

Astronomische Navigation

Skript zur Vorbereitung
auf den
Sporthochseeschifferschein

Lutz Böhme



Astronomische Navigation

**Skript zur Vorbereitung
auf den
Sporthochseeschifferschein**

Lutz Böhme

Erweiterte Ausgabe April 2021

Inhalt

Astronomische Navigation	7
Grundgedanken der astronomischen Navigation	8
Von der Beobachtungshöhe zur Standlinie	10
Nautisches Jahrbuch.....	14
Nautisches Jahrbuch – Tagseite	15
Nautisches Jahrbuch – Schalttafel.....	18
Sextant.....	21
Teile des Sextanten	23
Gestirnhöhe messen mit dem Sextanten	23
Ablezen des Sextanten	24
Fehler des Sextanten.....	25
Standlinienkonstruktion nach Saint Hilaire	27
Höhenwinkelmessung – Korrekturen.....	31
Höhenwinkelmessung – Korrektur – Kimmtiefe	31
Höhenwinkelmessung – Korrektur – Refraktion	32
Höhenwinkelmessung – Korrektur – Gestirnsdurchmesser, Höhen- und Horizontalparallaxe	33
Zeitmessung – die Uhr.....	36
Zeiten und Zeitarten	37
Dämmerung.....	38
Vollständige Berechnung.....	41
Grafische Lösung ohne Seekartenausschnitt	44
Versegeln von astronomisch gewonnenen Standlinien	45
Kurzes Versegeln von astronomischen Standlinien	46
Längeres Versegeln von astronomischen Standlinien.....	47
Astronomische Koordinatensysteme	49
System des Horizontes	49
System des Himmelsäquators	51
Nautisch astronomisches Grunddreieck	52
Polfigur	54
Meridianfigur.....	55
Mittagsbesteck	57
Nordsternbreite.....	57
Orientierung am Himmel.....	58
Fixsterne	58
Hilfsmittel zur Fixsternidentifikation.....	59

Planeten.....	59
Der umgekehrte Weg	60
Praktische Handhabung.....	60
Messung an Bord.....	60
Astronomische Kompasskontrolle.....	61
Koppel-, Besteck- und Großkreisrechnung.....	62
Hinweise zur Formelsammlung im SSS/SHS-Begleitheft	63
Hinweise für Taschenrechnernutzung.....	63
Koppelrechnung	63
Besteckrechnung	63
Koppelrechnung (loxodromisch) – mit Mittelbreite	64
Besteckrechnung (loxodromisch) – mit Mittelbreite	64
Vergrößerter Breite	65
Koppelrechnung (loxodromisch) – mit vergrößerter Breite.....	66
Besteckrechnung (loxodromisch) – mit vergrößerter Breite	66
Besteckrechnung (orthodromisch).....	67
Hinweis zur Arkustangens-Funktion.....	68
Abkürzungsverzeichnis	69
Literaturverzeichnis.....	71
Stichwortverzeichnis	72

Grundgedanken der astronomischen Navigation

Warum kann mit Gestirnen, die zigtausende Kilometer entfernt sind, eine Position auf der Erde bestimmt werden?

Damit es nicht gleich zu komplex wird, soll folgender Zwischenschritt den Einstieg erleichtern: Wie kann mit einer Gestirnsbeobachtung erst einmal nur eine Standlinie ermittelt werden?

Grundvoraussetzung ist die genau bekannte Position des Gestirns zum Beobachtungszeitpunkt. Diese Position ist für eine Vielzahl von Gestirnen vorausberechnet und im Stundenraster im Nautischen Jahrbuch aufgeführt. Der Aufbau des Jahrbuches folgt im nächsten Kapitel. Interessanterweise ist die Angabe der Gestirnsposition nicht dreidimensional. Es reicht für die gesamte astronomische Navigation aus, die Gestirnsposition wie einen geographischen Ort, also auf der Erdoberfläche, nach Breite und Länge zu benennen. Folgende Grafik veranschaulicht diese astronomische Ortsbeschreibung:

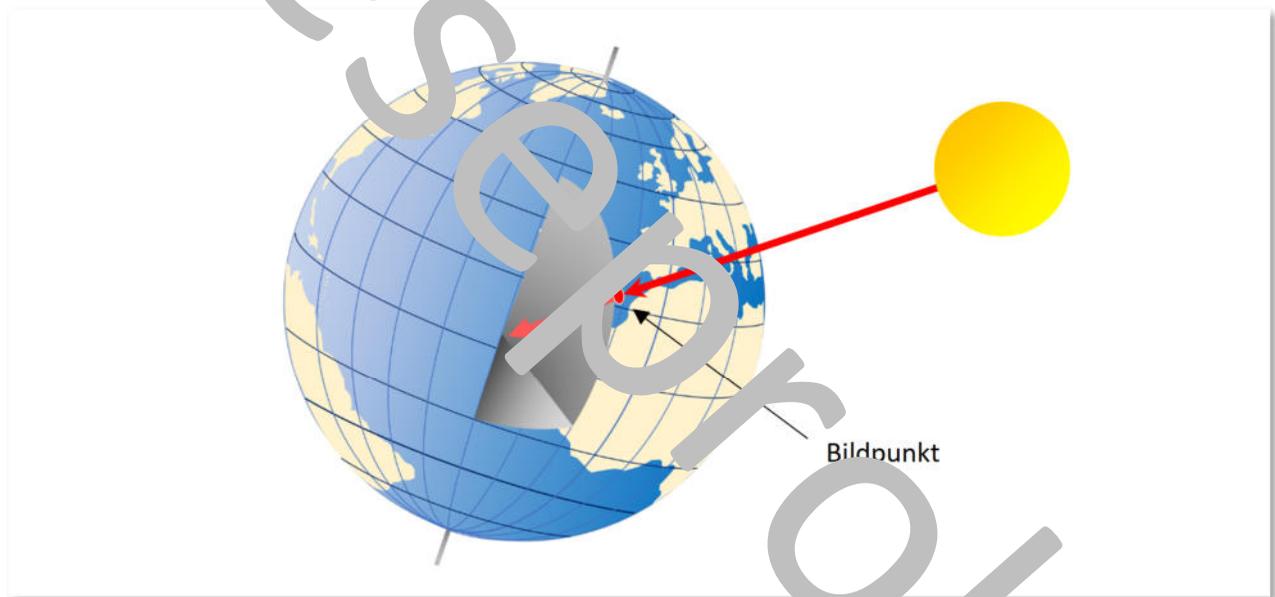


Abbildung 1: Bildpunkt auf Erdkugel: $\varphi = 32^{\circ} 00,0' N$, $\lambda = 014^{\circ} 00,0' W$

Eine gedachte gerade Linie vom Mittelpunkt des Gestirns zum Mittelpunkt der Erde durchschlägt irgendwo die Erdoberfläche. Dieser Punkt heißt **Bildpunkt**. Weil dieser auf der Erdoberfläche liegt, entspricht seine Position terrestrischen Koordinaten nach Breite und Länge. Über diesem Punkt steht das Gestirn in einem kurzen Moment senkrecht; bevor sich die Erde schnell weiterdreht.

Diese Bildpunktkoordinaten haben folgende astronomische Bezeichnungen: Die Breite wird **Deklination** oder **Abweichung** genannt und mit dem Formelzeichen „ δ “ gekennzeichnet. Die Länge heißt **Greenwicher Stundenwinkel** und wird mit „Grt“ abgekürzt. Grt und δ sind Parameter des astronomischen Koordinatengitters „System des Himmelsäquators“ (siehe Kapitel „Astronomische Koordinatensysteme“).

Darüber hinaus wird astronomisch immer erst die Länge, dann die Breite angegeben. Als dritter Unterschied wird die Längenangabe, also der Grt, vollkreisig nur westwärts von 0° bis 360° gezählt. Es wird also nicht wie in der terrestrischen Navigation zwischen Ost- und Westlängen unterschieden.

Beispiel: Terrestrisch $\varphi = 32^{\circ}00,0' N$, $\lambda = 019^{\circ}00,0' E$ wird astronomisch $\text{Grt} = 341^{\circ}00,0'$, $\delta = 32^{\circ}00,0' N$.

Erklärung: Aus 360° Vollkreis minus 019° Ost wird 341° West. Das „W“ hinter dem Grt wird weggelassen, da Bildpunktkoordinaten immer nur mit westlichen Längen beschrieben werden.

Warum wird nun aber die dritte Dimension, die Entfernung nicht benötigt? Diese Frage lässt sich mit einem einfachen Beispiel beantworten (Im Folgenden wird vorerst UT1 = UTC gesetzt. Siehe Kapitel „Zeiten und Zeitarten“).

Wenn am 20. Juni 2005 ein Beobachter um 02:00:00 Uhr UT1 genau unter Jupiter steht, sieht er das Gestirn exakt senkrecht über sich. Nun muss nur das Nautische Jahrbuch mit dem Datum 20. Juni 2005 aufgeschlagen und die Uhrzeitzeile von 02:00:00 Uhr UT1 angesehen werden, um die Koordinaten für Jupiter herauszufinden. Dort steht für Jupiter: $\text{Gr} = 109^{\circ}20,9'$ und $\delta = 02^{\circ}25,4' \text{ S}$. Nach kurzer Umwandlung der astronomischen in die terrestrische Schreibweise ist sofort der terrestrische Ort: $\varphi = 02^{\circ}25,4' \text{ S}$ und $\lambda = 109^{\circ}20,9'$ ermittelt. Der Standort ist der aktuelle Bildpunkt von Jupiter. Fertig! Die Entfernung zu Jupiter ist völlig egal. Der Beobachter hat seine „einfache“ astronomische Ortsbestimmung.

Hinweis: 02:00:00 Uhr UT1 bedeutet nicht 02:00 Uhr nachts Ortszeit, denn UT1 ist die Londoner Ortszeit am Null-Meridian. Grundsätzlich wird in der astronomischen Navigation mit UT1 gearbeitet. Die lokale Ortszeit spielt nur selten eine Rolle. (siehe Kapitel „Zeiten und Zeitarten“)

Sieht ein Beobachter ein Gestirn genau senkrecht über sich, dann steht er genau am Bildpunkt des Gestirns. Das Gestirn steht für ihn im **Zenit**. Die Bildpunkt-Koordinaten entsprechen den Beobachterkoordinaten und diese stehen im Nautischen Jahrbuch.

(Einschränkung: nur knapp 50 Gestirne und nur im Stundenraster sind im Jahrbuch aufgelistet)

Der Begriff **Gestirn** ist der Oberbegriff für alle natürlichen Himmelskörper, also Mond, Planeten, Fixsterne und damit auch die Sonne.

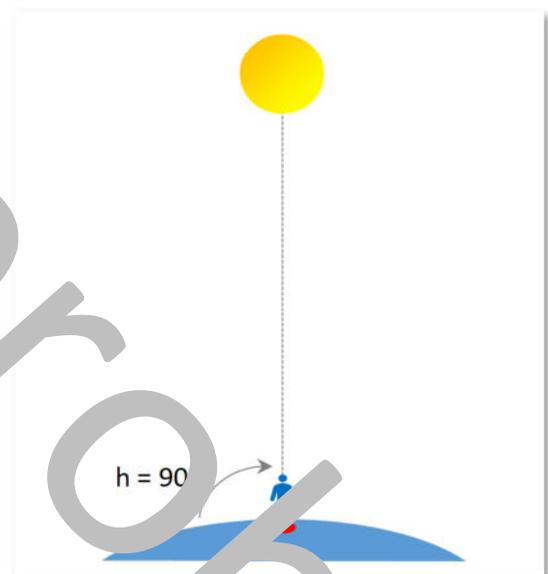


Abb. 2: Beobachter am Bildpunkt

Aber wo kommt der Sextant ins Spiel? Dass ein nautisch relevantes Gestirn für einen Beobachter genau im Zenit steht, wäre schon ein ziemlicher Zufall und außerdem nicht von großer Dauer. Schließlich bewegt sich der gesamte Sternenhimmel schnell über uns hinweg. Die oben beschriebene Zenit-Methode wird also nur sehr selten funktionieren.

