VI. KAPITEL

Simultane Bestimmungen

a) Die simultane Bestimmung der Zeit und der Polhöhe mit Hilfe von Almukantaratdurchgängen

1. *Die Funktionaldeterminante.* Soll die Uhrkorrektion und die Polhöhe neben der Instrumentalzenitdistanz aus den Durchgängen dreier Sterne durch denselben Almukantarat berechnet werden können, so darf die Funktionaldeterminante der drei Funktionen

$$y_i = \cos z - \cos p_i \cos \Phi - \sin p_i \sin \Phi \cos (U_i - u - \alpha_i) \qquad (i = 1, 2, 3)$$

in bezug auf die Unbekannten u, Φ und z nicht verschwinden. Setzt man

$$A_i = \frac{\partial y_i}{\partial u} = \quad \sin \Phi \sin z \sin a_i,$$

$$B_i = \frac{\partial y_i}{\partial \Phi} = - \sin z \cos a_i,$$

$$C_i = \frac{\partial y_i}{\partial z} = \sin z,$$

so wird die Funktionaldeterminante J gleich:

$$J = S\, A_1 (B_2\, C_3 - B_3\, C_2),$$

worin S die durch zyklische Vertauschung entstehende Summe bezeichnet. Es ist

$$J = \sin \Phi \sin^3 z\, S \sin a_1 (\cos a_2 - \cos a_3).$$

Da aber

$$\begin{aligned} S \sin a_1 (\cos a_2 - \cos a_3) &= \sin a_1 (\cos a_2 - \cos a_3) + \sin a_2 (\cos a_3 - \cos a_1) \\ &\qquad + \sin a_3 (\cos a_1 - \cos a_2) \\ &= \sin a_1 (\cos a_2 - \cos a_3) - \cos a_1 (\sin a_2 - \sin a_3) \\ &\qquad + \sin (a_2 - a_3) \end{aligned}$$

ist, verschwindet J nur, wenn von den 3 Azimuten 2 einander gleich werden.

Es sind zwei strenge Lösungen der Aufgabe, u und Φ aus den Gleichungen

$$y_2 - y_1 = 0$$
$$y_3 - y_2 = 0,$$

zu berechnen, bekannt; die eine geht auf CAGNOLI zurück, die andere stammt von GAUSS. Wir behandeln diese Lösungen nicht, sondern besprechen nur die Lösung, die von bekannten Näherungswerten ausgeht. Zur Berechnung der unbekannten Verbesserungen der Näherungswerte liegen dann lineare Beziehungen vor; diese vermitteln die Lösung auch dann, wenn die Durchgänge von mehr als 3 Sternen beobachtet worden sind.

2. *Allgemeine Bemerkungen; das Prismenastrolab.* Zur Beobachtung der Durchgänge durch einen bestimmten Almukantarat hat man besondere Instrumente konstruiert; das bekannteste ist das Prismenastrolab von CLAUDE und DRIENCOURT. Das Fernrohr dieses Instrumentes wird nur in horizontaler Stellung benützt und kann durch Drehung um eine vertikale Achse in jedes beliebige Azimut gebracht werden. Vor dem Objektiv ist ein gleichseitiges Prisma befestigt; eine Fläche desselben kann durch Autokollimation senkrecht zur optischen Achse des Fernrohres gestellt werden. Liegen die Kanten des Prismas horizontal, so dringen die Strahlen eines Sternes in 30^0 Zenitdistanz senkrecht durch die obere Fläche in das Prisma ein und werden von der unteren in horizontaler Richtung in das Fernrohr geworfen. Vor dem Prisma wird ein Quecksilberhorizont aufgestellt; er wirft die vom Stern kommenden Strahlen auf die untere Fläche des Prismas, sie durchdringen diese in senkrechter Richtung und werden von der oberen Fläche ebenfalls in horizontaler Richtung in das Fernrohr geworfen. Im Gesichtsfeld bewegen sich die beiden Sternbilder in entgegengesetzter Richtung. Das Fernrohr wird durch Korrektionsschrauben so gestellt, daß die beiden Sternbilder in unmittelbarer Nähe der optischen Achse aneinander vorbeigehen. Im Moment der Koinzidenz befindet sich dann der Stern in einer bestimmten, durch die Prismenwinkel bestimmten scheinbaren Zenitdistanz; sie ist nur dann genau gleich 30^0, wenn die drei Prismenwinkel genau gleich 60^0 sind. Das Instrument gestattet also, die Durchgänge der Sterne durch einen Almukantarat von bestimmter Zenitdistanz zu beobachten, ohne daß die Hilfe eines Niveaus in Anspruch genommen werden muß. Es ist nur notwendig, die Änderungen, welche die wahren Zenitdistanzen infolge von Änderungen der meteorologischen Verhältnisse erleiden, in Rechnung zu stellen.

