sonnenbahn und Erdbahn relativ zum Planetenhimmelsäquator und relativ zum Fixsternhintergrund (Planetenfixsternhimmel), Bewegungen der Erdachse und Sonnenachse aus Planetenperspektive, Perspektive auf andere Planeten, Bewegungen der Planetenbahnknoten (Schnittpunkte der Planetenbahn mit Ekliptik) und der Apsidenlinie (Perihel und Aphel, das heißt Sonnennähe und Sonnenferne), Präzession und Nutation der Planetenachse, Bewegungen der Planetenmonde, Planetenmond- und Sonnenfinsternisse.

Mechanisch-physikalisch: Gravitationsfeld und Magnetfeld des Planeten, Himmelsmechanik des Planetenkörpers, Störungen der Kepler-Planetenbahn durch andere Planeten, Atmosphäre des Planeten, allgemeine Geologie und Vulkanismus des Planeten, Entstehung des Planeten, weitere Entwicklung des Planeten.

1.3.6 Galaktozentrisches Weltbild

Milchstraßenorientiertes Weltbild: Auf Sterne und Sternsysteme der Milchstraße beschränkt.

Geometrisch-kinematisch: galaktozentrisches Weltsystem, Bewegungen des gesamten Sonnensystems im Raum, Bewegungen der Milchstraße im Raum (differentielle Rotation, Eigenbewegung), geometrische Kosmologie, galaktische Ebene, galaktisches Koordinatensystem.

Mechanisch-physikalisch: Eigenbewegung der Fixsterne, Dynamik der Milchstraße, Arme der Milchstraße.

1.3.7 Azentrisches Weltbild

Auf die ganze Fixsternwelt bezogener Gesichtspunkt ohne festen Bezugspunkt.

Geometrisch-kinematisch: Sonnensystem als Teil der astrophysikalisch bestimmten «lokalen Gruppe», Bewegungen des Milchstraßensystems relativ zu anderen Fixsternen und/oder Sternsystemen.

Mechanisch-physikalisch: Sternklassen, Sternsysteme, Stellarstatistik, allgemeine Astrophysik, physikalische Kosmologie (Urknalltheorie, schwarze Löcher als Singularitäten im Gravitationsfeld).

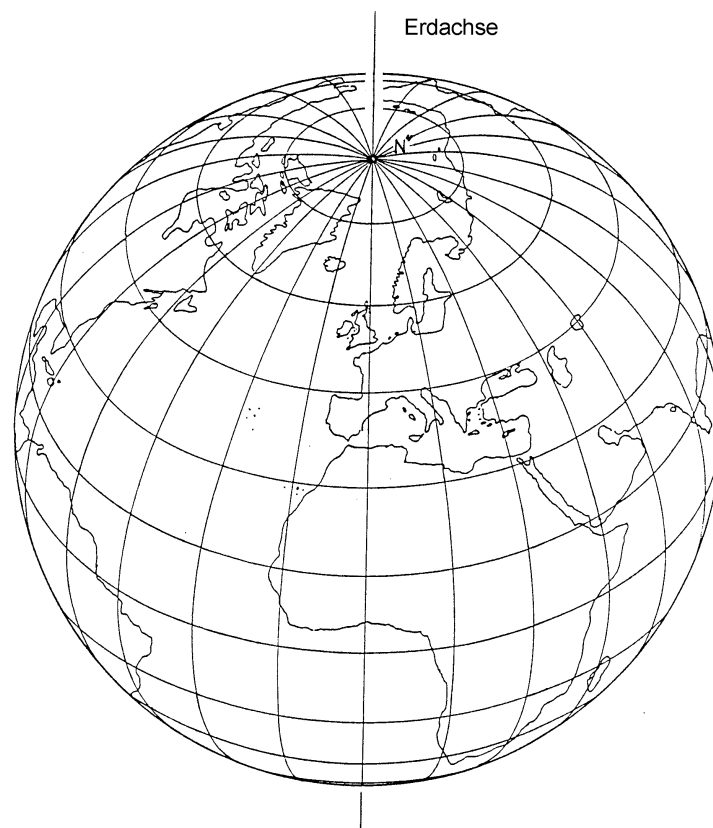
1.4 Erdkörper als Kugel

1.4.1 Geographische Erdkugel

Der Erdkörper ist in erster Näherung eine Kugel. Als rein erdbezogene Hinweise können herangezogen werden: (1) Die Beobachtung von Schiffen, die sich von der Küste entfernen oder sich ihr nähern (oder umgekehrt die Beobachtung der Küste von sich nähernden oder entfernenden Schiffen). (2) Horizonterweiterung beim Aufstieg auf hohe Türme oder Berge. (3) Erdumsegelung, Erdumschiffung, Erdumfliegung. (Für astronomische Hinweise: siehe Abschnitt 2.2.1).

Der Erdkörper ist in zweiter Näherung ein *abgeflachtes Ellipsoid*: ihr Durchmesser ist an den Polen 12713.55 km und am Äquator 12756.32 km. In dritter Näherung ist sie ein *Geoid* mit unregelmäßiger Oberfläche und nicht homogen verteiltem Schwerfeld (die Erdanziehung ist nicht an allen Orten der Erdoberfläche gleich).

Auf der **Erdkugel** könnte durch geographisch-messtechnische Auszeichnung eines im Prinzip beliebigen Großkreises als Äquator oder zweier Diametralpunkte als Pole ein Großkreisbüschel und ein dazugehöriges Parallelkreisbüschel und damit ein erdfestes Koordinatensystem festgelegt werden (zur Kugelgeometrie siehe Anhang 1). Dies wird jedoch nicht durchgeführt, sondern es wird für das globale Erdkoordinatensystem ein an der täglichen Drehung des Fixsternhimmels orientiertes Koordinatensystem eingeführt, mit dem Himmelsnordpol und -südpol als Pole der Drehung zusammen mit dem dadurch bestimmten Äquator (siehe dazu Abschnitt 2.1). Die Projektion dieser astronomisch bestimmten Größen (Himmels-Nordpol und Himmels-Südpol, Himmelsäquator) auf die Erdkugel ergibt den geographischen Nord- und Südpol und den Erdäquator.



Figur 1.1

Meridiankreise oder Längengrade und Breitenkreise der Erdkugel.

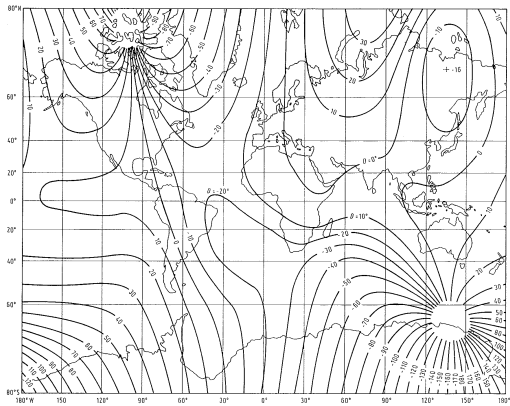
Die *Breitenkreise* auf der Erdkugel sind dann Kleinkreise parallel zum Erdäquator, bilden also in ihrer Gesamtheit ein Parallelkreisbüschel. Sie liegen in Ebenen, die senkrecht sind zur Verbindungsgeraden derjenigen Diametralpunkte der Erdkugel, die Pole des Erdäquators sind, das heißt sie gehen durch den *geographischen Nord- und Südpol*. Die *Meridiankreise* oder *Längskreise* sind Großkreise, die durch die geographischen Pole der Erde gehen. Sie bilden ein Großkreisbüschel. Mit Ausnahme der Pole geht durch jeden Punkt der Erde genau ein Breitenkreis und ein Meridiankreis oder Längskreis (**Figur 1.1**). Die Verbindungsgerade der geographischen Pole heißt *geographische Erdachse*. Sie fällt mit der Himmelsachse, das heißt der Verbindung von Himmelsnord- und Himmelssüdpol zusammen.

Durch die Breitenkreise und Erdmeridiankreise ist ein *Koordinatensystem* bestimmt, bestehend aus geographischer Breite und geographischer Länge. Der Nullpunkt liegt auf dem Erdäquator und auf dem *Nullmeridian* durch die Sternwarte von Greenwich (England). Er geht durch den Atlantik, den Golf von Guinea bei Afrika, etwa südlich der Grenze zwischen Ghana und Togo. Jedem Punkt auf der Erde kommen zwei Koordinaten zu: Die *geographische Länge* wird von Greenwich aus in östlicher Richtung gemessen von 0° bis $+180^\circ$ (oder 0° bis 180° östliche Länge) und in westlicher Richtung von 0° bis -180° (oder 0° bis 180° westlicher Länge). Die *geographische Breite* wird vom Äquator aus in Richtung der Pole gemessen: von 0° bis $+90^\circ$ in nördlicher Richtung (nördliche Breite) bis zum geographischen Nordpol und von 0° bis -90° in südlicher Richtung (südliche Breite).

<i>Beispiele:</i>	Ort	BreiteLänge	
	Nordpol	$+90^\circ$	$\pm 0^\circ$ bis $\pm 180^\circ$
	Magnetischer Nordpol	$+78.3^\circ$	-104.0 (Stand: 1980)
	Nordkap (Norwegen)	$+71^\circ$	$+26$
	Nördlicher Polarkreis	$+66.5^\circ$	$\pm 0^\circ$ bis $\pm 180^\circ$
	Stockholm (Schweden)	$+60^\circ$	$+18^\circ$
	Moskau (Russland)	$+55.8^\circ$	$+37.5^\circ$
	Greenwich (England)	$+51.4^\circ$	$\pm 0^\circ$
	Basel (Schweiz)	$+47.5^\circ$	$+7.5^\circ$
	New York (U.S.A.)	$+40.8^\circ$	-74°
	Kairo (Ägypten)	$+30^\circ$	$+31.3^\circ$
	Nördlicher Wendekreis	$+23.5^\circ$	$\pm 0^\circ$ bis $\pm 180^\circ$ (Wendekreis des Krebses)
	Mexico City (Mexiko)	$+19.4^\circ$	-99°
	Singapur	$+1.3^\circ$	$+103.5^\circ$
	Äquator	$\pm 0^\circ$	$\pm 0^\circ$ bis $\pm 180^\circ$
	Quito (Ecuador)	$\pm 0^\circ$	-78.3°
	Lima (Peru)	-12°	-77°
	Südlicher Wendekreis	$-23.5^\circ \pm 0^\circ$ bis $\pm 180^\circ$ (Wendekreis des Steinbocks)	
	Sao Paulo (Brasilien)	$-23.5^\circ - 47.5^\circ$	
	Kapstadt (Südafrika)	$-33.9^\circ + 18^\circ$	
	Melbourne (Australien)	$-37.8^\circ + 145^\circ$	
	Südlicher Polarkreis	$-66.5^\circ \pm 0^\circ$ bis $\pm 180^\circ$	
	Magnetischer Südpol	$-65.5^\circ + 139.1$ (Stand: 1980)	
	Südpol	-90°	$\pm 0^\circ$ bis $\pm 180^\circ$

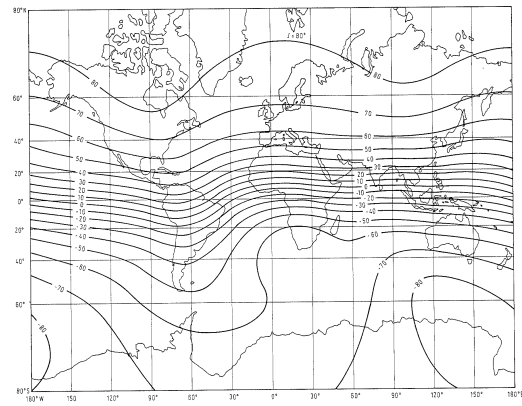
1.4.2 Magnetische Erdkugel

Die *Kompassnadel* zeigt nicht direkt zu den geographischen Polen. Ihre Richtung weicht in der Horizontalebene von der Richtung zu den geographischen Polen ab. Die Abweichung in der Horizontalebene heißt *Deklination* oder Missweisung der Kompassnadel (**Figur 1.2**, Detailkarte für Deutschland: **Figur 1.4**), und die Abweichung von der Richtung zu den geographischen Polen, das heißt in der Vertikalebene, heißt *Inklination* (**Figur 1.3**). Die relativ zu den geographischen Polen nicht stationären *magnetischen Pole* des Erdkörpers sind zurzeit (1980) ziemlich weit von den geographischen Polen entfernt. Der magnetische Nordpol befindet sich auf den Queen Elisabeth Islands (früher Parry Islands) in Canada und der magnetische Südpol auf der Antarktis im Wilkes-Land.



Figur 1.2

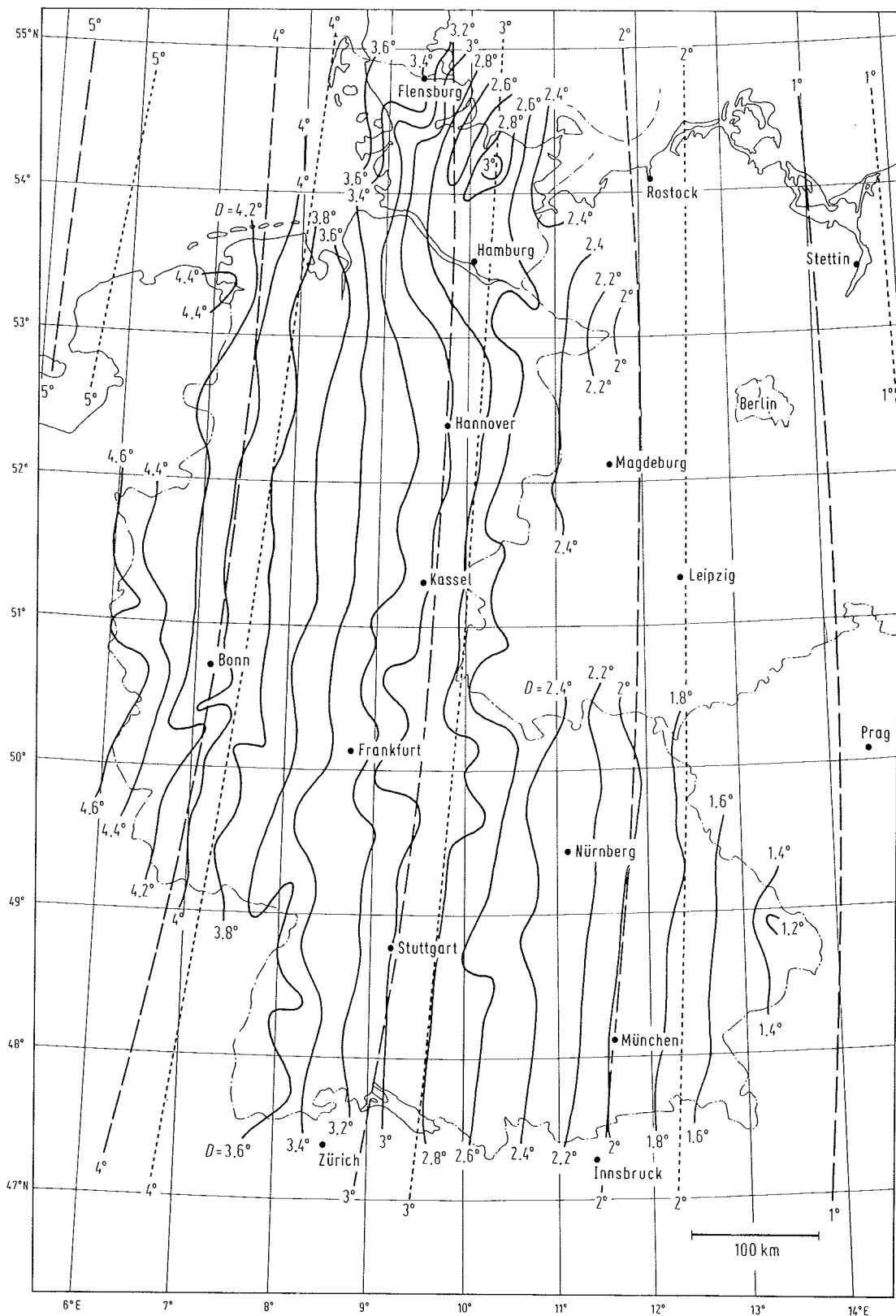
Weltkarte der Deklination, Stand 1980.



Figur 1.3

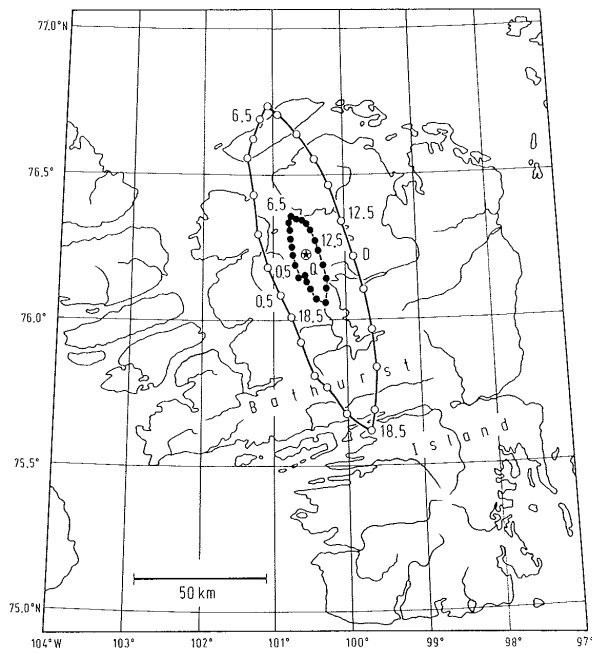
Weltkarte der Inklination, Stand 1980.

Die durchschnittliche mittlere Bewegung des nördlichen (arktischen) magnetischen Pols zeigt sowohl eine jährliche periodische Bewegung (**Figur 1.5**) als auch eine säkulare nicht periodische Bewegung (**Figur 1.6**). Letztere beträgt um 11 km pro Jahr nordwärts und 3 km pro Jahr westwärts (Stand: 1980). Man beachte: Die empirisch lokalisierbaren magnetischen Pole der Erde sind nicht zu verwechseln mit der Position der Pole im geophysikalischen Dipol-Modell der Erde.



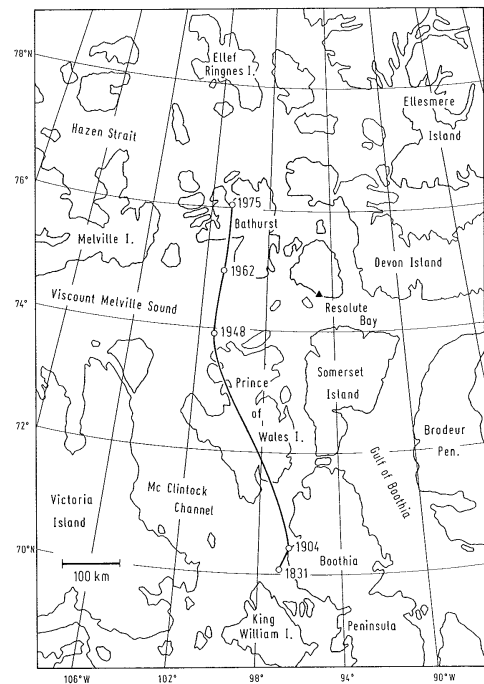
Figur 1.4

Deklinationkarte für Deutschland, Stand: 1965. Volle Linien: *Isogonen* (gedachte Verbindungslinie zwischen Orten gleicher Missweisung, also gleicher Abweichung von magnetisch Nord zu geographisch Nord), gestrichelte Linien: *Normalfeld* (Magnetfeld, das nicht durch Inhomogenitäten der Erdkruste bestimmt ist, sondern durch die Eigenschaften der *gesamten* Erde; es verläuft gleichmäßig vom Äquator zu den Polen).



Figur 1.5

Tägliche Wanderung der Position des nördlichen magnetischen Pols; Stand 1980. *Q* bedeutet den ruhigen Weg und *D* den Weg bei magnetischen Störungen.



Figur 1.6

Weg des nördlichen magnetischen Pols zwischen seiner Entdeckung 1831 bis 1975.

2. Beobachterzentrierte und geozentrische Phänomenologie von Fixsternen und Sonne

2.1 Beobachterzentrierte astronomische Phänomenologie

2.1.1 Himmelskugeln

Himmelskugeln sind Hilfsmittel zur räumlichen Vorstellung. Schneidet man eine Himmelskugel (bestimmt durch Mittelpunkt, Pole, Äquator – siehe Anhang 1: Kugelgeometrie) mit *Beobachtungsrichtungen* von Himmelskörpern, das heißt mit Fixsternen, Sonne, Mond oder Planeten, so erhält man Fixsternorte, Sonnenorte, Mondorte bzw. Planetenorte. Bewegen sich Himmelskörper relativ zueinander, so erhält man Bahnen von Himmelskörpern auf einer Himmelskugel. Es wird sich zeigen, dass man es mit verschiedenen Himmelskugeln zu tun hat (Tageskugel, Jahreskugel oder Ekliptikkugel, Fixsternkugel). Zentrale Aufgaben der geometrischen Astronomie sind erstens die durch die Bewegungserscheinungen bedingten Bestimmungen von Himmelskugeln vermöge deren Mittelpunkt, Pole und Äquator und zweitens die Bestimmung der relativen Bewegungen (Drehungen) solcher Kugeln gegeneinander.

2.1.2 Ursprünglicher Lichtrhythmus

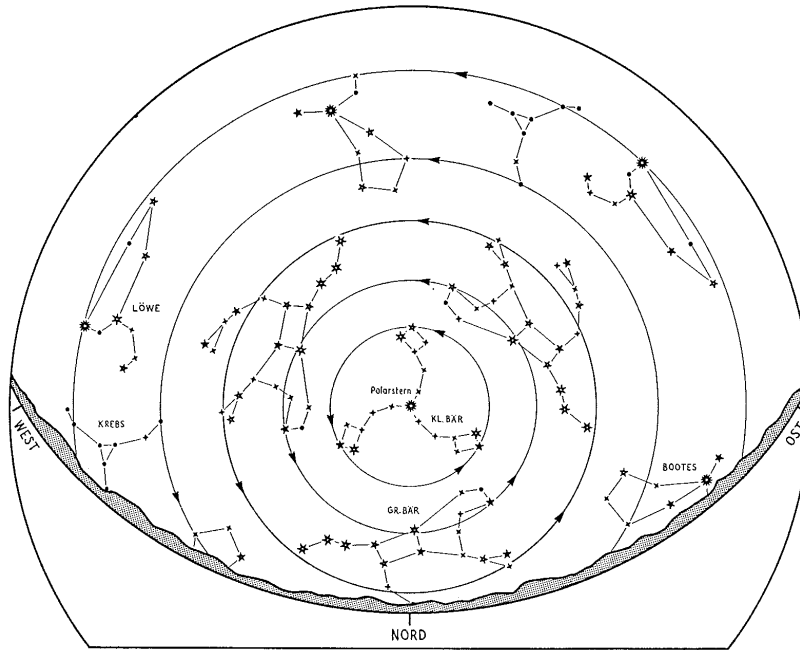
Der ursprüngliche Lichtrhythmus ist der von Morgen, Mittag (Mitte des Tages), Abend und Mitternacht (Mitte der Nacht). Dieser kommt bereits durch die Verknüpfung zweier Bewegungen zustande, durch die Tagesbewegung der Fixsterne und die Sonnenbewegung. Die Sonne geht nicht immer an denselben Stellen auf und unter. Sie bewegt sich komplizierter als die Fixsterne (siehe Abschnitt 2.3). *Fixsterne* sind solche punktförmigen Lichterscheinungen, deren relative Winkelabstände im Wesentlichen fest sind, die immer am selben Ort auf- und untergehen und denen zunächst keine messbare Entfernung zukommt. Damit sind alle Wandelsterne, das heißt Mond, Planeten, Planetoiden und Kometen ausgeschlossen. Fixsterne werden hier zunächst so behandelt, wie wenn sie unendlich weit weg wären; es wird also von deren großen Entfernungen sowie von deren geringen Eigenbewegungen abgesehen. Es werden außerdem ausschließlich die Bewegung der Fixsterne im Tageslauf betrachtet.

Man unterscheidet den topographisch (und zivilisatorisch) bedingten Landschaftshorizont vom *scheinbaren mathematischen Horizont*. Letzterer wird bestimmt durch eine Horizontalebene durch den Beobachtungsort. Die Horizontalebene liegt dabei senkrecht zur Richtung des Beobachters zum Erdmittelpunkt (Richtung der Schwerkraft), das heißt senkrecht zur ausgezeichneten Richtung oben-unten oder Zenit-Nadir.

Die mit dem Beobachtungsstandort auf der Erde fest verbundene *Horizontkugel* ist bestimmt durch die Achse Zenit-Nadir und den Äquator im (scheinbaren) mathematischen Horizont durch den Beobachtungsort.

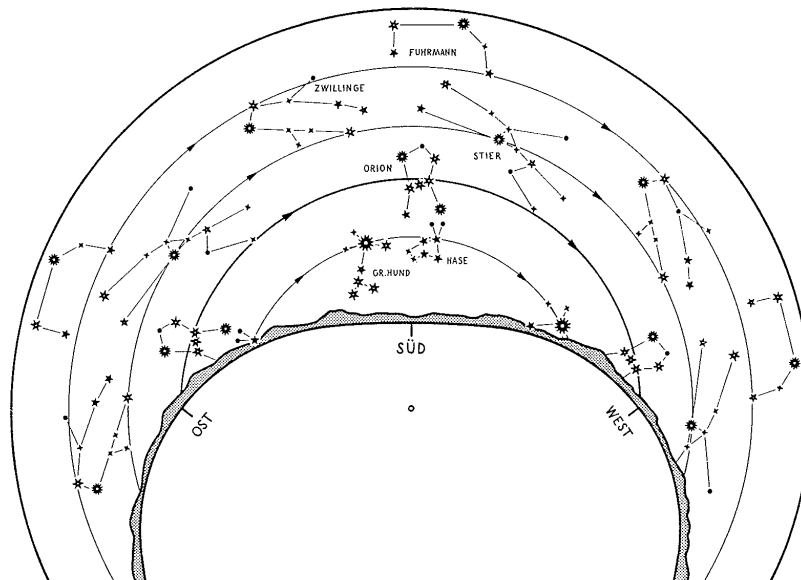
2.1.3 Tagesbewegung der Fixsterne

Man betrachte die Tagesbewegung der Fixsterne ohne Berücksichtigung der Sonnenbewegung, das heißt ohne Berücksichtigung der Unterschiede von hellem Tag und dunkler Nacht in der Nähe von Basel.



Figur 2.1:

Bewegung des Sternenhimmels über dem nördlichen Horizont (in der Nähe von Basel). Dieselben Sternbilder in drei Situationen; zum Beispiel Mitte unten am 20. September, 24 Uhr, links: 20. September, 16 Uhr, und rechts: 21. September, 8 Uhr.



Figur 2.2

Bewegung des Sternenhimmels über dem südlichen Horizont (in der Nähe von Basel). Dieselben Sternbilder in drei Situationen; zum Beispiel Mitte unten am 24. Dezember, 24 Uhr, links: 24. Dezember, 19 Uhr, und rechts: 25. Dezember, 5 Uhr. Die dickere Linie bezeichnet den Himmelsäquator und der kleine Kreis unter dem Südpunkt die Lage des Himmels Südpols.

Die Beobachtung der Fixsternbewegungen über mehrere Nächte führt zu folgenden Ergebnissen und Begriffen:

- Es gibt einen Ruhepunkt der Bewegung, den *astronomischen Nordpol* oder *Himmelsnordpol* oder kurz *Himmelspol*. Er liegt in der Nähe des Polarsterns und seine Polhöhe, das heißt sein Winkel über dem mathematischen Horizont ist bei Basel 47.5° . Die Richtung zum *astronomischen Südpol* oder *Himmelsüdpol* liegt dem Himmelsnordpol relativ zum Beobachter gegenüber.
- Als Kulminationsort wird der höchste oder tiefste Punkt der Fixsternbahnen bezeichnet. Diese bilden auf der Horizontkugel (bestimmt durch Zenit-Nadir und scheinbarer mathematischer Horizont durch den Beobachtungsort) den astronomischen *Meridiankreis*. Der auch *Kulminationskreis* genannte Meridiankreis geht durch den Himmelsnordpol sowie den Zenit und Nadir, und definiert die geographische Nord- und Südrichtungen bzw. die Nord- und Südpunkte des Horizontkreises (Schnittkreis der Tageskugel mit Horizontebene) auf der Tageskugel, und damit auch die *geographischen Ost- und Westpunkte* im Abstand von 90° . Der Meridiankreis hängt von der Zenitrichtung und damit vom Beobachtungsort ab. Geht ein Himmelskörper durch denjenigen den Zenit enthaltenden Halbbogen des Meridians (bezogen auf die Himmelspole und den Himmelsäquator), so ist er in *oberer Kulmination*, geht er durch den komplementären Halbbogen, so ist er in *unterer Kulmination*.
- *Astronomischer Äquator* oder *Himmelsäquator*: Bahnkreis von Himmelskörpern, der durch die geographischen Ost- und Westpunkte geht; er liegt senkrecht auf der Verbindungsgeraden des astronomischen Nord- und Südpols.
- *Sterntag* oder *siderischer Tag*: Zeitverlauf von Kulmination zu Kulmination irgendeines Fixsternes.
- Der Himmelsäquator teilt die Fixsternkugel in eine Nord- und eine Südhalbkugel (Nord- und Südhalbkugel).
- Die *Zirkumpolarsterne* liegen auf der Nordhalbkugel. Von ihnen ist der ganze Bahnkreis immer sichtbar (während eines ganzen Sterntages). Bei Blick nach Norden drehen sich die Fixsterne im Gegenuhrzeigersinn (**Figur 2.1**).
- Die übrigen Fixsterne auf der Nordhalbkugel (bis Himmelsäquator) sind mehr als $\frac{1}{2}$ Sterntag sichtbar.
- Die Fixsterne auf dem Himmelsäquator sind genau $\frac{1}{2}$ Sterntag sichtbar.
- Die Fixsterne auf der Südhalbkugel (bis zum Himmelsäquator) sind weniger als $\frac{1}{2}$ Sterntag sichtbar. Auf der Südhalbkugel gibt es Sterne, die für in der Umgebung von Basel nie sichtbar werden. Bei Blick nach Süden drehen sich die Sterne im Uhrzeigersinn (**Figur 2.2**).

Die **Tageskugel** wird durch den astronomischen Nord- und Südpol sowie den Himmelsäquator definiert.

In erster Näherung (*kleine* Veränderungen des geographischen Beobachtungsortes) hat die *Tageskugel* (bestimmt durch Himmelsnordpol und -südpol) ihren Mittelpunkt am geographischen Beobachtungsort. Die Gerade durch die Himmelspole heißt *Himmelsachse*.

Die Orientierung der ortsfesten Horizontkugel (von der grundsätzlich nur die obere Hälfte sichtbar ist) ist bestimmt durch Zenit-Nadir und den scheinbaren mathematischen Horizont durch den Beobachtungsort. Zu ihr gehört der durch Zenit und Himmelsnordpol gehende Großkreis, *Meridian* genannt. Er liegt der Bestimmung der geographischen Richtungen N, S, O, W zugrunde.

Das *Horizontkoordinatensystem* der Horizontkugel, bestimmt durch Zenit, Meridiankreis und Horizontkreis, beruht auf dem (scheinbaren) Höhenwinkel b über dem scheinbaren mathematischen Horizont oder der Zenitdistanz $90^\circ - b$ und dem Azimut A , gemessen von 0° bis 360° ausgehend

von Süden (Schnittpunkt des Meridiankreises mit dem Horizontkreis) über Westen nach Norden und Osten.

Aufgabe: Betrachte die Neigungen der Sternenbahnen und ihre Veränderung bei einer Wanderung des (inneren) Blicks von den Aufgangsorten im Osten über Süden und von den Untergangsorten im Westen nach Norden und zurück nach Osten.

2.1.4 Übergang vom beobachterzentrierten zum geozentrischen Gesichtspunkt

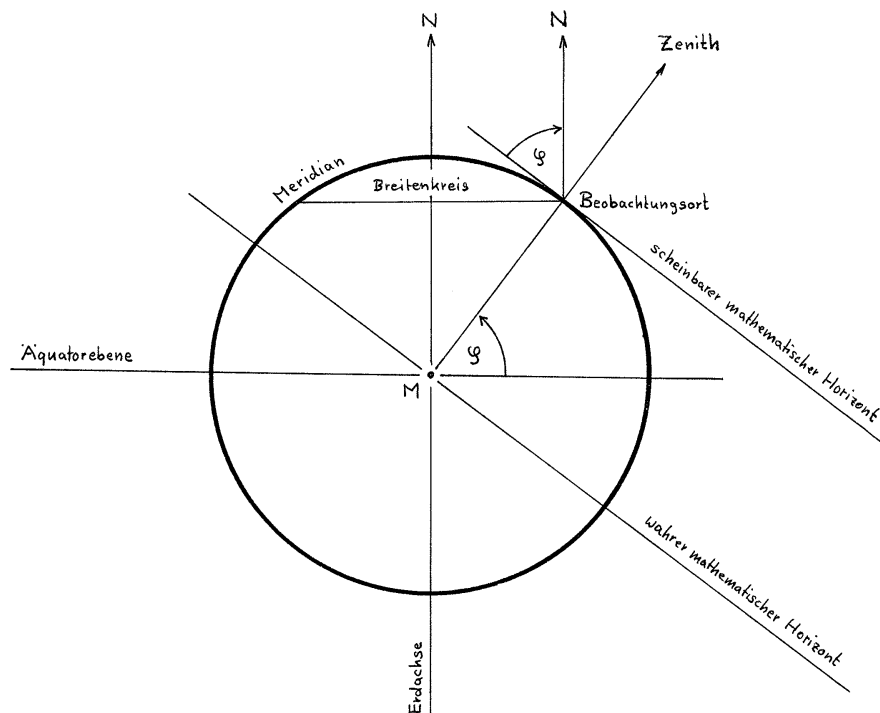
In erster Näherung (keine Präzisionsmessungen) entspricht die Höhe des astronomischen Poles der geographischen Breite.

Aufgabe: Geographische Wanderung vom Beobachtungsort zum Nordpol sowie zum Äquator und zum Südpol der Erde. Wie sehen die Verhältnisse der Fixsternbewegung dort aus? Man mache sich insbesondere die Lage des Nord- und Südpols und des Himmelsäquators klar sowie die Lage der Bahnkreise der Fixsterne.

Lösung: Bei einer Wanderung nach Norden wird die Polhöhe immer steiler und entsprechend werden die Bewegungsbögen der Fixsterne immer flacher, bis diese am geographischen Nordpol zu Parallelkreisen des Äquators werden. Dort liegt der Himmelsnordpol im Zenit und alle Fixsterne der Nordhalbkugel sind sich im Gegenuhrzeigersinn drehende Zirkumpolarsterne. Geht man nach Süden, so zeigen sich immer neue Fixsterne und bis zum Erdäquator sinkt der Himmelsnordpol bis auf den mathematischen Horizont, wo die immer steiler gewordenen Tagesbögen der Fixsterne nun senkrecht den Horizont schneiden. Am Erdäquator kann man im Laufe weniger Wochen oder Monate alle Fixsterne der Nord- und der Südhalbkugel sehen. Geht man weiter nach Süden bis zum geographischen Südpol, so verschwindet der Himmelsnordpol und es zeigt sich der Südpol, wobei nun Fixsterne im Umkreis des Südpols zu Zirkumpolarsternen werden. Am Südpol sind alle Fixsterne der Südhalbkugel zirkumpolar und drehen sich im Uhrzeigersinn.

Man beachte, dass die relative Orientierung (Stellung) der Horizontkugel und der Tageskugel nicht invariant ist bei Wanderungen über die Erdoberfläche. Die Lage der Pole verschiebt sich relativ zum Zenit und die Lage des Himmelsäquators relativ zum mathematischen Horizont.

Die Zusammenfügung aller derartigen Beobachtungen führt zum Ergebnis: Die astronomische bestimmte *Tageskugel* hat ihren Mittelpunkt im Erdmittelpunkt, ihre Pole im Himmelsnordpol und -südpol und ihren Äquator im Himmelsäquator. Damit ist die erste Näherung bezüglich kleiner Änderungen des geographischen Ortes aufgehoben. Bei festem Beobachtungstandort ist ihre Lage relativ zum Horizont in Orientierung und Neigung in erster Näherung immer gleich. Dies bedeutet, dass die Orientierung (nicht: Drehung) der Tageskugel in erster Näherung (keine Präzisionsmessungen) mit der Orientierung der Erdkugel fest verbunden ist. Die geographische Breite φ und die Polhöhe sind dabei in erster Näherung numerisch gleich (**Figur 2.3**). Der astronomische Nord- und Südpol sowie der Himmelsäquator können als zentrale Projektionen der geographischen Pole sowie des Erdäquators aus dem Erdmittelpunkt aufgefasst werden (oder umgekehrt): *Himmelsachse* und *geographische Erdachse* fallen in erster Näherung zusammen.



Figur 2.3

Parallelprojektion der Erdkugel senkrecht zur Meridianebene des Beobachtungsortes auf eine Ebene durch den Mittelpunkt der Erdkugel. φ = geographische Breite.

Der Sterntag mit seinen 24 Sternstunden und seine regelmäßige Unterteilung erlaubt eine rechnungs- oder koordinatenmäßige Orientierung am Himmel, die sich auf den Himmelsäquator bezieht (äquatoriales Koordinatensystem). Dabei bedeutet die *Rektaszension* α die Koordinaten für die Meridiankreise durch die astronomischen Pole; sie wird in Zeitmaß oder Winkelmaß von Westen über Süden nach Osten gemessen. Folgende Tabelle zeigt den Zusammenhang der beiden Maßsysteme:

Zeitmaß	1 ^d = 24 ^h	12 ^h	6 ^h	1 ^h = 60 ^m	20 ^m	4 ^m	1 ^m = 60 ^s	20 ^s	4 ^s
Winkelmaß	360°	180°	90°	15°	5°	1° = 60'	15'	5'	1'

Dabei wird 0^h lokale Sternzeit (willkürlich) festgelegt durch die Kulmination oder Meridiandurchschreitung (auf der Horizontkugel) des Frühlingspunktes, das heißt desjenigen Ortes, wo die Sonne den Himmelsäquator von Süden nach Norden überschreitet (siehe Abschnitt 2.3). Die Richtung der Messung geht von West nach Ost, das heißt entgegen der Tagesbewegung. Als *Stundenwinkel* eines Fixsternes gilt der Winkelabstand des durch die Himmelspole und den Stern gehenden Großkreises mit dem Zenitmeridian (auf der Horizontkugel) in Richtung Ost-West, also in Richtung der Tagesbewegung. Zwischen lokaler Sternzeit θ , Stundenwinkel t und Rektaszension α eines Fixsternes gilt dann die Beziehung $\theta = t + \alpha$. Daraus folgt, dass die Sternzeit t gleich der Rektaszension α aller derjenigen Fixsterne ist, die zu gleicher Zeit den Zenitmeridian durchschreiten, das heißt ihre gemeinsame obere Kulmination haben. Man beachte: Der durch Zenit und Himmelsnordpol gehende Zenitmeridian gehört als Großkreis sowohl zur Tageskugel als auch zur Horizontkugel, ist jedoch nur mit letzterer fest verbunden.

Eine entsprechende Winkleinteilung des Zenitmeridiankreises, ausgehend vom Himmelsäquator, ergibt die *Deklination* δ . Dabei handelt es sich um Koordinaten für die astronomischen Breitenkreise, das heißt die Parallelkreise zum Himmelsäquator. Der Himmelsäquator erhält die Deklination 0° und der Nordpol $+90^\circ$ und der Südpol -90° .

In zweiter Näherung (*kleine Zeiträume*) hat die *Tageskugel*, in ihrer Orientierung bestimmt durch Himmelsnordpol und -südpol und Äquator, relativ zu der Fixsternkugel immer dieselbe Lage.

Geometrisch gesehen kommt es auf dasselbe hinaus, ob man sich die Tageskugel um die astronomischen Pole (Himmelsachse) oder die Erdkugel in entgegengesetzter Drehrichtung um die geographischen Pole (Erdachse \approx Himmelsachse) drehend vorstellt.

Unter **Fixsternkugel** ist diejenige Kugel gemeint, die (vom geozentrischen Gesichtspunkt aus) ihren Mittelpunkt im Erdzentrum hat und deren Lage relativ zu den Fixsternen (*nicht*: relativ zur Tagesbewegung der Fixsterne) fest ist. Sie hat keine natürliche geozentrische (oder heliozentrische) Orientierung.

Der *wahre mathematische Horizont* ist bestimmt durch eine Ebene durch das *Erdzentrum*, die senkrecht zur Verbindungsgerade des Beobachters mit dem Zenit ist (**Figur 2.3**). Der *wahre Höhenwinkel* ist dann der relativ zum wahren mathematischen Horizont gemessene Höhenwinkel. Für Planeten mit ihren im Vergleich zu den Fixsternen endlichen Distanzen kann der Unterschied von wahrer und scheinbarer Höhe einige Winkelsekunden bis zu einem Winkelgrad ausmachen.

2.2 Form und Rotation des Erdkörpers

2.2.1 Form des Erdkörpers

In erster Näherung ist die Erde eine *Kugel*. Als astronomische Hinweise darauf gelten: (1) Der Auf- und Untergang von Fixsternen erfolgt für verschiedene Orte der gleichen Breite zu verschiedenen Zeiten. (2) Der Nord- und Südhimmel haben verschiedene Sternbilder. (3) Bei einer Wanderung entlang eines Meridians verändert sich der Fixsternhimmel kontinuierlich. (4) Der Erdschatten ist bei Mondfinsternissen kreisförmig. (5) Derselbe Fixstern hat zu selben Zeiten an verschiedenen Orten der Erde verschiedene Höhenwinkel im Horizontkoordinatensystem. (Daraus könnte auch auf eine endliche Entfernung von Fixsternen geschlossen werden; das konkrete Verhalten der zu gleichen Zeiten gemessenen Höhenwinkeldifferenzen in Abhängigkeit von den Distanzen der entsprechenden geographischen Orte ist mit dieser Annahme jedoch nicht vereinbar.)

In zweiter Näherung ist die Erde ein an den Polen abgeplattetes *Rotationsellipsoid*. Der Äquatordurchmesser $r_{\text{Ä}} = 6378.16$ km ist um 21.4 km länger als der Polradius $r_{\text{P}} = 6356.76$ km. Das ergibt eine Abplattung von 1:298, definiert durch $(r_{\text{Ä}} - r_{\text{P}}) / r_{\text{Ä}}$.

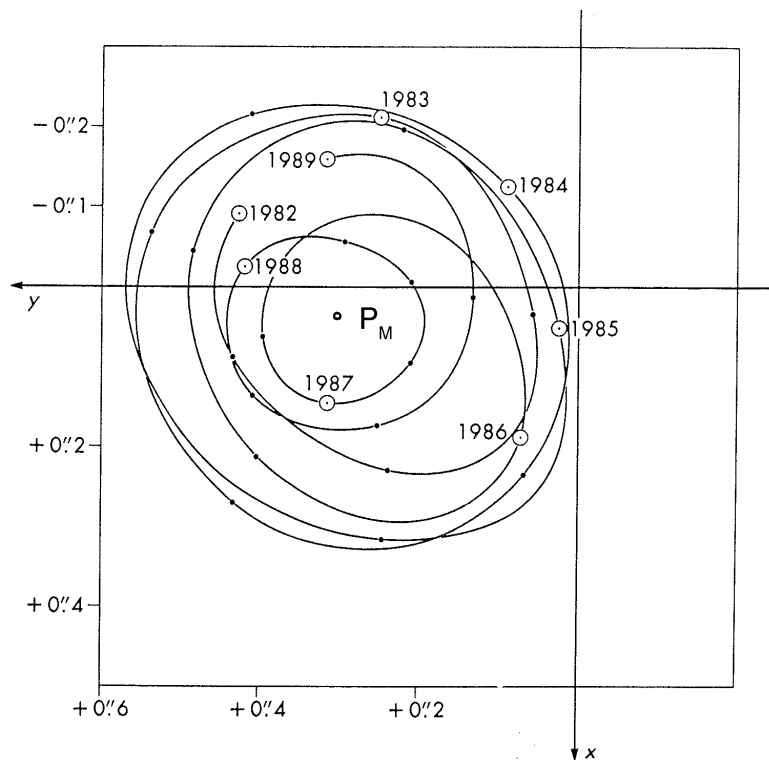
Als geodätische und astronomische Hinweise darauf gelten: (1) Variation der Bogenlänge eines Breitengrades: Die auf der Erdoberfläche gemessene Bogenlänge eines Breitengrades in der Nähe der Pole ist länger als beim Äquator bei gleichbleibender, durch Polhöhenbestimmung gemessenen Gradwinkeln. (2) Es gibt keine Variation der Bogenlänge von Längengraden konstanter Breite. (3) Die physikalische Theorie rotierender zähflüssiger Körper erklärt die Bildung eines Äquatorwulstes durch die im Äquatorbereich größere Fliehkraft.

In dritter Näherung ist die Erde ein *Geoid*, das heißt eine mit der mittleren Meeresoberfläche zusammenfallende, zur Schwerkraftsrichtung senkrechte Fläche (Niveauläche der Erdschwere). Relativ zum theoretischen Erdellipsoid hat das Geoid eine schwach gewellte Oberfläche (Abweichungen um ± 100 m, an den Polen um ± 25 m). Als geodätischer Hinweis darauf gilt: Abweichung des tatsächlichen Schwerelotes vom theoretischen Lot des Erdellipsoids.

2.2.2 Rotation des Erdkörpers

In erster Näherung geht die mit der Richtung der Himmelsachse zusammenfallende *astronomische Erdachse* oder *momentane Rotationsachse* immer durch dieselben Punkte des Erdkörpers, das heißt die Tageskugel ist in ihrer Orientierung (nicht: in ihrer Drehung) fest mit dem Erdkörper verbunden (Identität von geographischer und astronomischer Erdachse).

Präzisionsmessungen sowie Langzeitmessungen und Vergleichsmessungen zeigen jedoch, dass es für feste geographische Orte eine periodische Breitenschwankung oder *Polhöhenchwankung* mit einem Maximum von $0.35''$ gibt. Dies ist eine periodische, im Gegenuhrzeigersinn kreisförmige Bewegung der Durchstoßpunkte der momentanen Drehachse der Erde mit dem Erdkörper, der auf eine Variation um wenige Meter von einem in der Nähe der geographischen Pole liegenden mittleren Ort P_{M} zurückzuführen ist (*Nutation des Erdkörpers*). Bezüglich der raumfest gedachten Durchstoßpunkte der momentanen Drehachse mit dem Erdkörper vollzieht also der Erdkörper eine kreisförmige Bewegung um eine mittlere Lage im Uhrzeigersinn. Mit anderen Worten: Ein fest mit dem Erdkörper verbundener, zu einem festen Zeitpunkt zum Himmelsnordpol zeigender Stab (oder ein Fernrohr) wird sich im Laufe von etwas mehr als ein Jahr vom Himmelsnordpol im Gegenuhrzeigersinn kreisend wegbewegen und wieder in dessen Nähe kommen.



Figur 2.4

Bahn des Nordpols der Erdachse (Polhodie) 1982–1989 aus Beobachtungen des Internationalen Breitendienstes. Jahresviertel sind durch Punkte gekennzeichnet. – Die x-Achse verläuft in Richtung des Greenwich-Meridians (Maßstab: $0.5'' \approx 15.4$ m). Zwischen 1900 bis 1905 befand sich die mittlere Lage P_M der Rotationsachse am Nullpunkt des eingezeichneten Koordinatensystems. Die derzeitige Verlagerung von P_M beträgt etwa $0.003''$ pro Jahr.