Der Sextant ermöglicht einen neuen Ansatz.

Mit dem Sextanten wird die Winkelhöhe zwischen der Standfläche des Beobachters und dem Gestirn gemessen. Diese Höhe wird „h“ abgekürzt. In obigem Fall mit dem Gestirn im Zenit: $h = 90^{\circ}$.

Zusammen mit mindestens einer weiteren Höhenwinkelmessung (z. B. auf ein anderes Gestirn) führt eine so gewonnene zweite kreisförmige Standlinie zu zwei eindeutigen Schnittpunkten. Einer der beiden ist der tatsächliche Ort des Beobachters (O_b). Der zweite Schnittpunkt muss, zum Beispiel durch Koppeln (siehe Kapitel „Terrestrische Navigation“), als Ort ausgeschlossen werden. Dieses Klingt etwas riskant, ist aber in Anbetracht der meist sehr großen Abstände der beiden Schnittpunkte in der Regel gut machbar.

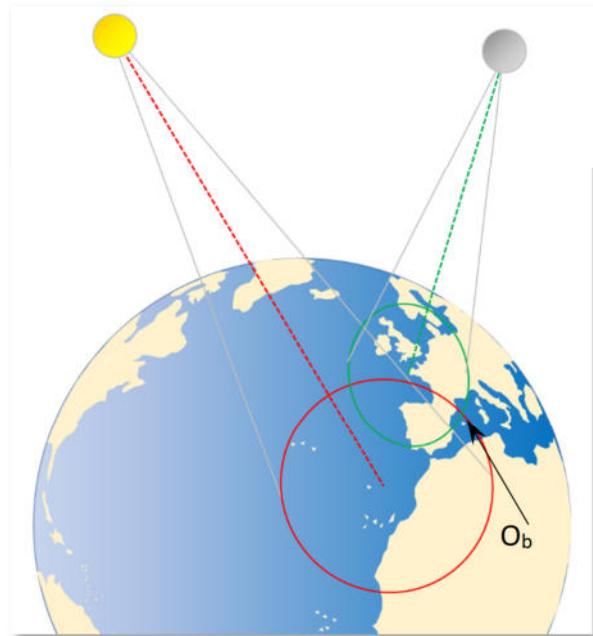


Abb. 6: Erdkugel mit zwei Gestirnsbeobachtungen

Wird diese Betrachtung in eine Weltkarte übertragen, ergibt sich folgende Darstellung:

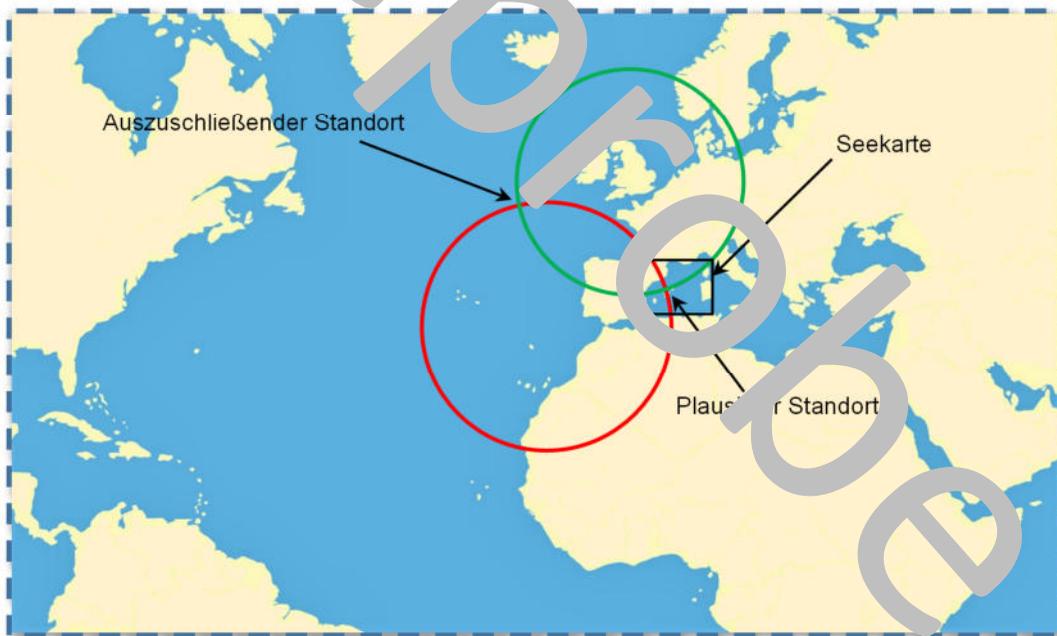


Abb. 7: Beide Standlinien in der Weltkarte (sind in der Mercatorprojektion eigentlich keine Kreise sondern zu den Polen hin geweitet)

Der nordwestliche Standort kann in diesem Beispiel ausgeschlossen werden, da der Törn am Vortag auf Korsika begann.

Nautisches Jahrbuch

Für die astronomische Navigation sind der sichere Umgang und das Herauslesen der erforderlichen Werte aus dem Nautischen Jahrbuch notwendig.

Das **Nautische Jahrbuch** wird jährlich für das jeweilige Jahr unter anderem vom *Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie* oder dem *Nautical Almanac* vom *United Kingdom Hydrographic Office* herausgegeben. Beide Werke beinhalten eine Unzahl von Tabellen, Listen und Plänen.



Abb. 9: Nautisches Jahrbuch

Im Begleitheft zur Ausbildung zum Sportsee- und Sporthochseeschifferschein sind Auszüge aus dem original Nautischen Jahrbuch (N.J.) des Jahres 2005 abgedruckt.

Das vollständige Original-N.J. umfasst u.a. Erklärungen der Tafeln und Ephemeriden (Bahndaten der Gestirne), Tabellen für Finsternisse, Jahreszeiten, Gleichung, Mondphasen, Fixsterne. Es folgen Listen für die Nutzung des Nordsterns, Sichtbarkeitszeiten der Planeten, Auf- und Untergangszeiten von Sonne und Mond mit Dämmerungszeiten gefolgt von Sternarten und den Gesamtbeschickungstafeln. Den größten Bereich im N.J. nehmen die 365 Tagseiten mit den Ephemeriden (aus dem griechischen: „einen Tag beschreibend“) der nautisch tauglichen Gestirne ein. Die Ephemeriden sind die Gestirnspositionen – jeweils für einen Tag im Stundenraster – aufgelistet. Am Ende des N.J. folgen die Schalttafeln.

Hinweis: Als „nautisch taugliche Gestirne“ werden die Sonne, der Mond, vier Planeten und insgesamt gut 50 Fixsterne genutzt.

Im Begleitheft zur SSS/SHS-Ausbildung sind nur folgende Teile des original Nautischen Jahrbuchs abgedruckt: Übersicht der Fixsterne, Sonnenauf- und -untergangstafeln mit Dauer der Dämmerung, Beschickungstafeln, knapp 100 Tagseiten von den 365 des Jahres 2005 und abschließend die Schalttafel!

Mit einem Nautischen Jahrbuch, einem Sextanten und unter Zuhilfenahme eines Taschenrechners mit Winkelfunktionen ist die Positionsbestimmung umzusetzen. Ausschließlich die Methode mit einem nicht programmierbaren Taschenrechner wird in der SHS-Prüfung verlangt und hier weiter vorgestellt. Noch einfacher wäre es mit einem programmierbaren Taschenrechner.

Es gibt noch weitere Methoden. Im amerikanischen sind die HO-Tafeln und im europäischen Raum werden mit den programmierbaren Taschenrechnern das Semiversusverfahren verbreitet.

171. Tag im Jahr 2005 Radius der Sonne an diesem Tag: 15,7' Zeit seit Neumond in Tagen

171	SONNE			MOND				FRÜHLP.	FIXSTERNE		
UT1	Grt	δ	Grt	Unt	δ	Unt		Nr	β	δ	
0	179 38,2	23 26,1 N	032 18,6	6,3	23 00,2 S	10,2	268 18,2	1	357 50,1	29 07,0 N	
1	194 38,1	23 26,1	046 43,9	6,3	23 10,4	10,1	283 20,7	3	353 21,7	42 16,4 S	
2	209 37,9	23 26,2	061 09,2	6,1	23 20,5	10,0	298 23,2	4	349 48,1	56 33,7 N	
3	224 37,8	23 26,2	075 34,3	5,9	23 30,5	9,8	313 25,6	5	349 02,2	17 57,3 S	
4	239 37,7	23 26,2	089 59,2	5,8	23 40,3	9,7	328 28,1	8	335 31,4	57 12,3 S	
5	254 37,5	23 26,2 N	104 24,0	5,7	23 50,0 S	9,5	343 30,6	11	328 08,1	23 29,2 N	
6	269 37,4	23 26,2	118 48,7	5,5	23 59,5	9,4	358 33,0	12	314 21,9	04 06,7 N	
7	284 37,3	23 26,2	133 13,2	5,4	24 08,9	9,3	013 35,5	14	308 49,9	49 52,7 N	
8	299 37,1	23 26,3	147 37,6	5,3	24 18,2	9,1	028 38,0	16	290 56,9	16 31,3 N	
9	314 37,0	23 26,3	162 01,9	5,1	24 27,3	9,0	043 40,4	17	281 18,4	08 11,6 S	
10	329 36,9	23 26,3 N	176 26,0	5,0	24 36,3 S	8,8	058 42,9	18	280 44,2	46 00,3 N	
11	344 36,7	23 26,3	190 50,0	4,9	24 45,1	8,6	073 45,4	19	278 39,1	06 21,4 N	
12	359 36,6	23 26,3	205 13,9	4,7	24 53,7	8,5	088 47,8	24	271 08,4	07 24,6 N	
13	014 36,5	23 26,3	219 37,6	4,6	25 02,2	8,4	103 50,3	27	263 59,5	52 41,8 S	
14	029 36,3	23 26,3	234 01,2	4,4	25 10,6	8,1	118 52,7	29	258 39,6	16 43,3 S	
15	044 36,2	23 26,4 N	248 24,6	4,4	25 18,7 S	8,0	133 55,2	30	255 17,9	28 58,7 S	
16	059 36,1	23 26,4	262 48,0	4,2	25 26,7	7,9	148 57,7	33	245 06,6	05 12,8 N	
17	074 35,9	23 26,4	277 11,2	4,0	25 34,6	7,7	164 00,1	34	243 35,7	28 01,0 N	
18	089 35,8	23 26,4	291 34,2	4,0	25 42,3	7,5	179 02,6	35	234 21,3	59 31,7 S	
19	104 35,6	23 26,4	305 57,2	3,8	25 49,8	7,3	194 05,1	36	222 57,5	43 27,3 S	
20	119 35,5	23 26,4 N	320 20,0	3,7	25 57,1 S	7,2	209 07,5	37	221 42,1	69 44,5 S	
21	134 35,4	23 26,4	334 42,7	3,6	26 04,3	7,0	224 10,0	38	218 02,5	08 40,9 S	
22	149 35,3	23 26,4	349 05,3	3,5	26 11,3	6,8	239 12,5	39	207 50,3	11 56,6 N	
23	164 35,2	23 26,4	363 27,8	3,3	26 18,1	6,6	254 14,9	41	193 59,1	61 43,6 N	
	T 12:02	12 00,0'	T 22:40	UT1 4 12 20			T 06:06	42	182 40,0	14 32,6 N	
				HP 59,4' 59,7' 59,9'							

Abb. 10: Auszug Nautisches Jahrbuch – Tagseite vom 20. Juni 2005 – obere Hälfte

Der Fixsternbereich (nicht SHS-prüfungswichtig) erstreckt sich immer über zwei Tagseiten und ist nicht im Stundenraster aufgebaut, sondern listet die Fixsterne nach Fixsternnummern auf. Dieser Bereich beinhaltet für 50 ausgesuchte Fixsterne deren Sternwinkel β und Deklination δ . Der dort angegebene Sternwinkel ist der feste Längengradabstand zwischen einem Fixstern und dem Grt des Frühlingspunktes. Der Sternwinkel und die jeweils angegebene Deklination ändert sich so langsam, dass beide Werte immer für zwei Tage gelten.