3. *Die Reduktionsformeln.* Die linearen Beziehungen, welche die Kenntnis der unbekannten Verbesserungen der Näherungswerte vermitteln, erhält man auf folgendem Weg. Es sei Z der konstante Wert der Instrumentalzenitdistanz, in der die Durchgänge beobachtet werden, und

$$dr_i = r_i - r_0$$

die Änderung, welche die Refraktion r_i gegenüber einem durchschnittlichen konstanten Wert r_0 während der Beobachtungsdauer erleidet. Die wahre Zenitdistanz ζ_{i0} ist dann gleich

$$\zeta_{i0} = Z + r_0 + dr_i$$

oder, wenn

$$Z + r_0 = z$$

gesetzt wird, gleich

$$\zeta_{i0} = z + dr_i .$$

Sind nun z_0, u_0 und Φ_0 Näherungswerte der Unbekannten z, u und Φ, und dz, du und $d\Phi$ deren Verbesserungen, so daß

$$\zeta_{i0} = z_0 + dz + dr_i ,$$
$$u = u_0 + du,$$
$$\Phi = \Phi_0 + d\Phi$$

wird, so erhält man durch Entwicklung der Gleichung

$$\cos(z_0 + dz + dr_i) - \cos(\Phi_0 + d\Phi)\cos p_i - \sin(\Phi_0 + d\Phi)\sin p_i \cos(U_i + u_0 + du - \alpha_i) = 0$$

unter Vernachlässigung kleiner Größen höherer Ordnung die Beziehung

$$\cos z_0 - \cos\Phi_0 \cos p_i - \sin\Phi_0 \sin p_i \cos(U_i + u_0 - \alpha_i) + du \sin\Phi_0 \sin z_0 \sin a_i - d\Phi \sin z_0 \cos a_i - (dz + dr_i)\sin z_0 = 0.$$

Definiert man nun den Winkel ζ_i durch die Gleichung

$$\cos\zeta_i = \cos\Phi_0 \cos p_i + \sin\Phi_0 \sin p_i \cos(U_i + u_0 - \alpha_i), \tag{75a}$$

und setzt

$$\cos z_0 - \cos\zeta_i = -2\sin\frac{z_0 + \zeta_i}{2}\sin\frac{z_0 - \zeta_i}{2} = \sin z_0 \cdot (\zeta_i - z_0) + \cdots ,$$

so erhält man die Beziehung

$$(dz + dr_i) - du \sin\Phi_0 \sin a_i + d\Phi \cos a_i = \zeta_i - z_0$$

oder, wenn man als fingierte Beobachtungsgrößen einführt

$$l_i = \zeta_i - z_0 - dr_i : \tag{75b}$$

$$dz - du \sin\Phi_0 \sin a_i + d\Phi \cos a_i = l_i + \lambda_i , \tag{75c}$$

worin λ_i die scheinbaren Fehler sind, deren Quadratsumme zu einem Minimum zu machen ist, wenn überschüssige Beobachtungen vorhanden sind.

4. *Die Berücksichtigung der täglichen Aberration.* Der Einfluß der täglichen Aberration kann leicht nachträglich in Rechnung gestellt werden.