Die vorherrschende Periode (Chandler'sche Periode) hat eine Länge um $1\frac{1}{4}$ Jahre (415 bis 433 Tage) und die Abweichung der Rotationsachse von einer mittleren Lage liegt im Rahmen von 10 bis 15 Metern (**Figur 2.4**). Die Ursache dieser periodischen Polbewegung wird darin gesehen, dass die physikalische Symmetrieachse (Hauptträgheitsachse) und die Rotationsachse der Erde nicht zusammenfallen. Es gibt eine weitere, durch jahreszeitliche Vorgänge bedingte, jedoch schwächere regelmäßige Abweichung, die eine Periode um 365 Tage hat. Zusätzliche säkulare Einflüsse, die auch zu *nichtperiodischen Polbewegungen* führen können, sind auf geophysikalische Vorgänge zurückzuführen.

Es gibt keine *direkten* phänomenologischen Beweise der täglichen Rotation des Erdkörpers, sondern nur astronomische, physikalische und meteorologische Phänomene, die als Ausdruck einer solchen Rotation *interpretiert* werden können.

Als indirekte physikalische, meteorologische und astronomische Hinweise auf die tägliche Rotation der Erde gelten: (1) Nachweis von *Corioliskräften*, das heißt von (Schein-) Kräften, die durch ein rotierendes und damit beschleunigtes Bezugssystem hervorgerufen werden. Ist \mathbf{v} die Geschwindigkeit eines Körpers auf der rotierenden Erde und ist $\boldsymbol{\omega}$ die Winkelgeschwindigkeit der Erddrehung, so ist die Corioliskraft proportional dem Vektorprodukt $\mathbf{v} \times \boldsymbol{\omega}$. (1a) Drehung der Schwingungsebene eines Pendels in der Nordhemisphäre der Erde im Uhrzeigersinn (Foucault'sches Pendel). Ein an den geographischen Polen aufgehängtes Pendel dreht sich in 24 Stunden um 360° . In der geographischen Breite φ ist die Zeitdauer einer vollen Umdrehung der Pendelebene (Periode) gleich $24/\sin\varphi$ Stunden. (1b) Fällt ein Stein aus großer Höhe (etwa von einem Turm) herab, so eilt er einerseits geringfügig in der Rotationsrichtung der Erde voraus, da er in größerer Entfernung vom Erdmittelpunkt eine größere Beschleunigung erhalten hat und andererseits wird er in der Nordhemisphäre der Erde durch die Corioliskraft in östlicher Richtung abgelenkt. Auf 100 m Höhe ergibt sich eine

Abweichung von um 22 mm. (1c) Ostablenkung von Nordwinden in der Nordhemisphäre und von Südwinden in der Südhemisphäre. (2) Konstante Ausrichtung eines Kreiselkompasses auf einen Fixstern. (3) Tägliche *Aberration* (beobachtbare tägliche Ortsveränderung von Sternen aufgrund der Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit) des Sonnen- und Fixsternlichtes (Maximum: 0.31"). (4) Relative tägliche *Parallaxe* (beobachtbare tägliche Veränderung der Position eines Sternes aufgrund der Tagesbewegung des Beobachters) von Fixsternen.

Im Folgenden ist mit *Erdachse* immer die mit der Himmelsachse zusammenfallende momentane Drehachse des Erdkörpers (astronomische Erdachse) gemeint, und nicht die geographisch bestimmte Erdachse oder die physikalisch definierte Trägheitsachse.

2.2.3 Rotationsgeschwindigkeit des Erdkörpers oder des Fixsternhimmels

Ein Sterntag ist in erster Näherung sehr regelmäßig (gleichförmig). Genauere Messungen sowie Langzeitbeobachtungen insbesondere anhand einer Analyse der Mondbewegungen zeigen jedoch unregelmäßige sowie periodische Schwankungen der Rotationsgeschwindigkeit der Erde: (1) *Säkulare Schwankung*: durch Gezeitenreibung hervorgerufene Verlangsamung der Erdrotation im Bereich von 0.0016 Sekunden pro Jahrhundert. (2) *Fluktuationen*: Wahrscheinlich führen geophysikalische Vorgänge (Massenverlagerungen) zu geringen Schwankungen im Millisekundenbereich im Bereich von Jahrzehnten bis Jahrhunderte. (3) *Jahreszeitliche Schwankungen*: vermutlich bedingt durch jahreszeitliche Vorgänge wie Luftmassenverlagerungen, Abschmelz- und Gefriervorgänge an den Polen etc. ergibt sich eine Schwankungsrate von um 0.001 Sekunde pro Tag.

2.3 Sonnenbewegungen

2.3.1 Sonnenbahn

Als Gesamtbild der Sonnenbewegung auf der Horizontkugel zeigt sich eine in sich geschlossene, zwischen zwei Kleinkreisen (astronomische Wendekreise) eingeschlossene *sphärische Schraubenlinie*.

Die Sonnenbewegung lässt sich in zwei Komponenten zerlegen: (1) Im Jahreslauf zeigt sich eine rhythmische Verschiebung der Aufgangs- und Untergangsorte. Beginnend im Frühling etwa am **21. März** (*Frühlingspunkt* oder *Frühlings-Äquinoktium*, abgekürzt F), wo die Sonne nahezu genau einen halben Großkreisbogen von Ost nach West durchschreitet, wandern die Auf- und Untergangsorte nach Nordosten bzw. Nordwesten (Tagesbögen werden zu Kleinkreisen, die größer als Halbkreise sind), erreichen eine maximale Abweichung von Osten und Westen etwa am **21. Juni** (*Sommersonnennende* oder *Sommer-Solstitium*, abgekürzt SS) und gehen dann wieder genau zu Ost und West etwa am **23. September** (*Herbstpunkt* oder *Herbst-Äquinoktium*, abgekürzt H). Danach beginnt eine Abweichung nach Südosten und Südwesten (Tagesbögen werden zu Kleinkreisen, die kleiner als ein Halbkreis sind), die nach einem Maximum etwa am **22. Dezember** (*Wintersonnennende* oder *Winter-Solstitium*, abgekürzt WS) wieder zum Ursprungszustand etwa am 21. März zurückgeht.

(2) Relativ zu einer über mehrere Sonnentage von Sonnenaufgang zu Sonnenuntergang gehenden Beobachtungsperiode rücken die Sterne oberhalb der Sonne immer näher zum Horizont. Relativ zu einem Sterntag vom Meridiandurchgang eines Sternes zum nächsten Meridiandurchgang bewegt sich die Sonne ausgehend von ihrem Untergang am 21. März 18 Uhr immer weiter in die Höhe in den Nordhimmel. Die Sonne bleibt also relativ zum Fixsternhintergrund zurück: Die Sonne läuft etwas langsamer als die Tagesbewegung der Fixsterne. Es gibt eine Verspätung der Auf- und Untergänge täglich um 4 Minuten, was einem Winkelgrad um 1° oder 2 Sonnenscheiben entspricht. Anders ausgedrückt: der *Sonntag* (Zeit von oberer Kulmination zu oberer Kulmination der Sonne) ist um 4 Minuten länger als der Sterntag. Auf 365 Sonnentage fallen ziemlich genau 366 Sterntage.

Die Sonnenbahn relativ zum Fixsternhintergrund und bei festgehaltener Tageskugel heißt *Ekliptik*. Diese ist ein Großkreis auf der Fixsternkugel mit einer Neigung um 23.5° zum Himmelsäquator, der den Himmelsäquator in den Äquinoktien F und H schneidet. Ein Halbbogen der Ekliptik liegt in der Nordhalbkugel der Fixsternkugel und ein Halbbogen in der Südhalbkugel.

2.3.2 Geometrie der Bewegungen der Ekliptikebene

Durch die Verbindung mit der Tageskugel wird die Ekliptikebene täglich in die Bewegung mitgenommen und dreht sich um die Nord-Süd-Achse (Himmelsachse). Dabei umhüllt sie einen Kegel, der die Tageskugel in den beiden Wendekreisen (nördlich höchste und südlich tiefste Sonnenbahn) schneidet. Der Kegel wird durch die Horizontebene (in der Nähe von Basel) durch zwei Geraden (Mantellinien oder erzeugende Linien des Kegels) geschnitten, die den nördlichsten Aufgangspunkt der Sonne mit dem südlichsten Untergangspunkt sowie dem südlichsten Aufgangspunkt mit dem nördlichsten Untergangspunkt verbinden. Die Schnittgerade der Ekliptikebene mit der Horizontebene (der Horizontkugel) pendelt während der Drehung der Tageskugel zwischen diesen beiden Geraden hin und her. Das trifft für alle geographischen Lagen zwischen den Polarkreisen ($\pm 66.5^\circ$ Breite) zu. In geographischen Orten über den Polarkreisen ($> 66.5^\circ$ Breite) dreht sich diese Gerade ohne Richtungswechsel (aber mit Geschwindigkeitsunterschieden) in der Horizontebene immer weiter.

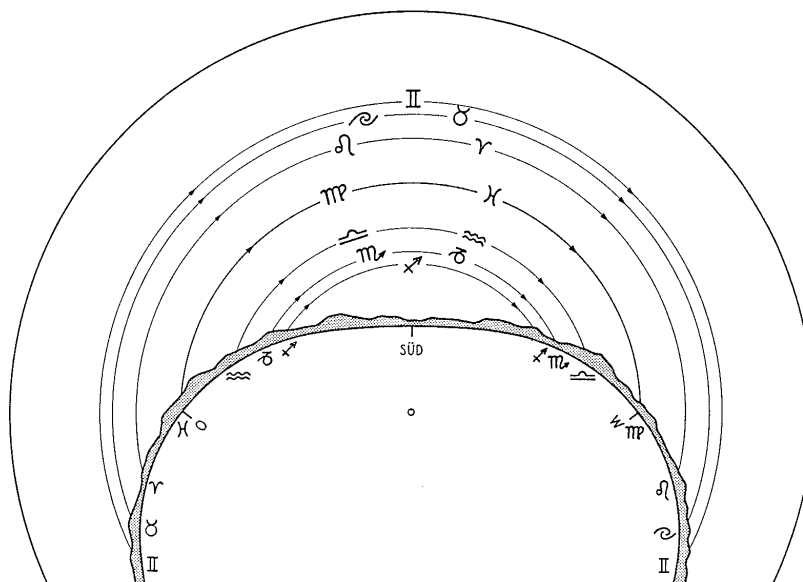
2.3.3 Ekliptikkugel

Da die Ekliptik ein Großkreis ist, besitzt sie zwei Pole, den *Ekliptiknordpol* E (im Sternbild des Drachen) und den *Ekliptiksüdpol*. Die Verbindungsgerade heißt *Ekliptikachse*. Die fest mit der

Sonnenbahn oder Ekliptik verbundene Kugel (mit Zentrum im Erdzentrum) heiße *Jahreszeitenkugel* oder **Ekliptikkugel**. Sie ist in erster Näherung fest mit der Fixsternkugel verbunden.

Der Ekliptiknordpol im Sternbild des Drachen (bei Basel zirkumpolar) spielt für die Gesamtbewegung von Erde und Sonne eine zentrale Rolle. Es sollen deshalb kurz seine wesentlichen Stellungen im Jahreslauf vergegenwärtigt werden. An der Sommersonnenwende hat der Ekliptiknordpol mittags seine untere und mitternachts seine obere Kulmination. Bei seiner oberen Kulmination steht er (in der Nähe von Basel) etwa zwischen Himmelsnordpol und Zenit, und in seiner unteren Kulmination etwa zwischen Himmelsnordpol und Horizont. Am Herbstpunkt hat der Ekliptiknordpol abends um 18 Uhr und morgens um 6 Uhr seine obere bzw. untere Kulmination. An der Winter­sonnenwende und am Frühlingspunkt kehren sich die entsprechenden Verhältnisse, die an der Sommersonnenwende und am Herbstpunkt gelten, um.

Auf der Ekliptikkugel lässt sich ein *ekliptikales Koordinatensystem* einführen mit dem Nullpunkt im Frühlingspunkt, *nördlicher und südlicher ekliptikaler Breite* β relativ zur Ekliptik und *ekliptikaler Länge* λ in Richtung der Sonnenbewegung.

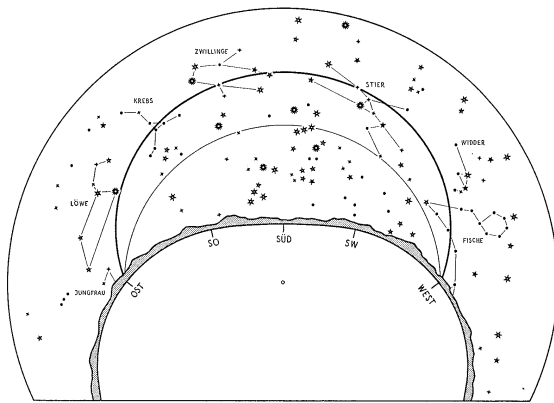


Figur 2.5

Tägliche Bewegungsbogen der zwölf Tierkreisbilder über dem Horizont in der Nähe von Basel. Jungfrau ♍ und Fische ♋ liegen auf dem Himmelsäquator.

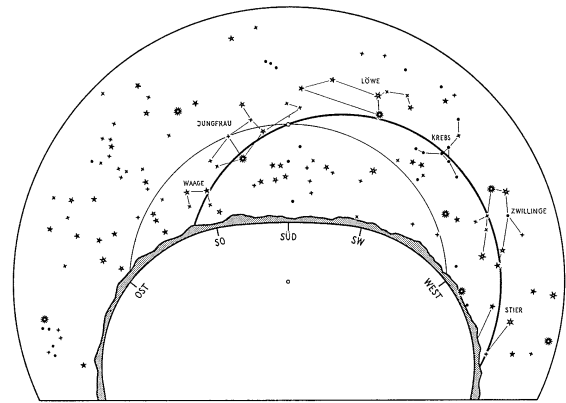
2.3.4 Der Tierkreis und seine Bewegungen

Der Sonnenlauf durch die Ekliptik bewirkt, dass der Fixsternhimmel im Jahreslauf jeweils abends, mitternachts und morgens immer wieder anders aussieht. So werden Fixsterne am westlichen Abendhimmel im Laufe weniger Wochen unsichtbar, und nach einigen weiteren Wochen tauchen sie am östlichen Morgenhimmel wieder auf. Man bezeichnet den Tag der letzten Sichtbarkeit bezogen auf den mathematischen Horizont (und unter Berücksichtigung der atmosphärischen Lichtwegbrechung oder Refraktion) am westlichen Abendhimmel als den *heliakischen Untergang* und den Tag der ersten Sichtbarkeit am östlichen Morgenhimmel als den *heliakischen Aufgang* des entsprechenden Fixsternes.



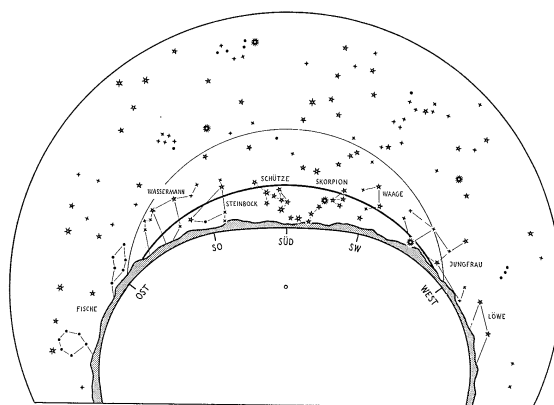
Figur 2.6

Steile Tierkreisstellung. Dicker Kreisbogen: Ekliptik (Sonnenbahn). Dünner Kreisbogen: Himmelsäquator. Stellung zum Beispiel am 21. März 18 Uhr und 23. September 6 Uhr.



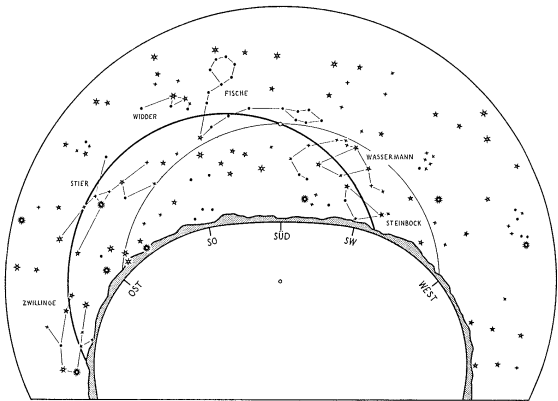
Figur 2.7

Nach Westen verschobene mittlere Tierkreisstellung. Dicker Kreisbogen: Ekliptik (Sonnenbahn). Dünner Kreisbogen: Himmelsäquator. Stellung zum Beispiel am 21. März 24 Uhr und 23. September 12 Uhr.



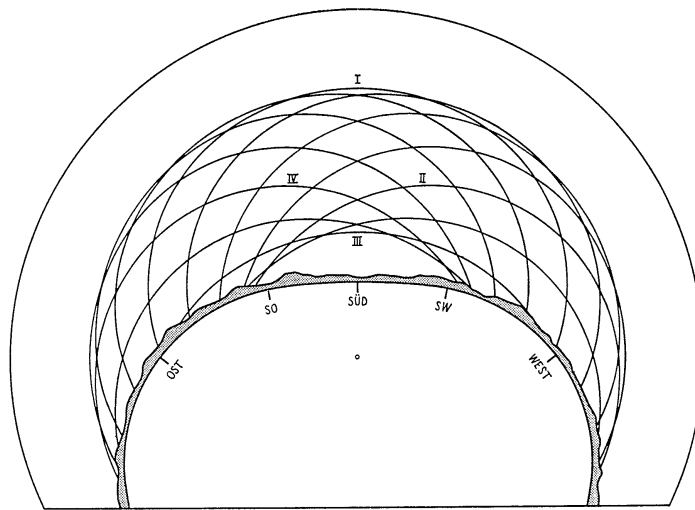
Figur 2.8

Flache Tierkreisstellung. Dicker Kreisbogen: Ekliptik (Sonnenbahn). Dünner Kreisbogen: Himmelsäquator. Stellung zum Beispiel am 21. März 6 Uhr und 23. September 18 Uhr.



Figur 2.9

Nach Osten verschobene mittlere Tierkreisstellung. Dicker Kreisbogen: Ekliptik (Sonnenbahn). Dünner Kreisbogen: Himmelsäquator. Stellung zum Beispiel am 21. März 12 Uhr und 23. September 24 Uhr.



Figur 2.10

Stellungen der Ekliptik über dem Horizont von zwei zu zwei Stunden. Die Lagen I, II, III und IV entsprechen den Figuren 2.6, 2.7, 2.8 und 2.9.

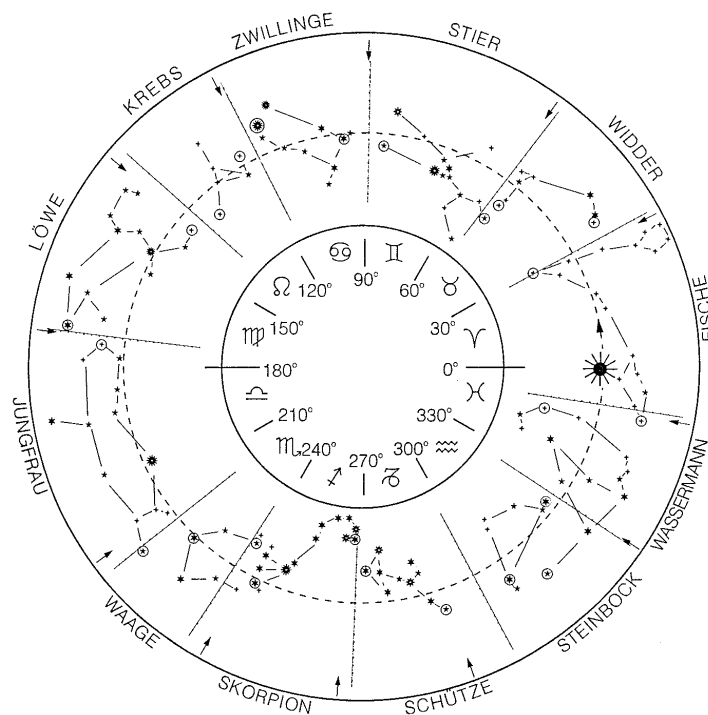
Betrachtet man den Sternenhimmel während eines ganzen Jahres immer bei Sonnenuntergang, so wandern die Sterne täglich jeweils parallel zur Ekliptik in den Westhorizont (je nach Lage des Sonnenuntergangsortes in verschiedener Steilheit relativ zum Horizont) und parallel zur Ekliptik aus dem Osthorizont hervor. Diese Jahresbewegung der Fixsternkugel relativ zur festgehaltenen Sonne ist eine Drehung in Richtung der Tagesbewegung von Ost nach West, die ihre Pole in den Ekliptikpolen und ihren Äquator in der Ekliptik selbst hat.

In der Reihenfolge des jährlichen Sonnenlaufes (von West nach Ost) befinden sich in der näheren Umgebung der Ekliptik die folgenden *Sternbilder des Tierkreises*:

Nordhalbkugel:	Fische	♈	Frühlingspunkt F
	Widder	♈	
	Stier	♉	
	Zwillinge	♊	Sommersonnenwende SS, Aphel A
	Krebs	♋	
	Löwe	♌	
Südhalbkugel:	Jungfrau	♍	Herbstpunkt H
	Waage	♎	
	Skorpion	♏	
	Schütze	♐	Wintersonnenwende WS, Perihel P
	Steinbock	♑	
	Wassermann	♒	

Die Tagesbögen der einzelnen Tierkreisbilder in der Nähe von Basel liegen sowohl in der Nordhalbkugel als auch in der Südhalbkugel des Himmels (**Figur 2.5**).

Man betrachte die Bewegung des Tierkreisgürtels im Tageslauf und achte insbesondere auf die Verschiebung der Schnittpunkte des Tierkreises mit dem Horizont sowie die Veränderung der Gesamtlage der Tierkreis- oder Ekliptikebene (**Figur 2.6 bis 2.10**).



Figur 2.11

Phänomenologisch orientierte Konvention der Tierkreiseinteilung aus dem Sternkalender der Mathematisch-Astronomischen Sektion am Goetheanum (radiale Linien) im Vergleich zur amtlichen Festlegung durch die Internationale Astronomische Vereinigung IAU (Pfeile). Im Innern des Kreises sind die Sternzeichen des Tierkreises markiert.

Die Sternbilder des Tierkreises oder *Tierkreisbilder* sind untereinander verschieden groß und haben keine genauen Abgrenzungen gegeneinander, stellenweise scheinen sie sich zu überschneiden, zum Beispiel beim Übergang Steinbock – Wassermann – Fische. Die in astronomischen Kalendern, Jahrbüchern oder Sternkarten angegebenen Grenzen sind «amtlicher» oder konventioneller Natur, eine Abmachung der Astronomen untereinander zur Fixierung der Himmelszonen (**Figur 2.11**).

Eine natürliche Gliederung der Sonnenbewegung auf der Sonnenbahn (Ekliptik) und damit der Jahreszeiten ist gegeben durch die Äquinoktien (Frühlingspunkt F und Herbstpunkt H) und die Solstizien (Sommersonnenwende SS und Wintersonnenwende WS). Die *Sternzeichen* des Tierkreises oder *Tierkreiszeichen* repräsentieren eine weitergehende regelmäßige Aufteilung der Sonnenbahn in Abschnitte von je 30° ausgehend vom jeweiligen Frühlingspunkt. Dadurch entsteht eine feinere Gliederung des Jahreslaufes und der Jahreszeiten (**Figur 2.11**).

2.3.5 Bewegung des höchsten Punktes der Ekliptik

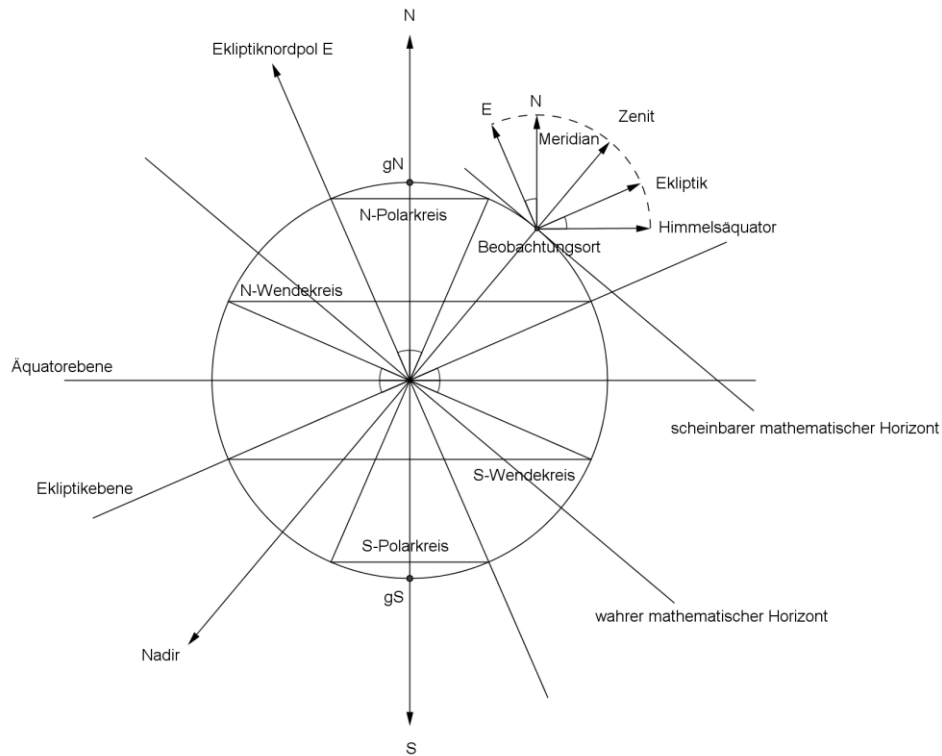
Ein anderer Gesichtspunkt auf den Tierkreis oder die Ekliptik ergibt sich, wenn man den höchsten Punkt der Ekliptik über dem Horizont im Tageslauf, oder besser, jede Nacht zur selben Uhrzeit während eines Sonnenjahres aufsucht. Beginnend mit dem 21. Dezember 24 Uhr (**Figur 2.6**), wo dieser Punkt im Süden auf dem Meridian liegt und zugleich seine höchste Stellung (23.5° über dem Himmelsäquator) einnimmt, sinkt er in einem kreisförmigen Bogen nach unten in westlicher Richtung (nach rechts). In diesem Zeitraum nähern sich die Schnittpunkte der Ekliptik mit dem Horizontkreis ihren südöstlichsten und nordwestlichsten Extremstellen an, welche sie am 21. März 24

Uhr erreichen (**Figur 2.7**). Einige Zeit nach dem 21. März erreicht die Ekliptik dieselbe Stellung über dem Horizont wie der Himmelsäquator: ihr höchster Punkt im Südwesten ist auf derselben Höhe wie der höchste Punkt des Himmelsäquators genau im Süden auf dem Meridian. In diesem Zeitpunkt erreicht der höchste Ekliptikpunkt zugleich seine westlichste Stellung, wandert dann, weiter sinkend, wieder in südlicher Richtung (nach links unten), bis er am 21. Juni 24 Uhr im Süden auf dem Meridian seinen tiefsten Punkt (23.5° unterhalb des Himmelsäquators) erreicht (**Figur 2.8**). Seit dem 21. Dezember hat er nun einen halben kreisförmigen Bogen an der Himmelskugel mit einem minimalen Durchmesser von $2 \times 23.5^\circ$ beschrieben. Von da an geht es in einem weiteren Halbbogen wieder aufwärts, nun in östlicher (linker) Richtung. Kurz vor dem 23. September 24 Uhr (**Figur 2.9**) ist der Ekliptikbogen wieder gleichauf mit dem Bogen des Himmelsäquators über dem Horizont, steigt dann noch weiter, bis er am 21. Juni 24 Uhr wieder seine höchste Stellung erreicht (**Figur 2.6**). Der im Uhrzeigersinn durchlaufene Bogen des höchsten Punktes der Ekliptik hat sich (nahezu) geschlossen. (Eine wirklich geschlossene Kurve ergibt sich allerdings nur aus dem Gesichtspunkt der relativen Lage von Ekliptik und Himmelsäquator, solange man von der Veränderung der Neigung der Ekliptik relativ zum Himmelsäquator absieht; bezüglich der Fixsternkugel ist dieser Bogen wegen der Bewegung des Frühlingspunktes nicht geschlossen.)

Die eben beschriebene Bewegung ist rein kugelgeometrischer Natur: Es handelt sich um die Betrachtung der Bewegung eines nicht mit dem Kugeläquator zusammenfallenden Großkreises in einer sich drehenden Kugelsphäre aus dem Mittelpunkt derselben, bezüglich des (wahren) mathematischen Horizonts (**Figur 2.12**). Verfolgt wird dabei die jeweilige Erhebung des höchsten Punktes dieses Großkreises über dem Horizont. Dieser Punkt ist nicht fest mit dem Großkreis, das heißt hier der Ekliptik, verbunden, sondern wandert auf dieser selbst in östlicher (rechtläufiger) Richtung, also im gleichen Sinne wie die Sonne. Dies bedeutet, dass der höchste Punkt der Ekliptik im Jahreslauf hintereinander alle Tierkreisbilder durchläuft, ausgehend von den Zwillingen am 21. Juni (**Figur 2.6**), über die Jungfrau zum Schützen am 21. Dezember (**Figur 2.8**) und zurück über die Fische wieder zu den Zwillingen.

2.3.6 Der Tierkreis an anderen Orten der Erde

Zur Betrachtung der Verhältnisse auf der ganzen Erdkugel muss die Beziehung der Horizontkugel zur Tageskugel und zur Ekliptikkugel ins Auge gefasst werden (**Figur 2.12**).



Figur 2.12

Schnitt durch die Meridianebene der Horizontkugel in Bezug auf die Erdkugel und die Ekliptikkugel: Projektion der Erdkugel parallel zur Horizontebene in Richtung Ost-West der Horizontkugel.

Man gehe nun aus von den Tagesbögen der einzelnen Tierkreisbilder in der Nähe von Basel (**Figur 2.5**). Geht man in Richtung des geographischen Nord- oder Südpols, so ändern sich die Tageszeiten-Verhältnisse. Wegen der beginnenden und dann zunehmenden Zirkumpolarität von Teilen des Tierkreises gibt es beim nördlichen und südlichen (geographischen) *Polarkreis* (66.5° nördliche oder südliche Breite) und von dort bis hin zum Nord- bzw. Südpol länger als einen Sonnentag dauernde *Polarnächte* und *Polartage*. Am 22. Dezember geht am nördlichen Polarkreis die Sonne nicht auf und am 21. Juni nicht unter. Beim (geographischen) nördlichen und südlichen *Wendekreis* (Wendekreis des Krebses und Wendekreis des Steinbocks, 23.5° nördliche bzw. südliche Breite) und von dort bis hin zum Äquator gibt es Tagesbahnen der Sonne, die durch den Zenit hindurch gehen. Am Wendekreis des Krebses geht die Sonne am 21. Juni durch den Zenit und am Wendekreis des Steinbocks am 22. Dezember.

2.3.7 Sonnenbewegungen auf der Sonnenbahn

Das *Siderische Sonnenjahr* dauert um 365.256363 mittlere Sonnentage ($\approx 365^d 6^h 9^m 10.7^s$). Dies ist das Sternjahr der Sonne oder das *Sonnenjahr im Tierkreis* oder der Sonnenumlauf relativ zur Fixsternkugel. Das siderische Jahr ist exakt definiert als diejenige Zeit in mittleren Sonnentagen, die

verstreicht, wenn die Sonne vom selben Ort auf der Fixsternkugel (auf dem Tierkreis) wieder zu demselben Fixsternort zurückkehrt.

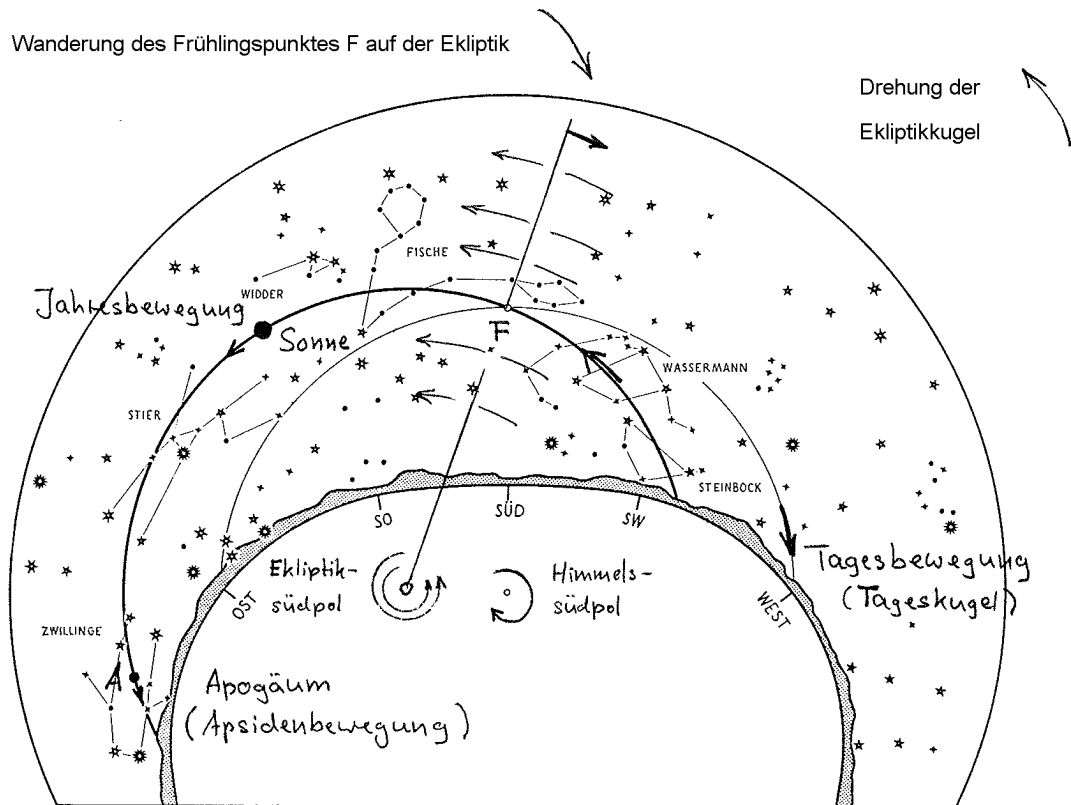
Die Sonne bewegt sich auf ihrer Bahn, der Ekliptik, im Mittel um

$$\frac{360^\circ}{\text{Sonnenjahr}} = \frac{360^\circ}{365.256363} \approx 59' 08.3'' \text{ pro Tag,}$$

das heißt um 2.464' pro Stunde oder 2.464'' pro Minute. Sie hat aber nicht immer dieselbe Geschwindigkeit. Im Sommer bewegt sie sich langsamer (57' 10.4'' pro Tag) als im Winter (61' 09.4'' pro Tag). Die maximale Differenz beträgt demnach $\pm 2'$.

Die Verschiedenheit der Quartale war schon Hipparch bekannt:

Frühlingspunkt F bis Sommersonnenwende SS:	92 Tage, 22 Stunden
Sommersonnenwende SS bis Herbstpunkt H:	93 Tage, 14 Stunden
Herbstpunkt H bis Wintersonnenwende WS:	89 Tage, 17 Stunden
Wintersonnenwende WS bis Frühlingspunkt F:	89 Tage, 1 Stunde



Figur 2.13

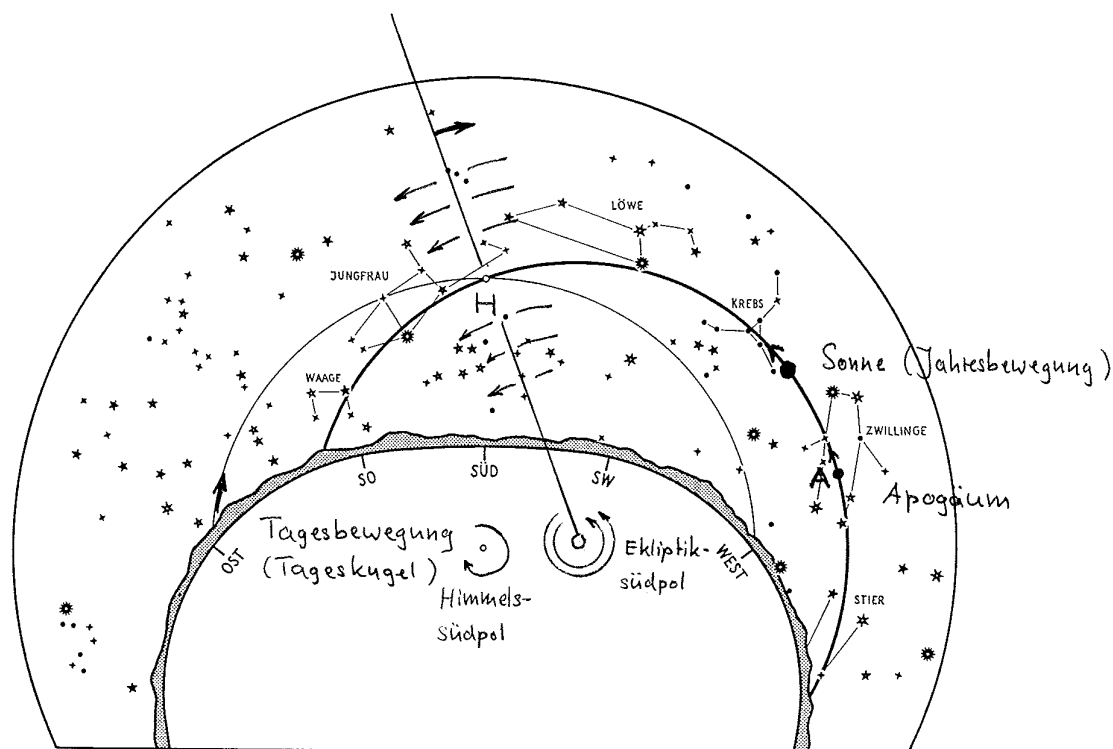
Wanderung des Frühlingspunktes relativ zur Ekliptikkugel und zur Fixsternkugel. Blick in den Südhimmel bei Kulmination des Frühlingspunktes F in der Nähe von Basel, zum Beispiel am 21. März 12 Uhr (oder am 23. September 24 Uhr, nach Osten verschobene mittlere Tierkreisstellung). Der halb fette Kreis ist die Ekliptik und der dünne Kreis der Himmelsäquator. – Blickt man nach Süden und denkt sich den Frühlingspunkt in fortwährender Kulmination, so dreht sich die Ekliptikkugel zusammen mit der Fixsternkugel um die Ekliptikachse, das heißt um den Ekliptiksüdpol, im Gegenuhrzeigersinn «hinter» F. Die Fixsterne bewegen sich auf parallelen Bahnen zur Ekliptik (platonische Bewegung).

Das Sommerhalbjahr von Frühlingspunkt F bis Herbstpunkt H hat etwa 186.5 mittlere Sonnentage. Das Minimum der Geschwindigkeit ist um den 3. bis 7. Juli in den Zwillingen. Dort ist die Sonne in Erdferne, im *Aphel* A. Das Winterhalbjahr von Herbstpunkt H bis Frühlingspunkt F hat um 178.75 mittlere Sonnentage. Das Maximum der Geschwindigkeit wird um den 2. bis 5. Januar im Schütze erreicht. Dort ist die Sonne in Erdnähe, im *Perihel* P. Die Punkte der Erdnähe (Perihel) und Erdferne (Aphel) auf der Ekliptik sind relativ zum Fixsternhintergrund (Fixsternkugel) bestimmt.

Entsprechend variiert die visuelle Größe der Sonnenscheibe: die Sonne erscheint im Sommer kleiner als im Winter. Ihre scheinbare Größe ist im Perihel P etwa 32' 32" und im Aphel A etwa 31' 28".

Das von Perihel zu Perihel oder von Aphel zu Aphel in mittleren Sonnentagen gemessene *anomalistische Sonnenjahr* dauert 365.259641 mittlere Sonnentage ($\approx 365^d 6^h 13^m 52.8^s$) und ist um 4.701^m länger als das siderische Sonnenjahr. Es ist Ausdruck der rhythmischen Geschwindigkeitsveränderungen der Sonne im Tierkreis relativ zur Fixsternkugel. Durch Aphel und Perihel ergibt sich eine dynamische Gliederung der Sonnenbahn.

Die *Apsidenlinie* ist die Verbindungslinie von Aphel und Perihel und geht durch den Mittelpunkt der Ekliptikkugel. Diese Linie dreht sich siderisch in Tierkreisrichtung (das heißt entgegen der Tagesbewegung) in etwa 110000 Sonnenjahren um 360° auf der Ekliptik. Denn es gilt für die jährliche Winkelbewegung der Apsidenlinie bezüglich der Sonnenbewegung $4.701 \cdot 2.464'' = 11.585''$ pro Sonnenjahr. Also braucht die Apsidenlinie $3600'' / 11.585'' = 310.75$ Jahre für 1°. Daraus ergibt sich für die volle Umdrehung $360^\circ \cdot 310.75 = 111870 \approx 110000$ Jahre.



Figur 2.14

Wanderung des Frühlingspunktes relativ zur Ekliptikkugel und zur Fixsternkugel. Blick in den Südhimmel bei Kulmination des Herbstpunktes H in der Nähe von Basel, zum Beispiel am 21. März 24 Uhr (oder am 23. September 12 Uhr, nach Westen verschobene mittlere Tierkreisstellung). Der halbfette Kreis ist die Ekliptik und der dünne Kreis der Himmelsäquator. – Blickt man nach Süden und denkt sich den Herbstpunkt in fortwährender Kulmination, so dreht sich die Ekliptikkugel zusammen mit der Fixsternkugel um die Ekliptikachse, das heißt um den Ekliptiksüdpol, im Gegenuhrzeigersinn «hinter» H. Die Fixsterne bewegen sich auf parallelen Bahnen zur Ekliptik (platonische Bewegung).

Diese Bewegung heißt *Apsidenbewegung* (**Figur 2.13, 2.14, 2.15**). Dies bedeutet, dass die fest mit der Ekliptik verbundene Ekliptikkugel sich relativ zur Fixsternkugel in Tierkreisrichtung um die Ekliptikpole dreht: Die dynamische Ordnung der Sonnenbahn verschiebt sich also relativ zum Fixsternhintergrund.

Beobachtet man zum Beispiel die Lage der Sonne im Verhältnis zu einem Fixstern in der Nähe des Aphels und wartet, bis nach einem Jahr genau dieselbe Lage wieder eintritt, so muss die Sonne noch etwa 4.7^m weiterlaufen, bis sie wieder am Aphel ist.

Das *Tropische Sonnenjahr*, oder kurz *Sonnenjahr*, dauert 365.242198 mittlere Sonnentage ($\approx 365^d 5^h 48^m 46.2^s$). Es kann auch als Jahreszeitenjahr bezeichnet werden; es ist das *Referenzjahr*, auf welches alle Zeitangaben in Jahren bezogen werden. Dieses Jahr ist um $20^m 24.5^s$ *kürzer* als das siderische Sonnenjahr. Es ist definiert als die Zeit in mittleren Sonnentagen, die verstreicht von Frühlingspunkt zu Frühlingspunkt oder von Herbstpunkt zu Herbstpunkt oder von Sonnenwende zu Sonnenwende (Bewegung der Sonne relativ zur *Tageskugel*). Der *Frühlingspunkt* ist dabei definiert als der Ort an der Tageskugel, wo die Sonne von der Südhalbkugel in die Nordhalbkugel übergeht (Überschreitung des Himmelsäquators). Der Frühlingspunkt wandert deshalb relativ zur Sonnenbahn entgegen der Tierkreisrichtung um $20.408 \cdot 2.464'' = 50.285'' \approx 50.25''$ (= genauerer Wert, gemittelt über längere Zeit) pro Sonnenjahr. Folglich braucht der Frühlingspunkt $3600'' / 50.285'' = 71.592 \approx 72$ Jahre für 1° und für einen vollen siderischen Umlauf $360^\circ \cdot 71.592 = 25773 \approx 26000$ Jahre.

Beobachtet man die Sonne beim Durchgang durch den Frühlingspunkt F und wartet ein (tropisches) Jahr, bis sie wieder von der Südhalbkugel des Fixsternhimmels in die Nordhalbkugel übergeht, so erreicht die Sonne den Frühlingspunkt *bevor* sie wieder am selben Sternort angelangt ist.

Beobachtet man nämlich die Lage der Sonne zu einem bestimmten Fixstern in der Nähe und nördlich des Frühlingspunktes und wartet, bis nach einem siderischen Jahr wieder dieselbe Lage eintritt, so hat die Sonne zwischenzeitlich vor etwa $20\frac{1}{2}$ Minuten den Himmelsäquator schon überschritten. Dies bedeutet, dass der Fixstern nach einem tropischen Jahr vom Himmelsäquator weg etwas mehr nach Nordosten gerückt ist.

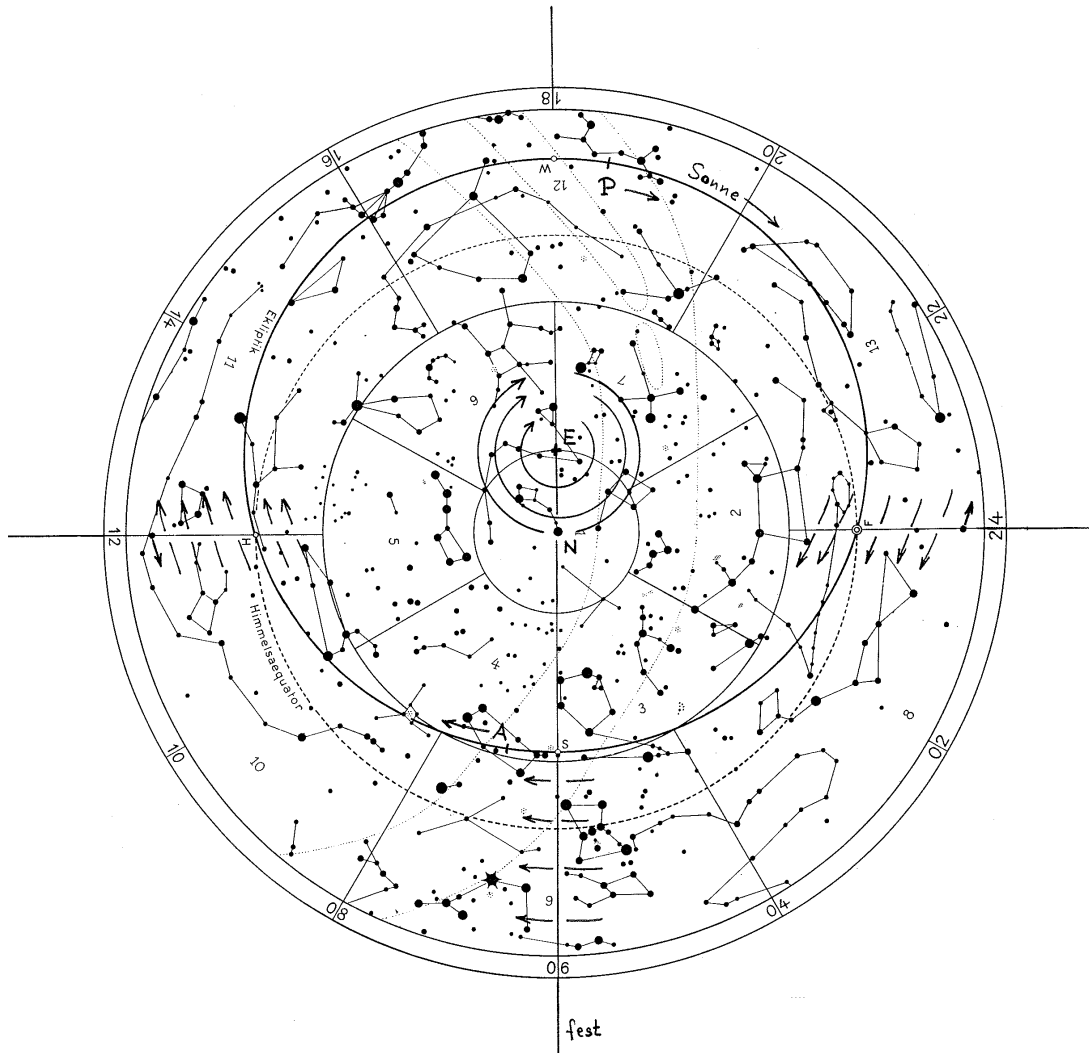
Das Verhältnis der Sonnenbewegung auf der Ekliptik zur Tageskugel bestimmt die Jahreszeiten, das heißt die Lage der Sonnenwenden (Solstitien) und des Frühlings- und Herbstpunktes (Äquinoktien).