Ein Beispiel im Kapitel „Nautisches Jahrbuch – Schalttafeln“ stellt die Anwendung vollständig dar.

Abb. 11: Auszug Nautisches Jahrbuch – Mittelteil 20. und 21. Juni 2005 – obere Hälfte

FIXSTERNE			FIXSTERNE		
Nr	β	δ	Nr	β	δ
1	357 50,1	29 07,0 N	43	173 16,7	68 08,0 S
3	353 21,7	42 16,4 S	44	172 08,2	57 08,9 S
4	349 48,1	56 33,7 N	46	166 25,7	55 56,1 N
5	349 02,2	17 57,3 S	49	158 37,7	11 11,5 S
8	335 31,4	57 12,3 S	50	153 03,3	49 17,4 N
11	328 08,1	23 29,2 N	51	148 56,8	60 24,2 S
12	314 21,9	04 06,7 N	53	146 01,2	19 09,3 N
14	308 49,9	49 52,7 N	54	140 00,3	60 51,7 S
16	290 56,9	16 31,3 N	56	137 12,2	16 04,0 S
17	281 18,4	08 11,6 S	57	137 18,3	74 08,2 N
18	280 44,2	46 00,3 N	59	126 15,9	26 41,8 N
19	278 39,1	06 21,4 N	61	112 33,6	26 26,8 S
24	271 08,4	07 24,6 N	62	107 40,7	69 02,5 S
27	263 59,5	52 41,8 S	65	096 30,0	37 06,6 S
29	258 39,6	16 43,3 S	66	095 11,9	12 33,2 N
30	255 17,9	28 58,7 S	67	095 08,5	51 29,2 N
33	245 06,6	05 12,8 N	68	088 01,7	34 23,0 S
34	243 35,7	28 01,0 N	69	087 02,8	38 47,0 S
35	234 21,3	59 31,7 S	71	081 14,0	08 08,0 N
36	222 57,5	43 27,3 S	72	083 28,3	03 03,0 S
37	221 42,1	69 44,5 S	73	049 35,0	03 03,0 N
38	218 02,5	08 40,9 S	75	033 09,5	09 53,0 S
39	207 50,3	11 56,6 N	76	031 01,1	46 56,0 S
41	193 59,1	61 43,6 N	78	030 30,6	29 35,5 S
42	182 40,0	14 32,6 N	80	021 44,5	15 13,0 S

Nautisches Jahrbuch – Schalttafel

Die Tagseiten im Nautischen Jahrbuch listen die Gestirnskoordinaten (Grt und Deklination) nur für volle Stunden auf. Deshalb müssen für Zeitpunkte zwischen den vollen Stunden die Koordinaten selbst bestimmt werden. Dazu könnten diese durch Interpolation aus den vollen-Stunden-Werten selbst berechnet werden. Dies ist jedoch bei Positionangaben mit Gradzahlen, Minuten und Dezimalminuten nicht immer einfach. So wurden zu Zeiten vor den Taschenrechnern die Schalttafeln eingeführt. Die Schalttafeln sind nichts weiter als Interpolationstabellen.

Im Nautischen Jahrbuch sind immer zwei Schalttafeln für je eine Zeit-Minute auf einem Blatt zusammengestellt. In folgendem Beispiel die 30. und 31. Minute einer vollen Stunde. Gedanklich muss somit in der Mitte eine Trennlinie (unten orange dargestellt) gelegt werden.

Jede Schalttafel besteht wiederum aus zwei Unterbereichen.

Der erste Bereich (unten gelb dargestellt) ist mit einer feineren Zeileneinteilung für die sekundengenaue Interpolation des sich schnell ändernden Greenwicher Stundenwinkels (Grt). Je eine Spalte für die Sonne mit den Planeten, den Frühlingspunkt und für den Mond. Die Korrektur des Grt heißt Zuwachs (Zw).

30 min						Schalttafel						31 min	
30 min	Zuwachs Grt			Unt	Vb	31 min	Zuwachs Grt			Unt	Vb		
	Sonne Planet	Frühlp.	Mond				Sonne	Frühlp.	Mond				
s	.	.	.	.	.	s	.	.	.	.	.
0	7 30,0	7 31,2	7 09,5	0,0	0,0	0	7 45,0	7 46,3	7 23,8	0,0	0,0		
1	7 30,3	7 31,5	7 09,7	0,3	0,2	1	7 45,2	7 46,5	7 24,1	0,3	0,2		
2	7 30,5	7 31,7	7 10,0	0,6	0,3	2	7 45,5	7 46,8	7 24,4	0,6	0,3		
3	7 30,8	7 32,0	7 10,2	0,9	0,5	3	7 45,8	7 47,0	7 24,7	0,9	0,5		
4	7 31,0	7 32,2	7 10,5	1,2	0,6	4	7 46,0	7 47,3	7 24,8	1,2	0,6		
5	7 31,3	7 32,5	7 10,7	1,5	0,8	5	7 46,3	7 47,5	7 25,0	1,5	0,8		
6	7 31,5	7 32,7	7 10,9	1,8	0,9	6	7 46,5	7 47,8	7 25,1	1,8	0,9		
7	7 31,8	7 33,0	7 11,2	2,1	1,1	7	7 46,8	7 48,0	7 25,5	2,1	1,1		
8	7 32,0	7 33,2	7 11,4	2,4	1,2	8	7 47,0	7 48,3	7 25,7	2,4	1,2		
...		
51	7 42,8	7 43,8	7 21,7	15,3	7,8	51	7 57,8	7 59,1	7 36,0	15,3	7,8		
52	7 43,0	7 44,3	7 21,9	15,6	7,9	52	7 58,0	7 59,3	7 36,2	15,6	8,2		
53	7 43,3	7 44,5	7 22,1	15,9	8,1	53	7 58,3	7 59,6	7 36,5	15,9	8,3		
54	7 43,5	7 44,8	7 22,4	16,2	8,2	54	7 58,5	7 59,8	7 36,7	16,2	8,4		
55	7 43,8	7 45,0	7 22,6	16,5	8,4	55	7 58,8	8 00,1	7 36,9	16,5	8,7		
56	7 44,0	7 45,3	7 22,9	16,8	8,5	56	7 59,0	8 00,3	7 37,2	16,8	8,8		
57	7 44,3	7 45,5	7 23,1	17,1	8,7	57	7 59,3	8 00,6	7 37,4	17,1	9,0		
58	7 44,5	7 45,8	7 23,3	17,4	8,8	58	7 59,5	8 00,8	7 37,7	17,4	9,1		
59	7 44,8	7 46,0	7 23,6	17,7	9,0	59	7 59,8	8 01,1	7 37,9	17,7	9,3		

Abb. 13: Schalttafeln für die 30. und 31. Minute

Der (oben blau hinterlegte) zweite Bereich ist eine von den Sekunden unabhängige Interpolationshilfe für den Unterschied (Unt). Dabei sind in der Spalte „Unt“ verschiedene mögliche Unterschieds-Werte (wie sie von der Tagseite für das jeweilige Gestirn vorgegeben werden) fortlaufend aufgelistet. In der Spalte „Vb“ (Verbesserung) stehen daneben der entsprechend interpolierten Teile des Unterschiedes.

Beispiel:

Aus einem Unterschied von 1,2' wird in der Schalttafel für die 31. Zeitminute eine Verbesserung von 0,6'.

Hinweis: Eine einfache Dreisatzrechnung führt gelegentlich zu anderen Werten als die (scheinbar manchmal seltsam) gerundeten Werte in den Schalttafeln.

Sextant

Der Sextant in seiner heutigen Form (Messbereich ca. 120°) ist eine Weiterentwicklung des Oktanten (Messbereich ca. 90°). Der Sextant wurde fast zeitgleich von dem Astronomen und Mathematiker John Hadley und dem Optiker Thomas Godfrey um 1730 entwickelt. Der Name „Sextant“ kommt von „ein Sechstel“, da er $1/6$ eines Vollkreises = $360^\circ/6 = 60^\circ$ Kreisbogen darstellt. Der Sextant ist ein optisches Winkelmessgerät. Diese Winkel können moderne Sextanten bis auf zehntel Winkelminuten genau messen, das entspricht einem Winkel von $0,0017^\circ$. Sextanten werden heute üblicherweise aus Druckgussaluminium oder aus hochwertigem Kunststoff hergestellt. Ältere Sextanten bestanden hauptsächlich aus Messing.

In der astronomischen Navigation kommen heutzutage Trommelsextanten zum Einsatz. Diese verfügen zusätzlich zur Gradablesung am Hauptbogen über eine Feineinstellung mit Hilfe einer Einstelltrommel (siehe Abbildung 18). Moderne Sextanten sind üblicherweise etwas größer als die namensgebenden 60° angelegt und ermöglichen auf Grund der verdoppelnden Spiegelwirkung damit Messbereiche von über 120° .

Der Sextant zeigt den Winkel zwischen zwei Beobachtungsrichtungen. Einerseits zeigt er das Bild, das gerade vor dem Beobachter liegt – in der Regel der Horizont – andererseits das Bild des Gestirns, welches prinzipiell in der gleichen Richtung, aber höher über dem Horizont steht. Durch Schwenken der Alhidade (Schwenkarm) und des daran befestigten Indexspiegels (in der Grafik rot dargestellt) werden diese beiden Bilder so „in Deckung“ gebracht, dass das Gestirn direkt auf dem Horizont zu liegen scheint.

Für terrestrische Navigation sind auch Horizontalwinkelmessungen möglich.