Die Korrektion δl_i, die an den fingierten Beobachtungsgrößen l_i anzubringen ist, wenn zu deren Berechnung die scheinbaren Örter nicht wegen der täglichen Aberration verbessert worden sind, wird durch den Ausdruck

$$\delta l_i = -(\sin q_i \, d\alpha_i \sin p_i - \cos q_i \, dp_i)$$

gegeben, in welchem zu setzen ist

$$d\alpha_i \sin p_i = +0''\!.322 \sin \Phi \cos t_i ,$$
$$dp_i = -0''\!.322 \sin \Phi \sin t_i \cos p_i .$$

Da aber

$$\cos t_i \sin q_i + \sin t_i \cos q_i \cos p_i = \sin a_i \cos z$$

ist, wird

$$\delta l_i = -0''\!.322 \sin \Phi \cos z \sin a_i .$$

Verbessert man um diesen Betrag die Werte von l_i in den Fehlergleichungen, so lassen sie sich, wenn

$$du' = du - 0''\!.322 \cos z$$

gesetzt wird, in der alten Form schreiben:

$$dz - du' \sin \Phi_0 \sin a_i + d\Phi \cos a_i = l_i + \lambda_i .$$

Daraus ist ersichtlich, daß man an dem Wert du, der ohne Rücksicht auf den Einfluß der täglichen Aberration ermittelt wird, die Korrektion

$$\delta u = +0''\!.322 \cos z = +0^{s}\!.021 \cos z$$

anzubringen hat. Die andern Unbekannten, dz und $d\Phi$, bedürfen keiner Verbesserung.

5. *Die mittleren Fehler der Unbekannten.* Im Differentialausdruck des Cosinussatzes:

$$dz + d\Phi \cos a_i - du \sin \Phi \sin a_i$$
$$= dU_i \sin p_i \sin q_i - (d\alpha_i \sin p_i \sin q_i - dp_i \cos q_i)$$

identifizieren wir dU_i, $d\alpha_i$, dp_i mit den wahren Fehlern der Größen U_i, α_i, p_i und setzen

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{U_i} \sin p_i \sin q_i - (\varepsilon_{\alpha_i} \sin p_i \sin q_i - \varepsilon_{p_i} \cos q_i);$$

mittels der Beziehungen

$$\varepsilon_z + \varepsilon_\Phi \cos a_1 - \varepsilon_u \sin \Phi \sin a_1 = \varepsilon_1 ,$$
$$\varepsilon_z + \varepsilon_\Phi \cos a_2 - \varepsilon_u \sin \Phi \sin a_2 = \varepsilon_2 ,$$
$$\varepsilon_z + \varepsilon_\Phi \cos a_3 - \varepsilon_u \sin \Phi \sin a_3 = \varepsilon_3$$

führen wir die wahren Fehler ε_Φ und ε_u auf die wahren Fehler ε_{U_i}, ε_{α_i} und

ε_{p_i} zurück, indem wir diese Beziehungen nach den Unbekannten ε_Φ und ε_u auflösen. Setzt man zur Abkürzung

$$c_{ik} = \cos a_i - \cos a_k,$$
$$s_{ik} = \sin a_i - \sin a_k,$$

so führt die Elimination von dz zunächst zu den beiden Gleichungen

$$c_{21}\, \varepsilon_\Phi - s_{21}\, \varepsilon_u \sin \Phi = \varepsilon_2 - \varepsilon_1,$$
$$c_{32}\, \varepsilon_\Phi - s_{32}\, \varepsilon_u \sin \Phi = \varepsilon_3 - \varepsilon_2;$$

somit wird

$$(s_{21}\, c_{32} - s_{32}\, c_{21})\; \varepsilon_u \sin \Phi = \varepsilon_1 c_{32} - \varepsilon_2 (c_{32} + c_{21}) + \varepsilon_3\, c_{21},$$
$$(s_{21}\, c_{32} - s_{32}\, c_{21})\; \varepsilon_\Phi = \varepsilon_1 s_{32} - \varepsilon_2 (s_{32} + s_{21}) + \varepsilon_3\, s_{21}.$$