Relativ zum Frühlingspunkt bewegt sich die Apsidenlinie in einem siderischen Jahr um einen Betrag, der gleich der Summe der Beträge der Apsidenbewegung und der Frühlingspunktbewegung ist: $25.109^m = 4.701^m + 20.408^m$. Dies ergibt eine Winkelbewegung von $25.109 \cdot 2.464'' \approx 61.86''$ pro Sonnenjahr. Folglich braucht diese Bewegung $3600'' / 61.86'' = 58.19$ Jahre für 1° und damit beträgt die Umlaufszeit der Apsidenlinie relativ zur Bewegung des Frühlingspunktes $360^\circ \cdot 58.19 = 20948 \approx 21000$ Sonnenjahre. Nach dieser Periode ist demnach die relative Lage von Frühlings- und Herbstpunkt sowie der Sonnenwenden zur Erdnähe und Erdferne der Sonne wieder dieselbe. Unter anderem hat dieser Rhythmus einen Einfluss auf die Eiszeitperioden.

2.3.8 Wanderung des Frühlingspunktes durch den Tierkreis

Die Differenz des tropischen Jahres zum siderischen Jahr hat eine siderische Wanderung des Frühlingspunktes relativ zum Tierkreis zur Folge, und zwar entgegengesetzt zur Tierkreisrichtung, das heißt in Richtung der Tagesbewegung von Ost nach West. Vom beobachterzentrierten Gesichtspunkt aus müsste man eher von einer Bewegung des Tierkreises in Tierkreisrichtung (das heißt in Richtung der Sonnenbewegung) durch den Frühlingspunkt sprechen, denn für den ortsfesten Beobachter ist die Lage des Himmelsäquators und des Himmels-Nordpols und des Himmels-Südpols im Wesentlichen immer dieselbe (Tageskugel). Es wandert also nicht der Frühlingspunkt auf dem Tierkreis entgegen der Tierkreisrichtung, sondern der Tierkreis dreht sich «hinter» dem Himmelsäquator (Tageskugel) in Tierkreisrichtung weiter. Diese Bewegung ist eine relativ zur Tageskugel verlaufende Drehung der mit der Fixsternkugel in erster Näherung fest verbundenen Ekliptikkugel um den Ekliptiknordpol und Ekliptiksüdpol, mit dem Tierkreis als Äquator der Bewegung. Die

Bewegung der Fixsternkugel/Ekliptikkugel relativ zur fest gedachten Tageskugel ist in den **Figuren 2.13, 2.14 und 2.15** dargestellt.



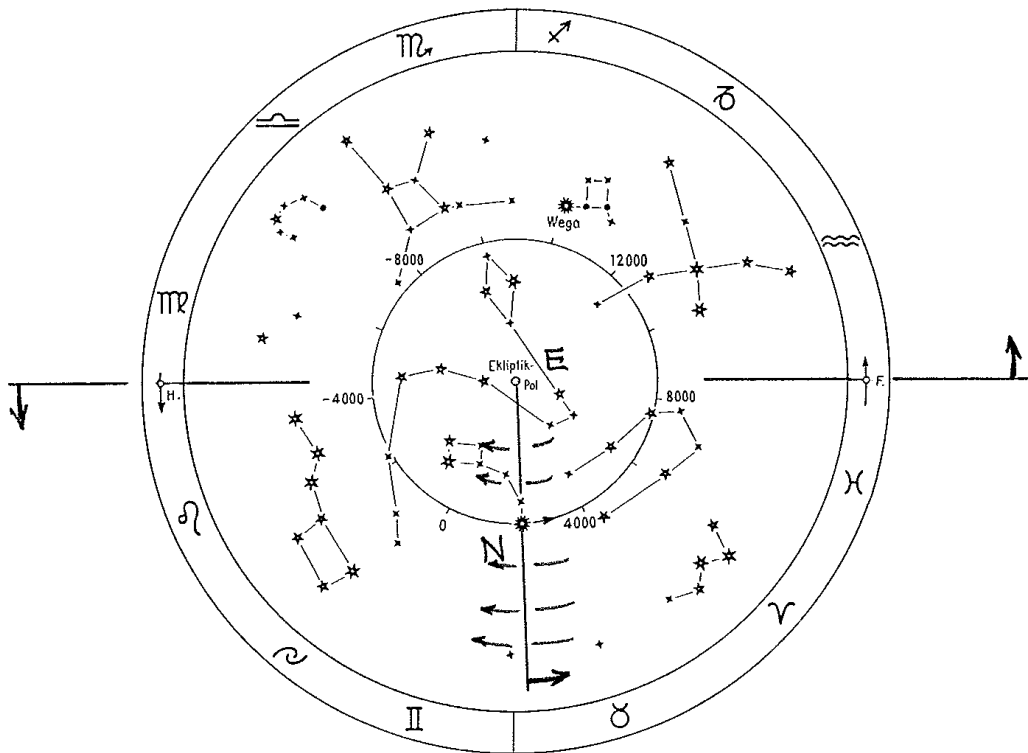
Figur 2.15

Wanderung des Himmelsnordpols um den Ekliptiknordpol. Blick in den Nordhimmel (ohne Horizont). – Hier blickt man nach Norden in Richtung des Himmelsnordpols N und hat das durch Himmelspol N und Himmelsäquator bestimmte Orientierungssystem fest zu denken; dabei dreht sich die Ekliptikkugel mit der Fixsternkugel im Uhrzeigersinn um den Ekliptiknordpol E; die Tagesbewegung geht dabei im Gegenuhrzeigersinn um den Himmelsnordpol N.

Bei dieser Bewegung der Fixsternkugel/Ekliptikkugel relativ zur festen Tageskugel bleibt auch der Nordpol nicht in derselben Fixsternregion (das heißt in der Nähe des Nordpolarsterns im Sternbild des kleinen Wagens), sondern bewegt sich, siderisch betrachtet, auf einem Kreis im Abstand 23.5° um den Ekliptiknordpol E im Sternbild des Drachen (**Figur 2.15, 2.16**). Beobachterzentriert dreht sich die Ekliptikkugel zusammen mit der Fixsternkugel «hinter» dem Himmelsnordpol weg, im Uhrzeigersinn um den Ekliptiknordpol E.

Da die Bewegung des Frühlingspunktes durch den Tierkreis, auch (absolute) *Präzessionsbewegung* genannt, um $50.25''$ pro Jahr oder um 1° pro 72 Jahre beträgt, braucht wie erwähnt ein ganzer siderischer Umlauf etwa 26000 Jahre. Dieser siderische Umlauf des Frühlingspunktes wird auch

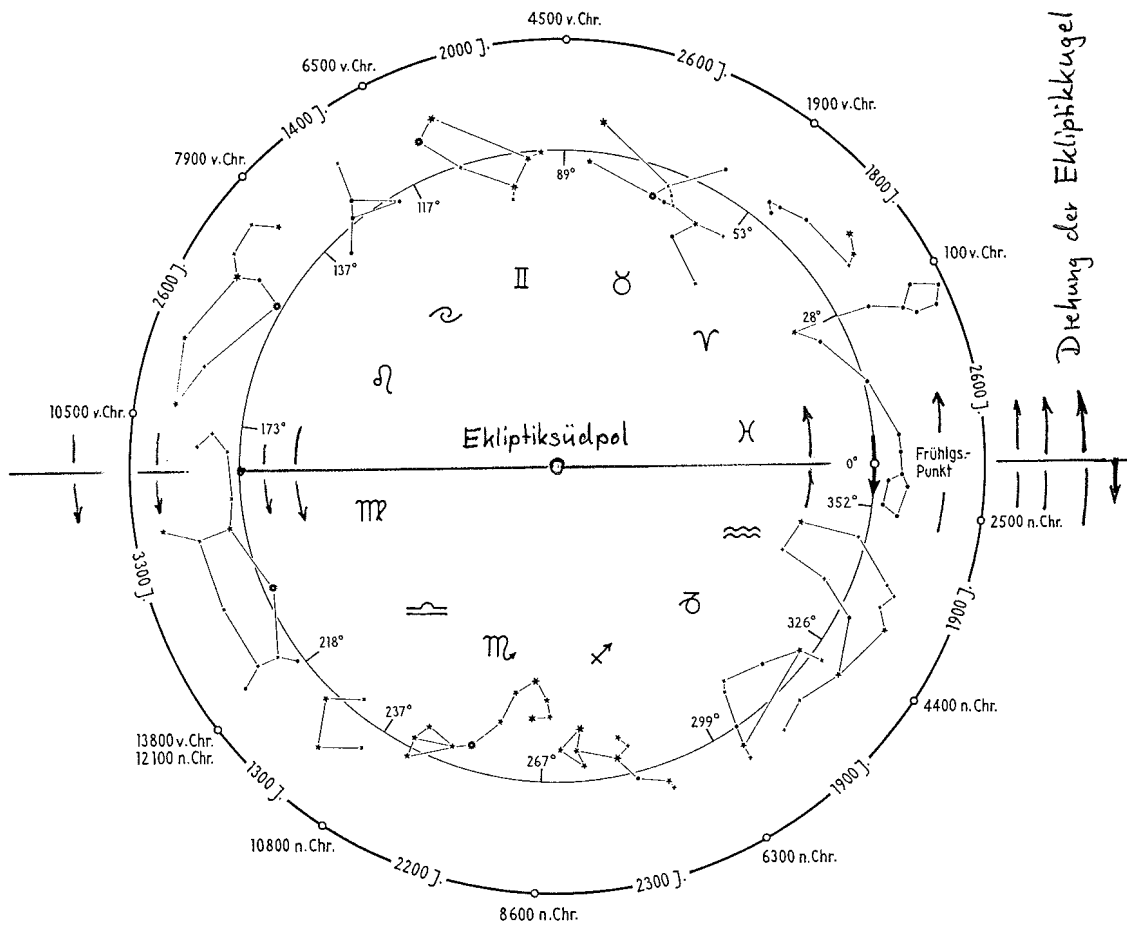
Platonisches Weltenjahr genannt. Die Zeit von Sternbild zu Sternbild beträgt durchschnittlich etwa 2150 Jahre (**Figur 2.17**). Heute ist der Frühlingspunkt in den Fischen. Um ca. 2536 n. Chr. wird er in den Wassermann eintreten, wenn man für das Eintrittsdatum die konventionellen Grenzen der Sternbilder zugrunde legt.



Figur 2.16

Bewegung des nördlichen Sternhimmels mit dem Himmelsnordpol N (auf dem Kreis zu denken) gegenüber dem Frühlingspunkt F und dem Herbstpunkt H um den Ekliptiknordpol E. Es handelt sich um eine Bewegung des Himmelsnordpols N relativ zur fest gedachten Fixsternkugel / Ekliptikkugel mit Ekliptiknordpol E. Hier bewegt sich der Himmelsnordpol N im Gegenuhrzeigersinn (oder der Fixsternhimmel im Uhrzeigersinn «hinter» dem Himmelsnordpol) um den Ekliptiknordpol E einmal herum in etwa 26000 Jahren.

Aus der Gesamtbewegung ergibt sich eine Änderung des Fixsternhintergrunds relativ zu den Jahreszeiten. Das bedeutet, dass im Hochsommer die Sonne nicht immer in den Zwillingen bleiben, sondern nach einigen hundert Jahren im Stier sein wird. Vor etwa zweitausend Jahren war die Sonne zur Sommersonnenwende im Krebs und zur Wintersonnenwende im Steinbock. Daraus leiten sich die oben besprochenen Bezeichnungen der geographischen Wendekreise als Wendekreis des Krebses und Wendekreis des Steinbocks ab. Da der Frühlingspunkt um diese Zeit etwa am Anfang des Widders war, wird er manchmal auch *Widderpunkt* genannt. Jedenfalls beginnt die regelmäßige Einteilung der Ekliptik durch die Tierkreiszeichen mit dem Widder, gibt also die Position der Tierkreisbilder im Verhältnis zu den Äquinoktien und Solstitionen vor etwa zweitausend Jahren, das heißt um die Zeitenwende, an.



Figur 2.17

Bewegung des südlichen Sternhimmels: Wanderung des Frühlingpunktes im Platonischen Weltenjahr. Die Jahreszahlen gelten nur approximativ. Es handelt sich um eine Bewegung des Frühlingpunktes F relativ zur fest gedachten Fixsternkugel/Eklipskugel mit Eklips Südpol. Hier bewegt sich der Frühlingspunkt F im Uhrzeigersinn (oder der Fixsternhimmel im Gegenuhrzeigersinn hinter dem Frühlingspunkt) durch den Tierkreis.

2.3.9 Zusammenfassung der Sonnenrhythmen

Zusammenfassung der Verschiebungen der Rhythmen der Sonne relativ zum Tierkreis.

Sonnenrhythmus	Sonnen-Jahresrhythmus	Umlauf	Richtung für Beobachter	Bewegung relativ zum Tierkreis
<i>Tägliche Bewegung der Sonne</i>	–	Sonne im Tageslauf	Ost → West	rüchläufig
<i>Siderischer Umlauf: Wiederkehr des Fixsternhintergrundes</i>	Siderisches Sonnenjahr 365 ^d 6 ^h 9 ^m 10.7 ^s 365.256363 ^d	Sonne vor Fixsternen	West → Ost	rechtläufig
<i>Maximal- und Minimal-geschwindigkeit in Perihel und Aphel</i>	Anomalistisches Sonnenjahr 365 ^d 6 ^h 13 ^m 52.8 ^s 365.259641 ^d	Apsidenlinie: 110000 Jahre	West → Ost	rechtläufig
<i>Überschreitung des Himmelsäquators in Frühlings- und Herbstpunkt</i>	Tropisches Sonnenjahr = Sonnenjahr 365 ^d 5 ^h 48 ^m 46.2 ^s 365.242198 ^d	Frühlingspunkt: 26000 Jahre	Ost → West	rüchläufig

2.4 Kalenderordnung

2.4.1 Grundlagen des Kalenders

Die Einrichtung des Kalenders soll den Sonnenlauf, das heißt das Jahreszeitenjahr (tropisches Jahr) mit dem *bürgerlichen Jahr*, das heißt mit dem Tages- und Monatsrhythmus ausgleichen. Es soll insbesondere erreicht werden, dass die Monate immer zu denselben Jahreszeiten stattfinden, damit auch die Jahresfeste immer zur selben Jahreszeit gefeiert werden können. Zum Beispiel soll Weihnachten immer im Mittwinter bleiben, und der Frühlingspunkt und Ostern im Frühjahr.

Grundlage der Kalenderrechnung ist demzufolge das *Tropische Jahr* mit einer Dauer von 365.242198 mittleren Sonnentagen ($\approx 365^d 5^h 48^m 46.2^s$).

2.4.2 Julianischer Kalender

Der Julianische Kalender wurde eingeführt von Julius Caesar um 46 v. Chr. und löste den vor allem auf dem Lauf des Mondes basierenden römischen Kalender ab. Er hat als wesentliches Element einen *vierjährigen Schaltzyklus* auf der Grundlage des *julianischen Jahres* mit einer Länge von 365.25 mittleren Sonnentagen. Dies hat zur Folge, dass jedes vierte Jahr ein Schalttag eingefügt werden muss: auf drei Normaljahre oder Gemeinjahre mit 365 Tagen folgt ein *Schaltjahr* mit 366 Tagen.

Ohne Schaltjahre wäre das Kalenderjahr mit 365 Tagen immer früher zu Ende als das tropische Jahr, die Sonne käme dadurch immer mehr zu spät und der Frühlingspunkt würde sich immer mehr gegen Ende März und in den April hinein verschieben. Dies bedeutet, dass im Laufe der Jahre der 21. März mit immer größerem Zeitabstand früher als der tatsächliche Frühlingspunkt (Überschreitung des Himmelsäquators durch die Sonne) stattfinden würde.

Die Jahreslänge von 365.25 ist dagegen zu lang. Im Laufe der Jahre wird bei Fortführung des Julianischen Kalenders der Frühlingspunkt immer früher im März stattfinden.

2.4.3 Gregorianischer Kalender

Bis zum Ende des 16. Jahrhunderts hat sich der Fehler, das heißt die Differenz der Jahreslänge von 365.25 mittleren Sonnentagen zur wahren Jahreslänge um 365.24220 mittleren Sonnentagen bis auf 10 Tage aufsummiert: Der Frühlingspunkt fiel bereits auf den 11. März. Deshalb ließ Papst Gregor XIII auf den 4. Oktober 1582 direkt den 15. Oktober 1582 folgen, ohne Unterbruch des Wochenrhythmus. (In den katholischen Ländern wurde diese Regelung sofort eingeführt bzw. durchgesetzt, bei anderen Ländern dauerte das bis in das 18. Jahrhundert. Russland schloss sich diesem Kalender sogar erst im 20. Jahrhundert an.)

Der Gregorianische Kalender beruht auf einem Schaltrhythmus auf der Grundlage des *gregorianischen Jahres* mit einer Länge von 365.2425 mittleren Sonnentagen. Daraus ergibt sich folgende *Schaltregel*:

- (1) alle durch vier teilbaren Jahre mit einer Länge von 365 Tagen erhalten einen Schalttag eingefügt (Jahreslänge: 366 Tage),
- (2) mit Ausnahme der durch 100 teilbaren Jahre;
- (3) von dieser Ausnahme werden die durch 400 teilbaren Jahre ausgenommen.

Mit anderen Worten: volle Jahrhunderte fallen als Schaltjahre weg, wenn sie nicht durch vier teilbar sind:

- (1) 1988, 1992, 1996, 2000, 2004, 2008, 2012, 2016, 2020, 2024, 2028, 2032, 2036, 2040, 2044, 2048, 2052, 2056, ... sind Schaltjahre;

(2) 1700, 1800, 1900, 2100, 2200, 2300, 2500, ... sind keine Schaltjahre;

(3) 1600, 2000, 2400, 2800, ... sind Schaltjahre.

Die Differenz von tropischem Jahr zum mittleren gregorianischen Jahr von $0.0003 \approx 26$ Sekunden, wächst erst nach über 3000 gregorianischen Jahren auf einen Tag an.

2.5 Astronomische Zeitbestimmungen

2.5.1 Sonnenzeit

Aus dem Sterntag, das heißt der Dauer einer vollen Rotation der Tageskugel von Kulmination zu Kulmination des Frühlingspunktes, kann durch Winkelunterteilung ein sehr exaktes, fast gleichmäßiges Zeitmaß abgeleitet werden, das jedoch bezüglich seines Nullpunktes vom Beobachtungsort abhängig ist: 0° Sternzeit ist beim Zenitmeridiandurchgang des Frühlingspunktes. Die lokale *Sternzeit* ist dann die seit der Kulmination des Frühlingspunktes verflossene, im Winkelmaß gemessene Zeit. Diese ist gleich der Rektaszension derjenigen Fixsterne, die dann kulminieren.

Trotz ihrer astronomischen Relevanz und großen Regelmäßigkeit wird die Sternzeit nicht direkt gebraucht, sondern eine an der Sonne orientierte, mit der Sternzeit synchrone Zeitbestimmung. Um diese zu verstehen, muss der genaue Sonnenlauf noch einmal ins Auge gefasst werden. Man kann hinsichtlich der Zeitbestimmung drei verschiedene Sonnenläufe unterscheiden, die sich immer wieder am Frühlingspunkt treffen.

1. *Wahrer Sonnenlauf auf der Ekliptik*: Sonnenbewegung mit ungleichförmiger Geschwindigkeit auf der Ekliptik. Der wahre Sonnentag ist dann definiert durch die Zeit von Kulmination zu Kulmination der Sonne. Dieser Sonnenlauf ist Grundlage der wahren Ortszeit (WOZ), die von einfachen (nicht korrigierten) *Sonnenuhren* (Schattenstäbe) angezeigt wird. Die Länge des wahren Sonnentages ist nicht konstant, sondern variiert um eine Minute, genauer um $\pm 28^s$ um einen Mittelwert.

2. *Mittlerer Sonnenlauf auf der Ekliptik*: Annahme einer «Sonnenbewegung» mit gleichförmiger Geschwindigkeit auf der Ekliptik. Der mittlere ekliptikaler Sonnentag ist dann definiert durch die Zeit von Kulmination zu Kulmination der gleichmäßig auf der Ekliptik laufenden «Sonne». Die Länge des ekliptikalen Sonnentages ist ebenfalls nicht konstant.

3. *Mittlere Sonne auf dem Himmelsäquator*: Annahme einer «Sonnenbewegung» mit gleichförmiger Geschwindigkeit auf dem Himmelsäquator. Der mittlere (äquatorialer) Sonnentag ist dann definiert durch die Zeit von Kulmination zu Kulmination der gleichmäßig auf dem Himmelsäquator laufenden «Sonne». Sie ist die Grundlage der *mittleren Ortszeit* (MOZ) oder mittleren Sonnenzeit. Sie verläuft konform mit der Sternzeit (das heißt mit der Bewegung der Tageskugel), dauert aber wegen der Bewegung der Sonne relativ zur Fixsternkugel etwa 4 Sonnenzeitminuten länger als diese. Die Länge des mittleren äquatorialen Sonnentages ist im Wesentlichen konstant. Die letztere Bewegung ist auch Grundlage der gleichförmigen *Uhrzeit*.

Die mittlere Sonne auf der Ekliptik weicht von der mittleren Sonne auf dem Himmelsäquator (mittlere Ortszeit) in symmetrisch-periodischer Weise ab (symmetrische lemniskatische Abweichung).

Die wahre Sonne auf der Ekliptik weicht von der mittleren Sonne auf dem Himmelsäquator (mittlere Ortszeit) in unsymmetrisch-periodischer Weise ab. Diese Abweichung wird durch die *asymmetrische Zeitgleichungslemniskate* dargestellt (siehe unten). Die Differenz von wahrer Sonne und mittlerer Sonne auf dem Äquator heißt *Zeitgleichung*. Ihr genauer Verlauf ist dargestellt in **Figur 2.18**.

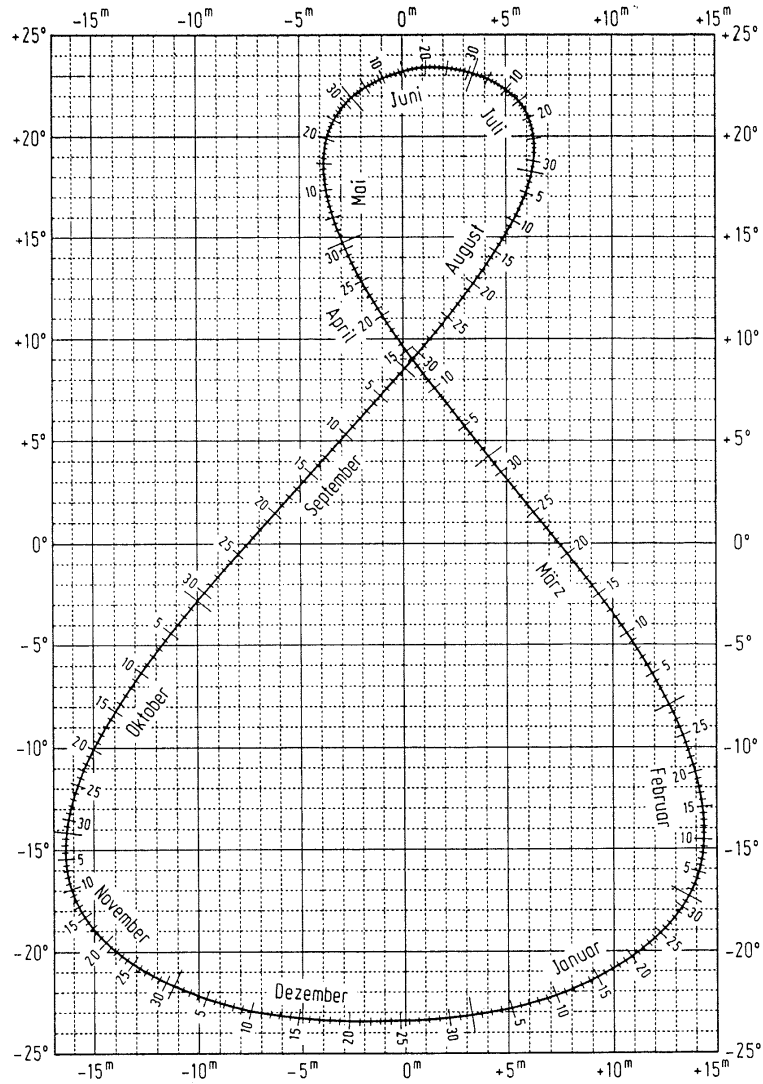
Da sich die mittlere Sonne auf dem Himmelsäquator pro 1° Längengraddifferenz in Richtung Westen um etwa 4 Minuten verspätet, geben *mechanische und elektronische Uhren* im Allgemeinen die Zeit einer *Zeitzone*, gegebenenfalls unter Berücksichtigung der Sommerzeit an. Zonenzeiten sind mittlere Ortszeiten gemäß der mittleren Sonne auf dem Himmelsäquator für bestimmte Längengrade. Es gibt 24 Zeitzonen auf der Erde. Beispiele:

MEZ = Mitteleuropäische Zeit: Mittlere Ortszeit bezüglich 15° östlicher Länge. Differenz zu WEZ: $1^h = 15 \times 4^m$. Dieser Meridian geht durch Motala in Schweden, Bornholm in Dänemark, Gmünd im Waldviertel in Österreich, Catania in Sizilien. – Wenn es 10 Uhr MEZ ist, dann ist es 9 Uhr WEZ, denn die Sonne geht in der östlicheren MEZ 1 Stunde vor der Zone WEZ auf.

WEZ = Westeuropäische Zeit: Mittlere Ortszeit bezüglich 0° Länge (Greenwich). Diese Zeit heißt auch Weltzeit (WZ) oder Universal Time (UT).

OEZ = Osteuropäische Zeit: Mittlere Ortszeit bezüglich 30° östlicher Länge. Dieser Meridian geht durch St. Petersburg, Kiew, Kairo. Differenz zu WEZ: $2^h = 30 \times 4^m$.

Etwa auf dem 180° Längengrad verläuft die *internationale Datumgrenze*. Wird sie in Richtung von West nach Ost durchschritten, so muss der Kalender um einen Tag zurückgestellt werden.



Figur 2.18

Exakter Verlauf der Zeitgleichungslemniskate (Stand: 1980).

2.5.2 Astronomische und physikalische Zeitbestimmungen

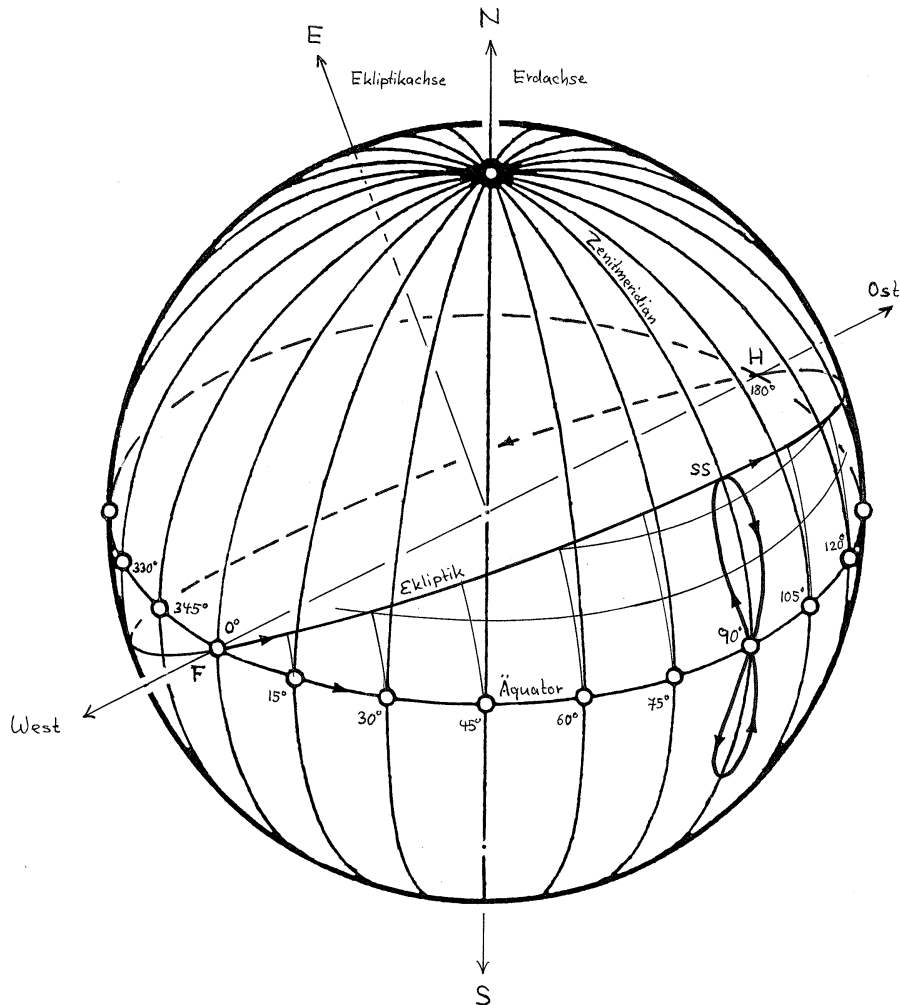
Aus einem Vergleich von sehr genau himmelsmechanisch berechenbaren und messbaren astronomischen Ereignissen (Sonnen- und Mondfinsternisse, Fixsternbedeckungen durch den Mond) mit dem tatsächlichen Eintritt dieser Ereignisse schloss man auf eine Unregelmäßigkeit in der Erdrotationsgeschwindigkeit (siehe Abschnitt 2.2). Astronomische Beobachtungen liefern also nicht ein völlig konstantes Zeitmaß, ein solches muss bewusst eingeführt werden. Die Forderung nach einem astronomisch definierten konstanten Zeitmaß erfüllt die offiziell bis in die 80er Jahre in Gebrauch gewesene *Ephemeridenzeit*. Sie beruht auf der gleichmäßigen Einteilung eines ausgewählten tropischen Jahres (meist 1900), da ein solches sehr genau messbar ist (Kulmination des Frühlingspunktes).

Eine auf physikalischen Vorgängen beruhende Zeitmessung heißt *Dynamische Zeit*. Die *terrestrische dynamische Zeit* (TDT) beruht auf der Zeitmessung durch Atom-Uhren und die auf das Schwerezentrum des Sonnensystems bezogene *baryzentrische dynamische Zeit* (TDB) beruht auf der Atom-Zeit, die durch auch relativistische Anteile berücksichtigende Schwerkrafteffekte korrigiert ist. Die von Funksendern ausgestrahlten Zeitsignale geben die *koordinierte Weltzeit* (UTC) an. Diese weicht von der Atomzeit um Vielfache von *ganzen* Sekunden ab und wird durch Hinzufügung oder Subtraktion von Sekunden am Ende eines Jahres so eingerichtet, dass sich aus ihr die Weltzeit (mittlere Ortszeit auf dem 0°-Meridian durch Greenwich) mit einer Abweichung um höchstens 1 Sekunde ableiten lässt.

Der in den Gleichungen der Himmelsmechanik auftretende Zeitfaktor wird auch *theoretische Zeit* oder *Inertialzeit* genannt.

2.5.3 Entstehung und Veränderungen der Zeitgleichungslemniskate

Die mittlere Sonne auf der Ekliptik (Ekliptiksonne) und die mittlere Sonne auf dem Äquator (Äquatorsonne) durchlaufen mit derselben konstanten Geschwindigkeit die beiden Großkreise der Himmelskugel (Tageskugel). Gleichen Winkelabständen bezüglich des Zentrums der Tageskugel entsprechen also gleiche Zeitintervalle. Die beiden Sonnen sind zusammen am Frühlingspunkt und laufen von dort in Ost-Richtung, treffen sich am Herbstpunkt und dann wieder am Frühlingspunkt.



Figur 2.19

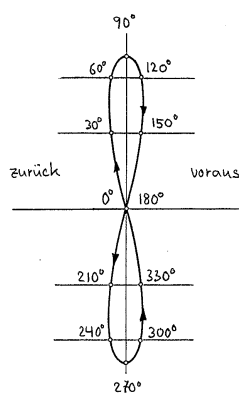
Entstehung der symmetrischen Zeitgleichungslemniskate aus konstanten Relativbewegungen auf zwei Großkreisen einer Kugelsphäre. Darstellung der Himmelskugel (Tageskugel) von außen. Aus konstruktiven Gründen und für eine besseren Übersicht wird der Himmelsäquator – entgegen dem Erscheinungsbild in nördlichen Breitengraden um 47° – in die Horizontalebene versetzt; dies entspricht dem Erscheinungsbild am Nordpol.

Im Folgenden werden die relative Bewegung von Ekliptiksonne und Äquatorsonne von zwei verschiedenen Gesichtspunkten aus beschrieben. Dabei handelt es sich um ein rein kinematisch-geometrisches Phänomen von Relativbewegungen auf Großkreisen einer Kugelsphäre.

(1) Zunächst wird die Tageskugel festgehalten und es wird der konstant-gleichmäßige Lauf der Bewegungen der beiden Sonnen auf dieser Kugel betrachtet (**Figur 2.19**). Anschaulich liegt den folgenden Beschreibungen der Bewegungsdynamik der Relativbewegungen das geometrische

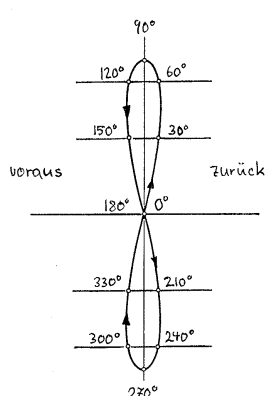
Phänomen zugrunde, dass die Großkreise eines Meridiankreisbüschels, das heißt eines Großkreisbüschels durch zwei diametrale Punkte der Kugel – hier die Meridiane bezüglich der Himmelspole und des Himmelsäquators – von einem anderen Großkreis – hier die Ekliptik – an ihren gegenseitig immer weiter voneinander entfernten Punkten in immer kleineren Abständen getroffen werden. Grundsätzlich gilt: Je größer der Winkelabstand des zweiten Großkreises vom Äquator des Meridiankreisbüschels ist, je kleiner werden diese Abstände.

Ordnet man nun der Äquatorsonne im 15°-Abstand (mit Annahme einer gleichmäßig-konstanten Geschwindigkeit, in welcher in gleichen Zeiten ein Rektaszensionsabstand von 15° oder 1^h zurückgelegt wird) die entsprechenden Himmelsmeridiane durch die Himmelspole zu, so bleibt die auf der Ekliptik gleich schnell laufende Ekliptiksonne mit ihren eigenen gleichmäßig zurückgelegten 15°-Abständen auf der Ekliptik nach gemeinsamem Start im Frühlingspunkt immer weiter hinter den entsprechenden Meridianen durch die Himmelspole zurück. Sie holt dann bei den enger werdenden Meridianabständen auf und kommt schließlich wieder zusammen mit der Äquatorsonne auf den 90°-Meridian; danach eilt sie den 15°-Meridianen der Äquatorsonne weiter voraus, bis sie wieder bei Abnahme der Meridianabstände zurückzufallen beginnt und im Herbstpunkt (180°-Meridian) mit ihr auf demselben Meridian liegt. Nach dem Herbstpunkt bleibt die Ekliptiksonne weiterhin zurück, überholt nach dem 270°-Meridian die Äquatorsonne bis sie mit ihr wieder zur selben Zeit am Frühlingspunkt anlangt.



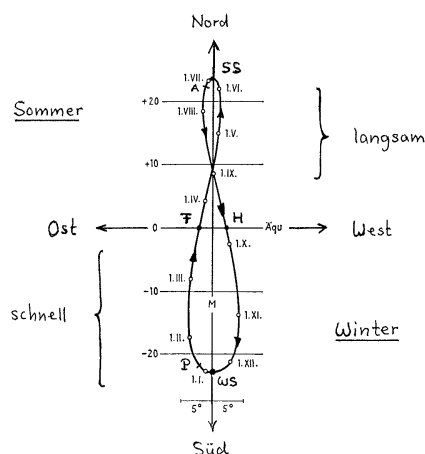
Figur 2.20

Symmetrische Zeitgleichungs- oder Ortsdifferenz-Lemniskate als Resultat der in Figur 2.19 dargestellten Bewegung. Verhältnis von mittlerer Sonnenbewegung auf Ekliptik und mittlerer Sonnenbewegung auf Himmelsäquator.



Figur 2.21

Symmetrische Zeitgleichungs- oder Ortsdifferenz-Lemniskate als Resultat der in Figur 2.19 dargestellten Bewegung; relativ zur Darstellung in Figur 2.19 und 2.20 vom Inneren der Kugel aus gesehen.



Figur 2.22

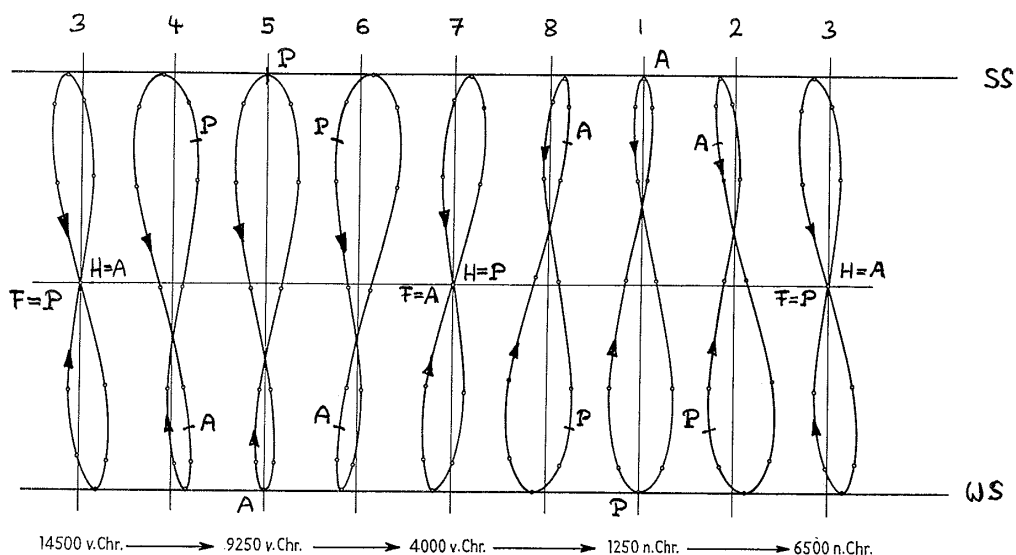
Unsymmetrische Zeitgleichungs-Lemniskate: Verhältnis von wahrer Sonnenbewegung auf Ekliptik zu mittlerer Sonnenbewegung auf Himmelsäquator.

(2) Um ein Gesamtbild der relativen Bewegungen zu erhalten, richtet man die Bewegung der Tageskugel so ein, dass die Äquatorsonne immer am selben Ort bleibt (Figur 2.19). Man stelle sich vor, man blicke nach Süden auf den Zenitmeridian, und die mittlere Sonne auf dem Himmelsäquator bleibe auf dem Zenitmeridian stehen; die Tageskugel dreht sich dabei also von Ost nach West um 1° pro Sonnentag. (Dies entspricht dem Festhalten – oder Fotografieren – der Sonnenposition jeden Tag um dieselbe Uhrzeit, etwa 12 Uhr mittags.) Aufgrund der unter (1) beschriebenen Bewegungsverhältnisse sieht man, dass nach gemeinsamem Beginn der Bewegung am Frühlingspunkt (Meridiandurchgang oder Kulmination des Frühlingspunktes) die Ekliptiksonne zunächst an Höhe

gewinnt und hinter dem Zenitmeridian zurückbleibt, dann wieder aufholt um an ihrem höchsten Ort wieder zusammen mit der Äquatorsonne auf dem Zenitmeridian anzulangen. Danach eilt sie voraus und verlangsamt sich wieder bis zum Zusammentreffen mit der Äquatorsonne am Herbstpunkt auf dem Himmelsäquator. Dann wiederholen sich qualitativ dieselben Bewegungsverhältnisse, indem die Ekliptiksonne an Höhe verliert, erst zurückbleibt, dann bei ihrer unteren Kulmination auf demselben Meridian mit der Äquatorsonne steht und ihr dann vorausseilt bis zum Zusammentreffen am Frühlingspunkt.

Die sich so ergebenden Ortsdifferenz-Lemniskaten (entsprechend **Figur 2.19** von außen gesehen: **Figur 2.20**; und von innen vom Zentrum der Tageskugel aus gesehen: **Figur 2.21**) relativ zur Äquatorsonne sind die sogenannten *symmetrischen Zeitgleichungslemniskaten*.

Die Ekliptiksonne, das heißt die mittlere Sonne auf der Ekliptik, hat demzufolge eine symmetrische lemniskatische Zeitgleichungskurve. Die wahre Sonne auf der Ekliptik dagegen hat eine unsymmetrische Zeitgleichungslemniskate (**Figur 2.22**). Die Asymmetrie dieser Kurve stammt von den wechselnden Beschleunigungen der Sonne auf der Sonnenbahn in Erdnähe und Erdferne (oben/unten Asymmetrie) sowie der Lage der Apsidenlinie relativ zu den Sonnenwendpunkten (links/rechts Asymmetrie). Entsprechend der relativen Lage der Apsidenlinie und der Sonnenwendpunkte verändert sich die wahre Zeitgleichungslemniskate gesetzmäßig während einer Periode von etwa 21000 Jahren (**Figur 2.23**).



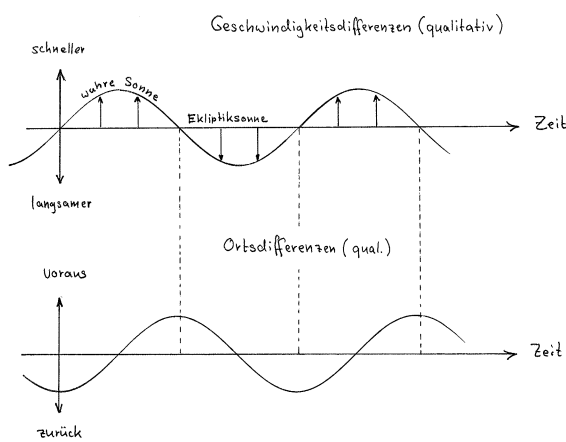
Figur 2.23

Formmetamorphose der unsymmetrischen Zeitgleichungslemniskate während des Umlaufs der Apsidenlinie relativ zum Frühlingspunkt.

Fallen die Geschwindigkeitshöchstwerte der wahren Sonne am Perihel mit der Wintersonnenwende und die Geschwindigkeitstiefstwerte am Aphel mit der Sommersonnenwende zusammen (**Figur 2.23**, Stadium 1), so ergibt sich eine links/rechts-symmetrische Lemniskate. Wandert das Perihel in Richtung Frühlingspunkt und entsprechend das Aphel in Richtung Herbstpunkt (in derselben Bewegungsrichtung wie die Sonne), so neigt sich die Lemniskate oben nach links und der Kreuzungspunkt bewegt sich nach unten (**Figur 2.23**, Stadium 2). Fällt das Aphel und Perihel mit dem Herbst- bzw. mit dem Frühlingspunkt zusammen, so ergibt sich eine symmetrische Lemniskate, deren Symmetrieachse jedoch oben nach links abweicht (**Figur 2.23**, Stadium 3). Bewegen sich Aphel und Perihel weiter in Sonnenrichtung, so sinkt der Kreuzungspunkt der Lemniskate weiter, so lange

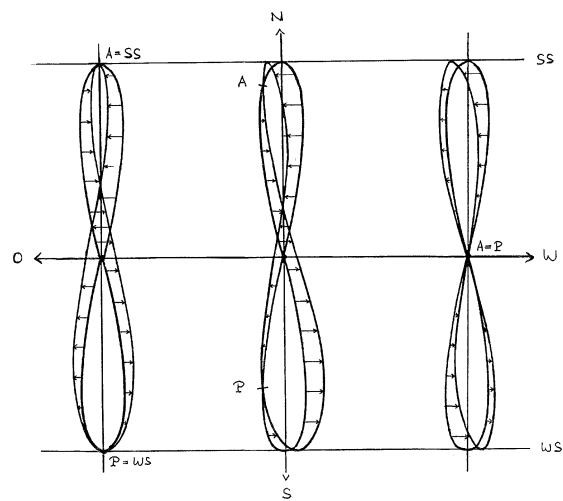
bis diese mit den Sonnenwenden zusammenfallen; dabei geht die Linksneigung der Lemniskate immer mehr zurück (**Figur 2.23**, Stadium 3 bis 5). Die weitere Wanderung der Erdferne und -nähe ist verbunden mit einer Hebung des Kreuzungspunktes der Lemniskate und mit einer zunehmenden Neigung nach oben rechts (**Figur 2.23**, Stadium 5 bis 7).

Die konkrete Konstruktion der wahren Sonnen-Lemniskate ergibt sich aus der Lemniskate der mittleren Sonne auf der Ekliptik durch Abtragung der Ortsdifferenzen, die sich durch die rhythmisch und symmetrisch um die mittlere Sonne wechselnden Geschwindigkeitsdifferenzen der beiden Sonnenbewegungen ergeben (**Figur 2.24**). Es ergibt sich aus diesem Bewegungsrhythmus, dass die wahre Sonne sich genau dann mit der mittleren Ekliptiksonne trifft, das heißt die wahre Lemniskate sich mit der mittleren Lemniskate schneidet, wenn die wahre Sonne ihre größte oder kleinste Geschwindigkeit hat, also Perihel oder Aphel durchschreitet (**Figur 2.25**). Im Weiteren liegt der Kreuzungspunkt der wahren Lemniskate immer auf der Symmetrielinie der mittleren Lemniskate.



Figur 2.24

Qualitative Darstellung der Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen mittlerer und wahrer Sonnenbewegung auf der Ekliptik sowie der entsprechenden Ortsdifferenzen.



Figur 2.25

Qualitative Darstellung der Übertragung der sich verändernden Ortsdifferenzen: Entstehung der unsymmetrischen Zeitgleichungslemniskate aus der symmetrischen.

Nimmt man die Bewegung des Frühlingspunktes vor dem Fixsternhintergrund in Richtung Ost-West hinzu, so ergibt sich eine auf der Ekliptikkugel jährlich um $50''$ nach Westen fortschreitende Lemniskate, die sich gemäß **Figur 2.23** langsam transformiert.