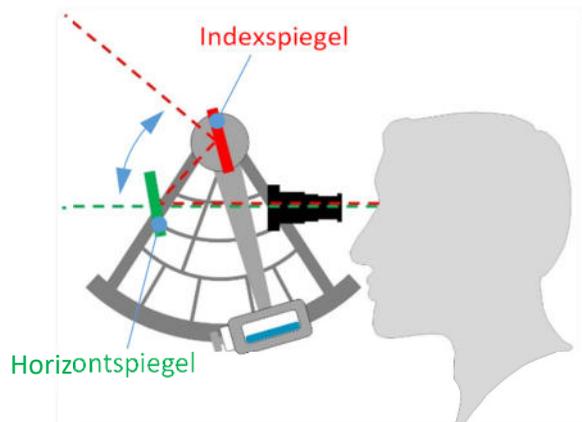


Abb. 14: Funktion eines Sextanten,
beobachtete Höhe ca.: 40°

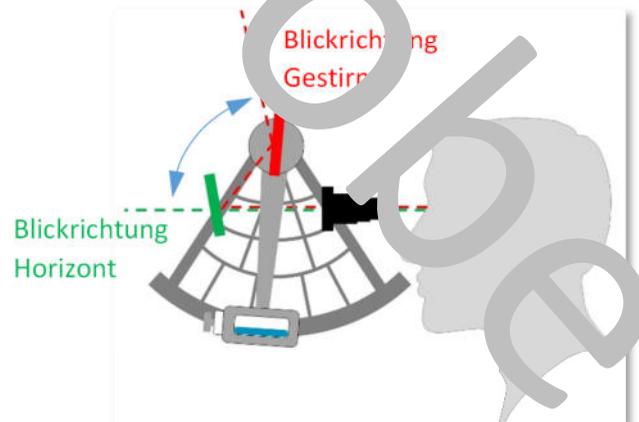


Abb. 15: Funktion eines Sextanten,
beobachtete Höhe ca.: 75°

Teile des Sextanten

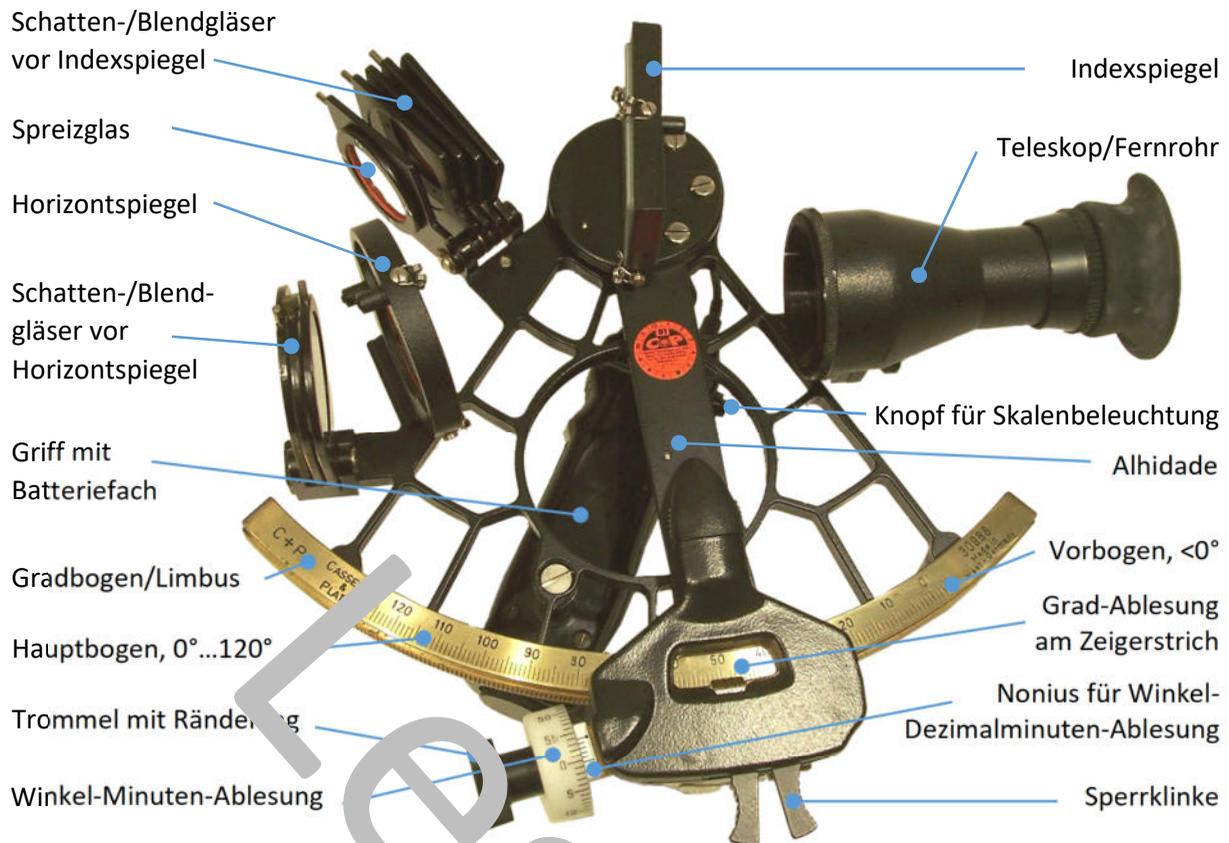


Abb. 18: Sextant

Durch die Ablesung der Gradzahl im Limbus, die Ablesung der vollen Minuten an der Trommelskala und die Nutzung des Nonius kann in diesem Sextanten auf 0,2' genau abgelesen werden.

Gestirnhöhe messen mit dem Sextanten

Es gibt verschiedene Vorgehensweisen mit dem Sextant eine Höhe zu messen. Bei der Beobachtung von kleinen Fixsternen kann es ratsam sein, die Gestirnhöhe vor auszurechnen und den Sextanten bereits auf die geplante Höhe einzustellen. Somit wird das Finden am Himmel erleichtert.

Bei größeren Gestirnen, wie der Sonnen- oder Mondscheibe, wird folgendes Vorgehen empfohlen:

Der Sextant wird auf 0° eingestellt und die (besonders bei Sonnenbeobachtung) notwendigen Filtergläser vorgeschwenkt. Nun wird das Gestirn anvisiert, welches (noch) in beiden Bildern zu sehen ist. Die Sperrklinke wird gelöst und mit dem Sextanten das Gestirn auf den Horizont heruntergeschwenkt. Dabei wird mit der Alhidade das Gestirn im Sichtfeld des einen Bildes „gehalten“, während der Horizont im anderen Bild auftaucht. Es wird also eigentlich der gesamte Sextant nach unten geschwenkt und diese Bewegung mit der Alhidade ausgeglichen.

Hat das Gestirn nahezu den Horizont erreicht, wird die Sperrklinke wieder arretiert und mit der Trommel der genaue Wert eingestellt. Das Gestirn muss „auf“ dem Horizont liegen. Abschließend wird um die Fernrohrachse geschwenkt, um eine wirklich senkrechte Messung zu prüfen. Das Gestirn muss bei dieser Pendelbewegung im tiefsten Punkt liegen.

Standlinienkonstruktion nach Saint Hilaire

Wie in vorherigen Kapiteln vorgestellt, ist es grundsätzlich möglich, aus dem Bildpunkt eines Gestirns und dessen beobachteter Winkelhöhe eine (prinzipiell) kreisförmige (durch die Mercatorprojektion elliptische) Standlinie zu konstruieren. Diese Konstruktion wäre jedoch nur in einer sehr großen Seekarte mit riesigem Maßstab einzuzeichnen. Die Seekarte müsste sowohl den Bildpunkt als auch den großen Standlinienkreis, dessen Radius aus 90° minus **beobachteter Höhe** (h_b) berechnet wird, beinhalten. Bei einer beobachteten Höhe von 50° wäre der Radius des Standlinienkreises $(90^\circ - 50^\circ) \times 60 \text{ sm}/1^\circ = 2400 \text{ sm}$ groß. Eine daraus gewonnene Position wäre wegen des unhandhabbaren Maßstabes dieser Karte zu ungenau.

Der französische Admiral Marc-Édouard de Saint-Hilaire erdachte um 1875 eine Methode die Standlinie zu konstruieren und dabei das Problem der großen Abstände von Bildpunkt und Koppelort zu umgehen. Genau genommen wird nur ein kleiner notwendiger Bereich des riesigen Standlinienkreises gezeichnet. Dazu muss der (wahrscheinlich weit entfernte) Bildpunkt selbst nicht auf der Karte eingezeichnet werden.

Bei dieser Methode werden mit Hilfe des Koppelortes (oft auch als **gegüßter Ort** bezeichnet) die Richtung und der Abstand zum Bildpunkt durch sphärische Mathematik bestimmt. Diese Richtung vom Koppelort zum Bildpunkt wird **Azimut** genannt. Der berechnete Abstand zwischen Koppelort und Bildpunkt wird nicht in Seemeilen angegeben, sondern nach dem oben vorgestellten Prinzip (1 sm entspricht 1 Winkelminute, bzw. 60 sm entsprechen 1° auf der Erdoberfläche) in Bogenmaß bestimmt.

Mit Hilfe der berechneten Entfernung zum Bildpunkt ist umgekehrt auch eine Vorausberechnung der Gestirns Höhe, der so genannten „**berechneten Höhe**“ (h_r), möglich:
 $h_r = 90^\circ - \text{Entfernung in } ^\circ$.

Im Englischen wird die „**beobachtete Höhe**“ (h_b) als „observed high“ (h_o) und die „**berechnete Höhe**“ (h_r) als „calculated high“ (h_c) bezeichnet und ist so in manchen Formeln wiederzufinden.

Zu Zeiten der Logarithmentafeln waren diese Berechnungen zwar noch recht aufwendig, mit heutigen Taschenrechnern mit Winkelfunktionen stellen diese aber keine Probleme mehr dar.

Hilaires Idee war nun, aus der Vorausberechnung der Gestirns Höhe (h_r) und einer anschließend durchgeführten Gestirns Höhenbeobachtung (h_b) mit dem Sextanten, die sich ergebende Differenz für die Standlinienkonstruktion zu nutzen. Diese Höhendifferenz (Δh) ist üblicherweise klein und damit gut in eine Seekarte einzutragen.

Als Formel: $\Delta h = h_b - h_r$

Abb. 26:

In der Seekarte ergeben Koppelort, Azimut und Δh die verschobene Standlinie.

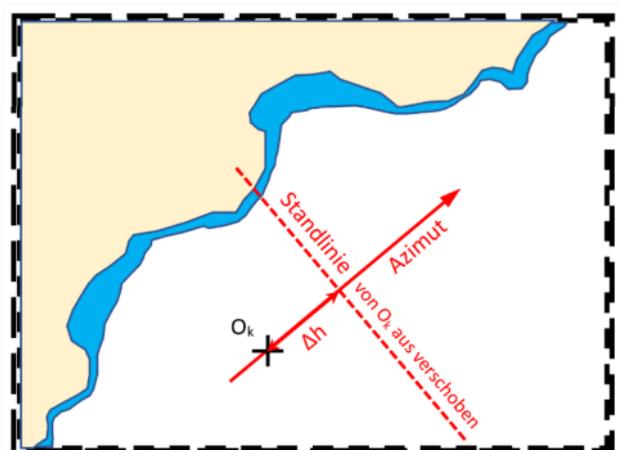
Der Bildpunkt ist hier nordöstlich weit außerhalb der Seekarte.

Eine zweite Gestirnsbeobachtung und Berechnung würden eine zweite Standlinie ergeben.