2.6 Zusammenfassung: Relative Kugelbewegungen der Fixsterne und der Sonne in geozentrischer Auffassung

Die durch den Erdkörper bestimmte **Erdkugel** ist nicht fest mit der **Tageskugel**, bestimmt durch das Erdzentrum, *Himmelsachse* (Verbindung von Himmelsnordpol und Himmelssüdpol) und Himmelsäquator, verbunden. Die beiden Kugeln drehen sich relativ zueinander in entgegengesetztem Sinne. Sieht man ab von der Drehung der Tageskugel, und projiziert man einen fest mit dem Erdkörper verbundenen Punkt in der Nähe des geographischen Nordpols auf die Tageskugel, so beschreibt dieser Punkt in etwa 1½ Jahren eine kleine kreisförmige Kurve im Gegenuhrzeigersinn (Polbewegung oder Polhöschwankung).

Die ebenfalls im Erdzentrum verankerte **Fixsternkugel** ist gebunden an die relativ zueinander fest gedachten Fixsternorte.

Die Sonnenbahn- oder **Eklptikkugel**, bestimmt durch die Ekliptik und die *Eklptikachse* (Verbindungsgerade von Eklptiknordpol E und Eklptiksüdpol), hat ihr Zentrum ebenfalls im Erdmittelpunkt. Sie bewegt sich relativ zur Fixsternkugel bei Blick nach Norden im Gegenuhrzeigersinn um den Eklptiknordpol (Bewegung der Apsidenlinie zwischen Aphel und Perihel).

Die **Fixsternkugel** bewegt sich relativ zur **Tageskugel** um die Eklptikachse (absolute Präzession, Bewegung des Frühlingspunktes/Herbstpunktes sowie des Himmelsnord- und Südpols, platonische Bewegung). Blick man nach Süden bei Kulmination des Frühlingspunktes, so bewegen sich die Fixsterne entlang und parallel der Ekliptik von West nach Ost; beim Blick nach Norden drehen sich die Fixsterne (bei fortdauernder Kulmination des Frühlingspunktes) im Uhrzeigersinn um den Eklptiknordpol.

2.7 Eigenbewegungen der Sonne

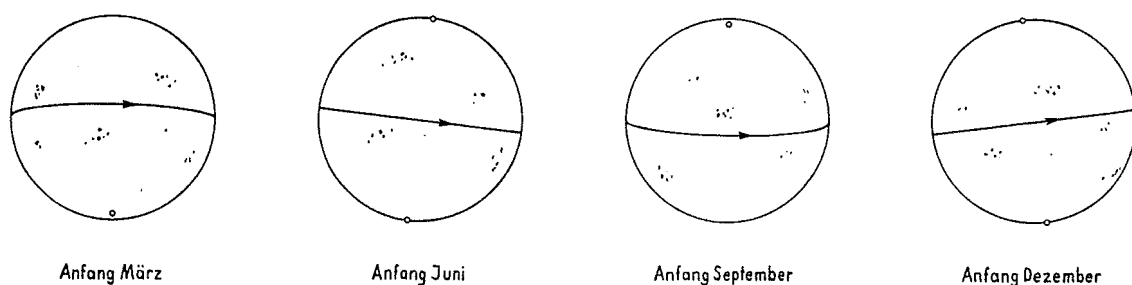
2.7.1 Differentielle Rotation der Sonne

Eine Beobachtung von Sonnenflecken führt zum Ergebnis, dass die **Sonnenkugel** eine Eigenrotation mit einer durchschnittlichen synodischen Periode von 27.3 Tagen vollzieht: Sonnenflecken – sofern sie überhaupt über mehrere Wochen erhalten bleiben – wandern in etwa 14 Tagen vom östlichen zum westlichen Sonnenrand, bleiben dann um 14 Tage unsichtbar, bevor sie wieder auftauchen. Daraus kann auch die Lage des durch diese Rotation bestimmten Sonnenäquators sowie der entsprechenden Pole und die Rotationsachse abgeleitet werden. Dabei muss beachtet werden, dass die Oberfläche der Sonne in ihren einzelnen Breitenzonen keine einheitliche Rotationsdauer hat (differentielle Rotation). Misst man die siderische Umlaufszeit, das heißt die Zeit, in der auf der Sonne laufende Punkte wieder in dieselbe Lage zum Fixsternhimmel kommen, so ergibt sich: Die Zonen um den Äquator drehen sich schneller mit einer siderischen Periode um 25.4 Tage als die Zonen nahe den Polen mit einer Periode um 36 Tage.

2.7.2 Sonnenstellung und Ekliptikebene: Phänomenologische Präzession der Sonnenachse

Der Sonnenäquator ist um 7.25° gegen die Ekliptikebene geneigt. Deshalb sieht man diesen Äquator je nach Jahreszeit in verschiedenen Lagen (**Figur 2.26**). Anfang Juni und Anfang Dezember sieht man den Äquator als gerade Linie; dies ist die Schnittlinie der Ebene des Sonnenäquators mit der Ebene der Ekliptik. (Zur phänomenologischen Präzession siehe Anhang A.1.5)

Geht man davon aus, dass die Rotationsachse der Sonne im wesentlichen rauminvariant ist (es ist keine sicher bestimmbar absolute Präzession der Sonnenachse bekannt), so kommt es bei den geschilderten jährlichen Bewegungen des Sonnenkörpers gegenüber der Erde ebenfalls zu wechselnden Stellungen: Die Sonnenachse beschreibt im Laufe eines Jahres relativ zur Erde eine Kegelbewegung von $2 \cdot 7.25^\circ$ Öffnungswinkel um eine Achse, die senkrecht zur Ekliptikebene steht und durch den Mittelpunkt der Sonne geht.

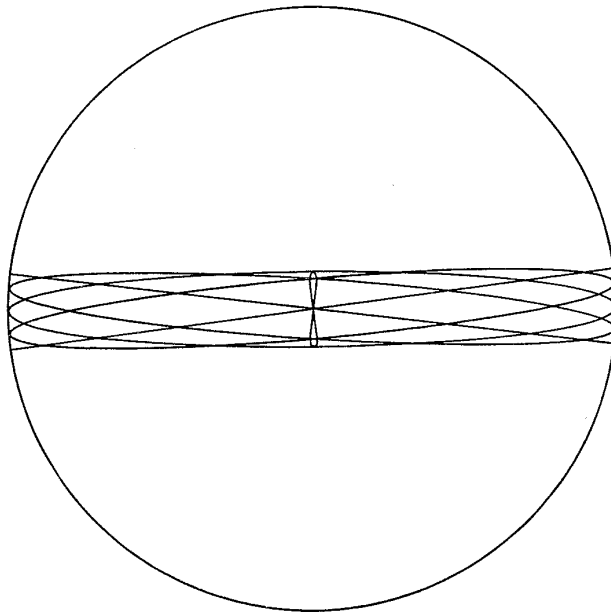


Figur 2.26

Lage des Sonnenäquators und der Sonnenpole (o) zu verschiedenen Jahreszeiten. Die Pfeile geben die Bewegungsrichtung der Sonnenflecken an.

Diese jährliche phänomenologische Präzession der Sonnenachse hat zur Folge, dass wegen der dadurch induzierten Bewegung der Äquatorebene der der Erde am nächsten liegende Punkt der

Sonne eine lemniskatische Bewegung beschreibt (siehe dazu Abschnitt 1.4). Die wechselnden Lagen des Sonnenäquators im Jahreslauf zeigt **Figur 2.27**.



Figur 2.27

Jährliche Verlagerung des Sonnenäquators auf der Sonnenscheibe und schleifenförmige Bewegung des erdnächsten Äquatorpunktes.

3 Geozentrische Mondbewegungen

3.1 Mondbahn und Ekliptik

3.1.1 Mondbahn

Man sehe zunächst ab vom Lichtgestaltenwechsel des Mondes, das heißt von den sogenannten Mondphasen. Die Tagesbewegung des Mondes, das heißt seine Tagesbögen, sind im Wesentlichen an denselben Orten und von derselben Größe wie diejenigen der Sonne. Nur durchläuft der Mond diese Tagesbögen in viel schnellerer Folge als die Sonne.

Sieht man von der Bewegung der Tageskugel ab, so bemerkt man, dass die Eigenbewegung des Mondes in derselben Richtung vor sich geht wie die jährliche Sonnenbewegung auf der Ekliptik. Er braucht um 50 Minuten länger für einen Tagesumlauf (von Kulmination zu Kulmination, das heißt von Meridiandurchgang zu Meridiandurchgang) als der Fixsternhimmel (Tageskugel). Dies bemerkt man anhand der täglichen Verspätung der Auf- oder Untergänge des Mondes relativ zur Sonne. Die Verspätungen schwanken allerdings je nach Stellung des Mondes im Tierkreis von 15 bis 80 Minuten. Er hat eine Geschwindigkeit um 13° pro Sonnentag und um 90° pro Woche. Ein Winkelgrad (1°) entspricht also etwa einem 2-Stundenweg des Mondes, das heißt 2 *Mondstunden*. Eine Winkelminute ($1'$) entspricht 2 Mondminuten und eine Winkelsekunde ($1''$) entspricht 2 Mondsekunden. Der Mond hat einen sichtbaren Durchmesser um 0.5° (er schwankt zwischen $29'$ und $33'$, mit einem mittleren Wert um $31'$).

Die mittlere Geschwindigkeit des Mondes pro Tag ergibt sich aus seiner siderischen Bewegung: $360^\circ / 27.32166 = 13^\circ 10' 34.9''$. Dies macht 0.549° pro Stunde, $0.549'$ pro Minute und $0.549''$ pro Sekunde.

Die Bewegung des Mondes im Tierkreis hat eine Veränderung seiner Tagesbögen zur Folge. Er steht einmal höher und einmal tiefer. Er beschreibt deshalb bei Zusammenschau der Tages- und Tierkreisbewegung eine Schraubenlinie wie die Sonne. Zu den Mond-Sonne-Rhythmen (siehe unten) gehört die Tatsache, dass im Sommer der Vollmond tief am Himmel (tiefe Tagesbögen) steht und im Winter hoch am Himmel (hohe Tagesbögen).

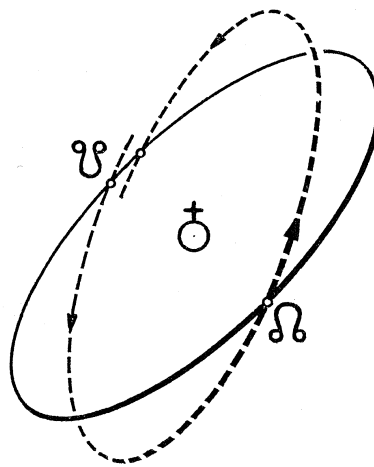
Der Aufgangsort des Mondes am Horizont schwankt während eines Monats zwischen einem südlichsten und einem nördlichsten Punkt hin und her, so wie es auch bei der Sonne im Verlauf eines Jahres der Fall ist. Im Laufe des Zeitraumes von 18.61 Jahren (siehe unten: drakonitischer Mondmonat) verändert sich die Spanne zwischen diesen beiden Extrempunkten in ihrem Abstand: Der Zeitpunkt, an dem diese Punkte am weitesten auseinanderliegen, heißt *große Mondwende*, der des geringsten Abstandes *kleine Mondwende*.

Der *siderische Mondumlauf* oder *siderische Mondmonat* dauert 27.321662 mittlere Sonnentage ($\approx 27^{\text{d}} 7^{\text{h}} 43^{\text{m}} 11.6^{\text{s}}$) und ist um mehr als zwei Tage kleiner als der synodische Umlauf. Er ist definiert als Bewegung des Mondes relativ zur Fixsternkugel. In einem tropischen Sonnenjahr gibt es $365.242198 / 27.321662 = 13.3682$ siderische Monate.

Eine genauere Beobachtung zeigt, dass die Mondbahn ein Großkreis ist, der um 5.2° gegenüber der Ekliptik geneigt ist. Durch diese Mondbahn ist die **Mondkugel** bestimmt, die ihr Zentrum im Erdmittelpunkt hat. Die Schnittpunkte der Mondbahn mit der Ekliptikebene heißen *Mondknoten*. Der *aufsteigende Mondknoten* bezeichnet den Übergang des Mondes vom südlichen Teil in den nördlichen Teil der Ekliptik und der *absteigende Knoten* den Übergang vom nördlichen Teil in den südlichen Teil der Ekliptik (1. Gliederung der Mondbahn).

Die Mondkugel und die Ekliptikkugel bewegen sich relativ zueinander, das heißt die Mondknoten bleiben nicht an denselben Stellen relativ zur Ekliptik. Sie verschieben sich in westlicher Richtung,

also entgegen der Mondbewegung (**Figur 3.1**). Die Wiederkehr zur Stellung des Mondes zum gleichen Mondknoten heißt *drakonitischer Mondmonat* und dauert 27.212221 mittlere Sonnentage ($\approx 27^{\text{d}} 5^{\text{h}} 5^{\text{m}} 35.9^{\text{s}}$). Er ist um $2^{\text{h}} 37^{\text{m}} 35.7^{\text{s}} = 2.6266^{\text{h}}$ kürzer als der siderische Monat. Dies entspricht bezüglich der Mondwanderung einer Winkeldifferenz von $2.6266 \cdot 0.549^{\circ} = 1.442^{\circ}$ pro siderischem Monat, das heißt um $1^{\circ} 30'$ pro Monat (etwa 3-Stundenweg für den Mond). Dies summiert sich auf $13.3682 \cdot 1.442^{\circ} = 19.277^{\circ}$ pro Jahr (genauerer, über längere Zeit gemittelter Wert: 19.3413°), das heißt etwa 38 Mondstunden. Der dadurch bedingte siderische Umlauf der Mondknoten, die sogenannte *Mondknotenperiode*, dauert um $360^{\circ} / 19.3413 = 18.613$ Jahre ($\approx 18^{\text{a}} 218^{\text{d}} 21^{\text{h}} 22^{\text{m}}$; zwei Perioden dauern um $37^{\text{a}} 72^{\text{d}} 6^{\text{h}}$, 3 Perioden um $55^{\text{a}} 291^{\text{d}} 10^{\text{h}}$ und 4 Perioden um $74^{\text{a}} 145^{\text{d}} 1^{\text{h}}$). Dabei handelt es sich um das Verhältnis der Mondkugel und Ekliptikkugel zur Fixsternkugel. Dieser Knotenzyklus ist ein Ausgleich des siderischen mit dem drakonitischen Monat.



Figur 3.1

Veranschaulichung der Entstehung der Mondknotenbewegung relativ zur Ekliptik (ausgezogen) während der Bewegung des Mondes auf seiner Bahn (gestrichelt).

3.1.2 Mondbewegung auf der Mondbahn

Die Geschwindigkeit des Mondes auf seiner Mondbahn ist nicht immer dieselbe. Er bewegt sich mal schneller und mal langsamer. Die Geschwindigkeitsmaxima sind mit einer Erdnähe (Perigäum) und Erdferne (Apogäum) verknüpft, und zwar bewegt sich der Mond in Erdnähe am schnellsten. Die Verbindungslinie von Apogäum und Perigäum, die Apsidenlinie verschiebt sich sehr schnell, durchschnittlich um 40° pro Sonnenjahr von Westen nach Osten, also mit der Mondbewegung. Die monatliche Bewegung der Apsidenlinie ist um 3.3° , was einem 6-Stundenweg des Mondes entspricht. Die Wiederkehr des Mondes zum Perigäum oder Apogäum, das heißt der Rhythmus von Erdferne und Erdnähe heißt *anomalistischer Monat* und dauert 27.554550 mittlere Sonnentage ($\approx 27^{\text{d}} 13^{\text{h}} 18^{\text{m}} 33.1^{\text{s}}$), ist also um $5^{\text{h}} 35^{\text{m}} 21.5^{\text{s}} = 5.589^{\text{h}}$ länger als der siderische Monat.

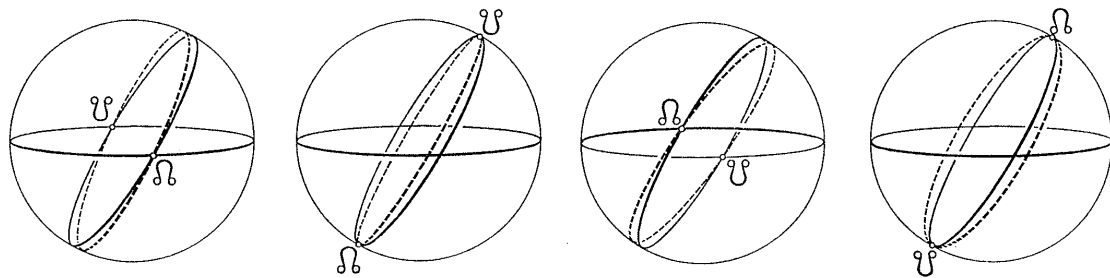
Die Winkelbewegung der Knotenlinie bezüglich der Mondbewegung beträgt $5.589 \cdot 0.549^{\circ} = 3.068^{\circ}$ pro Monat und damit $13.3682 \cdot 3.068^{\circ} = 41.0137^{\circ}$ pro tropisches Sonnenjahr (genauerer, über längere Zeit gemittelter Wert: 40.6901° pro Jahr). Ein voller siderischer Umlauf der Apsidenlinie findet statt in etwa $360^{\circ} / 40.6901^{\circ} = 8.847$ Jahren (2. Gliederung der Mondbahn).

Die gegenseitige Lage von Mondknoten und Apsiden wiederholt sich nach etwa 6 Jahren. Denn relativ zu den Knotenpunkten bewegt sich die Apsidenlinie in einem siderischen Monat um einen

Betrag, der gleich der Summe der Beträge der Knotenbewegung und der Apsidenbewegung ist: $2.6266^h + 5.589^h = 8.2156^h$. Dies ergibt eine Winkelbewegung von $8.2156 \cdot 0.549^\circ = 4.51^\circ$ pro siderischen Monat, also $13.3682 \cdot 4.51^\circ = 60.295^\circ$ pro Jahr. Als Periode ergibt sich deshalb $360^\circ / 60.295^\circ = 5.97$ Jahre.

3.1.3 Bewegung der Mondbahn relativ zur Ekliptik

Die Bewegung der Mondbahn, also die Bewegung der Mondbahnkugel relativ zur Ekliptikkugel, hat zur Folge, dass sich die Mondbahn als Ganzes relativ zur Sonnenbahn (Ekliptik) bewegt. Im Folgenden soll diese Bewegung in ihren geometrischen Aspekten näher ins Auge gefasst werden. Dazu denkt man sich zunächst die Ekliptik in einer festen Lage, nämlich dann, wenn sie ihren im nördlichen Himmelsfeld liegenden Bogen voll zeigt, also bei der Kulmination des Sommer-Solstitiums SS (Sommersonnenwende) 23.5° über dem Himmelsäquator; dies ist etwa am 21. März um 18 Uhr der Fall (**Figur 2.6**). Dann liegen die Äquinoktien genau im Osten und Westen, also der Frühlingspunkt F im Westen und der Herbstpunkt H im Osten. Nimmt man weiter an, dass der aufsteigende Mondknoten Ω mit dem Frühlingspunkt F im Westen und der absteigende Mondknoten Υ mit dem Herbstpunkt H im Osten zusammenfällt, so erhebt sich in dieser Lage die Mondbahn noch weiter in den Nordhimmel; an ihrem höchsten Punkt überschreitet sie dann den höchsten Punkt der Ekliptik (Sommer-Solstitium SS) um weitere 5.2° (**Figur 3.2** links). Wird die Ekliptik in dieser Lage zusammen mit dem Himmelsäquator weiter festgehalten, so wandern die Mondknoten in westlicher Richtung (also gegenläufig zur Mondbewegung und zur Sonnenbewegung auf der Ekliptik) weiter. Dabei wird die Neigung der Mondbahn relativ zur Horizontebene immer flacher, bis die Mondknoten wieder in den Äquinoktien liegen (**Figur 3.2** Mitte), jetzt aber in umgekehrter Lage: Ω in H im Osten und Υ in F im Westen. Danach wird die Mondbahn wieder steiler, und die Mondknoten wandern über die Solstitien (**Figur 3.2** rechts) der Sonnenbahn wieder zum Ausgangspunkt zurück (**Figur 3.2** links).



Figur 3.2

Lagen der Mondbahn (gestrichelt) zur Ekliptik (ausgezogen) beim Zusammenfallen der Knoten mit den Äquinoktien und Solstitien während eines Knotenumlaufs von 18.6 Jahren.

Nun wird, wie schon bei der Bewegung der Ekliptik relativ zur Horizontebene (Abschnitt 2.3, Bewegung des höchsten Punktes der Ekliptik) die Bewegung des höchsten Punktes der Mondbahn relativ zum Himmelsäquator aus rein geometrischer Sicht ins Auge gefasst. Die Mondbahn verschiebt sich relativ zum Himmelsäquator sowohl um mindestens $\pm 5.2^\circ$ in den Äquinoktien F und H entlang des Himmelsäquators (Abweichung in Rektaszension) als auch in ihrer Neigung um maximal $\pm 5.2^\circ$ relativ zu den Solstitien (Abweichung in Deklination). Der jeweils relativ zum Himmelsäquator höchste Punkt der Mondbahn, also der Punkt der Mondbahn mit maximaler Deklination, wird

Höchststellung des Mondes genannt. Aufgrund der Knotenbewegung der Mondbahn wandert dieser Punkt, bei festgehaltener Ekliptik und festem Himmelsäquator, beginnend beim angenommenen Ausgangspunkt (F in Ω im Westen, Sommer-Solstitium SS in Kulmination, **Figur 2.6** und **3.2** links), bei fortschreitender Mondbahnbewegung auf einem Bogen nach rechts unten, also nach Westen auf den Himmelsäquator zu. Erst nachdem der von Osten (links) kommende absteigende Knoten \mathcal{P} das Sommer-Solstitium SS überschritten hat, überschreitet auch dieser höchste Punkt die Ekliptik und wandert nach links unten (nach Westen unterhalb der Ekliptik), bis er seine (relativ) tiefste Lage erreicht, sobald der absteigende Mondknoten \mathcal{P} im Frühlingspunkt F (das heißt also bei der angenommenen Lage der Ekliptik im Westen) angelangt ist. Danach steigt die Höchststellung des Mondes wieder in einem Bogen nach links oben auf, überschreitet die Ekliptik bevor der von (links) Osten herkommende aufsteigende Knoten Ω das Sommer-Solstitium SS überschreitet und erreicht wieder seine höchste Höhe, sobald Ω im Frühlingspunkt F im Westen und \mathcal{P} im Herbstpunkt H im Osten angelangt sind.

Dies bedeutet zusammenfassend, dass die Höchststellung des Mondes, also der jeweils höchste Punkt der Mondbahn im Sinne desjenigen Punktes der Mondbahn, der eine maximale nördliche Abweichung vom Himmelsäquator (maximale nördliche Deklination) hat, immer in der «Nähe» des Sommer-Solstitiums SS der Ekliptik bleibt, also um SS bei festgehaltener Ekliptik im Laufe der Mondknotenperiode von 18.6 Jahren einen (nahezu) geschlossenen Bogen im Uhrzeigersinn durchläuft. (Dieser Bogen ist allerdings nur dann geschlossen, wenn man bloß auf die relative Lage der Ekliptik und der Mondbahn schaut und zudem die Veränderung der Mondbahnneigung ignoriert; wegen der Veränderung von SS vor dem Fixsternhintergrund aufgrund der Frühlingspunktbewegung ist dies strenggenommen (auch) vor den Fixsternen keine geschlossene Kurve.) Dabei durchwandert die Höchststellung des Mondes selbst die ganze Mondbahn in östlicher, das heißt rechtflüchtiger Richtung (gleich wie der Mondlauf), fällt also der Reihe nach periodisch sowohl mit den Knoten Ω und \mathcal{P} als auch mit Apogäum und Perigäum des Mondes zusammen.

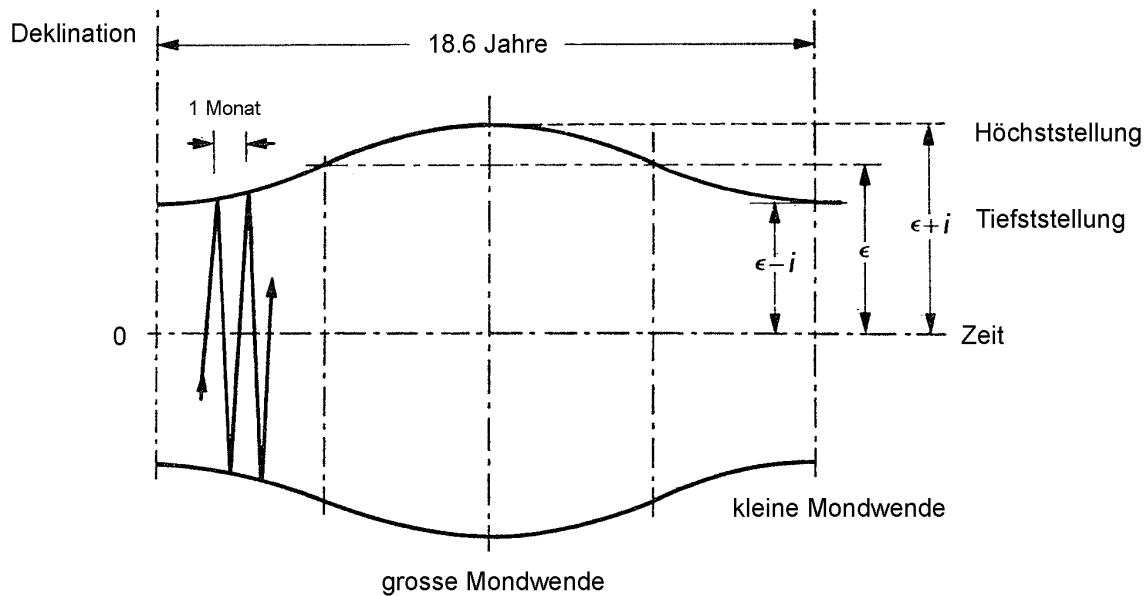
Richtet man während dieser Bewegung im Laufe von 18.6 Jahren den Blick allein auf die Höchststellung der Mondbahn relativ zum Himmelsäquator, so verschiebt sich bei festgehaltener Ausgangslage der Ekliptik (Frühlingspunkt F im Westen) diese Bahn (als halber Großkreis in der Ekliptikkugel) als Ganzes nach rechts und links sowie nach unten und oben; dabei schneidet er den Himmelsäquator immer in diametralen Punkten.

Blickt man hingegen immer zum festgehaltenen Sommer-Solstitium SS und beobachtet das Verhalten der Mondbahn relativ zur Sonnenbahn (Ekliptik), so ist diese Bahn in der hier gewählten Ausgangslage zunächst lokal «parallel» zur Ekliptik, neigt sich dann leicht von links unten nach rechts oben bis zum Eintreffen des absteigenden Knotens \mathcal{P} in SS, sinkt dann weiter herunter und wird zugleich flacher bis sie in ihrer relativen Tiefstellung (\mathcal{P} im Frühlingspunkt F im Westen) wieder lokal «parallel» zur Ekliptik ist. Danach neigt sich die Mondbahn leicht in der anderen Richtung von links oben nach rechts unten bis zum Eintreffen des von (links) Osten herkommenden aufsteigenden Knotens Ω in SS, steigt weiter und wird wieder flacher bis sie ihre höchste Stellung erreicht hat und damit wieder lokal «parallel» zur Sonnenbahn wird.

Eine entsprechende Bewegung durchläuft die *Tiefstellung* des Mondes, das heißt derjenige Punkt der Mondbahn, der die jeweils größte Deklination in südlicher Richtung von dem Himmelsäquator hat, in der Nähe des Winter-Solstitiums WS (Wintersonnenwende) während der Mondknotenperiode. Dabei entspricht der relativ höchsten Stellung der Höchststellung die relativ tiefste Stellung der Tiefstellung des Mondes.

Was bedeutet das alles phänomenologisch? Die Bewegung der Mondknoten hat eine periodische Veränderung sowohl der höchsten und der tiefsten Stellung des Mondes als auch von dessen südlicher und nördlicher Auslenkung der Auf- bzw. Untergangsorte zur Folge. Mit anderen Worten: die großen Schwankungen aufgrund der Nähe der Mondbahn zur Ekliptik (Sonnenbahn) werden überlagert durch Schwankungen aufgrund seines Laufs auf der zur Ekliptik um 5.2° geneigten Mondbahn. Diese doppelte Schwankung ist zusammenfassend in **Figur 3.3** dokumentiert.

Die relativ höchste Stellung der Höchststellung des Mondes beim Zusammenfallen des aufsteigenden Knotens Ω mit dem Frühlingspunkt F wird auch als *große Mondwende* (auf Englisch meist «major standstill») und die relativ tiefste Tiefstellung des Mondes entsprechend als *kleine Mondwende* («minor standstill») bezeichnet.

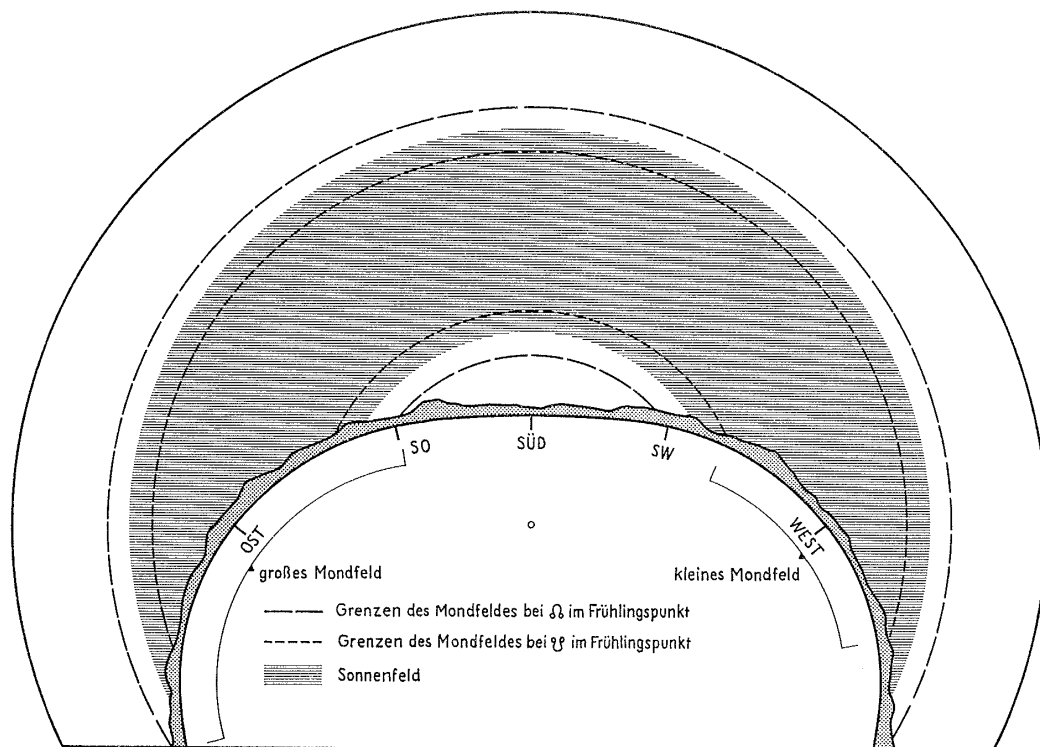


Figur 3.3

Mondmonatliche und 18,6-jährige Schwankungen der Deklination des Mondes aufgrund seiner Bahn in der Nähe der Ekliptik bzw. der Abweichung seiner Bahn von der Ekliptik. $\epsilon = 23,5^\circ$ bezeichnet die größte Abweichung der Sonne vom Himmelsäquator (Neigung der Ekliptik zum Himmelsäquator) und $i = 5,2^\circ$ die Neigung der Mondbahn relativ zur Ekliptik

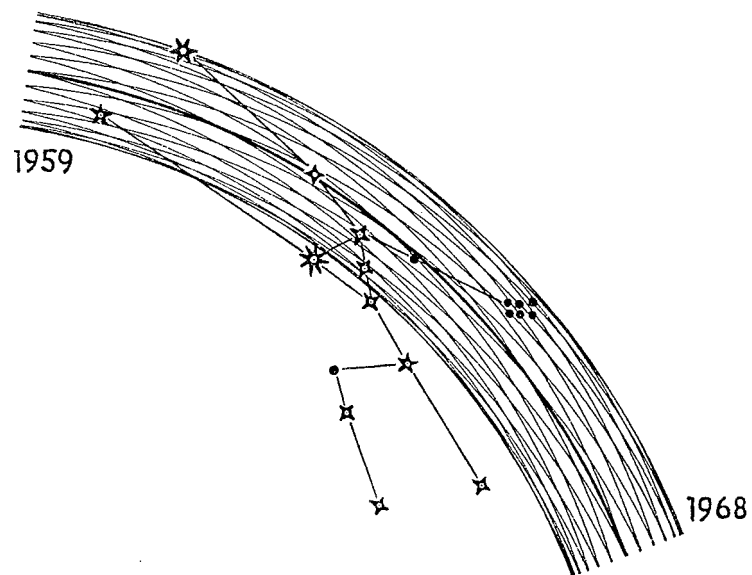
In **Figur 3.4** ist zu sehen, wie die mondmonatliche Schwankung der Mondhöhe über der Horizontebene beim relativ höchsten Stand der Höchststellung des Mondes, wenn der aufsteigende Mondknoten Ω im Frühlingspunkt F ist, das von der Sonne überstrichene Feld noch weiter überschreitet. Entsprechend unterschreitet der Mond in seiner Bewegung das Ausmaß des von der Sonne überstrichenen Himmelsfeldes, wenn die Höchststellung ihre relativ tiefste Stellung und zugleich zugleich die Tiefstellung ihre relativ höchste Stellung hat, also beim aufsteigenden Mondknoten Ω im Herbstpunkt H (oder absteigender Mondknoten \varnothing im Frühlingspunkt F).

Schaut man sich die Situation an einer konkreten Stelle des Himmels, etwa in der Nähe des Sternbildes Stier an, so zeigt sich, dass die 18,6-jährige Wanderung der Mondbahn (und damit letztlich auch des Mondes selbst) das Sternbild in großen Teilen überstreicht. Wegen ihrer wechselnden Stellung zur Ekliptik bewegt sich die Mondbahn nicht einfach zwischen zwei Extremstellungen hin und her, sondern verändert zugleich ihre Steilheit in periodisch wechselnder Weise (**Figur 3.5**).



Figur 3.4

Größtes und kleinstes Mondfeld bei konstantem Sonnenfeld bei folgenden Lagen des Mondknotens: aufsteigender Mondknoten Ω im Frühlingspunkt F und absteigender Knoten \varnothing im Frühlingspunkt F (aufsteigender Knoten Ω im Herbstpunkt H).



Figur 3.5:

18,6-jähriger Wechsel der Mondbahnlagen im Sternbild Stier im Vergleich zur Ekliptik (stark ausgezogener Bogen). Kleine Mondwende im Jahre 1959 und große Mondwende im Jahre 1968.

3.2 Sonne und Mond

3.2.1 Mond-Sonne-Rhythmen

Der Lichtgestaltenwechsel des Mondes (Mondphasen) beginnt nach einer Phase der Unsichtbarkeit (*Neumond*) mit der zunehmenden Sichel im Westen am Abendhimmel. Die Rundung der Sichel ist dabei der Sonne zugewandt, ihre Symmetrieachse weist auf die Sonne. Der *zunehmende Halbmond* steht bei Sonnenuntergang im Süden und der *Vollmond* geht gerade auf, wenn die Sonne untergeht. Der abnehmende Mond ist nur am späten Abend, nach Sonnenuntergang am Osthimmel sichtbar. Der *abnehmende Halbmond* geht um Mitternacht auf und steht bei Sonnenaufgang im Süden. Die Richtung zur Sonne kann aus dem Lichtverlauf auf der Mondoberfläche entnommen werden.

Der *synodische Mondumlauf* oder *synodische Mondmonat* dauert 29.530589 mittlere Sonnentage ($\approx 29^{\text{d}} 12^{\text{h}} 44^{\text{m}} 2.9^{\text{s}}$). Er ist definiert als eine periodische Bewegung relativ zur Sonnenbewegung im Tierkreis (von Vollmond zu Vollmond oder Neumond zu Neumond) und ist um mehr als 2 Tage (genauerer Wert: 2.209 Tage) länger als der siderische Umlauf.

Die Differenz von synodischem und siderischem Mondumlauf kommt durch die Wanderung der Sonne von einem Tierkreisbild in das nächste zustande: in 30 Tagen legt die Sonne $30 \cdot 0.986 = 29.57^\circ$, das heißt um 30° zurück, was etwa 2.2 Mondtagen entspricht.

In einem Sonnenjahr gibt es 13 siderische Mondumläufe ($355^{\text{d}} 4^{\text{h}}$) und 12 synodische Umläufe ($354^{\text{d}} 8^{\text{h}}$). Letzteres charakterisiert das *Mondjahr*; dieses ist die Basis des islamischen Kalenders.

Der *tropische Mondumlauf* oder *tropische Mondmonat* dauert 27.321582 mittlere Sonnentage ($\approx 27^{\text{d}} 7^{\text{h}} 43^{\text{m}} 4.7^{\text{s}}$) und ist um 6.9^{s} kürzer als der siderische Umlauf. Er ist definiert als die Bewegung der Mondkugel relativ zur Tageskugel in ihrem Verhältnis zur Ekliptikkugel, das heißt von Frühlingspunkt zu Frühlingspunkt, oder von Sonnenwende zu Sonnenwende. Der tropische Mondumlauf kann auch als Bewegung des Mondes relativ zum Himmelsäquator angesehen werden.

Der tropische Mondumlauf ist um 6.9^{s} kürzer als der siderische Mondumlauf wegen der Wanderung des Frühlingspunktes um $50.25''$ pro Jahr, das heißt $50.25'' / 12 = 4.187''$ pro Sonnenmonat. Dies ist der Weg, den der Mond in $4.187 / 0.549 = 7.63^{\text{s}}$, also in ungefähr 8 Sekunden, zurücklegt.

Aufgabe: Betrachte das wechselnde Verhältnis der Mondbahn zur Sonnenbahn, insbesondere die Stellungen, an denen es zu Kreuzungen des Mondes mit der Sonne kommen kann.

3.2.2 Gleichläufige und gegenläufige Perioden

Es soll aus zwei *gegenläufigen* Drehungen mit den Winkelgeschwindigkeiten v_1 und v_2 , bestimmt durch die Perioden T_1 und T_2 mit $T_1 < T_2$, die gemeinsame Periode T bei gleichzeitigem Start am selben Ort berechnet werden. Zunächst ist gemäß Definition der Winkelgeschwindigkeit

$$v_1 = \frac{360^\circ}{T_1}, v_2 = -\frac{360^\circ}{T_2}.$$

Aus dem Ansatz für die Bewegungsgleichungen für den durchlaufenen Winkelbereich ω beim Zeitpunkt T des Aufeinandertreffens

$$\begin{aligned}\omega &= v_1 T \\ \omega &= v_2 T + n \cdot 360^\circ\end{aligned}$$

ergibt sich

$$\begin{aligned}
v_1 T &= v_2 T + n \cdot 360^\circ \\
(v_1 - v_2) T &= n \cdot 360^\circ \\
T &= n \frac{360^\circ}{v_1 - v_2}.
\end{aligned}$$

Einsetzen von v_1 und v_2 , und von $n = 1$ für die *erste* Begegnung ergibt

$$T = \frac{360^\circ}{360^\circ \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right)} = \frac{T_1 T_2}{T_2 + T_1}.$$

Für *gleichläufige* Perioden ergibt sich bei gleichzeitigem Start am selben Ort:

$$T = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1}.$$

1. Mit dieser Formel lässt sich die Begegnungsperiode T der sich gegenläufig bewegenden Apsidenlinie und der Äquinoktiallinie der Sonne direkt aus den Perioden $T_1 = 25772$ Jahre und $T_2 = 111870$ Jahre berechnen:

$$T = \frac{T_1 T_2}{T_2 + T_1} = 20946 \approx 21000 \text{ Jahre.}$$

2. Entsprechend ergibt sich die Begegnungsperiode T der gegenläufigen Bewegungen der Apsidenlinie und der Knotenlinie des Mondes direkt aus den Perioden $T_1 = 8.847$ Jahre und $T_2 = 18.613$ Jahre:

$$T = \frac{T_1 T_2}{T_2 + T_1} = 5.97 \approx 6 \text{ Jahre.}$$

3. Die Periode T des *drakonitischen Sonnenjahres*, das heißt des siderischen Laufs der Sonne von einem Mondknoten zum nächsten Mondknoten derselben Art, ergibt sich aus den Perioden $T_1 = 1$ Jahr und $T_2 = 18.613$ Jahre:

$$T = \frac{T_1 T_2}{T_2 + T_1} = 0.949 \approx 346.62 \text{ Tage.}$$

4. Als ein Beispiel für eine gleichlaufende Periode soll die Begegnungsperiode T des siderischen Mondlaufes und des siderischen Sonnenlaufes mit den Perioden $T_1 = 27.3216$ Tage und $T_2 = 365.2563$ Tage berechnet werden, also die Zeit, in der sich Sonne und Mond immer wieder begegnen:

$$T = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} = 29.53 \text{ Tage.}$$

Dies ist genau die Periode des synodischen Mondmonats.

5. Periode der Begegnungen der gleichlaufenden anomalistischen ($T_1 = 27.55455$) und synodischen ($T_2 = 29.530589$) Mondbewegung nach gemeinsamem Beginn:

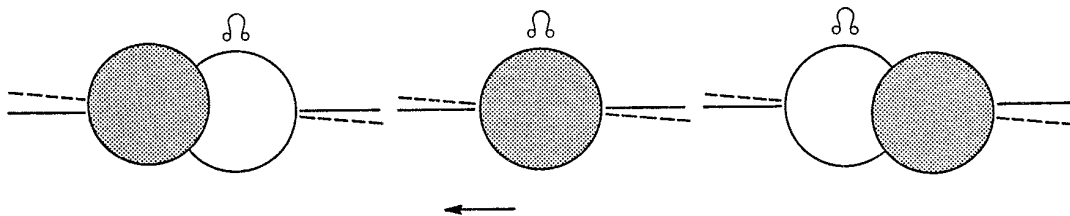
$$T = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} = 411.78 \text{ Tage.}$$

6. Periode der Begegnungen der gleichlaufenden drakonitischen ($T_1 = 27.212221$) und synodischen ($T_2 = 29.530589$) Mondbewegung nach gemeinsamem Beginn:

$$T = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} = 346.62 \text{ Tage.}$$

3.2.3 Sonnen- und Mondfinsternisse

Sonnenfinsternisse finden statt bei Neumond an Mondknoten. Es kann dabei eine ganze oder teilweise Bedeckung der Sonne durch den Mond geben (partielle, ringförmige oder totale Sonnenfinsternis). Der Mond überholt dabei die Sonne von West nach Ost, da er schneller durch die Tierkreisregion wandert als die Sonne. Der Schatten auf die Sonne wandert deshalb von West nach Ost (**Figur 3.6**).



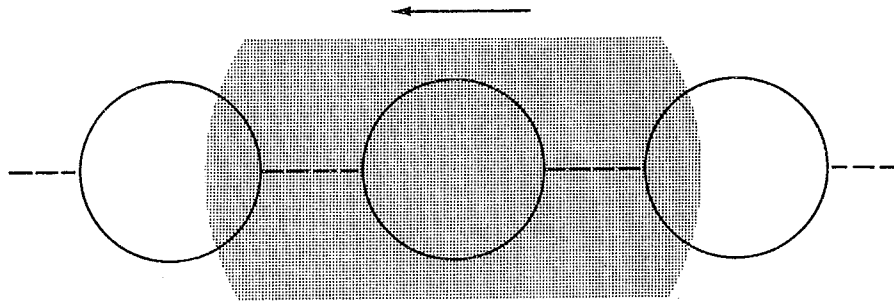
Figur 3.6

Vorübergang des Mondes vor der Sonne bei einer totalen Sonnenfinsternis. Der Pfeil gibt die Bewegungsrichtung des Mondes über die Sonnenscheibe an.

Sonnenfinsternisse dauern total um 3 bis 4 Stunden: so lange braucht die Mondscheibe von der ersten westlichen bis zur letzten östlichen Berührung, also beim Durchschreiten von 2 Monddurchmessern und einem Sonnendurchmesser. Die Totalität, falls sie überhaupt stattfindet, dauert maximal nur etwa 7 bis 8 Minuten an einem Punkt der Erde; sie dauert so lange, wie der Mond für die Durchschreitung der Differenz von aktuellem scheinbarem Sonnen- und Monddurchmesser braucht. Der Schattenkegel des Mondes auf die Erde ist relativ klein und wandert sehr schnell über die Erdoberfläche, sodass Sonnenfinsternisse nur an wenigen Orten der Erde sichtbar sind. Die genauen Werte der Finsternisdauern hängen empfindlich ab von den genauen Werten der verschiedenen Parameter der Sonnen- und Mondbewegungen, insbesondere von den jeweiligen Geschwindigkeiten, geozentrischen Abständen und topographischer Lage.

Mondfinsternisse finden statt bei Vollmond an Mondknoten. Es handelt sich dabei um ein Eintauchen des Mondes in den durch die Sonnenbeleuchtung der Erde entstehenden Erdschatten. Da der Mond in den relativ langsameren Schatten hineinläuft, überstreicht der Schatten den Mond von Ost nach West (**Figur 3.7**).

Die maximale Dauer einer Mondfinsternis von etwa 4 bis 5 Stunden lässt sich abschätzen aus der scheinbaren Größe der Erdscheibe vom Mond aus gesehen: $1^\circ 54'$ (siehe Abschnitt 4.2); sie dauert so lange, wie der Mond von der ersten östlich beginnenden bis zur westlich endenden Verfinsternung braucht, also für die Durchlaufung von 2 Monddurchmessern und einem scheinbaren Erddurchmesser. Die Totalität dauert so lange, wie der Mond für die Durchschreitung der Differenz von scheinbarem Monddurchmesser und scheinbarem Erddurchmesser braucht, etwa 2 Stunden. Für die genauen Werte gilt das bereits oben bei den Sonnenfinsternissen Gesagte.



Figur 3.7

Durchgang des Mondes durch den Kernschatten der Erde bei einer Mondfinsternis. Der Pfeil gibt die Bewegungsrichtung des Mondes an.

Mondfinsternisse sind von überall auf der Erde gleich gut sichtbar, falls der Mond überhaupt sichtbar ist. Totale Sonnenfinsternisse sind jedoch viel häufiger als totale Mondfinsternisse – auch wenn sie an einem bestimmten Ort der Erde nur sehr selten beobachtbar sind.

3.2.4 Zusammenfassung der Mondrhythmen

Zusammenfassung der Verschiebungen der Rhythmen der Sonne relativ zum Tierkreis.