Höhendifferenzmethode

1. aus Koppelort und Gestirnskoordinaten werden Entfernung und Azimut berechnet
2. Koppelort und Azimut in Seekarte einzeichnen
3. Gestirns Höhe mit Sextanten messen
4. gemessene Gestirns Höhe mit berechneter Höhe vergleichen
5. aus der Differenz die Standlinie senkrecht auf dem Azimut schieben

Ergebnis: eine Standlinie je Gestirn



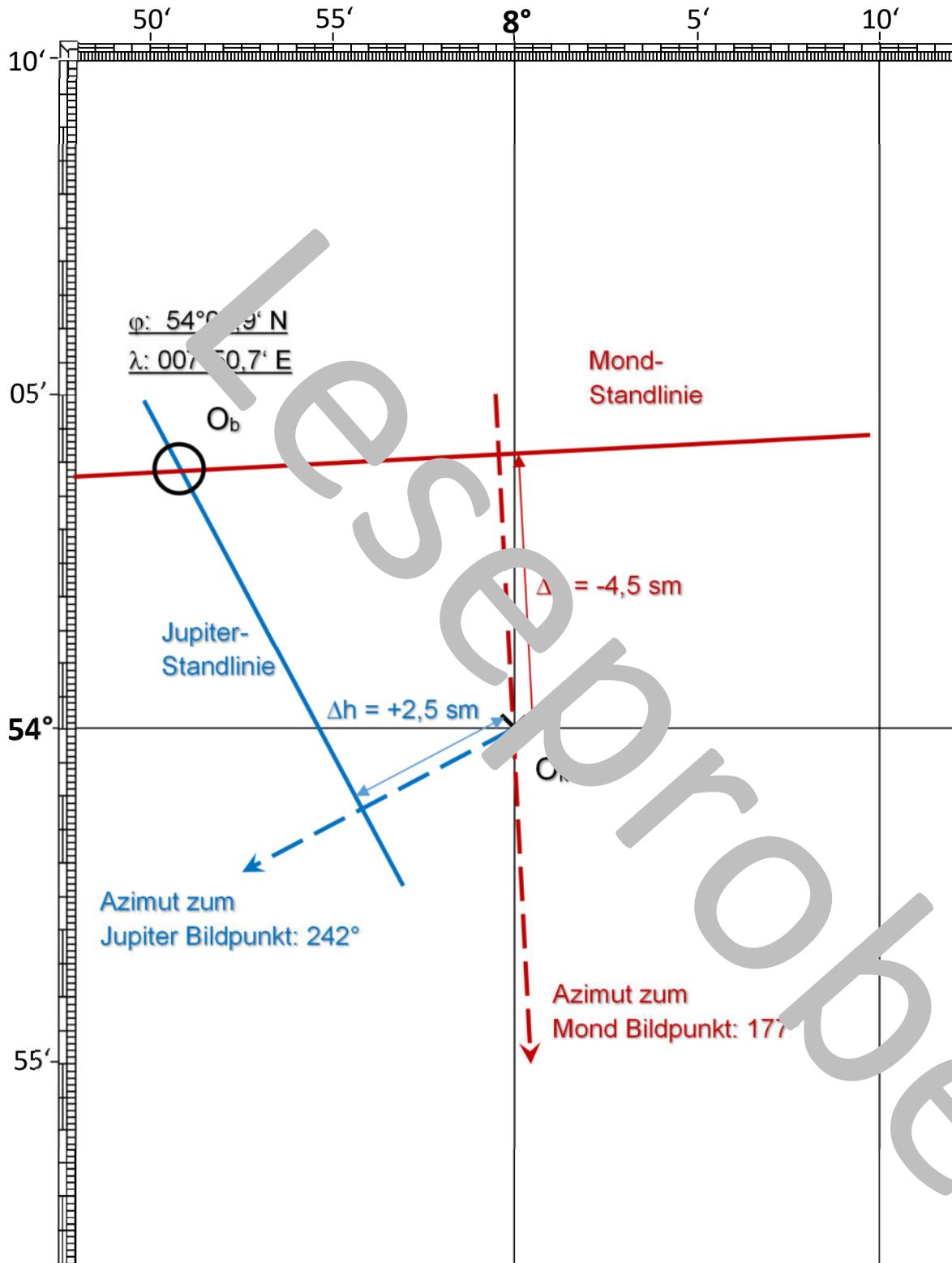


Abb. 27: Standlinienkonstruktion in einer Seekarte

In diesem Beispiel, welches Saint Hilaires Methode verdeutlicht, wurden noch einige Schritte weggelassen. So fehlen Korrekturen, die an die Sextantenablesung angebracht werden müssen, bevor dieser Wert mit der vorausberechneten Höhe verglichen und zu einer Höhenwinkeldifferenz umgerechnet in die Grafik eingehen. Außerdem sind die Beobachtungszeitpunkte der Einfachheit halber auf volle Stunden gewählt.

Höhenwinkelmessung – Korrekturen

Wie bereits vorgestellt, ist der Sextant ein optisches Winkelmessinstrument mit sehr hoher Genauigkeit. Trotzdem gilt es, einige Faktoren bei der Anwendung zu berücksichtigen. Neben den im Kapitel „Sextant“ bereits vorgestellten technischen Einschränkungen am Sextanten selbst, gilt es bei der Beobachtung der Gestirne einige Fremdeinflüsse zu beachten. Für die verschiedenen Gestirnsarten Sonne, Mond, Planeten und Fixsterne müssen erstens weitere, auch noch unterschiedliche Faktoren berücksichtigt werden.

Höhenwinkelmessung – Korrektur – Kimmtiefe

Mit dem Sextanten möchte der Beobachter grundsätzlich die Gestirnshöhe über dem „wahren“ Horizont messen. Dieser „wahre“ Horizont (siehe Kapitel „Astronomische Koordinatensysteme“) ist eine gedachte Ebene parallel zur Standfläche des Beobachters, jedoch die Erdmittelpunktebene. Durch die Augeshöhe des Beobachters wird jedoch die deutlich tiefer liegende Kimm gesehen.



Abb. 28: Augenhöhe, Kimmabstand und -tiefe

In Abhängigkeit von der **Augenhöhe** wird es zum **Kimmtiefe** zu großer Winkel gemessen. Der insgesamt gemessene Winkel, der **Kimmabstand**, ist größer als die eigentliche Gestirnshöhe.

Dieser Fehler, die Kimmtiefe (K), lässt sich jedoch leicht aus der Augenhöhe (Ah) und dem Erdradius ausrechnen. Die Formel: $1,779 \times \sqrt{\text{Ah in m}} \text{ [KT [']}]$ ergibt nach Eingabe der Augenhöhe in Metern ein Wert in Winkelminuten. Dieser muss von dem beobachteten Kimmabstand abgezogen werden. Diese Formel berücksichtigt bereits Umrechnungen von Erdkugelradius, Seemeilen und Metern, ist jedoch nur als Richtwert in Bereichen üblicher Gestirns Höhenbeobachtungen zwischen 10° und 80° anzuwenden.

Diese korrigierte Höhe wird als **scheinbare Höhe** bezeichnet, da auch diese noch weitere Fehler beinhaltet.

Statt die Kimmtiefe mit der Formel selbst zu berechnen, listen Tabellen im Nautischen Jahrbuch für ganzzahlige Augenhöhenangaben die Kimmtiefe als Korrekturwerte auf. Die Werte in der Tabelle werden jedoch mit einem weiteren Korrekturverfahren kombiniert, der Refraktion. Die Refraktion wird im Folgenden erklärt.

Kürzel	Beschreibung	Differenz zu UTC
UTC	Mit technischen Uhren sehr gleichmäßige künstliche Zeit	
UT1	Astronomisch bestimmte Weltzeit	
MEZ	Mitteleuropäische Zeit	MEZ – 1 h = UTC
MESZ	Mitteleuropäische Sommer-Zeit *)	MESZ – 2 h = UTC
BST	British-Summer-Time	BST – 1 h = UTC
ZZ	Zonenzeit	
GZ	Gesetzliche Zeit ist der Oberbegriff für die in einem Land gerade gültige Zeitart (z. B.: MESZ, BST, etc.)	

Abb. 34: Tabelle der verschiedenen Zeitarten

*) Mitteleuropäische Sommerzeit mit von 02:00 Uhr MEZ (wird dann 03:00 Uhr MESZ) des letzten Sonntags im März bis 03:00 Uhr MESZ (wird dann wieder 02:00 Uhr MEZ) des letzten Sonntags im Oktober

Dämmerung

Am Tage kann mit der Sonne oder -wenn sichtbar- mit dem Mond, gelegentlich sogar mit der Venus astronomisch navigiert werden.



Abb. 35: Nautische Dämmerung mit Mond und Venus

Es mag erstaunlich klingen, dass nicht auch während der gesamten Nacht astronomisch navigiert wird, jedenfalls nicht nach den (in diesem Skript behandelten) klassischen Methoden. Mit den gängigen Sextanten - also ohne künstlichen Horizont - wird nur am Tage (vor in der morgendlichen (vor Sonnenaufgang) oder abendlichen (nach Sonnenuntergang) Dämmerungsphase astronomisch gearbeitet. Nur in der morgendlichen Dämmerung ist es noch so dunkel, dass Gestirne am Himmel beobachtet und gleichzeitig der Horizont schon als Linie sehr hell genug gesehen werden können. Abends ist es bereits so dunkel, dass Gestirne schon und der Horizont noch ausgemacht werden können.

Bei dunkler Nacht ist die wirkliche Kimm nicht sauber erkennbar – auch nicht bei hellem Mondschein. Die Dämmerungsphasen sind also wichtig für die Gestirnsbeobachtungen.

Vollständige Berechnung

Nun, da das Herauslesen der Grundwerte aus dem Nautischen Jahrbuch, die Anwendung der Schalttafeln, die Handhabung des Sextanten und die Korrektur der Sextantenablesung sowie der Uhr vorgestellt wurden, wird das gesamte Rechenverfahren für verschiedene Gestirnsarten an einem vollständigen Beispiel dargestellt.

Wie in der terrestrischen Navigation auch, kann mit drei Standlinien eine gewisse Fehlerprüfung in der Standlinienermittlung ermöglicht werden. Dazu müssen die Standlinien in möglichst unterschiedlichen Richtungen liegen, somit auch die Gestirne in verschiedenen Beobachtungsrichtungen am Himmel ausgesucht werden.

In dem folgenden Beispiel wird von drei Gestirnsbeobachtungen in rascher Folge ausgegangen. Die zeichnerische Ermittlung der Standlinien nach der Methode von Saint Hilaire ist dadurch einfach umzusetzen, da sich alle Standlinien auf einen gemeinsamen Koppelort beziehen.

In der Praxis wäre eine solch rasche Beobachtung von verschiedenen Gestirnen nur schwer umsetzbar. Zeitlich versetzte Beobachtungen hätten jedoch Standlinien verschiedener Zeitpunkte zur Folge, die dann versiegelt (also zeitlich mitgenommen) werden. Diese Methode, der versiegelten Standlinien, wird erst im übernächsten Kapitel vorgestellt.

Standlinienberechnungen mit Fixsternen sind seit 2010 nicht mehr SH-prüfungsrelevant.

Beispielaufgabe:		
Ein Beobachter steht am 09.07.2005 auf der Koppelposition $\varphi_k = 18^\circ 50,0' N$, $\lambda_k = 022^\circ 46,0' W$ und kann gut in der Abenddämmerung den Mond, Jupiter und den Fixstern Antares beobachten.		
Mondunterrand:	Chronometerablesung (Chr) = 08:54:10	Sextantenablesung (h_s) = $22^\circ 24,5'$
Jupiter:	Chronometerablesung (Chr) = 08:56:35	Sextantenablesung (h_s) = $5^\circ 03,7'$
Antares:	Chronometerablesung (Chr) = 08:58:55	Sextantenablesung (h_s) = $1^\circ 31,5'$
Der Chronometer zeigt im 12-Stunden-Format an und geht 2 Sekunden vor. Der Sextant muss mit einer Indexberichtigung von $-0,4'$ beschickt werden. Die Augeshöhe beträgt 4 m.		

Welches ist der beobachtete Ort? Die Lösung soll mit grafischer Darstellung der Standlinien ohne Versiegelung ermittelt werden.

Lösung:

Zuerst müssen die im 12-Stunden-Format angezeigten Chronometerablesungen berichtigt werden. Die Koppelortlänge ($\lambda_k = 022^\circ 46,0' W$) liegt gerundet zwei Stunden westlich von Greenwich ($022^\circ 46,0' W : 15^\circ/h = 1,517h \approx 2h$) und der lokale Sonnenuntergang hat bereits stattgefunden. Somit handelt es sich bei den Chronometerablesungen (08:54:10 Uhr, usw.) um Ablesungen am Abend (20:54:10 Uhr, usw.).

Folgendes Schema listet alle notwendigen Datenfelder auf und hilft bei der Bestimmung von Azimut (Az) und berechneter Höhe (h_r) mit den Formeln aus dem Kapitel „Standlinienkonstruktion nach Saint Hilaire“ (S.: 28).

Formblatt: Ort aus 3 Gestirnsbeobachtungen

Datum:	Zonenzeit:	09.07.2005	≈ 19:55			Augenhöhe:	4,0 m
Koppelort (LAT/LON):	φ OK:	18°50,0' N	λ OK:	022°46,0' W	Indexberichtig.:	Ib:	-0,4'

Gestirn:	Mondunterrand	Jupiter	Antares * Nr.: 61
----------	----------------------	----------------	--------------------------

Chr (12/24 h Format)	08:54:10	08:56:35	08:58:55
+ Stand (nach +, vor -)	+ 00:00:02	- 00:00:02	- 00:00:02
= UT1 (immer 24 h Format)	20:54:12	20:56:33	20:58:53
Datum in UT1	09.07.2005	09.07.2005	09.07.2005

Gr _t (h) <i>NJ</i>	080°22,1'	037°34,2'	227°51,2'
+ Zw (m, s) <i>NJS</i>	+ 05,0'	+ 14°08,3'	+ 14°45,7'
+ Verb <i>NJS</i> | Unt <i>NJ</i>	15,0' | 13,5' | 2,2'	2,2'	
= Gr _t	093°10,7'	51°44,7'	242°36,9'
+ SHA β (nur Fixstern) <i>NJ</i>			112°33,6'
+ λ OK (-W / +E)	- 022°46,0'	- 022°46,0'	- 022°46,0'
= LHA (t)	070°24,7'	01°58,7'	332°24,5'

Dec δ <i>NJ</i>	17°18,1' N	03°02,5' S	26°26,8' S
+ Verb δ <i>NJS</i> | Unt <i>NJ</i>	11,4' S | 10,4' S | 0,1' S	0,1' S	
= Dec δ	17°07,7' N	03°02,6' S	26°26,8' S

HP	HP = 54'	HP = 0,0'	
----	-----------------	------------------	--

Sext. Abl. (h _s)	22°24,5'	54°03,7'	37°31,5'
+ Ib	-0,4'	-0,4'	-0,4'
= Ka	22°24,1'	54°03,3'	37°31,1'
+ Gb <i>NJ</i>	+56,7'	-4,3'	-1,8'
+ ggf. Zb (nur ☉ ☽ ♀ ♂) <i>NJ</i>	+2,0'		
+ ggf. Ø (bei Oberrand) <i>NJ</i>			
= h _b	23°22,8'	53°59,0'	37°26,3'

h _b (beobachtete Höhe)	23°22,8'	53°59,0'	37°26,3'
- h _r (berechnete Höhe)	23°28,4'	54°03,8'	37°23,5'
= Δh (+ in Az, - entgegen Az)	-5,6'	-4,8'	+2,8'

Az'	-79,0°	+55,5°	-31,5°
Az	281,0°	235,5°	148,5°

NJ bedeutet, dass diese Information aus den Tagseiten des Nautischen Jahrbuches (N. J.) entnommen wird
NJS bedeutet, dass diese Information mit den Schalttafeln aus dem N. J. bestimmt wird

(Dieses Formblatt kann unter www.LutzBoehme.de kostenlos heruntergeladen werden)

Nebenrechnungen für h_r und Az :

(Formeln siehe z.B. S.: 28)

h_r Mondunterrand	h_r Jupiter	h_r Antares * Nr.: 61
$h_r = \arcsin(\sin(+18^\circ 50') \times \sin(+17^\circ 7,7') + \cos(+18^\circ 50') \times \cos(+17^\circ 7,7') \times \cos(+70^\circ 24,7'))$	$h_r = \arcsin(\sin(+18^\circ 50') \times \sin(-3^\circ 2,6') + \cos(+18^\circ 50') \times \cos(-3^\circ 2,6') \times \cos(+28^\circ 58,7'))$	$h_r = \arcsin(\sin(+18^\circ 50') \times \sin(-26^\circ 26,8') + \cos(+18^\circ 50') \times \cos(-26^\circ 26,8') \times \cos(+332^\circ 24,5'))$
$\underline{h_r = 23^\circ 28,4'}$	$\underline{h_r = 54^\circ 03,8'}$	$\underline{h_r = 37^\circ 23,5'}$
Az' Mondunterrand	Az' Jupiter	Az' Antares * Nr.: 61
$Az' = \arctan(\sin(+70^\circ 24,7') / (\sin(+18^\circ 50') \times \cos(+70^\circ 24,7') - \tan(+17^\circ 7,7') \times \cos(+18^\circ 50')))$	$Az' = \arctan(\sin(+28^\circ 58,7') / (\sin(+18^\circ 50') \times \cos(+28^\circ 58,7') - \tan(-3^\circ 2,6') \times \cos(+18^\circ 50')))$	$Az' = \arctan(\sin(+332^\circ 24,5') / (\sin(+18^\circ 50') \times \cos(+332^\circ 24,5') - \tan(-26^\circ 26,8') \times \cos(+18^\circ 50')))$
$Az' = -79,0^\circ$ ($t < 180^\circ$, $Az' < 0^\circ$)	$Az' = 55,5^\circ$ ($t < 180^\circ$, $Az' > 0^\circ$)	$Az' = -31,5^\circ$ ($t \geq 180^\circ$, $Az' < 0^\circ$)
$Az = Az' + 360^\circ = \underline{Az = 281,0^\circ}$	$Az = Az' + 180^\circ = \underline{Az = 235,5^\circ}$	$Az = Az' + 180^\circ = \underline{Az = 148,5^\circ}$

Zeichnung:

In dieser Aufgabe wird kein Seekartenausschnitt, sondern ein schlichtes Blatt Papier mit selbst festgelegtem Maßstab: 1cm = 1sm = 1' genutzt. Als Zeichenursprung wird der Koppelort definiert.

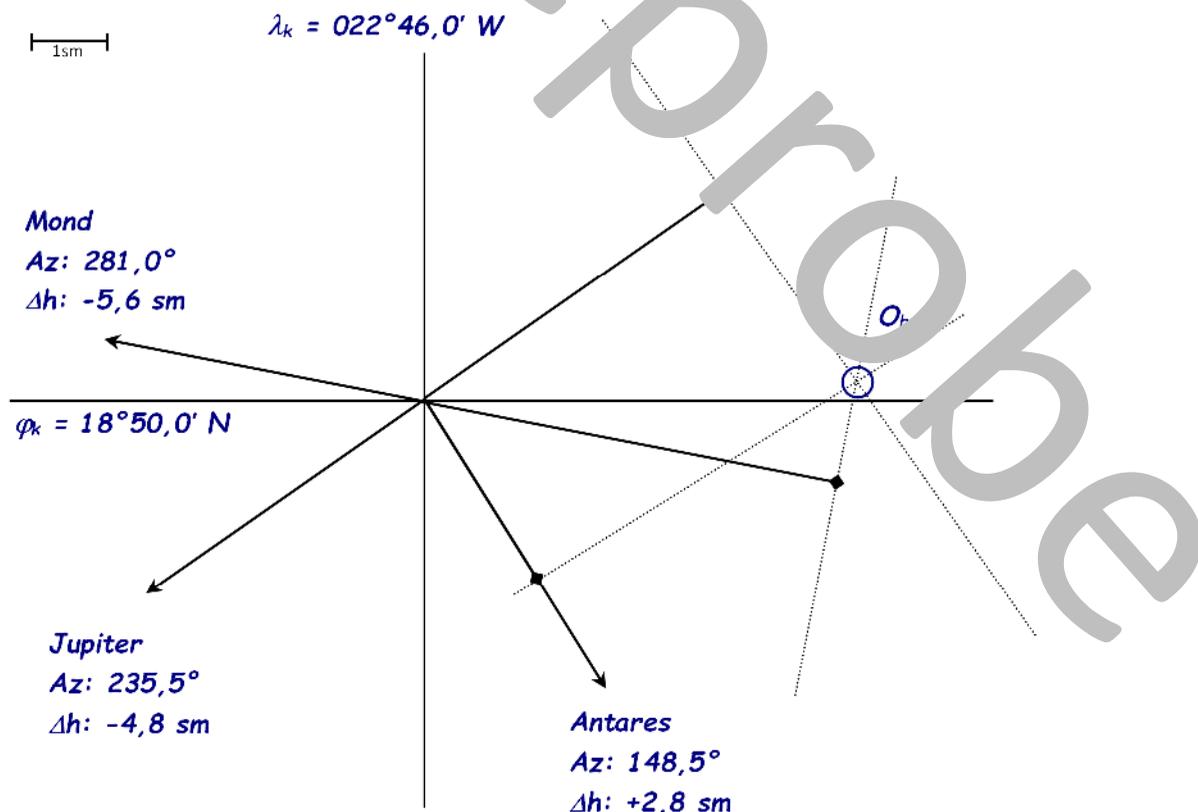


Abb. 38: Standlinienkonstruktion ohne Seekarte

Das Ablesen des Breiten- und Längengrades des beobachteten Ortes (O_b) ist aufgrund des fehlenden Kartenrandes nicht direkt möglich. Die folgende Methode löst dieses Problem.

Versegeln von astronomisch gewonnenen Standlinien

In der Praxis können nur sehr selten in rascher Folge mehrere Höhenmessungen auf verschiedene Gestirne durchgeführt werden. Das Anpeilen der Gestirne sowie das Notieren von Winkeln und Zeiten sind zu zeitaufwendig. Ab einer bestimmten Fahrtgeschwindigkeit sind diese daraus gewonnenen Standlinien für eine exakte Positionsbestimmung zu weit voneinander entfernt, da sich das Schiff inzwischen deutlich weiterbewegt hat.

Zeitlich versetzte Standlinien müssen somit versegelt, also nach Kurs und Strecke verschoben werden. Dieses Versegeln ist aus der terrestrischen Navigation bekannt, wo z. B. ein Leuchtturm zu zwei verschiedenen Zeitpunkten angepeilt wird. Ähnlich kann auch ein Gestirn, z. B. die Sonne am Tage mehrfach oder zwei Gestirne nacheinander beobachtet und zur Standlinienkonstruktion genutzt werden.

Bedingung ist, wie auch in der terrestrischen Navigation, die versegelte Strecke nach Kurs und Entfernung möglichst exakt zu bestimmen.

Es gibt verschiedene Verfahren solch eine Standlinienversegelung durchzuführen.

Im Folgenden wird ein Verfahren für kurze Versegelungen, das rein grafisch gelöst wird, vorgestellt. Anschließend wird für längere Versegelung ein rechnerisches Vorgehen erläutert.

Astronomische Koordinatensysteme

In den vorangegangenen Kapiteln zur astronomischen Positionsbestimmung wurden Formeln zur Berechnung der Gestirns Höhe sowie des Azimutes, also der Richtung vom Koppelort zum Bildpunkt, angewandt. Diese Formeln beschreiben die Beziehungen zwischen den individuellen Koordinaten des Standortes eines Beobachters und der sekundengenauen Bildpunktposition des Gestirns zum Beobachtungszeitpunkt. Dabei liegen sowohl der Koppelort als auch die Bildpunktkoordinaten auf der Erdoberfläche. Grundsätzlich können diese Koordinaten auch auf eine gedachte, die Erdkugel umspannende Himmelskugel projiziert vorgestellt werden. Auf dieser theoretischen Himmelskugel können mit Hilfe von trigonometrischen Funktionen Winkel und Entfernungen berechnet werden.

Für die äußere Betrachtung sind zuerst zwei getrennte Darstellungen die Basis, die später zu einem Gesamtsystem zusammengefasst werden. Die beiden Darstellungsarten heißen „Koordinatensystem des Horizontes“ und „Koordinatensystem des Himmelsäquators“.

System des Horizontes

Aus der individuellen Position eines auf der Erdkugel stehenden Beobachters ergibt sich folgende Betrachtung, die als „Koordinatensystem des wahren Horizontes“ bezeichnet wird.