Mondrhythmus	Mond-Monatsrhythmus	Umlauf	Richtung für Beobachter	Bewegung relativ zum Tierkreis
<i>Tägliche Bewegung des Mondes</i>	–	Mond im Tageslauf	Ost → West	rückläufig
<i>Siderischer Umlauf: Wiederkehr des Fixsternhintergrundes</i>	siderischer Mondmonat 27 ^d 7 ^h 43 ^m 11.6 ^s 27.321662 ^d	Mond vor Fixsternen	West → Ost	rechtläufig
<i>Synodischer Umlauf: Wiederkehr der Mondphasen</i>	synodischer Mondmonat 29 ^d 12 ^h 44 ^m 2.8 ^s 29.530589 ^d	Gang der Mondphasen	West → Ost	rechtläufig
<i>Überschreitung der Äquinoktien F und H (oder der Sonnenwenden SS und WS)</i>	tropischer Mondmonat 27 ^d 7 ^h 43 ^m 4.7 ^s 27.321582 ^d	Mond bezüglich Schnittpunkt von Ekliptik und Himmelsäquator	West → Ost	rechtläufig
<i>Überschreitung der Ekliptik in aufsteigenden und absteigenden Knoten</i>	drakonitischer Mondmonat 27 ^d 5 ^h 5 ^m 35.9 ^s 27.212221 ^d	Knotenlinie: Schnittpunkt von Mondbahn und Ekliptik 18.61 Jahre	Ost → West	rückläufig
<i>Maximal- und Minimalgeschwindigkeit in Perigäum und Apogäum</i>	anomalistischer Mondmonat 27 ^d 13 ^h 18 ^m 33.1 ^s 27.554550 ^d	Apsidenlinie oder Knotenlinie: 8.85 Jahre	West → Ost	rechtläufig

3.2.5 Ausgleich zweier Rhythmen

Sind zwei Rhythmen mit den Perioden T_1 und T_2 gegeben, so kann die Frage gestellt werden, zu welchem bestimmten Zeitpunkt diese nach gemeinsamem Beginn zum ersten Mal wieder zusammentreffen und somit die anfangs geltenden Verhältnisse wieder auftreten. Genauer: Nach wie vielen Wiederholungen n der Periode T_1 treten für m Wiederholungen der Periode T_2 dieselben Verhältnisse wieder auf. Gesucht sind also zwei positive ganze Zahlen m und n , sodass $nT_1 = mT_2$ oder

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{m}{n}.$$

Sind T_1 und T_2 nichtperiodische Dezimalzahlen, so sind demzufolge diejenigen Näherungsbrüche

$$\frac{m_1}{n_1}, \frac{m_2}{n_2}, \frac{m_3}{n_3}, \frac{m_4}{n_4}, \dots$$

gesucht, für welche die Differenz zu T_1 / T_2 immer kleiner wird. Diese Aufgabe kann durch die sogenannte *Kettenbruchentwicklung* gelöst werden (siehe Locher 1985, Kapitel 35, insbesondere S. 295f.).

1. Ausgleich von synodischem Mondmonat (T_1) und tropischem Sonnenjahr (T_2). Die Kettenbruchentwicklung von T_1 / T_2 ergibt die fortschreitend exakteren Näherungsbrüche:

$$1, \frac{12}{1}, \frac{25}{2}, \frac{37}{3}, \frac{99}{8}, \frac{136}{11}, \frac{235}{19}, \frac{4131}{334}, \dots$$

Daraus ergibt sich: Ein ungefähre Ausgleich von synodischem Mondmonat und tropischem Sonnenjahr kommt also zustande nach ungefähr 2.2 Sonnenjahren (806.845 Sonnentage) und etwa 25 synodischen Mondmonaten.

Ein viel genauere Ausgleich von tropischem Jahr und synodischem Mondumlauf, das heißt eine Wiederkehr derselben Mondphasen zum selben Datum, also dieselbe Stellung einer Mondphase zum Jahreszeitenjahr, kommt nach etwa 19 Jahren ($19^a 0^d 2^h 45^m$) und 235 synodischen Monaten zustande und heißt *metonischer Zyklus*.

2. Für einen Ausgleich von einem Mondjahr mit zwölf synodischen Monaten (T_1) und tropischem Sonnenjahr (T_2) ergeben sich aus der Kettenbruchentwicklung folgende Näherungsbrüche für T_1 / T_2 :

$$1, \frac{33}{32}, \frac{34}{33}, \frac{67}{65}, \frac{168}{163}, \frac{403}{391}, \dots$$

Dies bedeutet: Ein ziemlich genauer Ausgleich von Sonnenjahr und Mondenjahr findet nach etwa 33 Jahren statt, denn es gilt annähernd: 33×12 Sonnenmonate $\approx 34 \times 12$ Mondmonate (Differenz: etwa 4.5 Tage).

3. Die zweimal im Sonnenjahr durch die Überschreitung der Mondknoten durch die Sonne gegebenen Finsterniszeiten verschieben sich gemäß der Wanderung der Mondknoten durch den Tierkreis und damit durch den Jahreslauf. Sucht man nach einer ungefähren Wiederkehr derselben Art von Finsternissen, das heißt eine ungefähre Wiederkehr der Lage von Neumond und Vollmond zu den Mondknoten, so ergeben sich aus der Kettenbruchentwicklung für den Ausgleich von drakonitischem Monat (T_1) und synodischem Monat (T_2) die folgenden Näherungsbrüche für T_1 / T_2 :

$$1, \frac{12}{11}, \frac{13}{12}, \frac{38}{35}, \frac{51}{47}, \frac{242}{223}, \frac{777}{716}, \dots$$

Es ergibt sich, dass 223 synodische Monate gleich 6585.3 Tage oder 18 tropische Sonnenjahre und 10 oder 11 Tage (je nach der Anzahl Schalttage) sind. Diese Periode heißt *Sarosperiode*. Sie dauert um 18.03 Jahre und ist charakterisiert durch

- 19 drakonitische Sonnenumläufe (Wiederkehr der Sonne zum gleichen Mondknoten: 356.62 Tage)
- 242 drakonitische Mondumläufe
- 239 anomalistische Mondumläufe
- 223 synodische Mondumläufe

Der anomalistische Umlauf beeinflusst die Qualität der Sonnenfinsternisse bezüglich Totalität und Ringförmigkeit.

3.2.6 Sarosperiode und Saroszyklus

Finsternisse ereignen sich nur dann, wenn Voll- oder Neumond in oder nahe der Mondknoten stehen. Die Knoten aber wandern, wie bereits erwähnt, rückläufig auf der Ekliptik. Pro Jahr verschieben sie sich um $19 \frac{1}{3}^\circ$ nach Westen. Wenn also etwa der aufsteigende Knoten nahezu mit dem Frühlingspunkt zusammenfällt, ist er im darauffolgenden Jahr bereits um 19° von ihm abgerückt. Daher verfrühen sich die Finsternisse im Schnitt um 10 Tage pro Jahr.

Ein vollständiger Knotenumlauf dauert 18.61 Jahre. Nach genau 19 Jahren fallen die Mondphasen wieder nahezu auf die gleichen Kalendertage. Dies hängt mit der Tatsache zusammen, dass 235 synodische Monate ziemlich genau 19 Jahren entsprechen. Erst nach 114 Jahren (6 mal 19 Jahre) gibt es eine Abweichung von einem Tag, weil die 235 synodischen Monate nicht ganz genau mit den 19 Jahren übereinstimmen. Dieser Zyklus war schon im Altertum bekannt und heißt nach dem Astronomen Meton *Metonischer Mondzyklus*.

Die Finsternisse wiederholen sich jedoch nicht in exakt 19 Jahren. Eine Periode von 76 Jahren oder 4 Mondfinsternissen (bei der Sonne sind es 3 Finsternisse in 57 Jahren) überlagert den wirklichen Saros. Denn wenn man heute eine Finsternis beobachtet, war oder ist der Knoten vor bzw. nach genau 19 Jahren zwar noch nahe genug beim Mond, um eine Finsternis zu ermöglichen. Da aber die Umlaufszeit der Knoten um $4 \frac{1}{2}$ Monate kürzer als 19 Jahre ist, ist der Knoten irgendwann zu weit vom Mond entfernt, sodass er den Erdschatten bzw. die Sonne verfehlt.

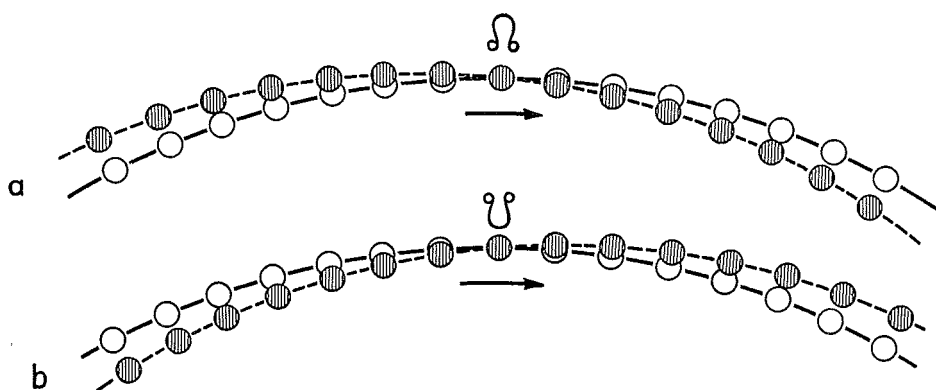
Wie kann überhaupt eine Periodizität bei Finsternissen festgestellt werden? Man muss berechnen, wann sich die Stellungen des Mondes, der Sonne und der Erde in Bezug auf die Knoten wiederholen. Oder anders ausgedrückt: Wenn der Vollmond heute im aufsteigenden Knoten durch den Erdschatten geht, wann passiert dies wieder? Wann also treffen sich drakonitischer und synodischer Monat wieder? Es stellt sich heraus (siehe oben), dass 223 synodische fast genau 242 drakonitischen Monaten entsprechen, das sind 6585.3 Tage. Das sind 18 Jahre und 10.3 bzw. 11.3 Tage, je nachdem, wie viele Schaltjahre in diesen 18 Jahren liegen. Nach dieser Zeit sind die Stellungen der Erde, des Mondes und der Knoten zueinander wieder nahezu gleich und die Finsternisse wiederholen sich. Allerdings spielen sie sich dann nicht in derselben Himmelsgegend ab, sondern ca. 5° östlich davon.

Diese 18 Jahre und 10 Tage sind die *Sarosperiode*, die schon im Altertum bekannt war. Der *Saroszyklus* oder kurz *Saros* ist jedoch anders definiert, hier kommt es deshalb immer wieder zu Irrtümern: Der Saroszyklus umfasst ca. 1500 Jahre, in denen sich um 75 Sarosperioden oder 75 Finsternisse ereignen, man kann hier auch von einer *Finsternisserie* sprechen. Allerdings gehen die 242 drakonitischen Monate nicht ganz genau mit den 223 synodischen auf, die drakonitischen sind 0.03 Tage oder 43 Minuten länger und laufen den synodischen Monaten auf lange Zeit gesehen hinterher, weshalb die Finsterniszyklen nicht ewig dauern. Das heißt, dass auf lange Zeit hin Voll- und Neumond nicht mehr exakt mit den Knoten zusammenfallen und es keine Finsternisse mehr geben wird. Natürlich beginnen dann an anderer Stelle weitere Saros-Perioden, und selbstverständlich

laufen immer mehrere Zyklen parallel zueinander ab, weil es pro Jahr immer mindestens 4 Finsternisse gibt (Halbschatten-Mondfinsternisse eingerechnet).

Wie nun läuft so ein kompletter *Saroszyklus* ab und wie viele Finsternisse umfasst er? Am Beispiel eines Sonnenfinsterniszyklus soll dies genauer beleuchtet werden. Zuvor sei noch erwähnt, dass auch die Entfernung des Mondes und damit die Variation seiner Bahngeschwindigkeit mit dem Saros korrespondiert: 239 anomalistische Monate entsprechen 6585.5 Tagen und sind somit nur gut 4 Stunden länger als 223 synodische Monate. Somit ergeben sich in der Mitte des Zyklus, in dem sich zentrale Finsternisse ereignen, durch die fast gleichen Entfernungsverhältnisse praktisch immer die gleichen Finsternistypen (totale oder ringförmige).

Die Bewegung des Mondes erfolgt rechtläufig, also von West nach Ost, während sich die Knoten rückläufig von Ost nach West bewegen. Der Mond und die Knoten kommen sich also entgegen. Sobald sich der Knoten bis auf eine Entfernung von $18\frac{1}{2}^\circ$ an den Neumond heran gearbeitet hat, reicht dies bereits für eine geringfügige partielle Bedeckung der Sonnenscheibe, und zwar des nördlichen bzw. südlichen Teils: Der Saros beginnt (**Figur 3.8**).



Figur 3.8

Wanderung der Finsternisse durch die Knotenbereiche. Die Pfeile geben die Richtungen der Wanderung der Finsternisse an.

Das Sichtbarkeitsgebiet ist beim Beginn des Saros immer eines der Polargebiete, weil der Mondschatten zunächst über den Erdnordpol oder Südpol hinweg geht: Zyklen in oder nahe dem aufsteigenden Knoten beginnen immer im Nordpolargebiet der Erde, und zwar mit einer geringen Verfinsterung der nördlichen Sonnenscheibe.

Bei Finsternissen im absteigenden Knoten finden sich analoge Verhältnisse: Sie starten im Südpolargebiet mit einer Bedeckung des südlichen Teils der Sonne. Bei den nächsten Finsternissen wird der Bedeckungsgrad immer größer, gleichzeitig verlagert sich das Sichtbarkeitsgebiet immer mehr nach Norden. Irgendwann werden die Finsternisse dann zentral, d. h. total oder ringförmig, je nachdem, ob der Mond gerade im Perigäum oder Apogäum steht. Hier erreicht die Achse des Kernschattens auch erstmalig die Erdoberfläche, während sie zu Beginn des Saros über die Erdpole hinweg geht. Zur Mitte des Zyklus haben die Finsternisse dann die längste Totalitätsdauer bzw. Ringförmigkeit. Diese sind dann im Äquatorgebiet der Erde beobachtbar. Die Kernschattenachse erreicht hier die geringste Entfernung zum Erdmittelpunkt. Irgendwann werden aus den zentralen Finsternissen wieder partielle, und die Sichtbarkeitsgebiete verlagern sich wieder in Richtung Erdpole, bedeckt ist dann nur noch ein geringer Teil der südlichen oder nördlichen Sonnenscheibe. Wenn sich der Neumond schließlich um $18\frac{1}{2}^\circ$ in westlicher Richtung vom Knoten entfernt hat,

berührt der Mond die Sonne gar nicht mehr, das Ende des Saros ist erreicht. Natürlich beginnt dann an anderer Stelle ein neuer Zyklus.

Bei Mondfinsternissen liegen die Verhältnisse ähnlich. Zyklen, die beim aufsteigenden Knoten stattfinden, beginnen stets am Nordrand des Erdschattens, der Mond durchquert ihn von Nord nach Süd. Entsprechend läuft der Mond bei Zyklen nahe dem absteigenden Knoten von Süd nach Nord durch den Erdschatten. Die maximale Totalität von gut $1\frac{3}{4}$ Stunden wird dann erreicht, wenn Knoten und Vollmondphase exakt zusammenfallen, der Erdtrabant also zentral durch den Kernschatten geht. Außerdem sind die Totalitäten generell länger, wenn die Erde in Sonnenferne steht, was Anfang Juli der Fall ist: Der Erdschatten hat dann einen größeren Durchmesser als in Sonnennähe Anfang Januar. Weiterhin ergibt sich dann im Perigäum eine längere Totalität als im Apogäum, weil der Kernschatten in Erdnähe einen größeren Durchmesser hat als in Erdferne. Zwar bewegt sich der Mond in Erdnähe schneller als in Erdferne, aber diese Differenz kann durch den längeren Weg durch den Kernschatten im Perigäum nicht ausgeglichen werden. Allerdings sind die Unterschiede für praktische Beobachtungen nahezu ohne Belang.

Ähnlich wie bei Sonnenfinsternissen muss der Knoten bei Mondfinsternissen nicht exakt mit der Vollmondphase zusammenfallen, damit es Finsternisse gibt. Da der Erdschatten wesentlich größer als der des Mondes ist, könnte der Eindruck entstehen, dass hier ein größerer «Spielraum» als bei Sonnenfinsternissen vorhanden ist. Das ist jedoch nur für totale Finsternisse der Fall: Bis zu einer Entfernung des Vollmondes von 2° vom Knoten kommt es noch zu totalen Mondfinsternissen, während der Neumond bei Sonnenfinsternissen nicht weiter als $\frac{1}{2}^\circ$ vom Knoten entfernt sein darf, damit es totale oder ringförmige Sonnenfinsternisse gibt. Insgesamt ist jedoch der «Aktionsradius» des Vollmondes geringer: Erst ab einer Entfernung von 13.5° zum Knoten berührt der Mond den Halbschatten der Erde. Ab einer Entfernung von 7.5° kommt es zu partiellen Finsternissen.

3.3 Eigenbewegungen des Mondes

3.3.1 Parallaxische Bewegungen des Mondes

Aus der Tatsache, dass Sonnenfinsternisse jeweils nur von ganz spezifischen Erdorten aus sichtbar sind (Finsternis- und Totalitätszonen auf der Erde) ergibt sich, dass der Mond von verschiedenen Erdorten zu gleichen Zeiten vor unterschiedlichem Fixsternhintergrund beobachtet werden kann. Die Unterschiede liegen im Bereich von maximal 4 Monddurchmessern oder 2° . Diese maximale Parallaxe von 2° (das heißt der größtmögliche Winkelabstand des Mondortes bei gleichzeitiger Beobachtung von der Erde aus, etwa aus gegenüberliegenden Orten auf dem Äquator) bestimmt zugleich die scheinbare Größe der Erde vom Mond aus gesehen. Der Erddurchmesser erscheint dort viermal größer als der Durchmesser der Sonne.

Dieser durch die endliche Entfernung des Mondes von der Erde und der relativ dazu nicht vernachlässigbaren Größe der Erde bedingte parallaxische Effekt kann wegen der täglichen Bewegung des Mondes jedoch auch von einem festen Ort der Erde aus beobachtet werden. Der Effekt verschwindet, wenn der Beobachter hypothetisch in den Mittelpunkt der Erde versetzt wird. Im Laufe von etwa 12 Stunden (Tagesbogen des Mondes von Mondaufgang bis Monduntergang) beträgt in der Nähe von Basel die Parallaxe in Rektaszension um 1.15° und in Deklination um 0.09° . Entsprechend ergibt sich auch eine unterschiedliche Sicht auf die Mondoberfläche um $1^\circ 02'$, manchmal tägliche *topozentrische* oder *parallaxische Libration* genannt.

3.3.2 Rotation und Libration

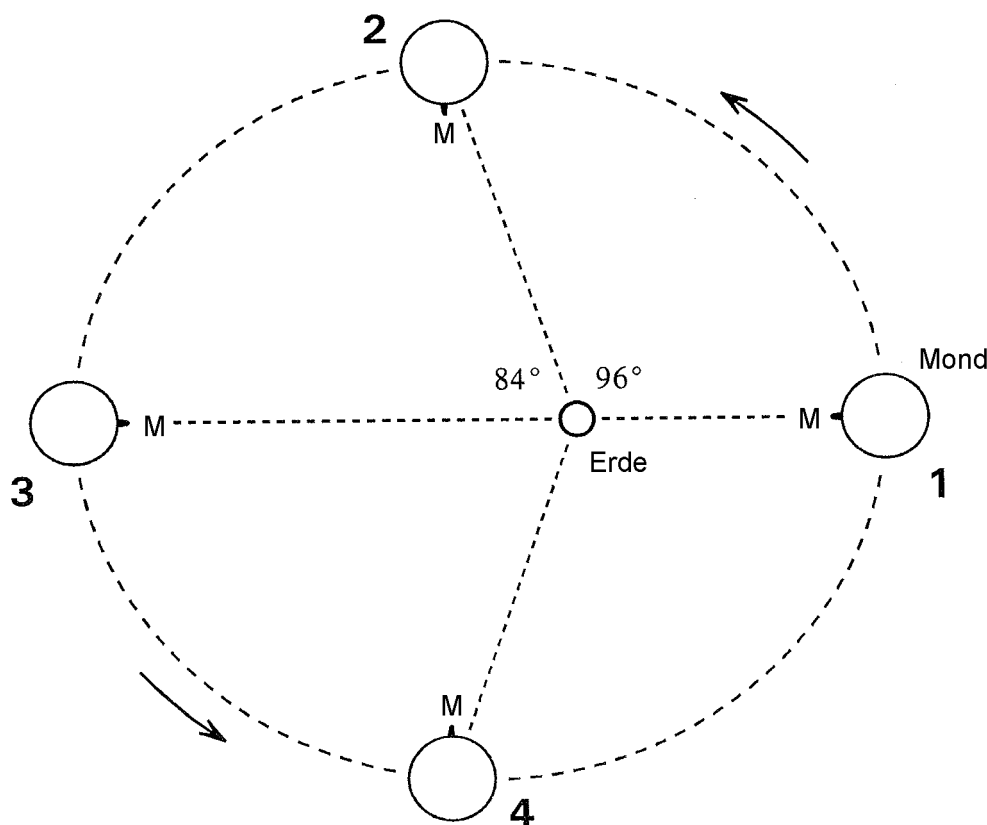
Der Mond zeigt der Erde in erster Näherung immer dieselbe Seite. Er vollzieht also eine sogenannte gebundene Drehung um die Erde (vom Ekliptiknordpol E aus gesehen im Gegenuhrzeigersinn). Mit anderen Worten, er hat eine Eigenrotation in derselben Richtung (Gegenuhrzeigersinn von E aus gesehen) und mit gleichem Betrag wie seine siderische Bewegung entlang des Tierkreises in der Tageskugel. Er dreht sich also von seiner linken östlichen Seite zu seiner rechten westlichen Seite.

Genauere Beobachtungen (zweite Näherung) zeigen, dass die Mondoberfläche im Laufe eines synodischen Monats leicht schwankt (Libration), sodass man schließlich mehr als die Hälfte des Mondes zu sehen bekommt (etwa 59% seiner ganzen Fläche). Dies weist zunächst auf unterschiedliche Geschwindigkeiten in seiner Bahn im Vergleich zu seiner regelmäßigen Eigenrotation (*optische Libration in selenographischer Länge*: Periodische seitliche Drehung um $\pm 8^\circ$) hin. Im Bereich des Perigäums etwa bewegt sich der Mond schneller auf seiner Bahn und deshalb bleibt danach seine konstant-gleichmäßige Rotation im Vergleich zur kumulierten Bahnbeschleunigung zurück. Dies bedeutet, dass am, von der Erde aus gesehen, westlichen rechten (von seiner Bewegung in Tierkreisrichtung aus gesehen «hinteren») Rand mehr von der erdabgewandten Seite des Mondes sichtbar wird. Entsprechend sieht man nach dem Durchlauf des Apogäums am östlichen linken Rand (am «vorderen» Ende seiner Bewegung) etwas von seiner Rückseite.

Die Periode der Libration in Länge ist demzufolge der anomalistische Monat. Gemäß der Begegnungsperiode des synodischen und anomalistischen Mondlaufs wiederholen sich nach 411.78 Tagen Mondphase und Libration in Länge in ähnlicher Weise.

Aus der Geometrie der Bewegung ergibt sich folgendes genauere Bild (**Figur 3.9**): Die Eigenrotation sowie die Bahnbewegung des Mondes um die Erde dauern beide exakt einen siderischen Monat. Beginnend im Perigäum (Position 1), vollzieht der Mond ein Viertel seiner Rotation, also genau 90° , in $27.32 / 4 = 6.83$ Tagen. In dieser Zeit erreicht er auf seiner Bahn Position 2, und diese ist um mehr als 90° , um 95° bis 98° , von Position 1 fortgerückt. Damit ist die Eigenrotation relativ zur Bahnbewegung des Mondes zurückgeblieben und ein Teil seines westlichen (hinteren, rechten) Randes wird sichtbar. Nach einem weiteren Viertel des siderischen Monats (Position 3: Apogäum)

stimmen Rotation (180°) und Bahnposition, gerechnet vom Perigäum aus, wieder zusammen und der Mond zeigt wieder sein mittleres Gesicht wie im Perigäum. Nach einem weiteren Viertel der Bewegung des Mondes läuft entsprechend der kumulierten Entschleunigung beim Durchgang durch das Apogäum danach die Rotation des Mondes seiner Bahnbewegung voraus (Position 4) und er zeigt deshalb etwas von seinen östlichen (vorderen, linken) Randbezirken. Mit dem letzten Viertel der Bewegung erreicht der Mond das Perigäum und zeigt wieder sein mittleres Gesicht.

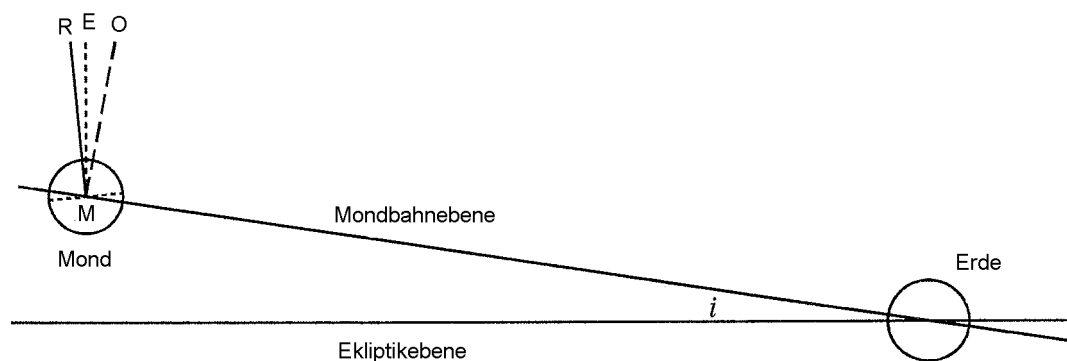


Figur 3.9

Entstehung der optischen Libration in Länge durch die periodischen Differenzen der gleichmäßigen Rotation des Mondes mit den periodischen Geschwindigkeitsschwankungen des Mondes auf seiner elliptischen Bahn um die Erde (nicht maßstabsgetreu). M bezeichnet die Mitte der Mondscheibe im Perigäum.

In dritter Näherung wird deutlich, dass von der Mondoberfläche immer wieder auch etwas über seinen Nordpol und Südpol hinaus sichtbar wird (*optische Libration in selenographischer Breite*: periodische Nickbewegung um $\pm 7^\circ$). Mit anderen Worten, man kann zeitweise mehr vom Nordrand und zeitweise mehr vom Südrand des Mondes sehen. Würde die Achse des Mondes senkrecht auf seiner Bahnebene stehen, so würde sie dem Beobachter (der sich in der Bahnebene befindet) stets unverändert erscheinen. Die Beobachtung der Libration weist also auf eine Neigung der Mondachse bezüglich der Bahn hin. Stünde die Achse senkrecht auf der Ekliptikebene, so wäre sie um 5.2° gegen die Bahn geneigt und der Beobachter könnte ein Nicken um $\pm 5.2^\circ$ sehen; beobachtet werden aber um $\pm 6.7^\circ$, die stets bei maximaler Abweichung der Mondbahn von der Ekliptik vom Mond erreicht werden. In der Nähe der Mondknoten sieht man die Mondachse jeweils von der Seite und der Blickstrahl liegt in der Äquatorebene des Mondes; dementsprechend verschwindet hier die Abweichung in Breite. Daraus folgt, dass die Mondachse noch zusätzlich 1.5° geneigt sein muss: der nördliche Teil der Mondkugel ist beim Erreichen seiner maximalen nördlichen Breite noch etwas

weiter von der Erde weggeneigt und bei Erreichen der maximalen südlichen Breite noch etwas weiter zur Erde hingeneigt (**Figur 3.10**). Dies lässt sich auch wie folgt ausdrücken (drittes Cassinisches Gesetz, siehe unten): Die Senkrechte auf der Mondbahn, die Senkrechte auf der Ekliptik und die Rotationsachse des Mondes liegen gemeinsam in einer Ebene, wobei die Ekliptiksenkrechte zwischen den beiden anderen liegt.



Figur 3.10

Entstehung der optischen Libration in Breite durch die relative Lage der Mondrotationsachse, der Bahnebene des Mondes und der Ekliptikebene (M = Mittelpunkt des Mondes, R = Rotationsachse des Mondes, E = Senkrechte auf die Ekliptikebene, O = Senkrechte auf die Bahnebene des Mondes, i = Winkel der Bahnebene des Mondes mit der Bahnebene der Erde/Sonne, das heißt mit der Ekliptikebene: 5.2°).

3.3.3 Phänomenologische und absolute Präzession der Mondachse

Aus den vorangehenden Untersuchungen ergibt sich, dass sich für den Erdbeobachter zur Rotation des Mondes im Gegenuhrzeigersinn um seine Achse (Quelle der Libration in Länge) eine Drehung der Mondrotationsachse im Uhrzeigersinn (Quelle der Libration in Breite) hinzugesellt. Dies ist die *totale phänomenologische Präzession der Mondachse* (zur phänomenologischen Präzession siehe Anhang A.1.5). Sie beschreibt einen Kegel mit dem halben Öffnungswinkel 6.7° . Die Mondachse zeigt in ihrem nördlichen Teil beim höchsten (bezüglich der Fixsternkugel nördlichsten) Stand des Mondes weg von der Erde, bei den Knoten liegt sie in einer Ebene senkrecht zum Blickstrahl und zeigt in ihrem tiefsten (südlichsten) Stand zur Erde hin.

Die Periode der Libration in Breite ist demzufolge der drakonitische Monat. Gemäß der Begegnungsperiode des synodischen und drakonitischen Mondlaufs wiederholen sich nach 346.62 Tagen Mondphasen und Libration in Breite in ähnlicher Weise.

Die Mondbahnebene ist um 5.2° gegen die Ekliptikebene geneigt und die Äquatorebene des Mondes ist wiederum um 6.7° gegen die Mondbahnebene geneigt, allerdings in entgegengesetzter Richtung. Die Neigungen heben sich daher fast auf, und der Mondäquator ist lediglich um 1.5° gegen die Ekliptik geneigt (genauerer, über längere Zeit gemittelter Wert: 1.5427°). Daher unterliegt die Sonneneinstrahlung auf dem Mond fast keinen jahreszeitlichen Schwankungen, und an den Mondpolen befindet sich die Sonne stets in der Nähe des Horizonts. Die Mondachse zeigt in ihrem nördlichen Teil ebenfalls in das Sternbild des Drachens wie die Achse der Ekliptikkugel; genauer weist sie zu den Kopfsternen des Drachens.

Da die Mondbahnebene eine eigene absolute Präzessionsbewegung ausführt (Umdrehung der Knotenlinie in 18.6 Jahren) im umgekehrten Sinne wie die Mondbewegung auf der Mondbahn, die beschriebene Konfiguration (die Senkrechte auf der Mondbahn, die Senkrechte auf der Ekliptik und

die Rotationsachse des Mondes liegen gemeinsam in einer Ebene, wobei die Ekliptiksenkrechte zwischen den beiden anderen liegt) aber – wie die Beobachtung zeigt – erhalten bleibt, muss also auch die Rotationsachse des Mondes eine absolute Präzessionsbewegung in derselben Richtung und mit derselben Geschwindigkeit wie die Mondbahnebene ausführen.

Diese *absolute Präzession der Mondachse* zeigt sich an einer Bewegung dieser Achse auf einem Kegel mit Öffnungswinkel $2 \cdot 1.5^\circ$ und einer Achse, die senkrecht auf der Ekliptikebene steht (**Figur 3.10**). Wäre diese Präzession *nicht* in der beschriebenen Weise an die Bewegung der Mondknoten gekoppelt, so ergäbe sich eine totale oder kombinierte phänomenologische Präzession der Mondachse auf einem Kegel mit einer Achse senkrecht zur Mondbahn, dessen halber Öffnungswinkel zwischen $5.2^\circ + 1.5^\circ$ und $5.2^\circ - 1.5^\circ$ schwanken würde.

Nun ist jedoch, wie oben ausgeführt, die Mondachse an die durch die Senkrechte zur Ekliptik und die Senkrechte zur Mondbahnebene aufgespannte Ebene gebunden, also gehört zur totalen phänomenologischen Präzession der Mondachse ein Kegel mit konstantem Öffnungswinkel $2 \cdot (5.2^\circ + 1.5^\circ)$.

Der Mondäquator ist um 6.7° gegen die Mondbahnebene und um 1.5° gegen die Ekliptik geneigt, der Winkel zwischen Mondbahnebene und Ekliptik variiert um $\pm 0.15^\circ$ (Schwankung der Bahnneigung). Die Neigung des Mondes bleibt aber *bezüglich der Ekliptik* konstant, daher variiert die Neigung des Mondes bezüglich seiner eigenen Bahn um $\pm 0.15^\circ$.

3.3.4 Perioden der Libration

Wie bereits erwähnt hat die Libration in Länge wegen der Abhängigkeit von Apogäum und Perigäum die Periode des anomalistischen Monats und die Libration in Breite wegen ihrer Abhängigkeit von der Knotenstellung diejenige des drakonitischen Monats. Die gegenseitigen Verhältnisse von Libration in Länge und Breite wiederholen sich demzufolge gemäß dem Aufeinandertreffen der rückläufigen drakonitischen und der rechtläufigen anomalistischen Periode, also nach jeweils knapp 6 Jahren. Gleiche Mondphasen mit derselben Libration in Länge oder Breite wiederholen sich nach 411.78 bzw. 346.62 Tagen. Fragt man nach dem Zusammentreffen gleichartiger Librationen in Länge und Breite mit denselben Mondphasen (synodische Periode), so kommt man wieder auf die Sarosperiode von 18 Jahren und 10 bis 11 Tagen. In dieser sind näherungsweise 19-mal die Periode von 346.62 Tagen und 16-mal die Periode von 411.78 Tagen enthalten. Die Librationen wiederholen sich also in einem ähnlichen Rhythmus wie die Sonnen- und Mondfinsternisse.

Die maximale Libration in Länge findet statt, wenn sich der Mond jeweils etwa in der Mitte seiner Bahn zwischen Apogäum und Perigäum bewegt. Die Libration in Länge wird Null im Apogäum und Perigäum selbst. Die Libration in Breite wird maximal, wenn der Mond sich in den nördlichsten und südlichsten Punkten seiner Bahn relativ zur Ekliptikkugel bewegt, sie wird Null in den Knotenpunkten.

Daraus folgt: Fallen Apsidenlinie und Knotenlinie zusammen, so fallen die in den Knoten für die Mondbewegung verschwindende Libration – und senkrecht dazu, näherungsweise in seinen nördlichsten und südlichsten Lagen (relativ zur Ekliptikkugel), die maximale Libration in Länge und Breite zusammen –; stehen die beiden Linien senkrecht aufeinander, so wird jeweils die eine Libration maximal, wenn die andere verschwindet.

Apogäum und aufsteigender Knoten (oder irgendeine andere Kombination von Apsiden und Knoten) treffen sich ca. alle 6 Jahre, die Apsidenlinie und die Knotenlinie ca. alle 3 Jahre und es dauert etwa 1.5 Jahre von einer gleichliegenden zur senkrechten Lage (oder umgekehrt) der beiden Linien.

3.3.5 Veranschaulichung der Libration

Die totale topozentrische (Beobachter-orientierte) Libration setzt sich zusammen aus den Librationen in Länge und Breite sowie der täglichen topozentrischen parallaktischen Libration. Im Folgenden werden nur die geozentrischen, also die auf den Erdmittelpunkt bezogenen Librationen in Länge und Breite betrachtet.

Bewegte sich der Mond anstatt auf einer Ellipse, in deren einem Brennpunkt die Erde steht, auf einem Kreis um die Erde, so gäbe es keine Libration in Länge und der senkrecht zur Rotationsachse des Mondes liegende Mondäquator würde für einen Erdbeobachter auf und ab sowie hin und her schwingen aufgrund der phänomenologischen Kegelbewegung der Mondachse entgegen seiner Bahnbewegungsrichtung (also im Uhrzeigersinn). Diese Bewegung der Mondachse wurde weiter oben als totale phänomenologische Präzession gekennzeichnet. Ihr kommt generell aus rein geometrischen Gründen (siehe Abschnitt 1.4) der Charakter zu, dass der jeweils erdnächste Punkt des Mondes eine lemniskatische Bewegung durchläuft, deren Qualität gemäß den **Figuren 1.5** oder **2.27** geartet ist.

Nun tritt beim Mond, wie beschrieben, die Besonderheit ein, dass seine Eigenrotation genau auf seine siderische Bahnbewegung und damit auf seine phänomenologische Präzession abgestimmt ist mit dem Resultat, dass er der Erde annähernd immer dieselbe Seite zeigt. Denn einer phänomenologischen Umdrehung seiner Achse entspricht genau eine im umgekehrten Sinne verlaufende Eigenrotation. Dies hat zur Konsequenz, dass man, anstatt wie bisher der Bewegung des jeweils erdnächsten Punktes (dem kein fest mit dem Mondkörper verbundener Punkt entspricht) zu folgen, auch die Bewegung eines Punktes *auf* der Mondoberfläche selbst in Betracht ziehen kann, da diese Fläche zwar ein wenig hin und her sowie auf und ab «schwankt», sich aber nicht wegdreht.

Man betrachte jetzt also einen Punkt auf der Mondoberfläche, der in einer mittleren Lage der Mondbewegung (das heißt hier: in der Position der Mondknoten) auf dem Mondäquator der Erde am nächsten liegt. Er soll hier der eigentliche *Mittelpunkt M_0 der Mondscheibe* genannt werden, den man sich für die im folgenden beschriebenen Bewegungen fest mit dieser verbunden denken muss.

Sieht man zunächst wieder ab von der Libration in Länge, denkt man sich also den Mond auf einer Kreisbahn laufend, so beschreibe M_0 aufgrund der allein anwesenden Libration in Breite bloß eine Lemniskate, die qualitativ ebenso verläuft wie in den Figuren **1.5** oder **2.27**. Man beachte allerdings, dass aus rein geometrischen Gründen die lemniskatische Kurve, wie sie von M_0 durchlaufen wird, relativ zur Bahnbewegung des jeweils erdnächsten Punktes, am Mittelpunkt der Lemniskate gespiegelt ist: Wenn M_0 auf der oberen Nordhälfte des Mondes nach links unten läuft, läuft der erdnächste Punkt gleichzeitig auf der unteren Südhälfte des Mondes nach rechts oben etc.

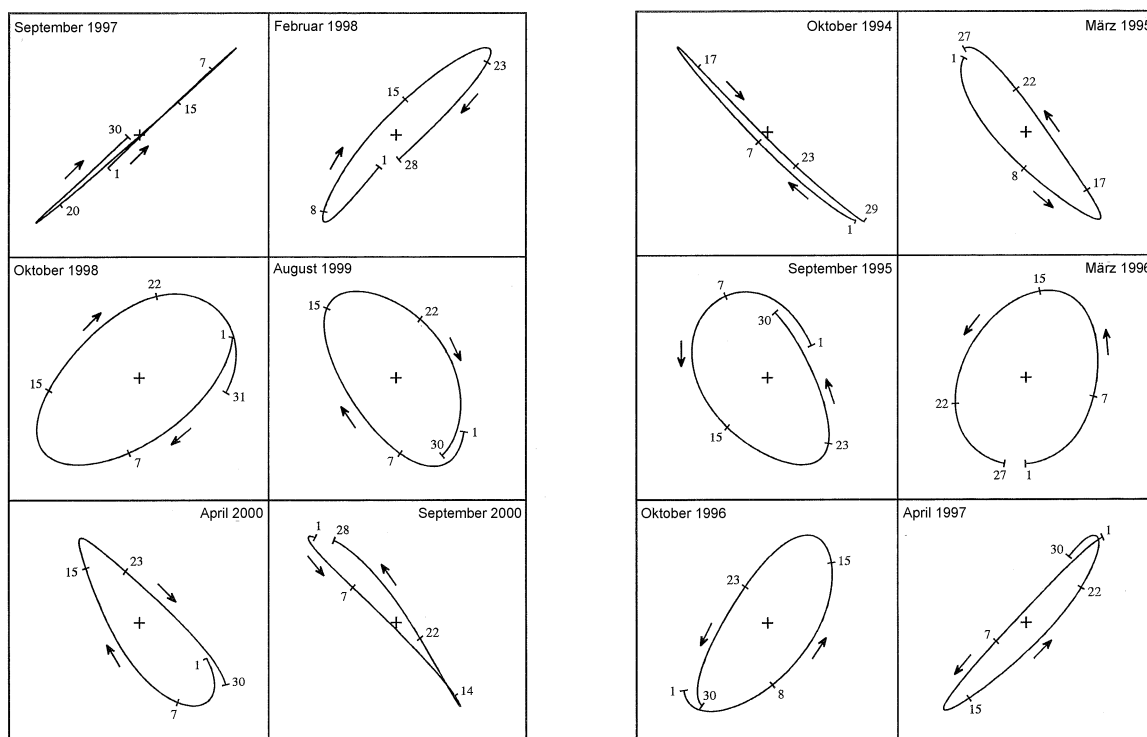
Wird dagegen die Libration weggelassen, läge also die Mondbahn in der Ekliptikebene *und* wäre seine Rotationsachse senkrecht dazu, würde der Punkt M_0 der Mondscheibe wegen der allein anwesenden Libration in Länge nur auf dem Mondäquator um $\pm 8^\circ$ hin- und herschwingen. Die tatsächliche Bewegung des fest mit dem Mondkörper verbundenen Punktes M_0 der Mondscheibe setzt sich also aus den genannten beiden Komponenten (Libration in Länge und Breite) zusammen.

Diese Bewegung soll nun in ihrem konkreten Verlauf näher betrachtet werden. Als *Ausgangslage* wird festgelegt: Apsidenlinie und Knotenlinie fallen zusammen, das Perigäum liege im aufsteigenden Knoten und der Mond durchlaufe gerade den aufsteigenden Knoten. In dieser Lage ist der erdnächste Punkt des Mondes auf dem Mondäquator gleich dem Mittelpunkt M_0 der Mondscheibe. Zunächst ist klar, dass der gesamte Kurvenverlauf des fest mit dem Mondkörper verbundenen Punktes M_0 innerhalb eines invarianten sphärischen Vierecks oder Rechtecks auf der phänomenologischen Mondscheibe stattfindet, mit ca. 7° Höhe und 8° Breite; der Mittelpunkt dieses Vierecks liegt im Mittelpunkt M_0 der Mondscheibe für die genannte Ausgangslage.

Das Zusammenfallen der Apsidenlinie und der Knotenlinie hat zur Folge, dass die ohne die Libration in Länge stattfindende (oben beschriebene) lemniskatische Bewegung des Punktes M_0 der Mondscheibe nur bei nördlicher (oberer) und südlicher (unterer) Abweichung (relativ zur Ekliptikugel) «gestört» wird, da diese Abweichung in mittlerer Lage Null ist.

Gemäß der Ausgangslage kommt es nun zur größten *linken* (vorderen, östlichen) Libration in Länge bei der Wanderung des Mondes vom aufsteigenden Knoten bis zu seiner nördlichsten Lage relativ zur Ekliptikkugel. Denn wenn der Mond mehr von seiner *rechten* (hinteren, westlichen) Seite zeigt, wandert entsprechend der Punkt M_0 der Mondscheibe nach *links*. Links und rechts bezieht sich von hier ab immer auf die phänomenologische Bewegung des Punktes M_0 .

Bewegt sich also der Mond vom Perigäum im aufsteigenden Knoten in seine nördlichste Lage relativ zur Ekliptikkugel, so wandert der Punkt M_0 zugleich nach oben und nach links, seine Kurve verläuft also etwa in der Diagonalen dieses Vierecks; mit der Weiterbewegung des Mondes in das Apogäum im absteigenden Knoten und darüber hinaus bewegt er sich wieder zurück (ungefähr) in die Ausgangslage und weiter nach rechts unten entlang der Diagonalen des Vierecks und dann wieder zurück.



Figur 3.11

Bahnkurve eines mittleren Punktes auf dem Mondäquator während einer Periode der beiden Librationen in Länge und Breite während etwa 6 Jahren.

Nach 1.5 Jahren ist das Perigäum im nördlichsten Punkt der Mondbahn relativ zur Ekliptikkugel angekommen und die größte Libration des Punktes M_0 in Länge nach links ist beim absteigenden Mondknoten angelangt, wo die Libration in Breite gleich Null ist. Dies bedeutet, dass sich die Kurve des Punktes M_0 der Mondscheibe zu einem kreisförmigen Oval aufweitet (**Figur 3.11**: März 1995 bis März 1996): die maximale rechte und linke Libration des Punktes M_0 in Länge wandern in den aufsteigenden bzw. absteigenden Mondknoten und damit läuft der Mond im aufsteigenden Knoten vom rechten mittleren Rand des Vierecks nach links im Gegenuhrzeigersinn in die Mitte nach oben.

In weiteren 1.5 Jahren wandert das Perigäum in den absteigenden Knoten, und die Kurve von M_0 zieht sich wieder fast auf die (andere) Diagonale des Vierecks zurück (**Figur 3.11**: Oktober 1996 bis

September 1997). In den darauffolgenden 1.5 Jahren weitet sich die schmale Diagonalkurve wieder bis zu einem kreisförmigen Oval, das nun aber in der umgekehrten Richtung durchlaufen wird (**Figur 3.11**: Februar 1998 bis April 2000): Denn jetzt ist das Perigäum im südlichsten Punkt der Mondbahn und die maximale rechte und linke Libration des Punktes M_0 in Länge liegt nun im absteigenden bzw. aufsteigenden Knoten. Dies bedeutet, dass nun der den aufsteigenden Knoten durchlaufende Mond seine Bahn am linken Rand des Vierecks nach rechts oben in die Mitte vollzieht.

Mit anderen Worten: Die Durchlaufrichtung von M_0 auf seiner ovalen Kurvenform hat sich während der Wanderung des Perigäums durch den absteigenden Knoten geändert, also beim Durchgang durch die Diagonallage dieser Kurve. Denn genau dort durchläuft die Kurvenmetamorphose im Wesentlichen die schmale lemniskatische Form, die ohne Libration in Länge stattfinden würde (**Figur 3.11**: September 2000). Dies ermöglicht die Umkehrung des Durchlaufsinns für die ovalen Kurvenformen.

Damit ergibt sich folgende Kurvenmetamorphose für den Verlauf des Punktes M_0 während der gemeinsamen 6-Jahres-Periode der Librationen in Länge und Breite innerhalb des Vierecks auf der Mondscheibe (**Figur 3.11**: Oktober 1994 bis September 2000): Beginnend mit der genannten Ausgangslage verläuft die Kurve als schmale Lemniskate in der Diagonale (von links oben nach rechts unten oder umgekehrt), weitet sich zur ovalen kreisförmigen Kurve, welche im Gegenuhrzeigersinn durchlaufen wird, wird wieder zu einer schmalen Lemniskate in der anderen Diagonale (von links unten nach rechts oben oder umgekehrt) und weitet sich zu einer ovalen Kurve im Uhrzeigersinn, bis sie sich wieder zur schmalen Lemniskate zusammenzieht.

3.3.6 Zusammenfassung: Eigenrotation und Bahnbewegung des Mondes

Die wesentlichen Zusammenhänge zwischen der Eigenrotation des Mondes und seiner Bahnbewegung kann etwa so zusammengefasst werden (*Cassinische Gesetze* für die Mondbewegung); dabei wird der Bewegungssinn vom Ekliptiknordpol E aus beurteilt.

- Der Mond rotiert gleichmäßig um seine Polachse im Gegenuhrzeigersinn; seine Rotationsperiode ist identisch mit der mittleren siderischen Periode seines Umlaufs um die Erde (ebenfalls im Gegenuhrzeigersinn).
- Die Neigung der Mondachse gegen die Ekliptik bleibt konstant.
- Die Knoten des Mondäquators mit der Ekliptik (Schnittpunkte der Schnittgeraden der Mondäquatorebene und der Ekliptikebene mit der Ekliptik) und die Mondknoten auf der Ekliptik (genauer: der absteigende Knoten des Mondäquators auf der Ekliptik und der aufsteigenden Knoten der Mondbahn auf der Ekliptik) fallen zusammen und präzedieren gemeinsam (im Uhrzeigersinn).

3.4 Einige Feinheiten der Mondbewegung

3.4.1 Schwankungen der großen Halbachse

Der Mittelwert 383397.3 km der große Bahnhalbachse der elliptischen Mondbahn unterliegt sich zahlreichen periodischen Schwankungen. Die bedeutendsten sind die folgenden Schwankungen:

$$\begin{array}{ll} \pm 3400.4 \text{ km} & \text{Periode 14.76 Tage,} \\ \pm 635.6 \text{ km} & \text{Periode 31.81 Tage.} \end{array}$$

Die erstere Schwankung hat ihren größten positiven Wert bei Vollmond und Neumond, der größte negative Wert wird im ersten und letzten Viertel des Mondes angenommen.