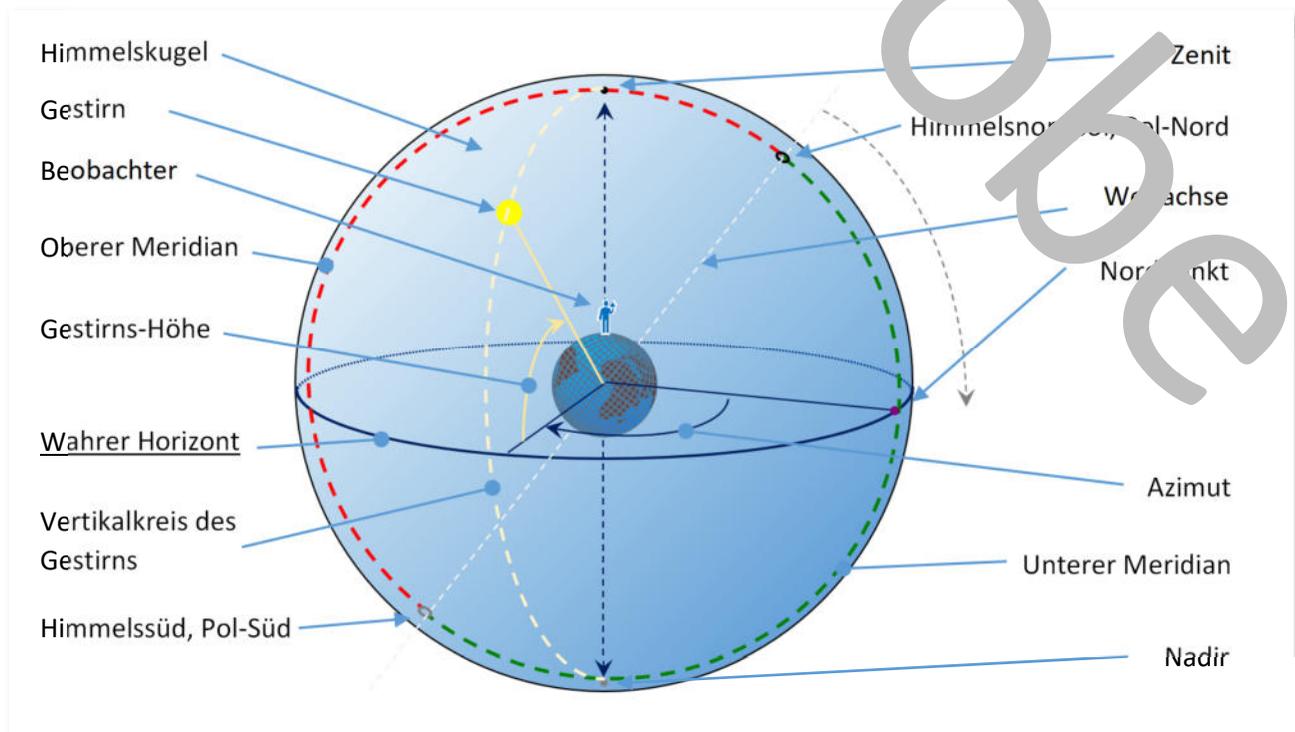


Abb. 45: Koordinatensystem des wahren Horizontes

Hinweis: Der Kippwinkel der Weltachse (in die Himmelskugel verlängerte Erdachse) hat in dieser Abbildung nichts mit der Schrägstellung der Erdachse um ca. $23,5^\circ$ zu tun. Da der Beobachter in diesem System immer „oben“ auf der Erdkugel dargestellt wird, ist der Kippwinkel der Weltachse hier rein von dem Standort (dem Breitengrad) des Beobachters abhängig.

Der wahre Horizont ist eine gedachte Ebene durch den Erdmittelpunkt parallel zur Standfläche des Beobachters. Diese Ebene liegt in dieser Darstellung immer waagrecht.

Nautisch astronomisches Grunddreieck

Werden die Systeme des Horizontes und die des Himmelsäquators ineinander projiziert, ergibt sich zwischen dem Himmelsnordpol, dem Zenit und dem Gestirn ein sphärisches – also über die Kugeloberfläche gekrümmtes – Dreieck. In diesem Dreieck lassen sich mit trigonometrischen Formeln die Winkel und Seitenlängen berechnen.

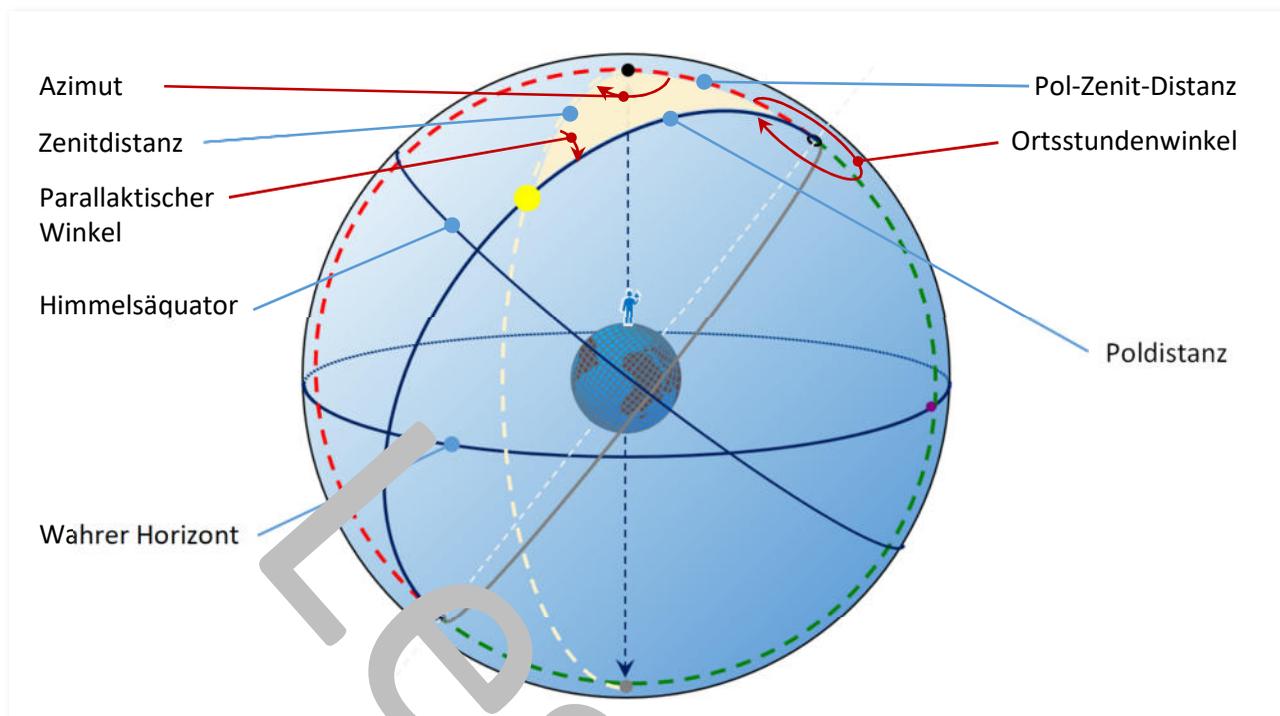


Abb. 48: Nautisch astronomisches Grunddreieck

Die Eckpunkte heißen:		Die Seitenlängen sind:		Die Winkel sind:	
Zt	Zenit	z	Zenitdistanz = $90^\circ - h$	Az	Azimut
G	Gestirn	b	Pol-Zenit-Distanz = $90^\circ - \varphi$		Ortsstundenwinkel (LHA)
P _N	Himmelsnordpol	p	Poldistanz = $90^\circ - \delta$	q	Parallaktischer Winkel

Ungewohnt ist die Angabe von Seitenlängen als Winkel. Bezogen auf die Erdoberfläche gilt: 1 Grad entspricht 60 Seemeilen. Dieser Zusammenhang wurde im Kapitel „Von der Beobachtung zur Standlinie“ erklärt.

Beispiel:

Bei einer Gestirns Höhe (h) von 65° beträgt die Zenitdistanz (z) zwischen Beobachterposition und Gestirnsposition: 90° minus 65° gleich 25°. Dies entspricht einem Abstand von 25° x 60 Seemeilen = 1.500 Seemeilen zwischen Standort und Bildpunkt.

Meridianfigur

Eine seitliche Ansicht auf die Himmelskugel ist die Grundlage für die Meridianfigur. Hier stehen der Breitengrad des Beobachters und die Deklination des Gestirns im Fokus der Betrachtung. Basis ist der Wahre Horizont und senkrecht dazu die Zenit-/Nadir-Achse (hier in Blau); beides aus der Beobachterperspektive. Ein zweites Kreuz (hier in Gelb) stellt den Himmelsäquator und senkrecht dazu die Himmelsachse zwischen Himmelsnord- (P_N) und -südpol (P_S) dar. Dieses Kreuz ist um die Beobachterbreite gegenüber dem ersten (hier blauen) Kreuz gekippt.

Der über dem Beobachter gespannte Längengrad, der obere Meridian (Abb. 47 rot) und sein Komplementär, der untere Meridian (grün) bilden die Basis für eine Darstellung mit Vollkreis.

Wird die Grafik auf die wesentlichen Punkte reduziert, ergibt sich die eigentliche Meridianfigur, Abb. 48.

In nebenstehendem Beispiel beträgt die Beobachterbreite 52° N, die Kreuze sind somit um diese 52° gegeneinander verdreht.

Der Kippwinkel des (gelben) Kreuzes aus Himmelsäquator und P_N - P_S -Achse hat nichts mit der bekannten Schrägstellung der Erdachse um $23,5^\circ$ zu tun.

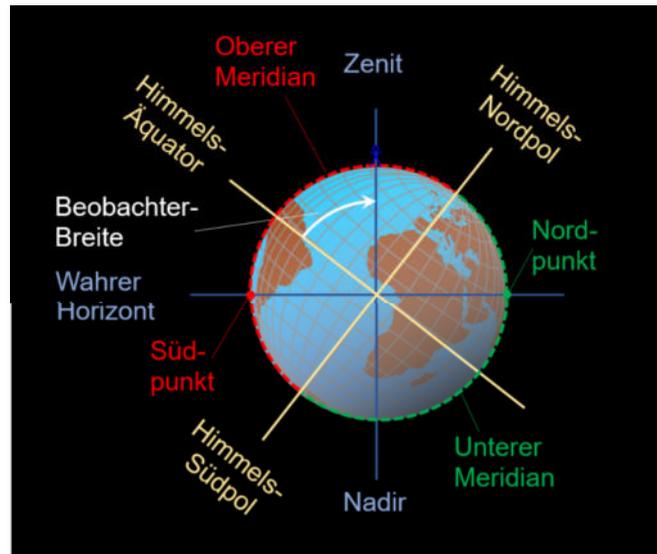


Abb. 51: Grundlage für die Meridianfigur

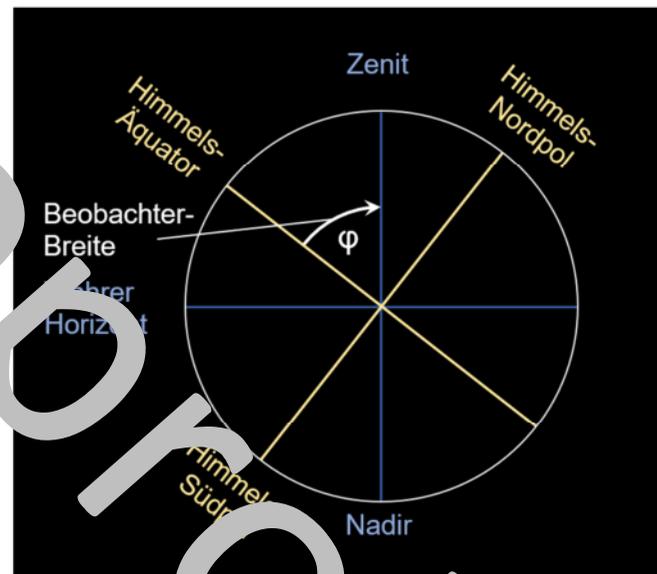


Abb. 52: Meridianfigur

In der Meridianfigur kann die Deklination eingetragen und damit die Bewegung des Gestirns im Laufe eines Tages dargestellt werden. Im rechten Beispiel ist die Bahn der Sonne an einem Sommertag auf der Nordhalbkugel ($\delta = 23^\circ$ N) mit dem höchsten Stand am Mittag (obere Kulmination), dem Gestirnsauf- und Untergangspunkt (Übergang über/unter dem Wahren Horizont) und der unteren Kulmination dargestellt. Der Bereich auf dem (roten) Deklinationsparallel von Aufgang über die obere Kulmination bis zum Untergang wird als **Tagbogen** bezeichnet, der untere als **Nachtbogen**.