3.4.2 Schwankungen der Exzentrizität

Dem Mittelwert 0.055546 der Exzentrizität der elliptischen Mondbahn überlagern sich ebenfalls zahlreiche periodische Schwankungen. Die bedeutendsten Schwankungen sind:

$$\begin{array}{ll} \pm 0.014217 & \text{Periode 31.81 Tage,} \\ \pm 0.008551 & \text{Periode 205.9 Tage.} \end{array}$$

Die Exzentrizität nimmt ihr Maximum an, wenn die große Bahnhalbachse der Mondbahn in Richtung der Sonne zeigt. Dies geschieht im Mittel alle 205.9 Tage. Dies ist etwas mehr als ein halbes Jahr, da die Apsidenlinie gleichzeitig in rechtläufiger Richtung (in Richtung der Mondbewegung) weiterschreitet. Sie nimmt ein Minimum an, wenn die große Halbachse senkrecht zur Sonne steht.

Diese Schwankung wird von der sich schneller verändernden erstgenannten Schwankung überlagert.

3.4.3 Schwankungen der Drehung der Knotenlinie

Der Bewegung der Mondknoten in 18.6 Jahren überlagern sich periodische Schwankungen. Der größte Schwankungsterm ist:

$$\text{Amplitude } \pm 1.4979^\circ \quad \text{Periode 173.3 Tage.}$$

Aufgrund dieser Schwankung steht die Knotenlinie kurzzeitig beinahe still, wenn sie in Richtung Sonne zeigt.

3.4.4 Schwankungen der Bahnneigung

Die dominierende Schwankung der Bahnneigung der Mondbahn ist folgende:

$$\text{Amplitude } \pm 0.14^\circ \quad \text{Periode 173.3 Tage}$$

Die Neigung nimmt ein Maximum an, wenn die Knotenlinie der Mondbahn in Richtung der Sonne zeigt. Dies geschieht im Mittel alle 173.3 Tage. Dies ist etwas weniger als ein halbes Jahr, da die Knotenlinie sich gleichzeitig rückläufig (entgegengesetzt der Mondbewegung) bewegt.

3.4.5 Schwankungen der Drehung der Apsidenlinie

Der Drehung der Apsidenlinie überlagern sich ebenfalls zahlreiche periodische Schwankungen. Die größten Terme sind:

Amplitude $\pm 15.448^\circ$ Periode 31.81 Tage.

Amplitude $\pm 9.462^\circ$ Periode 205.9 Tage.

Im Zuge dieser Schwankungen kann sich das Perigäum bis zu 30° von seiner mittleren Lage entfernen.

3.4.6 Evekation

Neben der durch die Ellipsenform der Mondbahn bedingten periodischen Differenzen der Winkelgeschwindigkeit des Mondes gibt es eine viel kleinere periodische Schwankung, die sogenannte *Evekation* (lat. *evehere, evertum*: hinausführen, hinausfahren):

Amplitude $\pm 1.27^\circ$ Periode 31.81 Tage.

Die Evekation ist Null, wenn sich die Sonne in der Mitte zwischen Mond und Perigäum befindet, oder von diesem Punkt 90° oder 180° entfernt ist.

3.4.7 Variation

Die Variation hängt nur von der Elongation des Mondes ab, also von seinem Winkelabstand zur Sonne und damit von den Mondphasen. Sie verschwindet, wenn die Elongation 0° , 90° , 180° oder 270° beträgt, also bei Neumond, Vollmond und den beiden Halbmonden. Ihre Maximalwerte von $\pm 0.658^\circ$ erreicht sie zwischen diesen Bahnpunkten, also in den so genannten Oktanten (45° , 135° , 225° , 315°). Sie variiert daher mit einer Periode von einem halben synodischen Monat:

Amplitude $\pm 0.658^\circ$ Periode 14.8 Tage.

3.4.8 Jährliche Gleichung

Der Mond bewegt sich etwas langsamer, wenn das Erde-Mond-System sich in Sonnennähe befindet, als beim Perihel und etwas schneller beim Aphel. Die jährliche Gleichung hat eine Periode von einem anomalistischen Sonnenjahr.

Amplitude $\pm 0.1864^\circ$ Periode 365.25964 Tage.

Diese Schwankung hat eine Schwankung der Umlaufzeit des Mondes um ± 10 Minuten zur Folge.

3.4.9 Parallaxische Gleichung

Der sich näher zur Sonne befindliche Neumond bewegt sich etwas langsamer als der Vollmond. Die Abweichung vom Mittelwert ist in den Halbmondphasen am größten.

Amplitude 0.0356° Periode 29.53 Tage.

Die Periode ist gleich einem synodischen Monat.

4. Vom geozentrischen zum heliozentrischen Weltbild

Bevor der Übergang zum heliozentrischen Weltbild vollzogen werden kann, muss erst ein Gesamtbild der rhythmisch wechselnden Sonneneinwirkungen auf die Erde erarbeitet werden. Daraus wird sich dann die heliozentrische Perspektive als naheliegende Interpretation dieser Bewegungsphänomene ergeben.

4.1 Verlauf der Sonnenlichtgrenzen

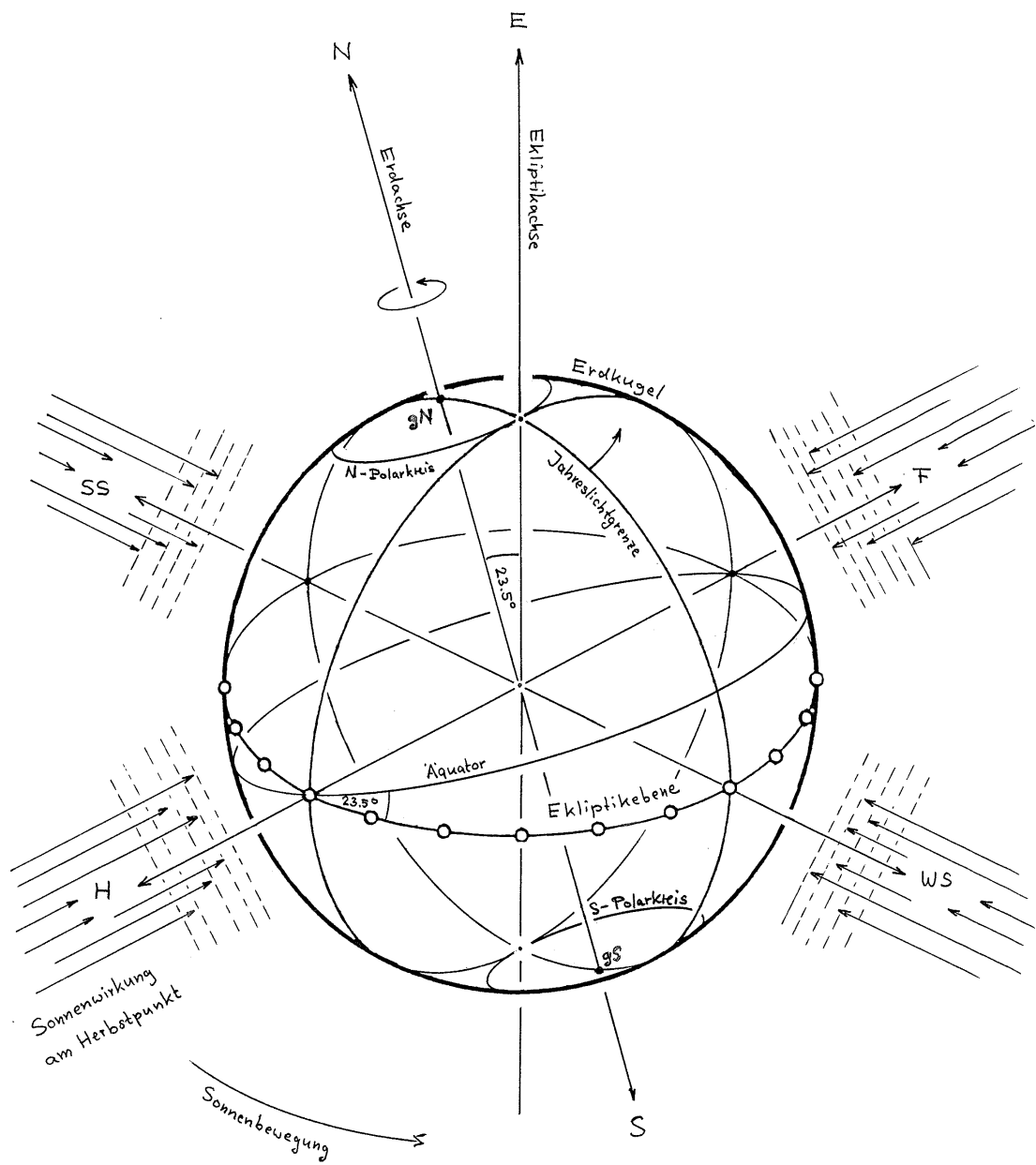
4.1.1 Verlauf der Jahreslichtgrenzen

Man betrachte die als Kugel aufgefasste Erde als Ganzes und sehe zunächst ab von der Tagesbewegung (keine Bewegung der Tageskugel). Von der Erdkugel kommen hier nur diejenigen Eigenschaften in Betracht, die allein der Jahresbewegung der Sonne im Verhältnis zur Tagesbewegung (das heißt den Jahreszeiten auf der Erdkugel) und nicht dem konkreten geographischen Ort zugehören, insbesondere also die Pole, die Polarkreise, die Wendekreise und der Erdäquator (siehe dazu **Figur 2.12**).

Im Jahreslauf wandert die Sonne von West nach Ost durch den Tierkreis. Man kann sich zunächst fragen, wie die dadurch bedingte Lichtgrenze aussieht und wie sie sich bewegt. Für die Erde als Ganzes ist diese Lichtgrenze wegen des nahezu parallelen Lichteinfalls von der Sonne im Wesentlichen ein Großkreis. Ist die Sonne etwa im Herbstpunkt, so verläuft diese Grenze durch die geographischen Pole (**Figur 4.1**). Dabei ist die Sonnenrichtung senkrecht zur Verbindungsebene von Erdachse und Ekliptikachse. Wandert die Sonne zur Wintersonnenwende, so entfernt sich diese Grenze vom Nordpol, sodass dieser ganz in den Schattenbereich zu liegen kommt (Nordpolarnacht) und überschreitet den Südpol derart, dass dieser ganz im Lichtbereich bleibt (Südpolarstag). Die Jahreslichtgrenze dreht sich dabei also von West nach Ost, das heißt von Norden her gesehen im Gegenuhrzeigersinn. In der Wintersonnenwende berührt dieser Grenzgroßkreis gerade den nördlichen und südlichen Polarkreis und ist senkrecht zur oben beschriebenen Lichtgrenze für die Sonne am Herbstpunkt. Hier liegt die Erdachse mit der Ekliptikachse in einer Ebene mit der Sonne. Danach wird die ganz in Licht getauchte Südpolarkappe immer kleiner und entsprechend die im Schatten liegende Nordpolarkappe ebenfalls kleiner, bis am Frühlingspunkt die Lichtgrenze wieder durch die geographischen Pole geht.

Da die Sonne auf der Ekliptik wandert und die jeweiligen Lichtgrenzen Großkreise sind, so stehen alle Lichtgrenzen senkrecht zur Ekliptik, bilden also ein Großkreisbüschel, das seine beiden Pole in den Durchstoßpunkten der Ekliptikachse mit der Erdkugel hat (**Figur 4.1**). Diese Durchstoßpunkte liegen auf den Polarkreisen.

Anstatt der Lichtgrenze, die mit der Grenze der gleichzeitigen Auf- und Untergänge der Sonne auf der Erde zusammenfällt, hätte man auch diejenigen Erdorte betrachten können, wo entweder die Sonne gleichzeitig den lokalen Zenitmeridian durchschreitet, das heißt eine obere Kulmination hat (Mittagsgrenze) oder die Sonne gleichzeitig eine untere Kulmination mit dem Zenitmeridian hat (Mitternachtsgrenze).

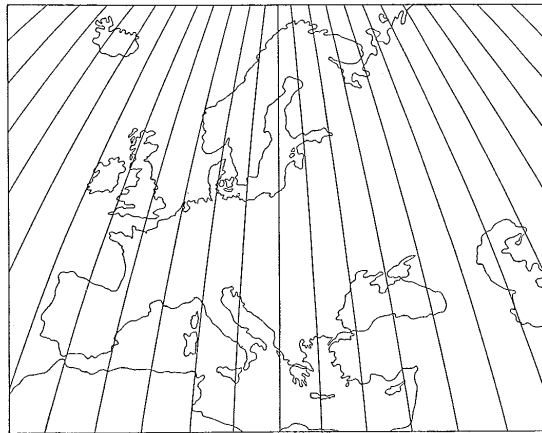


Figur 4.1

Erdkugel mit astronomisch bedingten Eigenschaften. gN und gS bedeuten geographischer Nord- und Südpol.

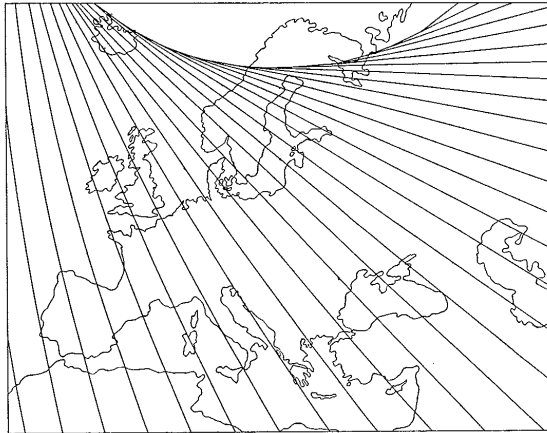
4.1.2 Verlauf der Tageslichtgrenzen

Ist der Verlauf der Jahreslichtgrenzen bekannt, so lässt sich daraus leicht eine Übersicht über den Verlauf der sich wandelnden Tageslichtgrenzen gewinnen. Zunächst ist klar, dass sich die beiden Durchstoßpunkte der Ekliptikachse mit der Erdkugel täglich einmal auf den Polarkreisen herumbewegen. Die Tageslichtgrenzen sind Großkreise, die sich dabei im Wesentlichen von Ost nach West bewegen, also entgegengesetzt zur Bewegung der Jahreslichtgrenzen. Ist die Sonne im Herbstpunkt, so sind die Tageslichtgrenzen Großkreise durch die geographischen Pole, fallen also im Wesentlichen mit den Erdmeridianen zusammen (**Figur 1.4** und **4.2**). In diesem Zeitpunkt bleibt während eines vollen Tages kein Punkt auf der Erdkugel unbeleuchtet. Wandert die Sonne zur Wintersonnenwende, so bleiben die Tageslichtgrenzen (insbesondere etwa die Kurven gleichzeitiger Sonnenaufgänge) natürlich Großkreise, gehen aber nicht mehr durch die geographischen Pole, sondern berühren jeweils einen Kleinkreis (Parallelkreis zum Äquator) mit Mittelpunkt in diesen Polen (**Figur 4.6**). Innerhalb des Kleinkreises um den Nordpol bleibt es dunkel (Nordpolarnacht) und innerhalb des gleich großen Kleinkreises um den Südpol immer hell (Südpolartag). Bei der Wintersonnenwende selbst berühren alle Tageslichtgrenzen die Nord- und Südpolarkreise (**Figur 4.3, 4.4, 4.5, 4.6**). Wandert die Sonne weiter zum Frühlingspunkt, so werden die Kleinkreise, welche durch die Tageslichtgrenzen berührt werden, immer kleiner, bis sie an den Polen zu einem Punkt zusammenschrumpfen, wobei die Tageslichtgrenzen wieder zu Meridianen durch die geographischen Pole werden (**Figur 4.2**) und bei der Weiterwanderung der Sonne über den Frühlingspunkt hinaus wieder größer werden (**Figur 4.3** und **4.4**). Die Tageslichtgrenzen bilden also nur dann annähernd ein Großkreisbüschel mit Polen, wenn die Sonne am Frühlings- oder am Herbstpunkt steht.



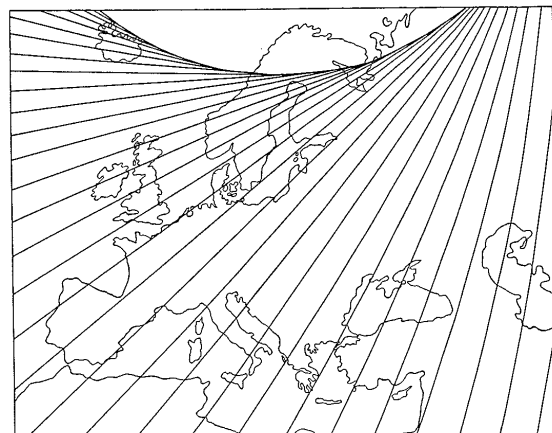
Figur 4.2

Kurve gleichzeitiger Sonnenauf- und Sonnenuntergänge am 21. März und 23. September. Zeitlicher Abstand der Linien: 20 Minuten.



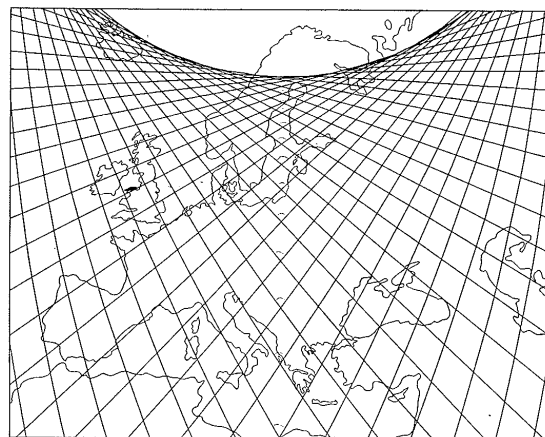
Figur 4.3

Kurve gleichzeitiger Sonnenaufgänge am 21. Juni oder gleichzeitiger Sonnenuntergänge am 22. Dezember. Zeitlicher Abstand der Linien: 20 Minuten



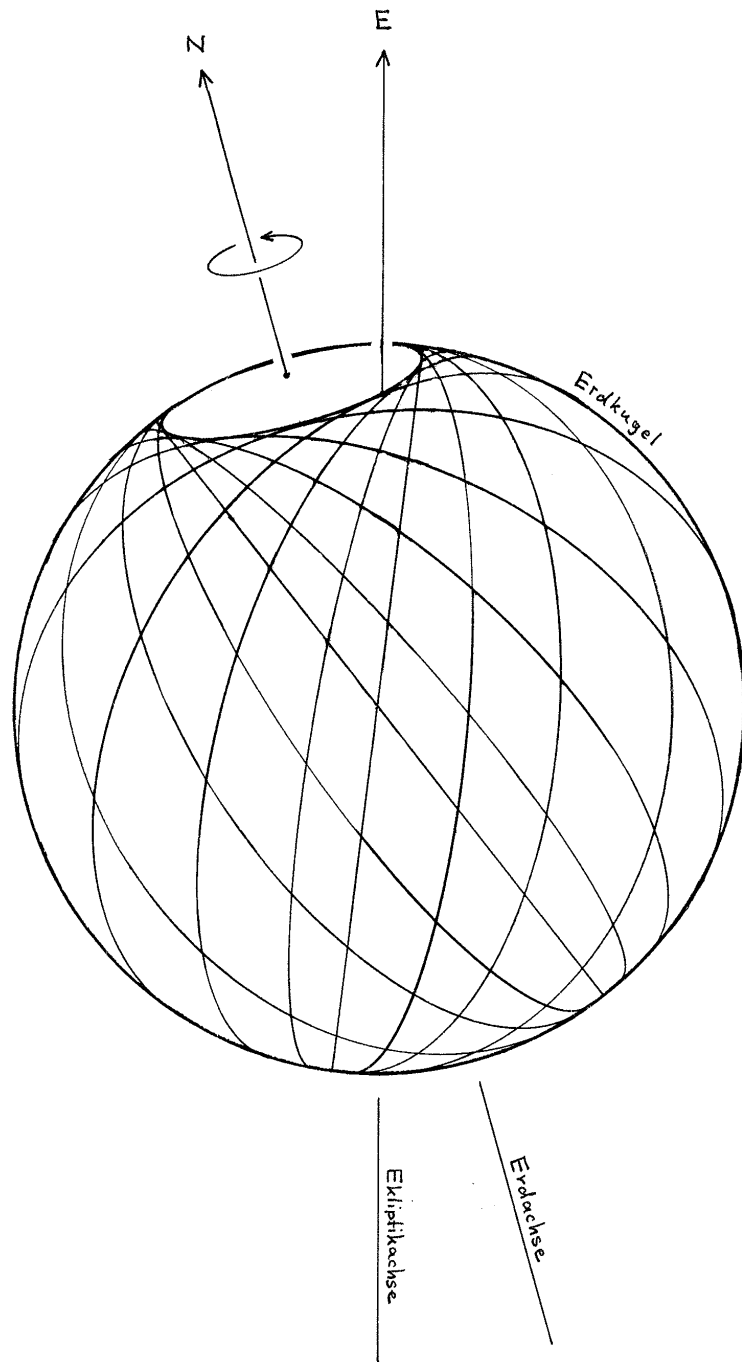
Figur 4.4

Kurve gleichzeitiger Sonnenaufgänge am 22. Dezember oder gleichzeitiger Sonnenuntergänge am 21. Juni. Zeitlicher Abstand der Linien: 20 Minuten.



Figur 4.5

Zusammenfassung der Figuren 4.3 und 4.4: Kurve gleichzeitiger Sonnenauf- und Sonnenuntergänge



Figur 4.6

Qualitative Darstellung der Großkreise gleichzeitiger Sonnenauf- und Sonnenuntergänge auf der Erdkugel.

Die Bewegung der Sonne auf der Ekliptik führt zu einer Verschiebung des beleuchteten Teils der ohne Tagesbewegung gedachten Erdkugel während eines Jahres. Die Lichtgrenze ist ein Großkreis, der sich von West nach Ost um die Durchstoßpunkte der Erdkugel mit der Ekliptikachse dreht; vom Ekliptiknordpol auf die Ekliptik her gesehen geht diese Bewegung im Gegenuhrzeigersinn, gleichlaufend mit der Sonnenbewegung auf der Ekliptik. Die Linie der Geschwindigkeits- und Abstandsmaxima des Sonnenlaufs im Verhältnis zur Erde, das heißt das Aphel und das Perihel verbindende Apsidenlinie, dreht sich dabei sehr langsam ebenfalls in Richtung der Sonnenbewegung (**Figur 4.7** unten).

Nimmt man die Bewegung des Frühlingspunktes mit hinzu, so ergibt sich eine Drehung der im Wesentlichen fest mit der Fixsternkugel verbundenen Ekliptikkugel relativ zur (raumfest gedachten) Tageskugel bzw. Erdkugel in derselben Richtung wie der Sonnenlauf, das heißt also von Norden gesehen im Gegenuhrzeigersinn. Dadurch dreht sich die den Frühlingspunkt mit dem Herbstpunkt verbindende *Äquinoktiallinie* im Uhrzeigersinn durch die Ekliptik (**Figur 4.7** unten).

Denkt man sich nicht die Tageskugel raumfest, sondern die mit der Fixsternkugel im Wesentlichen fest verbundene Ekliptikkugel, so muss sich anstatt einer Drehung der Ekliptikkugel im Gegenuhrzeigersinn, die Erdachse im Uhrzeigersinn um die Ekliptikachse drehen, das heißt auf einem Kegel mit Spitze im Erdmittelpunkt und Öffnungswinkel $2 \times 23.5^\circ$ wandern (**Figur 4.7** oben).

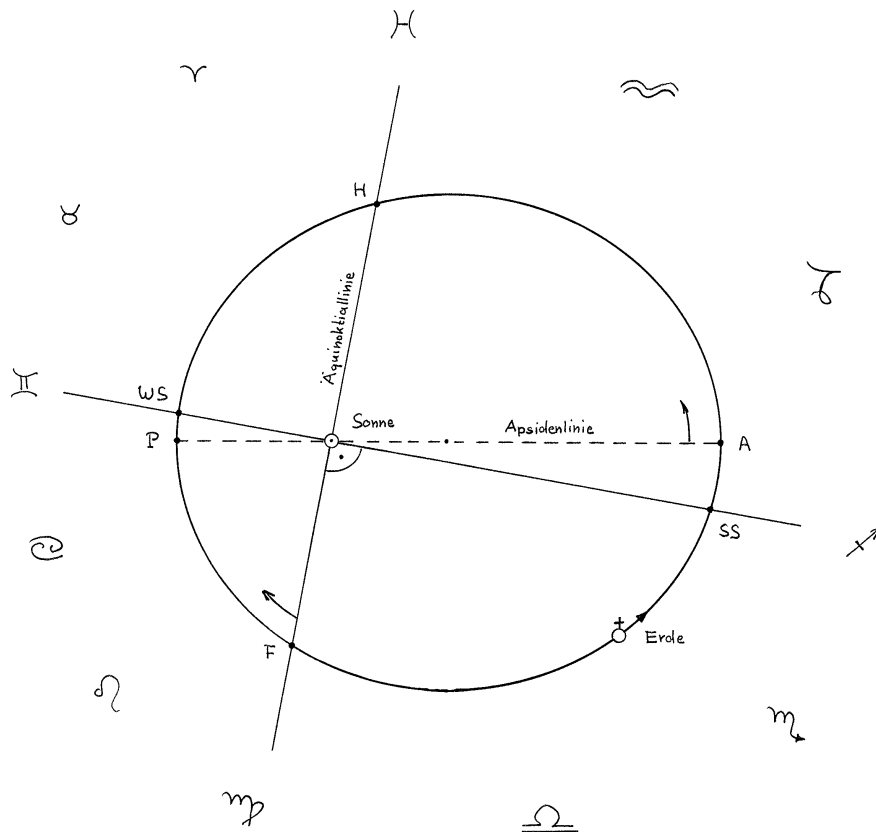
4.2 Vom geozentrischen zum heliozentrischen Gesichtspunkt

4.2.1 Bewegung der Erde um die Sonne: Jahresbahn und Präzession

Bisher hatten alle drei Himmelskugeln, die Tageskugel, die Ekliptikkugel sowie die Fixsternkugel ihren Mittelpunkt in der Erdkugel. Ein wesentlicher Schritt beim Übergang vom geozentrischen zum heliozentrischen Weltbild besteht darin, den Mittelpunkt der Ekliptikkugel zusammen mit der Fixsternkugel in die Sonne zu versetzen. Damit wird die Sonne zum Ruhepunkt im Kosmos und der Erde wird eine Bahn um die Sonne zuerteilt. Da die Sonne geozentrisch vom Nordpol des Äquators oder der Ekliptik aus gesehen im Gegenuhrzeigersinn läuft, muss die Erdbewegung um die Sonne im selben Sinn verlaufen (**Figur 4.7**). Den Unregelmäßigkeiten im geozentrischen Verlauf der Sonne wird man im Sinne von Kepler durch die besondere Gestalt der Erdbahn, die immer noch Ekliptik genannt wird, gerecht. Man hat es nun zu tun mit dem *Aphel* (Sonnenferne) und *Perihel* (Sonnennähe) der Erde mit den entsprechenden Geschwindigkeitsmaxima und Distanzmaxima.

Die ersten beiden *Kepler'schen Gesetze für die Erdbahn* (und die Bahnen aller übrigen Planeten und Planetoiden) lauten (**Figur 4.8**):

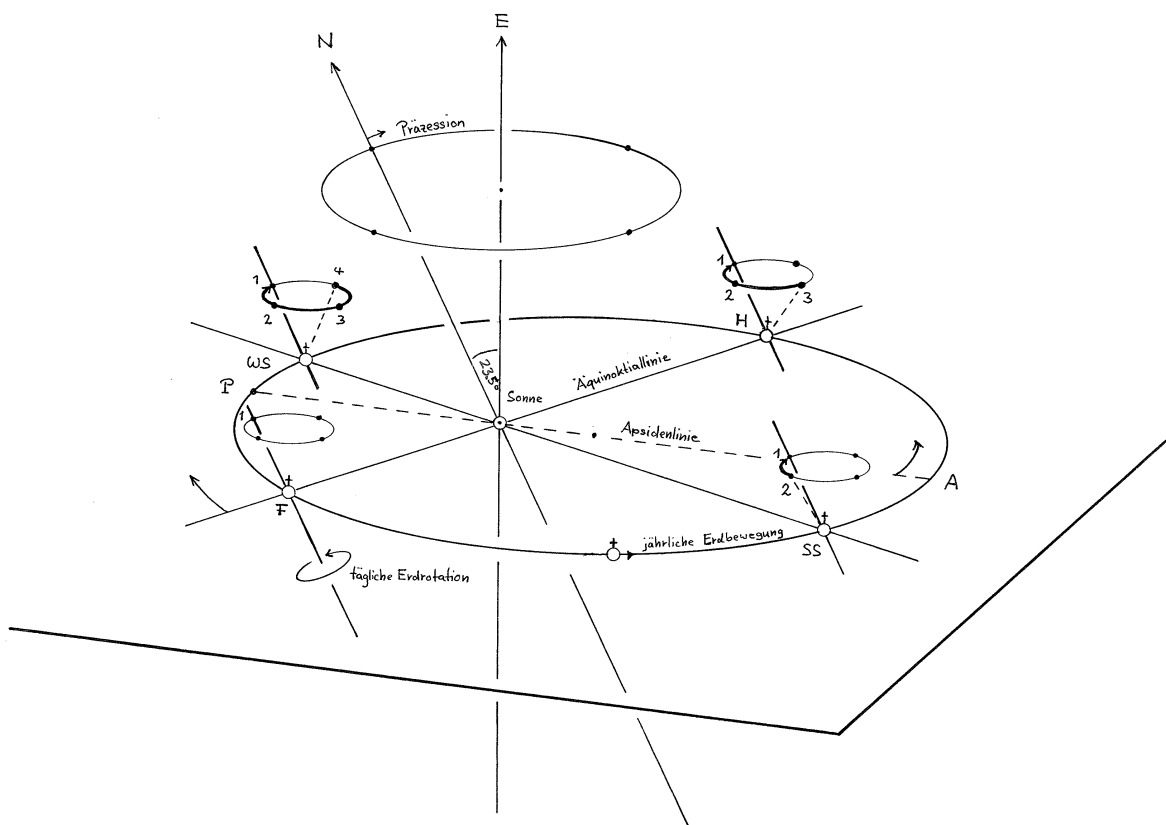
- (1) Die Erdbahn ist eine Ellipse, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.
- (2) Der Radiusvektor Sonne-Erde überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.



Figur 4.8

Erdbahn um die Sonne. Blick vom Ekliptiknordpol senkrecht auf die Ekliptikebene (Ellipse qualitativ).

Das zweite Gesetz erfasst die Tatsache, dass die Erde im Aphel langsamer und im Perihel schneller läuft. Die Richtungen zu den Tierkreisbildern sind um die Erdbahn so angeordnet, dass von der Erde aus gesehen die Sonne in der gewohnten Reihenfolge den Tierkreis durchwandert. Man beachte, dass die Äquinoktiallinie senkrecht auf der Verbindungsgeraden von Sommer- und Wintersonnenwende steht, denn die entsprechenden Jahreslichtgrenzen auf der Erdkugel sind ebenfalls senkrecht aufeinander (**Figur 4.1** und **4.7** unten).



Figur 4.9

Erdbahn um die Sonne mit Bewegung der Erdachse. Bei einer gebundenen Drehung hätte die Erdachse in den Bahnorten F, SS, H und WS die Stellungen 1, 2, 3 und 4.

Geometrisch gesehen ist es naheliegend, die Erde zunächst in einer von Norden her gesehen im Gegenuhrzeigersinn verlaufenden *gebundenen Drehung* auf einer nahezu kreisförmigen Ellipse um die Sonne laufen zu lassen. Die maximale Distanz Sonne-Erde im Aphel ist $r_A = 152.1 \cdot 10^6$ km und die minimale Distanz im Perihel gleich $r_P = 147.1 \cdot 10^6$ km. Die Exzentrizität dieser Ellipse ist definiert durch $(r_A - r_P) / (r_A + r_P)$ und hat den Wert 0.0167, ist also nahezu kreisförmig. Die mittlere Bahngeschwindigkeit ist um 29.783 km/s.

Die genannte gebundene Bewegung bedeutet, dass der Sonne immer dieselbe Seite der Erde zugewandt wäre, wenn man von der täglichen Rotation absieht (**Figur 4.9**). In einem nächsten Schritt ordnet man der Erdachse eine diese Drehung korrigierende *Kompensationsdrehung* in entgegengesetzter Richtung (Uhrzeigersinn von Norden aus) zu. Diese Drehung führt zu einer Bewegung der Erdachse auf einem Kegel mit Öffnungswinkel $2 \times 23.5^\circ$. Damit kann erreicht werden, dass die Richtung der Erdachse im Raum fest bleibt. Erteilt man der Kompensationsdrehung einen kleinen Überschuss («Überkompensation»), so kann man dadurch auch der absoluten Präzessionsbewegung gerecht werden (**Figur 4.7** oben und **4.9**). Diese leicht überkompensierte Drehung der Erdachse heißt *dritte kopernikanische Bewegung*; die ersten beiden kopernikanischen Bewegungen sind die

tägliche Drehung des Erdkörpers und die jährliche Bewegung (gebundene Drehung auf einer elliptischen Bahn) der Erde um die Sonne. Die nur die Präzession berücksichtigende langsame Drehung der Erdachse heißt *absolute Präzession der Erdachse*.

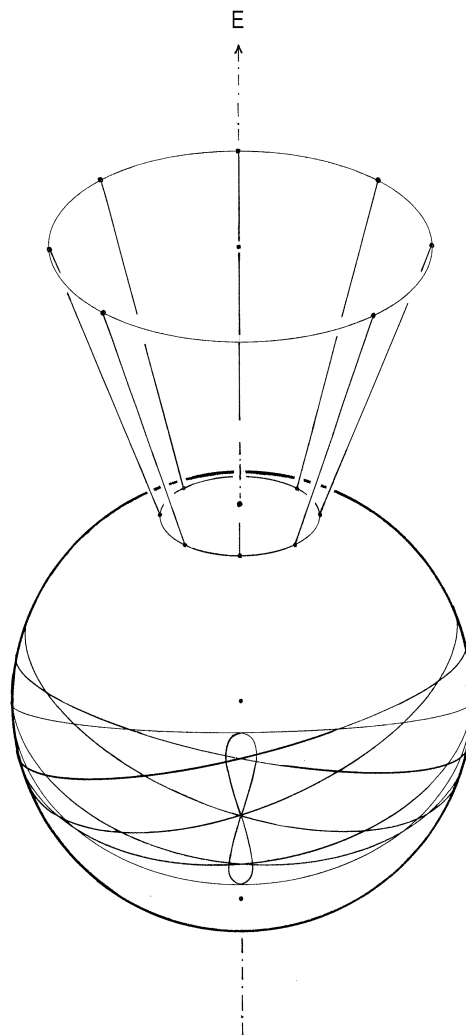
Astronomische und physikalische Hinweise auf die Rotation der Erde wurden weiter oben (Abschnitt 2.2) angeführt. Als astronomische und physikalische Hinweise auf die jährliche Bewegung der Erde um die Sonne gelten:

- (1) Jährliche relative Parallaxe der Fixsterne. Der nächste (Doppel-) Stern ist α Centauri mit einer Parallaxe von $0.754'' \pm 0.016''$.
- (2) Jahresperiodische Schwankung der Aberration des Lichtes (beobachtbare jährliche Veränderung eines Himmelsobjektes aufgrund der Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit); sie beträgt maximal $20.496''$ und wird als *Aberrationskonstante* bezeichnet (jährliche Aberration, stellare Aberration).
- (3) Jahresperiodische Schwankung der Radialgeschwindigkeit, gemessen anhand der Doppler-Ver-schiebung im Spektrum der Fixsterne. Sehr genaue Werte erhält man bei Verwendung von extrem regelmäßig elektromagnetisch strahlenden Pulsaren.

Die Bewegungen der Erdachse im Sinne der dritten kopernikanischen Bewegung ist eine notwendige Folge aus der gebundenen Drehung der Erde auf einer elliptischen Bahn um die Sonne. Im Sinne der Himmelsmechanik wird die Präzession der Erdachse als eine Komponente der mechanischen Bewegung eines schweren Kreisels im Schwerfeld der Sonne gedeutet.

4.2.2 Wie sieht man die Jahresbewegung der Erde von der Sonne aus?

Man stelle sich zunächst unter Absehung von der Eigenrotation der Sonne vor, man blicke von der Sonne immer in Richtung der Erde, das heißt man drehe die Blickrichtung langsam im Jahreslauf mit der Erde mit. Dann sieht man zunächst im Winter des Nordens der Erde den Erdkörper immer näher kommen und sich beschleunigen, dann gegen den Sommer hin wieder langsamer werden und sich entfernen.



Figur 4.10

Phänomenologische oder absolute Präzession der Erdachse: Bewegung der Erdkugel gemäß der 3. kopernikanischen Bewegung.

Darüber hinaus beschreibt die Erdachse um eine senkrecht zur Ekliptikebene liegende Achse eine Drehung in entgegengesetzter Richtung zum Jahresumlauf der Erde. Das heißt: vom Ekliptiknordpol E aus gesehen dreht sie sich im Uhrzeigersinn (phänomenologische Präzession der Erdachse: **Figur 4.10**; zur phänomenologischen Präzession siehe Anhang A.1.5); sie überstreicht dabei einen

Kegel mit Öffnungswinkel $2 \cdot 23.5^\circ$ Der sonnennächste Punkt der Erde vollzieht in dieser Zeit eine Lemniskatenbewegung.

Dieser phänomenologischen Präzession der Erdachse ist deren gleichgerichtete, jedoch viel langsamere absolute Präzession überlagert. Zusammen ergibt sich daraus die dritte kopernikanische Bewegung.

4.2.3 Wie sieht man die Bewegung der Erde von der rotierenden Sonne aus?

Die Projektion des Äquators der rotierenden Sonne auf den Fixsternhimmel ergibt den Sonnenhimmelsäquator. Die Nordrichtung dieser Achse wird per definitionem als diejenige Richtung bestimmt, welche in den Nordhimmel der Fixsternkugel der Erde verweist (wo auch der Ekliptiknordpol E liegt). Daraus leitet sich der Nordpol und die Nordhemisphäre (und damit der Südpol und die Südhemisphäre) der Sonnenkugel ab.

Die durch Sonnenhimmelsachse (Rotationsachse der Sonne) und Sonnenhimmelsäquator bestimmte Sonnenfixsternkugel dreht sich für einen Betrachter etwa auf der Nordhemisphäre der Sonne, wenn er nach Süden blickt, von links über oben nach rechts im Uhrzeigersinn oder von Ost nach West über den Zenitmeridian der Horizontkugel des Standortes auf der Sonne (der gleich definiert wird wie für die Horizontkugel der Erde). Denn aus ihrer Nordrichtung (oder von E) her gesehen dreht sich die Sonnenkugel im Gegenuhrzeigersinn. Ein Sterntag auf der Sonne dauert in Sonnenäquatornähe um 25.4 Erdentage. Die grundsätzlichen Phänomene der Fixsternbewegung in Abhängigkeit vom Beobachtungsort (Zirkumpolarsterne, Kulminationshöhe im Zenitmeridian) sind entsprechend wie auf der Erde.

Da die Sonnenachse um 7.25° gegen die Ekliptikebene geneigt ist, verläuft die Erdbahn auf der Sonnenfixsternkugel in einem Großkreis, der um 7.25° gegenüber dem Sonnenhimmelsäquator geneigt ist. Anfang Juni und Anfang Dezember durchschreitet die Erde in entgegengesetzter Richtung zur Bewegung der Sonnenfixsternkugel die Schnittpunkte des Sonnenhimmelsäquators mit der Erdbahn. Dabei dreht sich die Erde ebenfalls im Gegenuhrzeigersinn täglich um ihre Achse.

Darüber hinaus dreht sich die Erdachse selbst einmal jährlich phänomenologisch im Uhrzeigersinn um eine Achse senkrecht zur Ekliptikebene und überstreicht dabei einen Kegel mit $2 \cdot 23.5^\circ$ Öffnungswinkel (phänomenologische Präzession; siehe dazu Anhang A.1.5). Die absolute Präzession der Erdachse bewirkt, dass diese jährliche Bewegung einen kleinen Überschuss hat, das heißt, dass sich die Erdachse jedes Jahr ein klein wenig weiterdreht, als wenn es nur die phänomenologische Präzession gäbe.

In Abhängigkeit von Jahreszeit und Beobachtungsort auf der Sonne steht die Erde im Zenitmeridian hoch oder tief. Die Polarkreise und Wendekreise liegen sehr nahe zu den Polen ($\pm 82.75^\circ$) bzw. zum Äquator ($\pm 7.25^\circ$). Die Auf- und Untergangsorte der Erde bezüglich eines festen Sonnenortes schwanken nur wenig.

4.2.4 Momentane Bewegung der Erde an einem festen Erdort

Setzt man alle Bewegungen der Erde zusammen, so kann die Frage entstehen, in welcher Richtung man sich momentan auf dem «Raumschiff Erde» an einem gegebenen Ort der Erde zu gegebener Zeit bewegt. Es sind im Wesentlichen zwei Richtungs- bzw. Bewegungskomponenten zu berücksichtigen: die tägliche Drehung und die jährliche Bewegung. Die erste Komponente macht keine Schwierigkeiten: sie ist bestimmt durch die nach Osten verlaufende Richtung innerhalb des mathematischen Horizontes, die senkrecht zur Himmelsachse verläuft. Die entsprechende Gerade ist auch Tangente an den Breitenkreis des Beobachtungsortes.

Für die Betrachtung der anderen Komponente kann man zunächst von der Tagesbewegung absehen, und sich klar machen, wie sich diese Richtung im Jahreslauf verhält. Man nimmt dabei der

Einfachheit halber an, was tatsächlich der Fall ist, dass die Erdbahn nahezu ein Kreis ist. Es handelt sich dann um die Richtung der Tangente an den Bahnkreis der Erde zum gegebenen Beobachtungszeitpunkt. Die Tangentenrichtung bildet zusammen mit der Richtung zur Sonne und zum Ekliptiknordpol ein Rechtssystem. Dies bedeutet: Blickt man so auf die Ebene, bestimmt durch die Richtung zu Sonne und zum Ekliptiknordpol, dass die Richtung zur Sonne auf kürzestem Wege in die Ekliptiknordrichtung im Uhrzeigersinn gedreht werden kann, geht die Tangente senkrecht von dieser Ebene nach hinten. Stehen Daumen (Sonne), Zeigefinger (Ekliptiknordpol) und Mittelfinger (Tangente) der rechten Hand senkrecht aufeinander, so bilden sie ein Rechtssystem in dieser Reihenfolge. Richtet man also an irgendeinem Ort der Erde zu irgendeiner Zeit den linken Arm auf die Sonne und den rechten im rechten Winkel dazu auf den Ekliptiknordpol, so schaut man mit dem auf diese Ebene senkrechten Blick in Richtung der Erdbahnbewegung. Nimmt man dann die Richtung der täglichen Rotation der Erde mit hinzu, so kann man sich jederzeit ein Gesamtbild der momentanen Bewegung des Erdkörpers machen. Die Hauptschwierigkeit dabei ist, sich die jeweilige Lage des Ekliptiknordpols klar zu machen (siehe dazu Abschnitt 2.3).

4.2.5 Nutation der Erdachse

Die Erdachse beschreibt bei ihrer Präzessionsbewegung keinen genauen Kreiskegel, sondern macht eine zusätzliche Nickbewegung oder *Nutation*, was neben der Verschiebung des Frühlingspunktes auch eine periodische Änderung der Neigung der Ekliptikebene relativ zur Äquatorebene zur Folge hat. Dies ist eine zusätzliche Relativbewegung der Ekliptikkugel zur Tageskugel.

Diese Bewegung besteht genauer in einer elliptischen Kegelbewegung der wahren Nordrichtung (Erdachse) um eine mittlere Nordrichtung. In erster Näherung beschreibt die mittlere Nordrichtung den früher beschriebenen Präzessionskegel mit Öffnungswinkel 47° . Die durch diese elliptische Kegelbewegung bedingten maximalen Abweichungen des Himmelspols von seiner mittleren Bahn (in erster Näherung ein Parallelkreis um E) um den Ekliptiknordpol relativ zur Ekliptikkugel heißen *Nutation in Breite* und *Nutation in Länge*. Sie betragen $9.21''$ bzw. $6.86''$ und sind gleich den halben Öffnungswinkeln der Hauptachsenrichtungen des genannten elliptischen Kegels (**Figur 4.11**).

Die Periode der Nutation hat eine Länge um 18.61 Jahren, und ist damit von derselben Länge wie die Mondknotenperiode. Dies weist auf einen Zusammenhang der Mondknotenbewegung mit der Nutation der Erdachse hin. Durch diese Nutationsperiode erfährt natürlich auch der wahre Frühlingspunkt eine Hin- und Herschwankung (Nutation in Breite) von etwa $17.25''$ um einen mittleren Frühlingspunkt.

In zweiter Näherung ist jedoch die *Bahn der mittleren Nordrichtung*, das heißt der Präzessionsbewegung ohne die Nutation (mit einer Periode von 18.61 Jahren), kein Parallelkreis um E, sondern eine zwischen zwei Extremwerten hin- und herpendelnde Kurve. Denn der kurzperiodischen Nutation ist eine langperiodische Nutation überlagert, welche die Ekliptikneigung relativ zur Äquatorebene mit einer Periode um 40000 Jahre verändert (**Figur 4.11**). Die *Nutationskurve* ist dabei die Bahn der wahren Nordrichtung. In dieser Zeit schwankt die Schiefe der Ekliptik und damit der Winkelabstand der mittleren Nordrichtung oder Erdachse vom Ekliptiknordpol zwischen $21^\circ 55'$ und $24^\circ 18'$. Die dadurch bedingte Abnahme pro Jahr ist für das Jahr 2000 um $0.47''$.

zurückbleibend) eine flache Wellenlinie (ohne Schleifen, Rückläufigkeiten und von der Sonne weg-gekrümmten Bahnabschnitte), welche die Ekliptikebene in der Mondknotenlinie durchstößt.

Je nachdem, ob die Erde der Sonne näher (Perihel) oder ferne (Aphel) steht, beschleunigt sich ihre Bewegung und damit diejenige des Mondes. Diese Geschwindigkeitsänderungen haben die Größenordnung von $\pm 2'$ (Abweichung der Länge eines maximalen oder minimalen Sonnentages von einem mittleren Wert um $59'$). Hinzu kommt die Bahnbewegung des Mondes, welche diesem bei Vollmond auf der sonnenabgewandten Seite eine zusätzliche Beschleunigung erteilt und entsprechend bei Neumond zu einer Verlangsamung führt. Die entsprechenden Geschwindigkeitsvariationen sind von derselben Größenordnung wie die durch die Bahnbewegung der Erde bedingten. Denn die Mondbewegung ist zwar etwa 13-mal schneller als die Erdbahnbewegung, hat aber einen um 400-mal kleineren Bahnradius. Daraus ergibt sich aus der mittleren Bahnbewegung der Erde von $59'$ pro Tag, dass das Vorauseilen und Zurückbleiben des Mondes relativ zur Erde um einen Wert von $(13 / 400) \cdot 59' = 1.92'$ schwankt.

In der Perspektive von **Figur 4.9**, das heißt vom Ekliptiknordpol E aus auf die Erdbahn gesehen, bewegt sich der Mond um die Erde wie die Erde um die Sonne, im Gegenuhrzeigersinn (die Eigenbewegung des Mondes hat denselben Sinn). Die Mondknotenlinie bewegt sich dazu gegenläufig in etwa 18.61 Jahren einmal herum. Sie ist mit der Nutationsbewegung der Erdachse sowie mit der Präzession der Mondachse korreliert.

Die Bewegung der Apsidenlinie, also die Verbindung von Erdnähe (Perigäum) und Erdferne (Apogäum) des Mondes bewegt sich wiederum im selben Sinne wie der Mond um die Erde und braucht um 8.85 Jahre für einen Umlauf.

Die Mondbahn vergrößert sich zur Zeit um ca. 3.8 cm pro Jahr. Dadurch werden die verschiedenen Mondmonate (siderisch, synodisch, tropisch, drakonitisch, anomalistisch) im Laufe langer Zeiträume (Jahrhundertern) langsam größer.

Denkt man sich eine Senkrechte auf die Mondbahnebene durch den Erdmittelpunkt, so dreht sich diese mit den Mondknoten im Uhrzeigersinn um die Senkrechte zur Ekliptik (in Richtung Ekliptiknordpol E) im Erdmittelpunkt mit einem Winkel um 5.2° und beschreibt so einen Kegel mit halbem Öffnungswinkel 5.2° . Die Erdachse bleibt dabei im Wesentlichen (abgesehen von der Präzession und Nutation) fest und hat dementsprechend mit der Senkrechten auf die Mondbahnebene einen Winkel, der zwischen $23.5^\circ \pm$ maximal 5.2° schwankt. Denkt man sich eine Parallele zur Mondrotationsachse im Erdmittelpunkt dazu, dann liegt diese jeweils der Senkrechten zur Mondbahn relativ zur Senkrechten der Ekliptik mit einem Neigungswinkel um 1.5° gegenüber und gehört zugleich zu der durch die Senkrechten auf die Mondbahn und die Ekliptik bestimmten Ebene. Mit anderen Worten ausgedrückt: Die Rotationsachse des Mondes ist um 6.7° gegenüber einer senkrecht auf seiner eigenen Bahnebene stehenden Geraden geneigt. Sie zeigt in die Gegend des Pols E der Ekliptik und vollzieht eine komplizierte Präzessions- und Nutationsbewegung um den Pol der Ekliptik, erzeugt also einen Kegel mit einem halben Öffnungswinkel um 1.5° (Neigung der Mondäquatorebene zur Ekliptikebene), und dreht sich in derselben Richtung und in derselben durchschnittlichen Geschwindigkeit wie die Bewegung der Mondknotenlinie.

Daraus ergibt sich, dass die absolute Präzession der Mondachse in 18.6 Jahren eine Drehung im Uhrzeigersinn auf einem Kegel mit halbem Öffnungswinkel 1.5° beschreibt. Die durch die Bewegung der Erde um die Sonne bedingte phänomenologische Präzession des Mondes ergibt eine jährliche Bewegung der Mondachse auf demselben Kegel in derselben Richtung. Zusammen mit der absoluten Präzession ergibt sich daraus eine totale jährliche phänomenologische Präzession, die um etwas mehr als 19° über eine volle Drehung hinausgeht (zur phänomenologischen Präzession siehe Anhang A.1.5).

Alle Bahnelemente der Mondbewegung unterliegen weiteren kürzeren periodischen und langfristigen säkularen Veränderungen.

4.3 Zusammenfassung: Relative Kugelbewegungen in heliozentrischer Auffassung

Die **Erdkugel** ist durch den Erdkörper bestimmt, orientiert durch die von der Himmelsachse abgeleiteten geographischen Pole und den Erdäquator. Die **Tageskugel** ist durch die Himmelsachse (Verbindungsgerade der Ruhepunkte der täglichen Fixsternbewegung, das heißt von Himmelsnordpol und Himmelssüdpol), den Himmelsäquator und das Erdzentrum bestimmt. Die Erdkugel bewegt sich in minimaler Weise relativ zur Tageskugel und damit zur mit ihr gleich orientierten Koordinatenkugel der Erde, da die Rotationsachse der Erde die Erdkugel nicht immer an denselben Orten trifft, sondern periodische und säkulare Wanderungen vollzieht (Polhöenschwankung und Polbewegung). Von Norden auf die Erdkugel blickend geht die Tagesbewegung der Erde im Gegenursichtersinn und die Bewegung eines festen Erdpunktes relativ zur momentanen Dreh- oder Himmelsachse im Uhrzeigersinn um eine Mittelstellung.

Die **Ekliptikkugel** hat ihr Zentrum in der Sonne und ist bestimmt durch den Ekliptiknordpol und die Bahnebene der Ekliptik. Die Himmelsachse der Tageskugel bewegt sich relativ zur Ekliptikkugel und deren Achse von Norden her gesehen im Mittel im Uhrzeigersinn (entgegen der Jahresbewegung der Erde) vermöge der Präzessions- und Nutationsbewegung der Erdachse.

Die Ekliptikkugel mit ihrem Zentrum in der Sonne ist in erster Näherung fest mit der **Fixsternkugel**, deren Zentrum hier zunächst ebenfalls in die Sonne gelegt worden ist, verbunden.

Die **Sonnenkugel** dreht sich ebenfalls im Gegenursichtersinn mit einer Periode um 25.4 Tage.

Zum Schluss bleibt festzuhalten, dass alle Bahnelemente der Erdbahn (Exzentrizität: Periode um 100000 Jahre, Apsidenlinie: Periode um 110000 Jahre und Bahnneigung: Periode um 70000 Jahre) kleinen säkularen Variationen unterliegen. Dies trifft sowohl für die Präzession als auch für die Neigung der Erdachse relativ zur Erdbahn zu.

5. Lunazentrisches Weltbild

Alle in diesem Kapitel beschriebenen (hypothetischen) Phänomene ergeben sich lückenlos anhand der weiter oben aus den topozentrischen (beobachtungszentrierten), geozentrischen und heliozentrischen Gesichtspunkten beschriebenen Phänomenen der Mondbewegung. Es bedarf im Wesentlichen, was die geometrischen Kennzeichen der Bewegungen betrifft, keiner zusätzlichen Informationen oder Erfahrungen aus anderen Quellen oder Gesichtspunkten, also keines umfassenderen Wissens und Könnens als des Bisherigen, um das lunazentrische Weltbild geometrisch-kinematisch vollständig zu erfassen.

5.1 Bewegungen des Mondfixsternhimmels und der Sonne

5.1.1 Mondsterntage

Zum allgemeinen Charakter astronomischer Erscheinungen auf dem Mond muss festgehalten werden, dass aufgrund der fehlenden Atmosphäre alle Licht-Schatten-Grenzen sehr scharf sind: es gibt keine weichen Übergänge, keine Dämmerung, keine Halbschatten – nur entweder dunkel oder hell.

Der rotierende Mond hat eine Rotationsachse und einen Äquator, welche in ihren Projektionen in den Fixsternraum die Mondhimmelsachse bzw. den Mondhimmelsäquator, und damit die Mondfixsternkugel, festlegen. Die Nordrichtung der Mondhimmelsachse weist per definitionem in den Nordhimmel der Fixsternkugel der Erde (in welchem auch der Ekliptiknordpol E liegt). Daraus leitet sich auch der Nordpol und damit die Nordhemisphäre der Mondkugel (alle Mondorte zwischen Mondnordpol und Mondäquator) ab. Entsprechendes gilt für den Südpol und die Südhemisphäre der Mondkugel. Der Zenitmeridian eines Mondstandortes wird wie auf der Erde bestimmt: Es ist der durch Zenit und Mondnordpol bestimmte Großkreis in der Mondhorizontkugel des Beobachtungsortes. Er bestimmt die Nord- und Südrichtung des Mondstandortes. Darauf aufbauend lässt sich auch für einen Mondstandort eine Ost- und Westrichtung definieren: Sie liegen senkrecht zu der Nord-Süd-Richtung, wobei bei Blick nach Süden die Ostrichtung linker Hand liegt.

Von einem Beobachtungsort etwa in der Nordhemisphäre des Mondes aus gesehen bewegt sich der Mondfixsternhimmel mit Blick nach Süden von links über oben nach rechts (oder von Ost über den Zenitmeridian nach West). Denn von der Nordrichtung der Mondrotationsachse (oder vom Ekliptiknordpol E) aus gesehen, das heißt also in Südrichtung blickend, dreht sich der Mond im Gegenuhrzeigersinn um sich selbst – also muss sich für einen Mondbeobachter, der in dieselbe Richtung, also nach Süden blickt, der Mondfixsternhimmel im Uhrzeigersinn drehen.

Ein Mondfixsterntag dauert so lange wie der siderische Mondmonat für die Erde, also um $27^{\text{d}} 7^{\text{h}}$ mittlere Erdsonnentage. Der im Mondnordhimmel liegende Pol der Mondhimmelsachse zeigt zum Kopf des Sternbilds des Drachens in der Nähe des Ekliptiknordpols E mit einem Abstand von 1.5° zu diesem Pol. Denn die Neigung der Mondhimmelsachse zur Richtung des Ekliptiknordpols E ist etwa 1.5° . Die Phänomene der Steilheit der Fixsternbahnen relativ zum Horizont, die Kulminationshöhen im Zenitmeridian sowie die Variation der Zirkumpolarsterne in Abhängigkeit vom Beobachtungsort auf dem Mond sind entsprechend wie auf der Erde.

5.1.2 Mondsonnentage

Während eines Mondsterntages (siderischer Erdenmonat) bleibt die Sonne zurück und braucht um 53 Stunden zusätzlich, bis sie wieder kulminiert (synodischer Mondmonat minus siderischer Mondmonat). Folglich wandert die Sonne in entgegengesetzter Richtung zur Tagesbewegung auf der Mondfixsternkugel. Die Neigung der Sonnenbahn zum Mondhimmelsäquator beträgt um 1.5° . Folglich hat die Stellung der Sonne auf ihrer Bahn wenig Einfluss auf die tägliche Sonnenscheindauer auf dem Mond sowie auf die Auf- und Untergangsorte und die Kulminationen der Sonne im Zenitmeridian. Die mittlere Mondsonnentageslänge, gemessen von Kulmination zu Kulmination der Sonne auf dem Zenitmeridian, ist gleich dem irdischen synodischen Mondmonat, also um $29^d 12^h$ mittlere Erdsonnentage.

Wegen der geringen Distanz des Mondes zur Erde im Verhältnis der Distanz der Erde zur Sonne ist die Sonne vom Mond aus gesehen ähnlich groß wie von der Erde aus gesehen: Sie hat einen Durchmesser um 0.5° . Auf der Erde benötigt die Sonne bei steilem Aufstieg etwa 2 Minuten (denn in einer Minute bewegt sich die Fixsternkugel in ihrer täglichen Bewegung um $360^\circ/24^h \cdot 60^m = 0.25^\circ$) und auf dem Mond 1 Stunde, denn

$$\frac{360^\circ}{27.32166^d \cdot 24^h} = 0.55^\circ.$$

Die Abweichung der Sonne vom Mondhimmelsäquator schwankt bloß im Rahmen von $\pm 1.5^\circ$. Unabhängig von verschiedenen Beobachtungsorten auf dem Mond ist also die Steilheit der Sonnenbahn nahezu gleich wie die Steilheit des Mondhimmelsäquators. Dies bedeutet, dass die Kulminationshöhe der Sonnenbahn im Zenitmeridian im Wesentlichen nur vom Beobachtungsort und nicht vom Jahreslauf der Sonne auf ihrer Bahn abhängt. Folglich sind die Phänomene der Polarkreise auf dem Mond ($\pm 88.5^\circ$ Breite) und Wendekreise ($\pm 1.5^\circ$ Breite) nur wenig ausgeprägt: es gibt nur kleine Bereiche um die Pole mit Polartagen und Polarnächten, ebenso nur einen schmalen Streifen um den Mondäquator, auf welchem die Sonne für einen Mondbeobachter den Zenit überschreitet.

5.1.3 Rhythmen im Mondsonnenjahr

Die Bewegung der Sonne auf ihrer Bahn in der Mondfixsternkugel macht den jährlichen Beschleunigungs- und Verzögerungsrhythmus im Perihel und Aphel mit: sie läuft schneller im Dezember/Januar (Maximum um den 2. bis 5. Januar) und langsamer im Juni/Juli (Minimum um den 3. bis 7. Juli). Überlagert wird dieser jährliche Rhythmus durch monatliche Geschwindigkeitsvariationen. Bei irdischem Vollmond eilt der Mond heliozentrisch der Erde voraus und bei irdischem Neumond bleibt er zurück, die maximale Differenz von der mittleren täglichen Bewegung von $59'$ ist um $\pm 2'$. Daraus folgt, dass für einen Beobachter auf dem Mond die Sonne bei irdischem Vollmond (also bei Neuerde, siehe unten) etwas schneller und bei irdischem Neumond (also bei Vollerde) etwas langsamer läuft. Diese Geschwindigkeitsdifferenzen sind von derselben Größenordnung wie die zuerst genannten. Dies ergibt sich aus folgender Überschlagsrechnung: Der Mond läuft etwa $365.25^\circ / 27.32^\circ \approx 13$ -mal schneller um die Erde als die Erde um die Sonne, zudem ist der mittlere Bahnradius um $149598022 \text{ km} / 383398 \text{ km} \approx 390$ -mal kleiner als derjenige der Erdbahn. Daraus folgt, dass die Bewegungen des Mondes um die Erde ein Vorauseilen oder Zurückbleiben der Sonne am Mondhimmel um

$$\pm \frac{13}{390} \cdot 59' = 1.96'$$

im Maximum bewirkt.

Die visuelle Größe der Sonne schwankt in erster Näherung wie die visuelle Größe der Sonne auf der Erde: im Perihel ist sie $32' 32''$ und im Aphel $31' 28''$. In zweiter Näherung kommen die Schwankungen aufgrund der Bewegung des Mondes um die Erde hinzu; diese betragen näherungsweise wegen der etwa 390-mal kleineren Distanz des Mondes zur Erde im Vergleich zur Distanz der Erde zur Sonne nur $32' \cdot 60 / 390 = \pm 4.92''$, also eine totale Differenz von etwa $9.84''$.

Eine etwas genauere Rechnung geht von folgenden Näherungen aus (rechtwinklige Dreiecke über der Verbindungsgerade Sonnenzentrum-Mondzentrum mit Spitze auf der Sonnenoberfläche):

$$\sin \alpha_1 = \frac{r_{\text{Sonne}}}{d_{\text{Erde-Sonne}} + d_{\text{Mond-Erde}}} = \frac{695700\text{km}}{149600000\text{km} + 383398\text{km}},$$

$$\sin \alpha_2 = \frac{r_{\text{Sonne}}}{d_{\text{Erde-Sonne}} - d_{\text{Mond-Erde}}} = \frac{695700\text{km}}{149600000\text{km} - 383398\text{km}}.$$

Daraus ergibt sich die totale Schwankung der scheinbaren Größe der Sonne am Mondhimmel zu

$$2(\alpha_2 - \alpha_1) = 2(0.26713^\circ - 0.26577^\circ) = 0.002727^\circ \approx 9.8'',$$

also ein ähnlicher Wert wie derjenige aus der Überschlagsrechnung.

5.1.4 Phänomenologische Präzession der Sonne

Die Neigung der Rotationsachse der Sonne zur Ekliptik um 7.25° hat zur Folge, dass vermöge der jährlichen Erdbewegung um die Sonne diese Achse auch für Mondbewohner jährlich im Uhrzeigersinn rotiert und einen Kegel mit Öffnungswinkel $2 \cdot 7.25^\circ$ und Achse senkrecht zur Ekliptik überstreicht (jährliche phänomenologische Präzession der Sonnenachse, siehe Abschnitt 2.8; zur phänomenologischen Präzession allgemein siehe Anhang A.1.5). Eine wahrscheinlich vorhanden absolute Präzession der Sonnenachse ist nicht mit Sicherheit bekannt.

5.2 Bewegungen der Erde

5.2.1 Erdphasen

Der Durchmesser der Erdkugel vom Mond aus ist etwa viermal größer als der Durchmesser der Sonne, also um 2° . Dieser Wert ergibt sich aus folgender Näherung (rechtwinkliges Dreieck über der Verbindungsgerade Mondzentrum-Erdzentrum mit Spitze auf der Erdoberfläche)

$$\sin \alpha = \frac{r_{\text{Erde}}}{d_{\text{Erde-Mond}}} = \frac{6378\text{km}}{383398\text{km}},$$

woraus sich eine scheinbare Größe um $2\alpha = 1^\circ 54'$ ergibt.

Vermöge des Umlaufs des Mondes um die Erde sieht ein Beobachter auf dem Mond die Erde in verschiedener Weise von der Sonne beschienen: die Erdphasen auf dem Mond durchlaufen denselben Rhythmus wie die Mondphasen von der Erde aus, nämlich Vollerde, Halberde, Neuerde, Halberde und schließlich wieder Vollerde etc. Die synodische Erdphasenperiode auf dem Mond ist identisch mit der synodischen Mondphasenperiode auf der Erde. Dabei fallen aus geometrisch-optischen Gründen Neuerde und Vollmond (Erde zwischen Sonne und Mond) sowie Vollerde und Neumond (Mond zwischen Sonne und Erde) zusammen. Dies hat zur Folge, dass sich Erdphasen (vom Mond aus gesehen) und Mondphasen (von der Erde aus gesehen) immer zu einer Ganzheit ergänzen: Wenn etwa der Mond im abnehmenden Viertel am Morgen im Osten des Erdhimmels steht, so steht die Erde am Mondhimmel im zunehmenden Viertel.

Von der Erde aus gesehen zeigt der Mond in *erster Näherung* immer dasselbe Gesicht. Folglich bleibt die Erde in erster Näherung am Mondhimmel immer am selben Ort. Zusammen mit den Erdphasen ergibt sich daraus eine für Beobachter auf dem Mond immer präsente und konstante Erduhr: Aus der genauen Phasenlage lässt sich ohne Unterbruch (auch bei Abwesenheit der Sonne) der genaue Zeitpunkt innerhalb eines Mondsonnentages bestimmen.

Der Mond hat also eine immer der Erde zugewandte Seite und eine der Erde abgewandte Seite. Im Folgenden werden nur Beobachtungsorte auf der der Erde zugewandten Seite berücksichtigt. Hier gibt es einen durch seine Lage zur Erde ausgezeichneten Mondort, derjenige Punkt auf dem Mond, der der Erde am nächsten liegt, in der «Mitte» der zur Erde gewandten Seite. Der Zenitmeridian dieses Punktes werde hier *Zentralmeridian* genannt.

Je nach dem Standort des Beobachters auf dem Mond ist die Erde hoch oder tief am Mondhimmel, nahe am Sonnenaufgangs- oder Sonnenuntergangsort, oder mitten im Himmel beim Zentralmeridian. Ist etwa die Erde im Osten am Horizont, so kann bei Sonnenaufgang nur Vollerde oder Neuerde sein, ist sie im Zentralmeridian, so kann bei Sonnenaufgang nur Halberde und am Mittag nur Neuerde sein.

Oft steht bei Neuerde die Erde oberhalb oder unterhalb der Sonne und erscheint deshalb als schmale Sichel, deren Öffnung auf die der Sonne gegenüberliegende Seite zeigt.

5.2.2 Schwankungen der Erdscheibe: Libration

Bei genauerem Überlegen steht die Erde jedoch nicht still am Mondhimmel. Am auffälligsten ist zunächst eine im drakonitischen Erdmond-Monatsrhythmus verlaufende Auf- und Abbewegung (*zweite Näherung* zur Bewegung der Erde am Mondhimmel). Denn erstens ergibt sich aus den Cassinischen Gesetzen der Mondrotation in ihrem Verhältnis zur Mondbahn und zur Ekliptik, dass die Erdbahn relativ zum Mondfixsternhimmel genau durch die Knoten der Sonnenbahn mit dem

Mondhimmelsäquator geht: Stellt man sich als Beobachter auf dem Mond den Mondhimmelsäquator vor und denkt sich diejenige Lage, in welcher die Sonnenbahn nach oben neigt (in den Nordhimmel der Mondfixsternkugel) und zugleich den Äquator im Osten und Westen unter einem Winkel von 1.5° schneidet, so bildet die Erdbahn einen Großkreis auf der Mondfixsternkugel, der durch dieselben Schnittpunkte (Knoten) geht und um weitere 5.2° gegenüber der Sonnenbahn in den Mondnordhimmel geneigt ist. Daraus ergibt sich eine totale Neigung der Erdbahn von 6.7° gegenüber dem Mondhimmelsäquator.

Zweitens erscheint die Bewegung der Erdscheibe vor dem Fixsternhintergrund, die in gleicher Richtung verläuft wie die Bewegung der Sonne, also von West nach Ost, wegen der diese Erdenbewegung kompensierenden Eigenrotation des Mondes (die von Norden der Rotationsachse her gesehen im Gegenuhrzeigersinn mit der Periode des siderischen Erdmond-Monats verläuft) und dem daraus folgenden relativen Stillstand der Erde, nur als eine Bewegung der Fixsterne hinter der (nahezu stillstehenden) Erde vermöge der Mondtagesbewegung der Fixsterne (Bewegung der Mondfixsternkugel).

Aufgrund der Schiefe der Erdbahn ergibt sich daraus schließlich drittens eine mondtägliche (das heißt genauer drakonitische erdmond-monatliche Auf- und Abbewegung der Erde um $\pm 6.7^\circ$ ($= 1.5^\circ + 5.2^\circ$). Dies ist die *Libration in Breite*.

Die fest verbundenen Knoten der Sonnen- und Erdbahn mit dem Mondhimmelsäquator am Mondfixsternhimmel bewegen sich siderisch in 18.61 Erdsonnenjahren einmal um den Mondhimmelsäquator herum in umgekehrter Richtung wie die Mondjahresbewegung der Sonne (also von Ost nach West). Dies ist derselbe Rhythmus wie der siderische Umlauf der Mondknoten bezüglich der Ekliptik.

In *dritter Näherung* zeigt die Erdscheibe auch eine Schwankung nach links und rechts. Dies ist auf die relative Bewegung der gleichmäßigen Mondrotation und der relativ ungleichmäßigeren (elliptischen) Bewegung des Mondes auf seiner Bahn um die Erde aufgrund Erdnähe (Perigäum P) und Erdferne (Apogäum A) zurückzuführen. Dies ist die *Libration in Länge* mit der Periode des anomalistischen Erdmond-Monats. Vom Mond aus gesehen bedeutet dies, dass die Mondtagesbewegung (Drehung der Mondfixsternkugel) etwa in der Mitte zwischen Perigäum und Apogäum der scheinbaren Erdbahn um den Mond leicht zurückfällt, ihr also die Erde vorausseilt und sich deshalb am Mondhimmel in Richtung des Sonnenaufgangsortes nach Osten verschiebt. Zwischen Apogäum und Perigäum ist das Umgekehrte der Fall: Die Erde verschiebt ihre Lage in Richtung Sonnenaufgangsort nach Westen.

Zusammengefasst ergibt sich eine maximale Schwankung der Erdscheibe um $\pm 7^\circ$ in Breite und um $\pm 8^\circ$ in Länge. Dies sind notwendigerweise dieselben Werte wie sie sich auch bei der Libration des Mondes aus Erdsicht ergeben haben. Demzufolge bewegt sich die Erdscheibe innerhalb eines sphärischen Vierecks mit $7^\circ \cdot 8^\circ$ Kantenlänge. Wegen der fortwährenden gegenseitigen Verschiebung der Knotenachse und der Apsidenlinie (Verbindungsgerade von Perigäum und Apogäum), bewegt sich die Erde im Mondhimmel in kontinuierlichen, sich fortwährend verändernden und nicht geschlossenen ovalen sowie in Übergangsstadien lemniskatischen Kurven innerhalb dieses Rechtecks.

Steht die Apsidenlinie senkrecht auf der Knotenlinie, was etwa alle 3 Jahre der Fall ist, so hat diese Kurve ihre bauchigste und breiteste (mit ihren Hauptachsen parallel zu den Seiten des Rechtecks) oder näherungsweise kreisförmige Gestalt. Die größte und geringste Abweichung in Breite fällt dann zusammen mit der geringsten bzw. größten Abweichung in Länge. Fallen Apsidenlinie und Knotenlinie zusammen, so fallen jeweils die maximalen Abweichungen in Länge und Breite zusammen, sodass die ovale Kurve ihre Hauptachsen in den Diagonalen des Rechtecks hat und dabei ihre schlankste oder schmalste Form annimmt, die ein lemniskatisches Stadium durchläuft. Ein Wechsel zwischen diesen beiden Extremformen findet etwa alle 1.5 Jahre statt.

Sucht man nach einer Periode, in welcher sich auch die Stellung zur Sonne und damit die gleichen Erdphasen beim Durchlaufen der verschiedenen Kurvenformen wiederholen, so kommt man

wieder auf die Sarosperiode mit 242 drakonitischen, 239 anomalistischen und 223 synodischen Erdmond-Monaten in etwa 18.03 Jahren.

Fällt die maximale Libration in Breite aufgrund des Zurückbleibens der Erde zwischen Apogäum und Perigäum in den aufsteigenden Knoten, so bewegt sich die Erde im Gegenuhrzeigersinn durch ihre ovale Kurve innerhalb des genannten sphärischen Vierecks, da sie bei dieser Konfiguration von ihrer westlichsten (rechten) Position zu ihrer größten Höhe aufsteigt. Wandert dieser Ort maximaler Libration weiter bis in den nördlichen Teil der Mondbahn relativ zur Ekliptikkugel (dann fallen Apsidenlinie und Knotenlinie zusammen), so verschmälert sich die ovale Kurve fast zu einer diagonalen Strecke (von links unten nach rechts oben oder von Südosten nach Nordwesten in der Mondfixsternkugel im Viereck verlaufend – oder umgekehrt) und durchläuft dort ein schmales lemniskatisches Stadium. Danach öffnet sich die ovale Kurve, bis sie wieder fast kreisförmig wird, sobald der Ort maximaler Libration in Breite beim Zurückbleiben der Erde beim absteigenden Knoten erreicht ist. Dabei hat sich jedoch mit dem Übergang der fast auf die Diagonale geschrumpften Kurve die Bewegungsrichtung der Erdscheibe auf der ovalen Kurve umgedreht: Nun wandert die Erdscheibe im Uhrzeigersinn auf ihrer Kurve. Denn verlässt sie im genannten Ort maximaler Breite im absteigenden Knoten denselben, so wandert sie von ihrer westlichsten (rechten) Position nach unten in ihre tiefste (südlichste) Position, also im Uhrzeigersinn. Der Wechsel der Drehrichtung findet demzufolge genau dann statt, wenn die ovale Kurve der Erdbewegung auf eine Strecke, die Diagonalen des sphärischen Vierecks, zusammenschrumpft und dort näherungsweise lemniskatische Gestalt annimmt, also beim Zusammenfallen der Apsidenlinie und der Knotenlinie. Die entsprechenden Kurven sind qualitativ dieselben wie in Figur 3.11.

Für einen Mondbeobachter, für welchen die Erde in ihrer mittleren Lage sehr nahe am Horizont steht, hat die Libration der Erde in Länge und Breite die Konsequenz, dass die Erde zeitenweise partiell oder ganz «untergeht», und dann nach einer Weile an einem nicht weit davon entfernten Ort wieder «aufgeht». Im Einzelnen ist dieses Phänomen davon abhängig, welcher Teil des genannten sphärischen Rechtecks für einen bestimmten Mondort unter die Horizontlinie zu liegen kommt.

5.2.3 Drehung der Erdachse: Phänomenologische Präzession der Erdachse

Die oben beschriebene Libration in Länge und Breite betrifft die ganze *Erdscheibe* und hat wenig Einfluss auf die sichtbaren Teile der Erdkugel (ganz im Gegensatz zur Libration des Mondes bezüglich der Erde, wo diese partielle Blicke «hinter» den Mond gestattet). Die Sichtbarkeit der *Erdkugel* hängt erstens ab von der Rotation der Erde um ihre Achse (Tagesbewegung der Erde) und zweitens von der Stellung der Rotationsachse zur Mondbahn, oder besser: zur Erdbahn. Hier soll insbesondere letzteres genauer angeschaut werden. Die Rotationsachse der Erde ist um 23.5° gegenüber der Sonnenbahn geneigt. Ihre Neigung zur Mondbahnebene schwankt periodisch um 5.2° im Rhythmus des Mondknotenumschlages. Innerhalb eines siderischen Mondmonats verändert sich diese Schwankung nur wenig. In jedem solchen Monat dreht sich jedoch die Erdachse vom Mond aus gesehen in umgekehrter Richtung wie die Erdrotation einmal um eine senkrecht auf der Mondbahn (= Erdbahn vom Mond aus) stehende Achse herum und beschreibt einen Kegel mit einem halben Öffnungswinkel von $23.5^\circ \pm \text{maximal } 5.2^\circ$. Dies ist die monatliche phänomenologische Präzession der Erdachse (zur phänomenologischen Präzession siehe Anhang A.1.5). Qualitativ sieht diese Bewegung der Erde aus wie in Figur 4.10. Im Laufe mehrerer Monate und Jahre weitet und verengt sich dieser Kegel kontinuierlich gemäß der Wanderung der Mondknoten (siehe Abschnitt 5.3).

5.2.4 Erd- und Sonnenfinsternisse

Erd- und Sonnenfinsternisse können auftreten, wenn erstens die Sonne in der Nähe der Knoten vorbeikommt und damit zugleich den Mondhimmelsäquator überschreitet und zweitens Vollerde bzw. Neuerde ist. Finsternisse finden vom Mond aus gesehen also immer in der Nähe des Mondhimmelsäquators statt. Wegen der 4-fachen Größe des scheinbaren Erddurchmessers gegenüber

dem scheinbaren Sonnendurchmesser finden für einen festen Mondort viel mehr sichtbare Sonnenfinsternisse statt als für einen festen Ort auf der Erde. Sie verlaufen oft total, da die kleinere Sonne immer wieder ganz hinter der größeren Erde verschwindet. Sie entsprechen den irdischen Mondfinsternissen, deren sichtbare Totalität jedoch nicht wie bei Sonnenfinsternissen vom Beobachtungsort abhängt.

Die den partialen, ringförmigen und totalen Sonnenfinsternissen auf der Erde entsprechenden partialen Finsternisse der Erde sind vom Mond aus kaum zu erkennen, da der Mond nur einen kleinen Schatten auf die Erde zu werfen vermag. Totale Erdfinsternisse durch den Mond gibt es nicht.

5.3 Knotenbewegungen

5.3.1 Verschiebung der Knoten von Erd- und Sonnenbahn

Die Erde durchläuft ihre Bahn am Mondfixsternhimmel etwa 13mal schneller als die Sonne (dies ist phänomenologisch gemeint, also im Sinne von Winkelgeschwindigkeiten). Ihr siderischer Umlauf ist gleich dem siderischen Umlauf des Mondes. Nun ist der drakonitische Mondumlauf um $2^h 37^m$ kürzer als der siderische Umlauf; damit kommt die Erde am Mondhimmel schneller wieder zu ihrem Schnittpunkt mit dem Mondhimmelsäquator (und zugleich mit der Sonnenbahn) als wieder zum selben Ort am Mondfixsternhimmel. Da für einen am selben Ort bleibenden Mondbeobachter die Lage des Mondhimmelsäquators invariant ist, bedeutet dies, dass sich (bei festgehaltenem, etwa fortwährend kulminierenden aufsteigendem Knoten) der Fixsternhimmel «hinter» dem Mondhimmelsäquator in gleicher Drehrichtung wie die Erdbewegung auf ihrer Bahn durch den Mondfixsternhimmel verschiebt (Gegenuhrzeigersinn). Aus der heliozentrischen Tatsache jedoch, dass sich die Mondrotationsachse um die Richtung zum Ekliptiknordpol E in einem Abstand von etwa 1.5° herumdreht (präzediert), folgt, dass die Bewegung des Mondfixsternhimmels entlang der um 1.5° zum Mondhimmelsäquator geneigten Sonnenbahn stattfindet. Es sei daran erinnert, dass die Schnittpunkte der Sonnen- und Erdbahn immer mit den Schnittpunkten dieser Bahn mit dem Mondhimmelsäquator zusammenfallen (diese drei Kreise gehören zu *einem* Großkreisbüschel der Mondfixsternkugel). Nach Vollendung eines Erdsonnenjahres hat sich diese Bewegung auf gut 19° aufaddiert, so dass nach etwa 18.61 Jahren (Mondknotenperiode) wieder dieselben Fixsterne «hinter» diesen Knoten oder Schnittpunkten stehen.

Blickt man am Mondhimmel (etwa bei fortwährender Kulmination des aufsteigenden Knotens) nach Norden, so dreht sich der Mondhimmel in dieser Periode «hinter» dem Mondhimmelsnordpol im Uhrzeigersinn um den Ekliptiknordpol E, so dass er in 18.61 Jahren einen Kreis mit Radius 1.5° um E beschreibt.

5.3.2 Bewegungen der Erdachse

Wie bewegt sich die Erdachse in einer solchen Mondknotenperiode von 18.61 Jahren? Wie bereits oben in Abschnitt 5.2 beschrieben, dreht sich vom Mond aus gesehen die Erdachse in einem Kegel um eine Achse senkrecht zur Mondbahnebene, das heißt hier am Mondhimmel senkrecht zur Erdbahnebene. Der halbe Öffnungswinkel dieses Kegels hängt nur von der Stellung der Erdachse zur Mondbahnebene ab: Geht die Knotenlinie durch die geozentrisch bestimmten Äquinoktien (Frühlingspunkt F und Herbstpunkt H) der Sonnenbahn, ist sie also parallel zur Äquinoktiallinie, so werden die beiden Extremwerte $23.5^\circ \pm 5.2^\circ$ angenommen. Denn wenn der aufsteigende Knoten in F liegt, dann kommt die Erdachse der Mondbahnebene (vom Mond aus: Erdbahnebene) am nächsten und damit wird der Kegel am weitesten mit dem größten Öffnungswinkel; geht die Knotenlinie durch die Solstitien (Sommersonnenwende SS und Wintersonnenwende WS), so ist der halbe Öffnungswinkel gleich 23.5° . In einer Mondknotenperiode verändert sich also der halbe Öffnungswinkel der sich einmal in einem siderischen Erdmonat aus Mondperspektive drehenden Erdachse vom Maximalwert $23.5^\circ + 5.2^\circ$ bei aufsteigendem Mondknoten in F über 23.5° beim Mondknoten in SS bis zum Minimalwert $23.5^\circ - 5.2^\circ$ beim Mondknoten im Herbstpunkt H und zurück über 23.5° beim Mondknoten in WS bis zum Ausgangspunkt von $23.5^\circ + 5.2^\circ$ beim aufsteigenden Mondknoten in F.

5.3.3 Absolute Präzession der Erdachse

Die Präzession der Erdachse zeigt sich für einen Beobachter der Bewegung der Erde am Mondhimmel in der relativen Lage der kleinsten oder größten Ausdehnung des Rotationskegels der Erdachse relativ zum Fixsternhintergrund. Wie eben dargestellt, finden diese maximalen Ausdehnungen beim

Zusammenfallen der Richtungen der Mondknotenlinie mit der Richtung der Äquinoktiallinie statt. Mit der Veränderung der Äquinoktiallinie vor dem Fixsternhintergrund (Wanderung des Frühlings- und Herbstpunktes, das heißt der geozentrisch relevanten Schnittpunkte von Erdhimmelsäquator und Erdsonnenbahn, im Platonischen Weltenjahr), verändert sich auch der Fixsternhintergrund der maximalen und minimalen Ausdehnungen des genannten Kegels.

Anhang

A.1 Kugelgeometrie

A.1.1 Kugeloberfläche in Beziehung zu Geraden und Ebenen

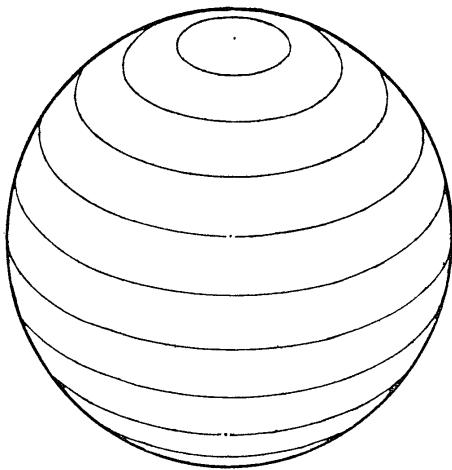
Eine Kugeloberfläche, auch *Sphäre* genannt, ist der geometrische Ort aller Punkte, die von einem festen Punkt, dem Mittelpunkt, gleich weit entfernt liegen. Wird im Folgenden von einer *Kugel* gesprochen, so ist immer die *Kugeloberfläche* gemeint und nicht die Vollkugel.

Für die Vorstellung astronomischer Erscheinungen ist es hilfreich, sich eine Kugel nicht von außen vorzustellen, sondern sich in deren Inneres zu versetzen, zunächst in deren Mittelpunkt.

Eine Gerade durch den Mittelpunkt einer Kugel schneidet deren Oberfläche in zwei *Diametralpunkten*. Nicht jede beliebige Gerade schneidet eine Kugel in zwei Punkten. Es gibt Geraden, welche mit einer Kugel keinen (Passante) oder einen Punkt (Tangente) gemeinsam haben.

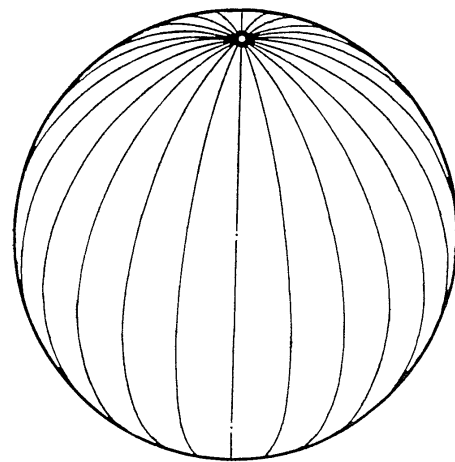
Man stelle sich eine Ebene vor, die sich von außen einer Kugeloberfläche nähert; sie verschiebe sich parallel zu sich selbst (und bleibt damit immer senkrecht zu einer festen Richtung). Zunächst hat sie kein Element mit der Kugel gemeinsam, dann einen Punkt (die Ebene ist *Tangentialebene*), und dann kleine und immer größer werdende Kreise, bis die Ebene durch den Kugelmittelpunkt geht und damit den größtmöglichen Kreis aus der Kugel schneidet. Bewegt sich die Ebene weiter, so werden die entsprechenden Schnittkreise wieder kleiner und verschwinden, sobald die Ebene weiter als der Kugelradius von dem Mittelpunkt der Kugel entfernt ist.

Kreise auf einer Kugel, die in parallelen Ebenen liegen, heißen *Parallelkreise*; alle zu einer Ebene parallelen Kreise zusammen mit den beiden «Grenzkreisen» (Diametralpunkte) bilden ein *Parallelkreisbüschel* oder eine *Parallelkreisschar* (**Figur A1.1**). Die größten Kreise auf einer Kugel heißen *Großkreise*; sie werden von Ebenen, die durch den Mittelpunkt der Kugel gehen, aus deren Oberfläche herausgeschnitten. Alle übrigen Kreise heißen *Kleinkreise*. Zu einem Parallelkreisbüschel gehört also genau ein Großkreis.



Figur A1.1

Kleinkreisbüschel oder Parallelkreisbüschel auf einer Kugel, mit einem einzigen Großkreis, dem Äquator.



Figur A1.2

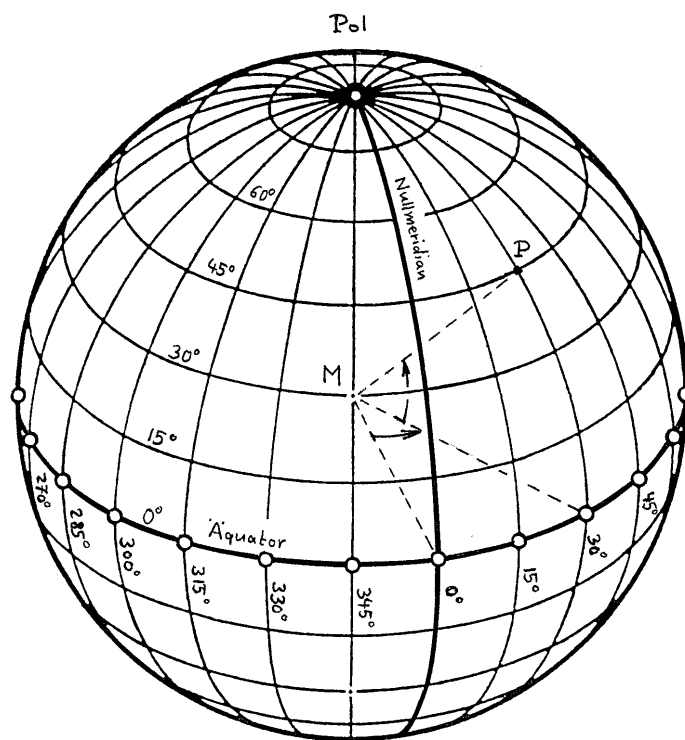
Großkreisbüschel, Meridiankreisbüschel oder Längskreisbüschel auf einer Kugel mit zwei Polen.

Zu jedem Großkreis einer Kugel gibt es ein eindeutig bestimmtes Paar von Diametralpunkten. Sie sind bestimmt durch die durch den Mittelpunkt der Kugel gehende, senkrecht auf der Ebene des

Großkreises stehende Gerade, welche die Kugel in den *Polen* dieses Großkreises schneidet. Die Pole sind offenbar Diametralpunkte. Umgekehrt gehört zu jedem Paar von Diametralpunkten genau ein Großkreis, dessen Ebene senkrecht auf der Verbindungsgeraden dieser Punkte steht und durch den Mittelpunkt der Kugel geht. Er heißt *Äquator* der Pole.

Durch zwei Diametralpunkte einer Kugel gehen unbegrenzt viele Großkreise; sie bilden ein *Großkreisbüschel*, auch *Meridiankreisbüschel* oder *Längskreisbüschel* genannt. Sie liegen alle in Ebenen, die durch die Verbindungsgerade der Diametralpunkte gehen (**Figur A1.2**).

Die umkehrbar eindeutige Zuordnung zwischen Paaren von Diametralpunkten (Pole) und Großkreisen (Äquator) induziert eine umkehrbar eindeutige Beziehung zwischen Parallelkreisbüscheln und Großkreisbüscheln: Zu jedem Großkreisbüschel gehört das eindeutig bestimmte Parallelkreisbüschel, das den zu den gemeinsamen Diametralpunkten (Polen) des Großkreisbüschels gehörenden Äquator als einzigen Großkreis hat. Umgekehrt kann zu einem Parallelkreisbüschel immer genau ein Großkreisbüschel gefunden werden, das genau durch die beiden Diametralpunkte des Parallelkreisbüschels geht (**Figur A1.3**).



Figur A1.3

Senkrecht aufeinander stehende Kleinkreisbüschel und Großkreisbüschel als Grundlage für ein sphärisches Koordinatensystem mit Breitenkreisen und Meridiankreisen auf der Kugel. Als Nullkreis der Breitenkreise dient natürlicherweise der Äquator. Der Nullkreis der Meridiankreise muss (willkürlich) festgelegt werden, da keinem Kreis dieses Büschels aus geometrischen Gründen eine Sonderstellung zukommt.

Durch zwei nicht diametrale Punkte auf einer Kugel (die zwei Paare von Diametralpunkten bestimmen) geht genau ein Großkreis. Er liegt in derjenigen Ebene, die durch die zwei Verbindungsgeraden der beiden Punkte mit dem Mittelpunkt der Kugel bestimmt ist. Durch drei nicht paarweise diametrale Punkte auf einer Kugel, die nicht auf einem Großkreis liegen, sind genau zwei parallele Kleinkreise bestimmt: der eine geht durch die gegebenen Punkte, der andere durch die

entsprechenden Diametralpunkte. Diese Kleinkreise sind die Schnittkreise derjenigen Ebenen, die durch die drei ursprünglichen Punkte und die drei dazugehörigen Diametralpunkte bestimmt sind.

A.1.2 Natürliches sphärisches Koordinatensystem

Man gehe aus von einem beliebigen Paar voneinander zugeordneten Gross- und Parallelkreisbüscheln im oben dargestellten Sinne. Durch ein solches Paar ist genau ein Paar von Polen (gemeinsame Punkte der Kreise des Großkreisbüschels) und ein Äquator bestimmt. Durch jeden Punkt P einer mit diesen Büscheln überzogenen Kugel, mit Ausnahme der Pole, geht genau ein Großkreis des Großkreisbüschels und genau ein Kreis des Parallelkreisbüschels (**Figur A1.3**). Werden die Kleinkreise und die Großkreise der beiden Büschel geeignet mit einer kontinuierlichen Zahlenreihe in Beziehung gebracht, so lässt sich jedem Punkt auf der Kugel ein eindeutig bestimmtes Zahlenpaar zuordnen. Dazu muss nur für jedes Büschel ein Nullkreis festgelegt werden. Daraus ergibt sich ein *sphärisches Koordinatensystem*.

Für die Parallelkreise, auch *Breitenkreise* des sphärischen Koordinatensystems genannt, gibt es einen durch die Kugelgeometrie ausgezeichneten Kreis, den Äquator, den einzigen Großkreis des Parallelkreisbüschels; er dient als *Nullbreitenkreis*. Nun hat jeder Parallelkreis einen eindeutig bestimmten Winkelabstand vom Äquator, gemessen relativ zum Kugelzentrum M als Winkel der Schnittpunkte des Parallelkreises und des Äquators mit einem Großkreis durch die Pole (**Figur A1.3**). Dadurch kann man den Kleinkreisen Winkelwerte von 0° bis $+90^\circ$ und von 0° bis -90° zuordnen.

Unter den Großkreisen, auch *Meridiane* oder *Längskreise* des sphärischen Koordinatensystems genannt, ist geometrisch keiner ausgezeichnet. Hier muss nach außergeometrischen (das heißt zum Beispiel nach geographischen oder astronomischen) Kriterien ein beliebiger Großkreis als Nullkreis oder *Nullmeridian* ausgewählt werden. Dadurch kann man den Großkreisen Winkelwerte entweder von 0° bis 360° oder von 0° bis $+180^\circ$ und von 0° bis -180° zuordnen.

A.1.3 Rotation

Unter *Drehung* oder *Rotation* einer Kugelsphäre versteht man eine Bewegung der Kugelsphäre in sich, bei welcher die ganze Sphäre ohne Verzerrung oder innere Bewegung in sich übergeht (starre oder abstandstreue und winkeltreue Bewegung). Eine solche Bewegung hat eine *Drehachse*, die durch den Mittelpunkt der Kugel geht und welche die Fixpunkte der Drehung enthält. Diese Achse schneidet die Kugeloberfläche in den ruhenden *Polen* der Drehung; der diesen Polen über die senkrecht zur Drehachse liegende Ebene durch den Kugelmittelpunkt zugeordnete Großkreis ist der *Äquator* der Drehung. Die Bahnkreise der Punkte auf der Kugeloberfläche bilden eine parallele Schar von Kleinkreisen, also ein Parallelkreisbüschel.

Die *Orientierung* oder *Stellung* einer rotierenden Kugelsphäre ist bestimmt durch ihre Drehachse und den dazugehörigen Äquator. Eine sich um ihre Achse drehende Kugelsphäre hat demzufolge immer dieselbe Orientierung (Stellung), auch wenn sich ihre Lage im Raum, das heißt ihr Mittelpunkt, ändert. Bleibt der Mittelpunkt einer rotierenden Sphäre immer am selben Ort, behält die Sphäre sowohl ihre Stellung als auch ihre Lage im Raum (nicht aber die Lage ihrer Punkte).