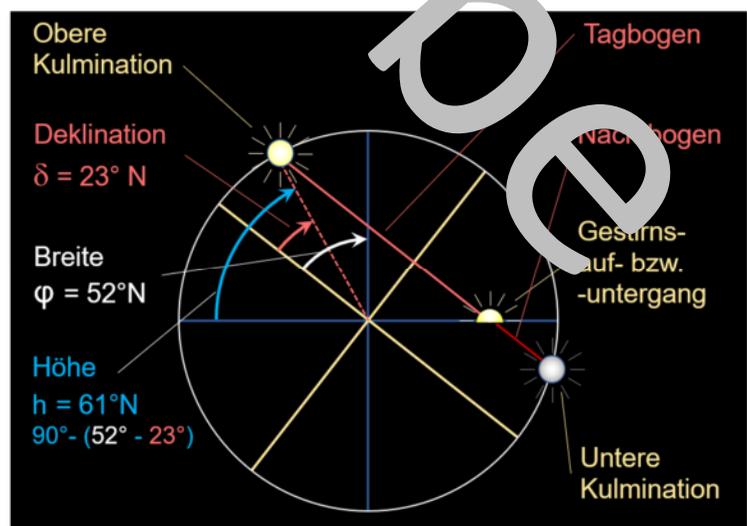


Abb. 53: Meridianfigur mit Gestirnsbahn

Koppel-, Besteck- und Großkreisrechnung

Spätestens seit Nutzung elektronischer Kartenplotter ist klar, dass Navigation auch ohne Kursdreieck, Zirkel und Papierseekarte, rein mathematisch durchgeführt werden kann. Die Berechnung von Entfernungen und Kursen auf der Kugeloberfläche sind jedoch nicht trivial. Im Gegensatz zu Winkel- und Streckenbestimmung auf einer planen Ebene, kommt auf der gekrümmten Erdoberfläche die sphärische Trigonometrie zur Anwendung. Die notwendigen Formeln für Kurswinkel und Distanzen auf der Kugeloberfläche werden ebenso für die astronomische Azimut- und Höhenwinkelkalkulation benötigt.

Bei Strecken auf der (Erd-) Kugeloberfläche sind zwei Routen, die Loxodrome (kursgleicher) und orthodrome (auf dem Großkreis) Route unterschieden. Der Loxodrome, die Kurslinie, schneidet alle Meridiane zwischen Start- und Zielpunkt unter gleichem Winkel, es wird ein konstanter Kurs gefahren. Die Strecke dazwischen ist aber nicht die kürzeste auf der Kugeloberfläche. Solch ein Kurs würde bei der Eintragung in eine übliche Seekarte nach Mercatorprojektion als gerade Linie zwischen Start und Ziel darstellbar. Stattdessen ist die orthodromische Route die kürzeste mögliche Verbindung auf der Kugeloberfläche, folgt aber nicht einem konstanten Kurs. Spezielle Großkreiskarten (in gnomonischer Projektion) unterstützen grafisch bei der Ermittlung dieser Orthodrome für Langstreckenpassagen (z. B. vom Westausgang des Englischen Kanals zum Karibik).

Großkreise sind die Schnittpunkte einer Kreisscheibe mit der einer Kugeloberfläche bei denen Scheibemittelpunkt und Kugelmittelpunkt als auch die Durchmesser der beiden gleich sind. Der Äquator und alle Meridiane sind solche Großkreise.

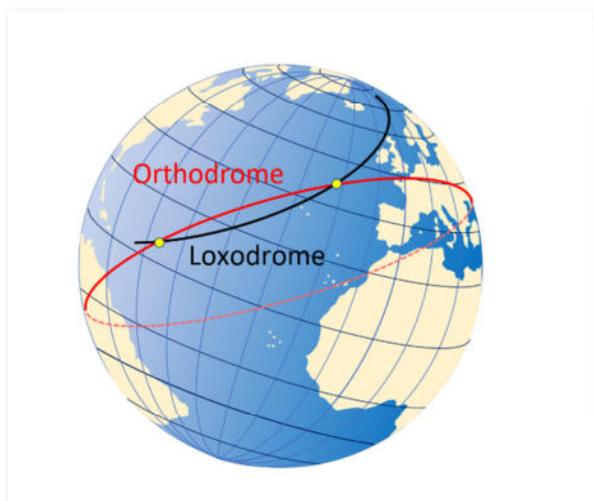


Abb. 62:
Orthodrome (Großkreis, engl.: *great circle*) und
Loxodrome (Kursgleiche, engl.: *rhumb line*)

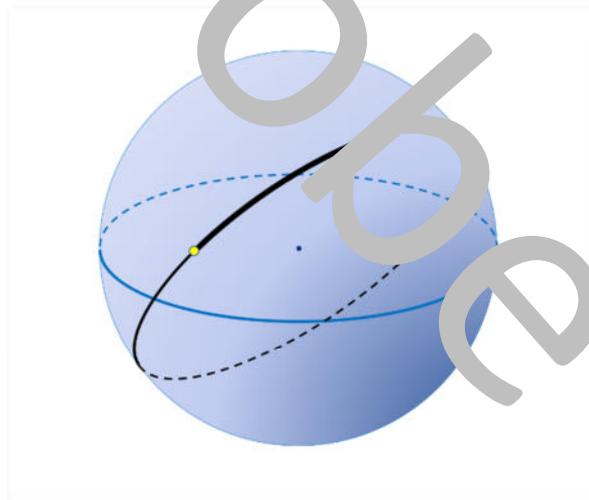


Abb. 61: Kugel mit Großkreisen

Der Großkreis führt immer um die gesamte (Erd-) Kugel, während die Loxodrome (außer bei reinen Ost-West-Kursen) immer in einem Pol beginnt und im anderen Pol endet.

Im Folgenden werden verschiedene Berechnung und deren Formeln für die Koppel- und Besteckrechnung erläutert. Es wird darin zwischen loxodromischen und orthodromischen Methoden unterschieden. Die zugrundeliegenden Formeln sind auch im SSS-SHS-Begleitheft abgedruckt, bedürfen jedoch zur sicheren Anwendung einer Erklärung. In den SHS-Prüfungen stehen (durch den Lenkungsausschuss freigegebene und zum Download bereitstehenden) Formblätter zur Verfügung.

Abkürzungsverzeichnis

α	Griechisches kleines Alpha, z.B. Kurswinkel
β	Griechisches kleines Beta, z.B. Sternenwinkel; engl.: <i>star hour angle, SHA</i>
δ	Griechisches kleines Delta, Deklination; engl.: <i>declination</i>
Δ	Griechisches großes Delta, Differenz zwischen zwei Werte; z. B. Δh
λ	Griechisches kleines Lambda, geografische Länge; engl.: <i>longitude, LON</i>
φ	Griechisches kleines Phi, geografische Breite; engl.: <i>latitude, LAT</i>
Φ	Griechisches großes Phi; in der Navigation vergrößerte Breite
$^{\circ}$	1 Winkelgrad
$'$	1 Winkelminute
Υ	Widderpunkt, Frühlingspunkt; engl.: <i>aries</i>
Ω	Waagepunkt, Herbstpunkt; engl.: <i>autumnal equinox</i>
a	Abstand zwischen Längengraden
Abl	Ablenkung, Differenz zwischen magnetisch und missweisend Nord; engl.: <i>deviation</i>
Ah	Augeshöhe, Augenhöhe
Az	Azimut, Winkel zwischen Nord- und Gestirnsrichtung
b	Abstand zwischen Breitengraden
BST	<i>british summer time</i>
BT	<i>british time</i>
BV	Besteckversetzung; Differenz zwischen Koppel- und tatsächlichem Ort; engl.: <i>vector adjustment</i>
BZ	Bordzeit; an Bord festgelegte Zeitart während eines Reiseabschnittes
Chr	Chronometerablesung
d oder D	Distanz
Dek	Deklination
d_{GK}	Großkreisdistanz; engl.: <i>great circle distance</i>
d_{Lox}	loxodromische Distanz; engl.: <i>loxodromic distance</i>
EQ	Äquator
Gb	Gesamtbeschickung
Grt	Greenwicher Stundenwinkel
GZ	gesetzliche Zeit
h	Höhe
h	Stunde, als Zeiteinheit; engl.: <i>hour</i> ; z. B.: 03 h 12 min 45 s oder 03:12:45
h_b	beobachtete Höhe; engl. <i>observed high (Ho)</i>
HP	Horizontparallaxe
h_r	berechnete Höhe; engl.: <i>calculated high (Hc)</i>

Stichwortverzeichnis

Abweichung	8	Mittagsbesteck	57
Abweitung	44	mittlere Ortszeit, MOZ.....	37
astronomische Dämmerung	39	Nachtbogen	55
Augenhöhe	31	Nautisch astronomisches Grunddreieck.....	52
Azimet.....	27	nautische Dämmerung	39
beobachtete Höhe.....	27	Nautisches Jahrbuch.....	14
berechnete Höhe.....	27	Nonius.....	23
Besteckrechnung	63	observed high	27
Bildpunkt	8	Orthodrome.....	62
Bildpunktkoordinaten.....	8	Refraktion, R	32
bürgerliche Dämmerung	39	Schalttafel	18
calculated high.....	27	scheinbare Höhe.....	31
Chronometerablesung.....	36	scheinbare Horizont	50
Deklination	8	scheinbarer Radius	33
Ephemeriden	14	Schiffsmittag	37
Frühlingspunktes	15	Sextant.....	21
geißter Ort	27	siderischer Tag.....	37
gemittelte Breite	64	Sonnentag.....	37
Gesamtbeschickung, Gb	32	Stand.....	36
Gestirn	9	Sternentag	37
gleichnamig	56	Sternwinkel.....	16
Greenwicher Stundenwinkel	8	synodischer Tag	37
Größenklasse, scheinbare	17	System des Himmelsäquators	51
Großkreis	62	System des wahren Horizontes	49
Halbsichtsextant	22	Tagbogen	55
Höhendifferenz, Δh	27	Transitus	15
Höhenparallaxe, P	34	Trommelsextanten	21
Horizontalwinkelmessungen	21	Universal Time Coordinated, UTC	37
Horizontparallaxe, HP.....	33	Universal Time, UT.....	37
Indexberichtigung.....	26	Unterschied, Unt.....	19
Indexbeschickung	26	Verbesserung, Vb.....	19
Indexfehler	26	vergrößerte Breite	65
Kimmaabstand.....	31	Vollsichtsextant	22
Kimmtiefe	31	wahre Ortszeit, WOZ	37
Kippfehler des Horizontspiegels.....	25	wahrer Horizont.....	50
Kippfehler des Indexspiegels.....	25	Widderpunkt.....	15
Koppelrechnung	63	Winkelhöhe, h.....	9
Kulmination	37	Zenit.....	9
Kursgleiche	62	zirkumpolar.....	56
Loxodrome.....	62	Zusatzbeschickung, Zb	33
		Zuwachs, Zw	19