A.1.4 Absolute Präzession

Die folgenden Abschnitte über absolute Präzession, Phänomenologische Präzession und die Kombination von absoluter und phänomenologischer Präzession sind beim ersten Anlauf schwierig nachzuvollziehen und können beim ersten Lesen übersprungen werden.

Ausgehend von einer rotierenden Kugel mit Mittelpunkt M , Rotationsachse A_{Rot} , Nordpol N und Südpol S sowie Äquator A_{eqRot} ist die Präzession definiert als eine zusätzliche Rotation der Kugel

um eine von A_{Rot} verschiedene Achse $A_{\text{Pr} \ddot{a} z}$, die ebenfalls durch den Mittelpunkt M der Kugel geht. Haben die beiden Achsen einen Zwischenwinkel α , so bewirkt die Rotation um $A_{\text{Pr} \ddot{a} z}$ eine Bewegung der Achse A_{Rot} auf einem Kegel (genauer, aber umständlicher: Doppelkegel) mit Öffnungswinkel 2α (**Figur A1.4**). Sie wird hier als *absolute Präzessionsbewegung* von A_{Rot} um $A_{\text{Pr} \ddot{a} z}$ bezeichnet, da dies die Bewegung von A_{Rot} von einem außerhalb des Kegels liegenden raumfesten Beobachtungsort B ist, der weder die Rotation um A_{Rot} noch diejenige um $A_{\text{Pr} \ddot{a} z}$ mitmacht.

Bei der absoluten Präzessionsbewegung bewegen sich sowohl Nord- wie Südpol der rotierenden Kugel auf einem Kleinkreis um die Schnittpunkte (Pole) der Achse $A_{\text{Pr} \ddot{a} z}$ mit der Kugel. Die Ebene des Äquators $A_{\text{eq}_{\text{Rot}}}$ umhüllt einen Kegel mit Öffnungswinkel $180^\circ - 2\alpha$ und bewirkt verschiedene Lagen dieses Äquators relativ zur Äquatorebene $A_{\text{eq}_{\text{Pr} \ddot{a} z}}$ der Präzession (**Figur A1.5**).

Für den raumfesten Beobachtungsort B außerhalb der Kugel, der für alles Folgende in der Ebene des Äquators $A_{\text{eq}_{\text{Pr} \ddot{a} z}}$ der Präzession liegen soll, erscheint diese Bewegung auf folgende Weise. Als Orientierungspunkt wähle man den dem Beobachtungspunkt B immer am nächsten liegenden Punkt Q auf der Oberfläche der sich bewegenden Kugel. Dieser Punkt Q liegt auf dem Äquator $A_{\text{eq}_{\text{Pr} \ddot{a} z}}$ in der Mitte der Scheibe, als welche die Kugel dem Beobachter in B erscheint.

Liegt bei der frei gewählten *Ausgangslage* der Nordpol der Achse A_{Rot} der Kugel hinten oben und geht die Präzession im Uhrzeigersinn um $A_{\text{Pr} \ddot{a} z}$ (die Drehrichtung und -geschwindigkeit der Rotation um die Achse A_{Rot} spielt im Folgenden keine Rolle), so ragt zunächst der sichtbare Teil des Äquators $A_{\text{eq}_{\text{Rot}}}$ der rotierenden Kugel in die obere (nördliche) Hemisphäre (Kugelhälfte) der durch Präzessionsachse $A_{\text{Pr} \ddot{a} z}$ und Äquator $A_{\text{eq}_{\text{Pr} \ddot{a} z}}$ bestimmten Kugel, liegt also oberhalb des horizontal liegenden Äquators $A_{\text{eq}_{\text{Pr} \ddot{a} z}}$. Der Äquator $A_{\text{eq}_{\text{Rot}}}$ neigt sich dann nach rechts und der sichtbare Schnittpunkt von $A_{\text{eq}_{\text{Rot}}}$ und $A_{\text{eq}_{\text{Pr} \ddot{a} z}}$ wandert von rechts her nach links in den Punkt Q , sobald der nördliche (obere) Teil der Präzessionsachse $A_{\text{Pr} \ddot{a} z}$ ihre größte Auslenkung nach rechts erreicht hat. Bewegt sie sich weiter nach oben vorne, so bewegt sich der Schnittpunkt von $A_{\text{eq}_{\text{Rot}}}$ mit $A_{\text{eq}_{\text{Pr} \ddot{a} z}}$ weiter nach links, die Lage von $A_{\text{eq}_{\text{Rot}}}$ wird dann flacher und der sichtbare Teil liegt schließlich ganz unterhalb $A_{\text{eq}_{\text{Pr} \ddot{a} z}}$ etc.

Man betrachte nun diejenigen Meridiane der rotierenden Kugel, welche durch den Punkt Q gehen; sie schneiden den sichtbaren Teil des Äquators $A_{\text{eq}_{\text{Rot}}}$ (per definitionem senkrecht) in einem Punkt L . Dieser bewegt sich während eines ganzen Umlaufs der Präzession auf einer Lemniskate: Bei der genannten Ausgangslage liegt L zuoberst in der Mitte des sichtbaren Teils des Äquators $A_{\text{eq}_{\text{Rot}}}$, wandert dann nach rechts in einer lemniskatischen Kurve nach unten, bis er mit Q zusammenfällt, sobald auch $A_{\text{eq}_{\text{Rot}}}$ durch diesen Punkt hindurchgeht (1. rechter oberer Quadrant der lemniskatischen Kurve). Der weitere Weg von L geht dann in einer lemniskatischen Schleife nach links unten bis zum Mittelpunkt des sichtbaren Teils des Äquators $A_{\text{eq}_{\text{Rot}}}$ in seiner tiefsten Lage (2. linker unterer Quadrant der lemniskatischen Kurve). Im weiteren Gang der Präzessionsbewegung bis wieder zur Ausgangslage hin, während der sich der sichtbare Teil des Äquators $A_{\text{eq}_{\text{Rot}}}$ nach links neigt, den Punkt Q durchschreitet und wieder ganz oberhalb von $A_{\text{eq}_{\text{Pr} \ddot{a} z}}$ zu liegen kommt, durchläuft L den 3. (rechten unteren) und 4. (linken oberen) Quadranten der Lemniskate (**Figur A1.5**); dabei hat sich der obere Teil der Achse A_{Rot} der rotierenden Kugel von oben vorne weiter nach links und wieder nach hinten oben zur Ausgangslage hin bewegt.

Es gibt noch eine andere mit der Präzession zusammenhängende lemniskatische Bewegung, nämlich die Bewegung des dem raumfesten Beobachter B immer am nächsten liegenden Punktes Q relativ zu dessen Orten auf der unteren oder oberen Hemisphäre (Kugelhälfte) der sich bewegenden Kugel.

Die Dynamik der Bewegung des dem Beobachter in B am nächsten liegenden Punktes Q relativ zur Kugel wird in erster Linie durch das Pendeln der Achse A_{Rot} vermöge der Präzession um $A_{\text{Pr} \ddot{a} z}$ von hinten nach vorne und umgekehrt bewirkt. So bewirkt zum Beispiel die sich vom Beobachter B aus gesehen von oben hinten nach oben vorne bewegende Achse A_{Rot} eine Bewegung dieses Punktes von der unteren Kugelhälfte über den Äquator $A_{\text{eq}_{\text{Rot}}}$ auf die obere Kugelhälfte. Auf der anderen Seite hat die vom Beobachter B aus gesehen etwa nach oben rechts geneigte Achse A_{Rot} zur Folge, dass sich der dem Beobachter B am nächsten liegende Punkt Q relativ zur sich bewegenden Kugel

und ihrem Äquator $A_{eq_{Rot}}$, auf deren oberer Hälfte im linken Bereich und auf deren unterer Hälfte im rechten Bereich bewegen muss, und zwar je weiter, je größer die Neigung der Achse A_{Rot} ist und je weiter er vom Äquator $A_{eq_{Rot}}$ entfernt ist.

Die genannte zweite Lemniskate des Punktes Q relativ zur sich bewegenden Kugel kommt dann folgendermaßen zustande: Angenommen, die Präzession geht im Uhrzeigersinn (vom Nordpol N der Rotationsachse A_{Rot} aus gesehen), dann bewegt sich dieser beobachtungsnächste Punkt bei der maximal nach hinten oben geneigten Achse A_{Rot} auf seinem (relativ zur rotierenden Kugel) südlichsten/tiefsten Punkt nach rechts. Während sich der nördlichste/obere Teil der Achse von hinten über rechts nach vorne bewegt, durchschreitet dieser Punkt das rechte untere Viertel der Lemniskate und erreicht deren Mittelpunkt, sobald A_{Rot} am weitesten nach rechts geneigt ist.

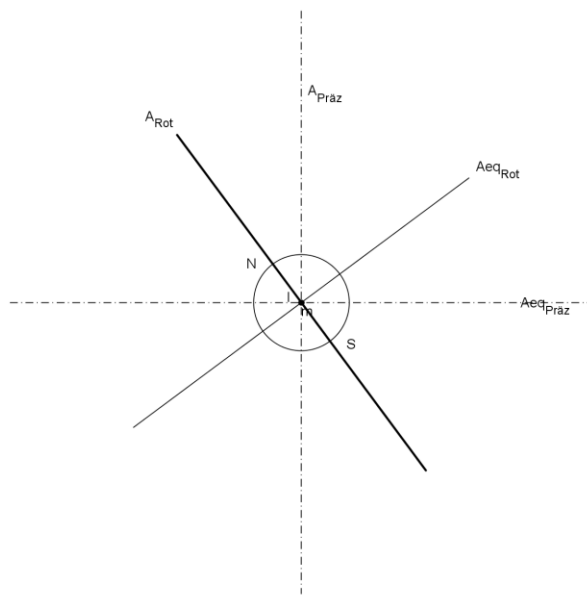
Soweit ist die Bewegung leicht nachvollziehbar. Für den nächsten Bewegungsschritt soll exemplarisch etwas genauer hingeschaut werden. In der zuletzt erreichten Lage ist die Achse A_{Rot} oben am stärksten nach rechts geneigt und setzt ihre Bewegung von hinten nach vorne fort, also muss sich der dem Beobachter B am nächsten liegende Punkt Q relativ zur sich bewegenden Kugel nach links oben bewegen. Dabei nimmt die nach rechts oben gehende Komponente der Neigung der Achse A_{Rot} relativ zum Beobachter B erst langsam, dann immer schneller ab und die nach vorne gehende Komponente der Neigung schneller und dann immer langsamer zu. Zusammen mit der mit zunehmendem Abstand vom Äquator $A_{eq_{Rot}}$ größeren Abweichung kommt es zum linken oberen Teil der Lemniskate, also durch die Kombination von zunehmender Abweichung beim Weg in die obere Kugelhälfte mit der relativ zum Beobachter B abnehmenden Rechtsneigung der Achse A_{Rot} sowie der zunehmenden nach vorne gehender Neigung.

Danach läuft der dem Beobachter B am nächsten liegende Punkt Q an seinem (relativ zur rotierenden Kugel) nördlichsten/höchsten Punkt wieder nach rechts in das nach unten gehende, rechte obere Schleifenviertel, sobald der nördlichste/obere Teil der Rotationsachse A_{Rot} seine vorderste Lage durchschritten hat und die Achse auf ihre vom Beobachter B aus gesehen am stärksten nach links geneigte Lage zusteuert. Hat sie diese erreicht, ist der beobachternächste Punkt wieder am Mittelpunkt der Lemniskate angelangt und nimmt das linke untere Schleifenviertel der Lemniskate in Angriff, bis er wieder, nach rechts weiter eilend, seinen südlichsten/tiefsten Punkt durchschreitet, wenn die obere Hälfte der Achse A_{Rot} nach hinten oben geneigt ist.

A.1.5 Phänomenologische Präzession

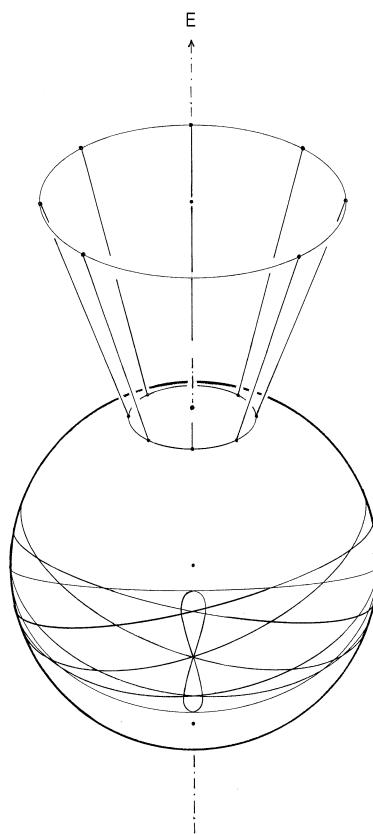
Die phänomenologische oder scheinbare Präzession einer Kugel kann auf zwei geometrisch-kinematisch äquivalente Weisen zustande kommen: (1) Man denke sich die Rotationsachse A_{Rot} einer Kugel raumfest (unverändert) und dann einen bewegten Beobachter, der die Kugel auf einem Kreis in einer Ebene $A_{eq_{Präz}}$ durch deren Mittelpunkt M in einer gebundenen Drehung umrundet, welche *nicht* mit der Äquatorebene $A_{eq_{Rot}}$ der Kugel zusammenfällt, also etwa einen Winkel α mit ihr bildet (**Figur A1.4**).

Geht die Bewegung des Beobachters kreisförmig im Gegenuhrzeigersinn um die Kugel, das heißt um deren Mittelpunkt M herum, so erscheint für den seinen Blick immer auf die Kugel heftenden Beobachter die Bewegung der Rotationsachse A_{Rot} als eine Bewegung auf einem Kegel mit Öffnungswinkel 2α und Achse $A_{Präz}$ im Uhrzeigersinn. Der bewegte Beobachter auf $A_{eq_{Präz}}$ sieht zugleich die Bewegung der Äquatorebene $A_{eq_{Rot}}$ der rotierenden Kugel einen Kegel mit Öffnungswinkel $180^\circ - 2\alpha$ umhüllen und den Äquator selbst eine entsprechende Bewegung ausführen (**Figur A1.5**) – genau gleich wie bei der vorangehend beschriebenen Situation der absoluten Präzession für den raumfesten Beobachter. Auch relativ zum bewegten Beobachter bewegt sich der ihm nächste Punkt (der immer auf demjenigen Äquator der Kugel liegt, der um eine halbe Drehung verschoben ist) auf der Kugeloberfläche auf einer Lemniskate in derselben Art wie oben beschrieben.



Figur A1.4

Lage der Achsen und Äquatorebenen bei absoluter oder phänomenologischer Präzession einer rotierenden Kugel.



Figur A1.5

Bewegung der Rotationsachse und des entsprechenden Äquators bei absoluter oder phänomenologischer Präzession einer rotierenden Kugel.

Man beachte, dass es sich bei dem sich auf einer Lemniskate auf der Kugeloberfläche bewegenden Punkt *nicht* um einen *auf* der rotierenden Kugel (das heißt mit ihr fest verbundenen) Punkt handelt. Ein solcher würde je nach seiner Lage auf der Kugel einen Kleinkreis parallel zum Äquator A_{eqRot} (und damit schief zur Äquatorebene $A_{\text{eqPräz}}$ der phänomenologischen Präzession) beschreiben.

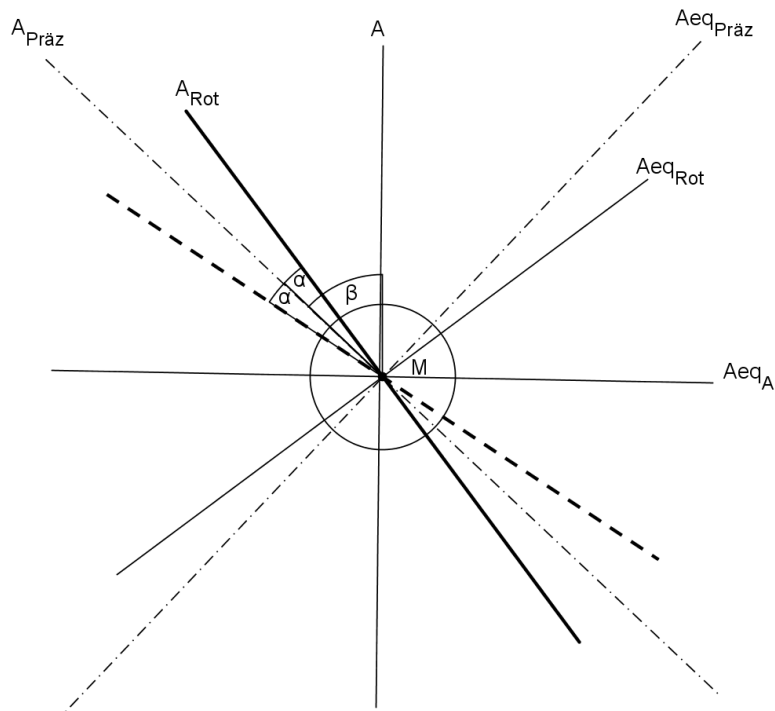
(2) Man denke sich anstatt des bewegten Beobachters einen raumfesten Beobachter und lasse die rotierende Kugel mit der raumfesten Achse A_{Rot} in einer Ebene $A_{\text{eqPräz}}$, die nicht mit der Äquatorebene A_{eqRot} der rotierenden Kugel zusammenfällt, sich im Gegenuhrzeigersinn um den Beobachter bewegen (**Figur A1.4**). Dabei soll hier unter dieser Bewegung keine Drehung der Kugel im Sinne einer gebundenen Drehung verstanden werden, das heißt keine solche, welche die Kugelachse A_{Rot} mitnimmt, sondern eine solche, bei welcher die Rotationsachse A_{Rot} raumfest und damit parallel zu sich selbst bleibt. Das lässt sich rein geometrisch natürlich nur realisieren, wenn sich die einer gebundenen Drehung um den Beobachter unterworfenen Kugel zugleich im Uhrzeigersinn um eine senkrecht auf $A_{\text{eqPräz}}$ liegende Achse $A_{\text{Präz}}$ durch den Mittelpunkt M der Kugel genau einmal herum dreht, wenn die Kugel einmal ihre Bahn durchläuft.

Haben nun die Äquatorebene A_{eqRot} der rotierenden Kugel und die Ebene $A_{\text{eqPräz}}$, auf welcher sich der Kugelmittelpunkt M kreisförmig im Gegenuhrzeigersinn um den Beobachter dreht, wieder den Zwischenwinkel α (der dann zugleich der Winkel zwischen A_{Rot} und der senkrecht auf der Ebene $A_{\text{eqPräz}}$ stehenden Achse $A_{\text{Präz}}$ ist), so dreht sich die Achse A_{Rot} phänomenologisch im Uhrzeigersinn für den kontinuierlich auf sie gerichteten Blick des Beobachters auf einem Kegel mit Öffnungswinkel 2α und die Achse $A_{\text{Präz}}$. Entsprechend umhüllt die Äquatorebene der rotierenden Kugel einen Kegel mit Öffnungswinkel $180^\circ - 2\alpha$ und der dem Beobachter am nächsten liegende Punkt der Kugel vollführt wieder eine lemniskatische Bewegung wie oben beschrieben (**Figur A1.5**).

A.1.6 Kombination von absoluter und phänomenologischer Präzession

Anstatt von einer Kombination von absoluter und phänomenologischer Präzession ist hier manchmal auch von *totaler phänomenologischer Präzession* die Rede. Man denke sich eine rotierende Kugel mit Achse A_{Rot} , mit Äquatorebene A_{eqRot} und mit einer langsam verlaufenden absoluten Präzession von A_{Rot} im Uhrzeigersinn um eine Achse $A_{\text{Präz}}$ durch den Mittelpunkt M der Kugel. Der Zwischenwinkel von A_{Rot} und $A_{\text{Präz}}$ sei α (**Figur A1.6**).

Wird nun diese Situation von einem Beobachter in einer Ebene A_{eqA} durch den Mittelpunkt M der Kugel, die weder mit A_{eqRot} noch mit der senkrecht zu $A_{\text{Präz}}$ liegenden Ebene $A_{\text{eqPräz}}$ zusammenfällt, im Gegenuhrzeigersinn umrundet, so ergibt sich aus der Kombination dieser beiden Bewegungen eine neue Situation. Sie ist geometrisch-kinematisch äquivalent zur Situation eines raumfesten Beobachters, um welchen sich die rotierende und langsam präzedierende Kugel so bewegt, dass ihre Achse A_{Rot} raumfest, das heißt immer parallel zu sich selbst bleibt.



Figur A1.6

Lage der Achsen und Äquatorebenen bei der Kombination von absoluter und phänomenologischer Präzession einer rotierenden Kugel.

Daraus ergibt sich folgende Bewegungsphänomenologie: Sieht man zunächst ab von der absoluten Präzessionsbewegung von A_{Rot} um $A_{Präz}$, so zeigt sich eine phänomenologische Präzession: Die Achse A_{Rot} bewegt sich im Uhrzeigersinn um die Achse A und bewirkt die bekannte Lemniskatenbewegung des beobachternächsten Punktes der Kugel. Nun hängt jedoch der Öffnungswinkel des entsprechenden Kegels von der Lage von A_{Rot} relativ zur Ebene Aeq_A ab: dieser Winkel verändert sich mit der Präzessionsbewegung von A_{Rot} um die Achse $A_{Präz}$. Bezeichnet man den Winkel zwischen $A_{Präz}$ und der Senkrechten A zu dieser Ebene Aeq_A mit β (**Figur A1.6**), so schwankt der Öffnungswinkel des Kegels der phänomenologischen Präzession in Kombination mit der absoluten Präzession um $A_{Präz}$ demnach zwischen $2(\alpha + \beta)$ und $2|\alpha - \beta|$. Letzterer Ausdruck ist für $\beta \leq \alpha$ gleich $2(\alpha - \beta)$ und für $\alpha < \beta$ gleich $2(\beta - \alpha)$. Wird die Kegelöffnung weiter, so wird auch die entsprechende Lemniskate größer und umgekehrt.

A.2 Astronomische Abkürzungen und Symbole

Tierkreisbilder

♈	Widder
♉	Stier
♊	Zwillinge
♋	Krebs
♌	Löwe
♍	Jungfrau
♎	Waage
♏	Skorpion
♐	Schütze
♑	Steinbock
♒	Wassermann
♓	Fische

Himmelskörper

☉	Sonne
♁	Erde
☾	Mond

Astronomische Abkürzungen

A	Apogäum (Erdferne), Aphel (Sonnenferne)
P	Perigäum (Erdnähe), Perihel (Sonnennähe)
E	Ekliptiknordpol
N	astronomischer Nordpol
S	astronomischer Südpol
gN	geographischer Nordpol
gS	geographischer Südpol
F	Frühlingspunkt, Frühlingsäquinoktium
H	Herbstpunkt, Herbstäquinoktium
SS	Sommersonnenwende, Sommer-Solstitium
WS	Wintersonnenwende, Winter-Solstitium

Mondbewegung

●	Neumond
○	Vollmond
☾	Erstes Viertel
☾	Letztes Viertel
♁	Aufsteigender Mondknoten
♁	Absteigender Mondknoten
Ag	Apogäum (Mond in Erdferne)
Pg	Perigäum (Mond in Erdnähe)

Zeitangaben

^a	Jahr
^d	Tag
^h	Stunde
^m	Minute
^s	Sekunde

Gradangaben

°	Grad
'	Bogenminute
"	Bogensekunde

Mathematische Zeichen

e	Exzentrizität der Ellipse
π	Kreiszahl (Kreisumfang/Durchmesser): 3.1415926 ...
≈	ungefähr gleich: von derselben Größenordnung

A.3 Literatúrauswahl

A.3.1 Phänomenologische Grundlagen

- Backhaus, Udo: *Astronomie plus: Schülerbuch*. Berlin: Cornelsen 2005.
- Baravalle, Hermann: *Die Erscheinungen am Sternenhimmel*. Stuttgart: Freies Geistesleben 1962 (4. Auflage)
- Brunner, William: *Von Stern zu Stern: Eine Weltschau von verschiedenen Himmelskörpern aus*. Zürich: Rascher 1923.
- Bühler, Walther: *Geistige Hintergründe der Kalenderordnung*. Stuttgart: Urachhaus 1978 (2. Auflage).
- Herrmann, Joachim: *dtv-Atlas Astronomie*. München: dtv 1998 (14. Auflage).
- Hoerner, Wilhelm: *Zeit und Rhythmus*. Stuttgart: Urachhaus 2006 (5. Auflage).
- Keller-von Asten, Heidi: *Sterne schauen dich an*. Dornach: Walter Keller Verlag o. J.
- Kepler, Johannes: *Traum vom Mond*. Übersetzt und herausgegeben von Ludwig Günther. Leipzig: Teubner 1898 [unvollständig deutsche Übersetzung, ausführlicher astronomischer Kommentar].
- *Somnium: The Dream, or Posthumous Work on Lunar Astronomy*. Translated with a commentary by Edward Rosen. Madison: University of Wisconsin Press 1967 [vollständige englische Übersetzung, ausführlicher historischer und editorischer Kommentar].
 - *Der Traum, oder: Mond-Astronomie. Somnium sive astronomia lunaris*. Mit einem Leitfaden für Mondreisende von Beatrix Langner. Berlin: Matthes & Seitz 2011 [vollständige deutsche Übersetzung, historische Einleitung, kein astronomischer Kommentar, kein editorischer Bericht].
- Kraul, Walter: *Erscheinungen am Sternenhimmel. Die Bewegungen der Gestirne beobachten und verstehen*. Stuttgart: Freies Geistesleben 2009 (3. Auflage).
- Langbein, P. Das Bild der Erde vom Mond und von anderen Planeten aus betrachtet. *Kosmos: Handweiser für Naturfreunde* 1922, Band 19, Heft 1: S. 16–20, Heft 3: S. 74–77, Heft 5: S. 133–136.
- Meyers Handbuch Weltall*. Mannheim: Meyers Lexikonverlag 1994 (7. Auflage).
- Mulder, Elisabeth: *Sonne, Mond und Sterne*. Stuttgart: Freies Geistesleben 1999 (4. Auflage).
- Schmidt, Thomas: *Zum Astronomie-Unterricht an der Waldorfschule*. Stuttgart: Manuskriptdruck der Pädagogischen Forschungsstelle beim Bund der Freien Waldorfschulen 1987.
- Schmidt, Thomas: *Astronomie – Kosmologie – Evolution*. Stuttgart: Freies Geistesleben 2004.
- Schultz, Joachim: *Rhythmen der Sterne*. Dornach: Verlag am Goetheanum 1985 (3. Auflage)
- Vreede, Elisabeth: *Astronomie und Anthroposophie*. Dornach: Verlag am Goetheanum 1980 (2. Auflage)

A.3.2 Hilfsmittel zur Beobachtung

- Baravalle, Hermann von: *Der Sternenhimmel über und unter uns. Sternkarten in Verbindung mit dem Durchblick durch die Erde*. Bern: Troxler 1958 (3. Auflage).
- Blattmann, Georg: *Geheimnisvolle Sternennwelt*. Stuttgart: Urachhaus 2003 (2. Auflage)
- Perrey, Werner: *Tierkreis und Planetenkarte*. Stuttgart: Urachhaus o. J.
- Perrey, Werner: *Sternbilder: Himmelsatlas für das ganze Jahr*. Stuttgart: Urachhaus 2002 (4. Auflage)
- Perrey, Werner: *Sternbilder und ihre Legenden*. Stuttgart: Urachhaus 2007 (4. Auflage).
- Drehbare Kosmos-Sternkarte*. Stuttgart: Franck-Kosmos 2010.
- Schultz, Joachim: *Drehbare Sternkarte ZODIAK*. Dornach: Verlag am Goetheanum 2001 (15. Auflage).
- Drehbare Sternkarte SIRIUS*. Bern: Hallwag-Verlag / Freemedien (verschiedene Auflagen).
- Sternkalender* (erscheint jährlich von Ostern zu Ostern). Dornach: Verlag am Goetheanum.
- Der Sternenhimmel* (jährlich). Stuttgart: Franckh-Kosmos.
- Hünig, Klaus: *Kleines Tischplanetarium*. Astro-Media (www.astromedia.de).
- Planetenbahnen in geozentrischer Sicht* (erscheint jährlich). Herrischried: Institut für Strömungswissenschaften (www.stroemungsinstitut.de).

A.3.3 Weiterführende Fachliteratur

- Bachmann, Heinz: *Kalenderarithmetik*. Zürich: Juris 1986 (2. Auflage).
- Eckhardt D. H.: Theory of the libration of the moon. *The Moon and the Planets* 1981, **25**, 3–49.
- Finkleman D., Seago J. H., Seidelmann P. K.: The Debate over UTC and Leap Seconds. *Proceedings of the ALAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference*. Toronto, Canada, 2010.
- Gabbey, Alan: Innovation and continuity in the history of astronomy: the case of the rotating moon; in: Barker, Peter / Ariew, Ariew: *Revolution and Continuity: Essays in the History and Philosophy of Early Modern Science*, Washington: Catholic University of America Press 1991, S. 95–129.
- Locher, Louis: *Arithmetik und Algebra*. Dornach: Philosophisch-Anthroposophischer Verlag am Goetheanum 1984 (2. Auflage).
- Meeus, Jean: *Astronomische Algorithmen*. Leipzig: Barth 1994 (2. Auflage).
- *Mathematical Astronomy Morsels [I]*. Richmond: Willmann-Bell 1997.
 - *More Mathematical Astronomy Morsels [II]*. Willmann-Bell, Richmond 2002.
 - *Mathematical Astronomy Morsels III*. Richmond: Willmann-Bell 2004.
 - *Mathematical Astronomy Morsels IV*. Richmond: Willmann-Bell 2007.
 - *Mathematical Astronomy Morsels V*. Richmond: Willmann-Bell 2009.
- Nelson R.A., McCarthy D.D., Malys S., Levine J., Guinot B., Fliegel H.F., Beard R.L., Bartholomew T.R.: The leap second: its history and possible future. *Metrologia* 2001, **38**, 509–529.
- Nordtvedt, K.: Probing gravity to the second post-newtonian order and to one part in 10^7 using the spin axis of the sun. *The Astrophysical Journal* 320: 871–874.
- Roncoli R.B.: *Lunar Constants and Models Document*. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology 2005.
- Schultz, Joachim: Die drei Sonnen und die Zeitgleichung. *Mathematisch-Astronomische Blätter* 1940, Heft 1, S. 41–49.
- Simon J.L., Bretagnon P., Chapront J., Chapront-Touzé M., Francou G., Laskar J.: Numerical expressions for precession formulae and mean elements for the Moon and the planets. *Astronomy and Astrophysics* 1994, **282**, 663–683.
- Seidelmann P. K. (Hrsg.): *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*. Mill Valley: University Science Books 1992.
- Thom, Alexander: *Megalithic Lunar Observatories*. Oxford: Clarendon 1973.
- Wlodarczyk, Jaroslaw: Libration of the moon, Hevelius's theory, and its early reception in England. *Journal for the History of Astronomy* 2011, 42(4), 495–520.
- Van Flandern T. C., Pulkkinen K. F.: Low-Precision Formulae for Planetary Positions. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 1979, **41**, 391–411.
- Voppel D.: Main geomagnetic field and its secular variation; in: Fuchs K., Soffel H. (Hrsg.): Landolt Börnstein, Neue Serie Bd 2b, *Geophysik der festen Erde, des Mondes und der Planeten*, Berlin: Springer Verlag 1985, S. 126–180.

A.3.4 Digitale Ressourcen

Internet

Internetressourcen offizieller akademischer Institute zu astronomischen, astrophysikalischen und geophysikalischen Themen gibt es viele, mit guten Graphiken, Diagrammen und Texten (Deutsch und vor allem Englisch). Dort findet man auch den sich ständig verändernden neuesten Stand der Daten und Messungen, die in diesem Text nur exemplarisch angegeben werden und, was die Stellen hinter dem Komma anbetrifft, in der Regel nicht auf dem neuesten Stand gehalten sind. Die entsprechenden Internetseiten sind leicht zu finden durch Eingabe spezifischer Stichworte in eine Suchmaschine oder über Aufruf entsprechender Artikel in *Wikipedia*. Hilfreich ist auch die Webseite *astronomie.de* mit ihren zahlreichen Erläuterungen zur phänomenologischen Sonnen- und Mondbewegung.

Wikipedia

Folgende Wikipedia-Artikel erwiesen sich unter anderen als besonders hilfreich (Zugriff im Oktober 2011): *Eklíptik*, *Erdrotation*, *Erdbahn*, *Kepler-Gleichung*, *Libration*, *Milchstraße*, *Mondbahn*, *Präzession*, *Nutation*, *Sonnenrotation*. Man vergleiche damit auch die entsprechenden englischen Artikel, die auf weitere informative englische Webseiten verweisen.

A.4 Nachweis der Abbildungsvorlagen

- 1.1, 1.2, 1.3: Nach Walter Wunderlich, *Darstellende Geometrie I* (Mannheim: Bibliographisches Institut 1966), S. 51.
- 1.7: Nach Wolfgang Held, *Materialien zur Kartographie* (Dornach: Mathematisch-Astronomische Sektion am Goetheanum 1990/91).
- 1.8: Aus Voppel 1985, S. 155.
- 1.9: Aus Voppel 1985, S. 163.
- 1.10: Aus Voppel 1985, S. 150.
- 1.11: Aus Voppel 1985, S. 177.
- 1.12: Aus Voppel 1985, S. 178.
- 2.1, 2.2: Aus Joachim Schultz, *Rhythmen der Sterne*, S. 18, 19.
- 2.4: *Meyers Handbuch Weltall* (Mannheim: Bibliographisches Institut, 7. Auflage 1994), S. 50.
- 2.5: Aus Joachim Schultz, *Rhythmen der Sterne*, S. 28.
- 2.6, 2.7, 2.8, 2.9: Aus Joachim Schultz, *Rhythmen der Sterne*, S. 30, 31, 32, 33.
- 2.10: Aus Joachim Schultz, *Rhythmen der Sterne*, S. 34.
- 2.11: Aus Sternkalender 1995/96 (Dornach: Philosophisch-Anthroposophischer Verlag am Goetheanum 1994).
- 2.13, 2.14: Verändert nach Joachim Schultz, *Rhythmen der Sterne*, S. 30.
- 2.15: Verändert nach der Sternkarte des Nordhimmels aus *Drehbare Sternkarte SIRIUS*. Bern: Hallwag 1960.
- 2.16: Verändert nach Joachim Schultz, *Rhythmen der Sterne*, S. 68.
- 2.17: Verändert nach Joachim Schultz, *Rhythmen der Sterne*, S. 67.
- 2.18: Günter Dietmar Roth (Hrsg.), *Handbuch für Sternfreunde, Band 1: Technik und Theorie* (Berlin-Heidelberg: Springer 1989), S. 288.
- 2.20, 2.21, 2.22: Verändert nach Joachim Schultz, *Rhythmen der Sterne*, S. 56.
- 2.23, 2.25: Verändert nach Joachim Schultz, *Rhythmen der Sterne*, S. 59.
- 2.26, 2.27: Aus Joachim Schultz, *Rhythmen der Sterne*, S. 63, 64.
- 3.1, 3.2: Aus Joachim Schultz, *Rhythmen der Sterne*, S. 89, 88, 91.
- 3.3: Verändert nach Alexander Thom, *Megalithic Lunar Observatories*, S. 19.
- 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8: Aus Joachim Schultz, *Rhythmen der Sterne*, S. 89, 88, 91.
- 3.9, 3.10, 3.11: Verändert nach Jean Meeus, *Mathematical Astronomy Morsels [I]*, S. 30, 29, 34–35.
- 4.2, 4.3, 4.4, 4.5: Aus Joachim Schultz, *Rhythmen der Sterne*, S. 48, 49, 59, 52.

Die übrigen Figuren stammen vom Verfasser. Die Figuren 1.4, 1.6 und 2.12 wurden nach Vorlagen des Verfassers von Bettina Kistler ausgeführt.

Index

- Aberration 11, 27, 88
- Aphel, Perihel bezüglich Sonnenbahn/Erdbahn 11f., 31, 36, 41, 49f., 77, 85, 86f., 96
- Apogäum, Apogäum bezüglich Mondbahn 11f., 56, 58, 64, 67f., 69f., 72, 99
- Apsidenbewegung der Sonnenbahn 37
- Apsidenbewegung der Mondbahn 57
- Apsidenlinie der Sonnenbahn 12, 36f., 41, 49, 51, 62
- Apsidenlinie der Mondbahn 56, 64, 72f., 76f., 93, 99f.
- Äquator 14f., 108f.
- Astrologie 10
- Astrophysik 9, 10, 13
- Astrosophie 10
- Ausgleich zweier Rhythmen 56, 65f.
- Beobachterzentriertes Weltbild 11
- Bewegungen der Ekliptikebene 28
- Bewegungsrhythmen 7, 9
- Breitenkreise 14f., 24, 108f.
- Cassinische Gesetze 69, 75, 98
- Chandler'sche Periode 26
- Corioliskräfte 26
- Datumgrenze 45
- Deklination, magnetische 16f.
- Deklination von Breitenkreisen 24, 57–59
- Diametralpunkte 14f., 107–109
- Drakonitischer Mondmonat 56, 64–66, 71f.
- Drehachse 25, 27, 109
- Eigenbewegungen der Sonne 52f.
- Eigenbewegungen des Mondes 69–71
- Ekliptik 11f., 28–34
- Ekliptikachse 28, 35f., 51, 79
- Ekliptikale Breite und Länge 29
- Ekliptikales Koordinatensystem 29
- Ekliptikebene 28, 52, 70–72, 89f.
- Ekliptikkugel 11, 19, 28f., 34–40
- Ekliptiknordpol und -südpol, siehe Nordpol, Südpol
- Ellipsoid 11, 14, 25
- Ephemeridenzeit 11, 46
- Erdachse 11f., 27, 79, 87–91, 100–102
- Astronomische 25–27
- Bewegungen 86–93, 100–102
- Geografische 15, 22, 27
- Physikalische Trägheitsachse 27
- Erdkugel 14–14, 22–24, 34, 79–85, 86–91
- Erdensonnentage 95f.
- Erdfinsternis 100f.
- Feinheiten der Mondbewegung 76f.
- Finsternis 75
- Sonne und Mond 11f., 63f., 65–68
- Erde und Mond 100f.
- Fixsterne 10, 12, 19–24, 44, 51
- Fixsternkugel 11f., 19, 21, 24, 28, 34–40, 42, 44
- Foucault'sches Pendel 26
- Frühlings-Äquinoktium, Frühlingspunkt F 28–33, 35–41, 47–51, 57–60, 91
- Galaktozentrisches Weltbild 12
- Geographische Breite 15, 22
- Geographische Erdachse 15, 22
- Geographische Länge 15
- Geographische Ost- und Westpunkte 21
- Geoid 22, 33
- Geometrisch-kinematischer Gesichtspunkt 10
- Geozentrischer Gesichtspunkt 11
- Geozentrisches Weltbild 11
- Greenwich 15
- Gregorianischer Kalender 42f.
- Großkreisbüschel 14f., 48, 79, 81, 102, 107–109
- Großkreis 14f., 21, 107–109
- Heliakischer Aufgang und Untergang 11, 29
- Heliozentrischer Gesichtspunkt 11
- Heliozentrisches Weltbild 11
- Herbst-Äquinoktium, Herbstpunkt H 28f., 31f., 35–37, 41, 48f., 57, 79–81, 102

Himmelsachse 11f., 15, 21f., 24f., 27f., 51, 84, 94f.
 Himmelsäquator 11f., 14, 21–24, 32f., 37f., 41, 44, 57f.
 Himmelsmechanik 9–12, 46, 88
 Himmelsnordpol und Himmels-südpol 14, 21–24, 29, 38f., 51, 94
 Himmelspol 21, 23, 38, 48, 84, 91
 Höchststellung des Mondes 58f.
 Höhenwinkel 21, 23f., 25
 Horizont, siehe Mathematischer Horizont
 Horizontebene 21, 28, 57, 59
 Horizontkoordinatensystem 11, 21, 25
 Horizontkreis 21f., 32
 Horizontkugel 19, 21–23, 28, 34, 90

 Inklination 16
 Interpretation von Bewegungen 7, 10, 79

 Jahreslichtgrenzen 79, 81, 87
 Jahreskugel 19
 Jahreszeitenkugel = Ekliptikkugel 29
 Julianischer Kalender 42

 Kalenderordnung 42f.
 Kepler'schen Gesetze für die Erdbahn 12, 86
 Kleinkreise 15, 28, 81, 107–109
 Knotenlinie der Mondbahn 56, 62, 64, 71–73, 76, 93, 99f., 102
 Kompass, Kompassnadel 16, 27
 Koordinatensystem
 Äquatoriales 23
 Ekliptikales 29
 Horizont- 21, 25
 Sphärisches 14f., 108f.
 Kopernikanische Bewegung 87–90
 Kugelgeometrie 107–114
 Kugeloberfläche 107, 109, 111, 113
 Kulminationskreis 21

 Längskreisbüschel 107f.
 Längskreise 15, 109
 Lemniskate 11, 44f., 47–50, 73, 75, 89f., 99, 110–114
 Lemniskatenbewegung 90, 114

 Libration 11, 69–75, 98–100
 Lichtrhythmen 9, 11
 Lunazentrisches Weltbild 9, 12, 95–97

 Magnetische Erdkugel 16–18
 Magnetischen Pole 15
 Mathematischer Horizont 11, 19, 21f., 24, 29, 90
 Mechanisch-physikalischer Gesichtspunkt 10–13
 Meridian 14f., 21, 23, 32f., 44–49, 81, 90, 95f., 98, 107–109
 Meridiandurchgang 28, 44, 48, 55
 Meridiankreis 14f., 21f., 23f., 107f.
 Meridiankreisbüschel 48, 108
 Metonischer Mondzyklus 65f.
 Missweisung 16f.
 Mittlere Sonne, Sonnentage 11, 34, 36f., 44, 47–50, 55f., 61
 Mittlerer Sonnenlauf 44
 Momentane Rotationsachse 25
 Mondachse 12, 70–73, 75, 93
 Mondbahn 11f., 55–60, 61, 64, 70–72, 74f., 76f., 93, 101f.
 Mondbewegung 55–57, 62, 64, 75, 76f.
 Mondfinsternisse 11, 25, 45, 63f., 66–68
 Mondhimmelsäquator 12, 95f., 98–100, 102
 Mondjahr 61, 65, 99
 Mondknoten 11f., 55–60, 62f., 65f., 74f., 76, 91–93, 100, 102f.
 Mondknotenperiode 56, 58, 91, 102
 Mondkugel 55f., 61, 95
 Mondmonat
 Anomalistischer 56, 64, 93
 Drakonitischer 56, 64–66, 71f., 93
 Siderischer 55, 64, 93
 Synodischer 61f., 64f., 93
 Tropischer 61, 64, 93
 Mondrhythmen 64
 Mondsonnentag 95f.
 Mondsterntage 95f.
 Mondstunden 55f.
 Mondtag, Mondtagesbewegung 61, 99
 Mondwende 55, 59f.

- Nadir 9, 19, 21
- Neuerde 96, 98, 100
- Neumond 61, 63, 65–68, 76f., 96
- Nordpol, Südpol
- Astronomisch (Himmelspol) 14f., 21–23
 - Ekliptisch (Ekliptikpol) 11, 28f., 31, 37–39, 51
 - Geografisch 15
 - Magnetisch 16
- Nullbreitenkreis 109
- Nullmeridian 15, 109
- Nutation der Erdachse 11, 91–93
- Nutation des Erdkörpers 25
- Parallelkreisbüschel 14f., 107–109
- Parallelkreise 22, 24, 107, 109
- Parallelkreisschar 107
- Perihel, siehe Aphel
- Perigäum, siehe Apogäum
- Planetozentrisches Weltbild 12
- Platonisches Weltenjahr, platonische Bewegung 35f., 39f., 51, 59, 103
- Polarnächte 34, 79, 81, 96
- Polartage 34, 79, 81, 96
- Polbewegung 51, 94
- Polbewegungen, nichtperiodische 26
- Polhodie 26
- Polhöschwankung 25, 51, 94
- Polwanderung 18
- Präzession,
- absolute 109f., 113f.
 - phänomenologische 111–114
- Präzession der Erdachse
- absolute 87f., 89f., 102f.
 - phänomenologische 100
- Präzession der Sonnenachse, phänomenologische 52, 97
- Präzession der Mondachse, absolute und phänomenologische 71–73, 93f.
- Präzessionsbewegung des Frühlingspunktes, phänomenologische und absolute 38, 51, 86, 89–91
- Präzessionskegel 91
- Rektaszension 23
- Rotationsachse
- Erde 25f., 94, 100
 - Mond 12, 71–75, 93, 95, 102
 - Sonne 11, 52, 97
- Rotationsellipsoid 25
- Sarosperiode 66, 72
- Saroszyklus, Saros 66f.
- Schaltregel 42
- Schraubenlinie, sphärische 28
- Siderischer Tag, siehe Sterntag
- Sommersonnenwende, Sommer-Solstitium 28f., 31f., 35, 39, 57f.
- Sonnenbahn, siehe auch Ekliptik 11f., 28–30, 32, 51, 57f., 95f., 98, 102
- Sonnenfinsternisse 11f., 63f., 68, 100
- Sonnenhimmelsäquator 11, 90
- Sonnenjahr 32, 37, 41
- anomalistisches 36, 41
 - drakonitisches 62, 66
 - siderisches 34, 41
 - tropisches 37, 41
- Sonnenlauf 29, 31, 42, 44, 85
- Sonnenrhythmen 41
- Sonnentag 28
- Äquatorialer 44
 - Ekliptikaler 44
 - Mittlere 34–37, 42, 55f., 61
 - Wahrer 44
- Sonnenzeit 11, 44f.
- Sternbilder des Tierkreises 20, 25, 31f., 39
- Sterntag 21, 23, 27f., 44
- Sternzeichen 32
- Sternzeit 23, 44
- Stundenwinkel 23
- Südpol., siehe Nordpol
- Tagesbewegung der Fixsterne 19–24
- Tageskugel 11, 19–24, 28, 34, 37f., 44, 47–49, 51, 55, 85, 94
- Tageslichtgrenzen 81–83
- Tiefststellung des Mondes 58f.
- Tierkreis, siehe Ekliptik

Tierkreisbilder 29–34, 39, 87, 113
 Tierkreiszeichen 32, 39
 Topozentrischer Gesichtspunkt 9, 11, 95
 Tropisches Sonnenjahr 37, 41–43, 65f.
 Tropischer Mondmonat 61, 64

 Uhren 44, 46, 98

 Vollerde 96, 98, 100
 Vollmond 55, 61, 63, 65, 68, 76f., 96, 98

 Wanderung des Frühlingspunktes 35–40
 Weltbilder 11–13
 Azentrisch 12f.
 Beobachterzentriert 11
 Galaktozentrisch 12
 Geozentrisch 11
 Heliozentrisch 11
 Lunazentrisch 12
 Planetozentrisch 12
 Weltzeit 45f.
 Wendekreis 15, 28, 34, 39
 Widderpunkt 39
 Wintersonnenwende, Winter-Solstitium 28f., 31f., 35,
 58, 79, 81

 Zeitgleichung 11, 44, 47–50
 Zeitgleichungslemniskate 47–50
 Zeitzone 44
 Zenit 9, 19, 21–24
 Zenitmeridian 23f., 44, 48f., 79, 90, 95f.
 Zirkumpolarsterne 21f., 29, 34, 90, 95