Geht man von den wahren Fehlern ε zu den mittleren Fehlern m über, so erhält man:

$$(s_{21}\; c_{32} - s_{32}\; c_{21})^2\, m_u^2 \sin^2 \Phi = m_1^2\; c_{32}^2 + m_2^2\; (c_{32} + c_{21})^2 + m_3^2\; c_{21}^2,$$
$$(s_{21}\; c_{32} - s_{32}\; c_{21})^2\, m_\Phi^2 = m_1^2\; s_{32}^2 + m_2^2\; (s_{32} + s_{21})^2 + m_3^2\; s_{21}^2.$$

Die rechter Hand auftretenden mittleren Fehler m_i führen wir auf ihre Komponenten zurück; es ist

$$m_i^2 = m_{U_i}^2 \sin^2 p_i \sin^2 q_i + m^{*2},$$

worin m^* die aus der Unsicherheit des Sternortes entspringende Fehlerkomponente bezeichnet. Führt man m_{U_i} auf die beiden Komponenten a_0 und b_0 zurück (vergleiche Seite 46) und auf den Winkel (q), den die Bewegungsrichtung des Sternes mit der Normalen zum Almukantarat bildet: $(q) = 90^0 - q$, so erhält man, wenn n Fadendurchgänge oder Kontaktbeobachtungen vorliegen:

$$m_i^2 = \frac{1}{n} \sin^2 p_i \sin^2 q_i \left(a_0^2 + \frac{b_0^2 \operatorname{cosec}^2 p_i}{V^2 \sin^2 q_i} \right) + m^{*2}. \tag{76a}$$

Wir nehmen wieder an, die Zahl n der Durchgänge werde so gewählt, daß m_i^2 gleich dem konstanten Wert m^2 wird. Die Ausdrücke für die Quadrate der mittleren Fehler von u und Φ nehmen dann die Form an:

$$(s_{21}\, c_{32} - s_{32}\, c_{21})^2\, m_u^2 \sin^2 \Phi = 2\, m^2\, (c_{32}^2 + c_{32}\, c_{21} + c_{21}^2),$$
$$(s_{21}\, c_{32} - s_{32}\, c_{21})^2\, m_\Phi^2 = 2\, m^2\, (s_{32}^2 + s_{32}\, s_{21} + s_{21}^2).$$

Nimmt man nun an, die drei Sterne seien in drei um je 120^0 verschiedenen Azimuten beobachtet worden, so daß

$$s_{21} = -\frac{3}{2} \sin a_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos a_1; \quad s_{32} = -\sqrt{3} \cos a_1$$

$$c_{21} = -\frac{3}{2} \cos a_1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin a_1; \quad c_{32} = -\sqrt{3} \sin a_1$$

wird, so findet man leicht, daß

$$2\,(c_{32}^2 + c_{32}\,c_{21} + c_{21}^2) = 2\,(s_{32}^2 + s_{32}\,s_{21} + s_{21}^2) = \frac{2}{3}\,(s_{21}\,c_{32} - s_{32}\,c_{21})^2 = \frac{9}{2}$$

ist. Somit erhält man die Beziehung

$$m_u^2 \sin^2 \Phi = m_\Phi^2 = \frac{2}{3}\,m^2. \tag{76b}$$

Ist nicht nur *eine* Gruppe von drei Sternen in Azimutunterschieden von 120° beobachtet worden, sondern liegen N' solcher Gruppen vor, so daß das arithmetische Mittel der Gruppenwerte von u und von Φ als Endresultat aller Beobachtungen anzunehmen ist, so sind diesen Mittelwerten mittlere Fehler M_u und M_Φ beizulegen, die durch die Beziehung

$$M_u^2 \sin^2 \Phi = M_\Phi^2 = \frac{2\,m^2}{3\,N'}$$

gegeben werden. Da aber die Gesamtzahl aller einzelnen Beobachtungen gleich $3\,N'$ ist, so erhält man, wenn

$$3\,N' = N$$

gesetzt wird:

$$M_u \sin \Phi = M_\Phi = \pm \sqrt{\frac{2}{N}}\; m.$$

75c

6. *Das Gewicht der Fehlergleichung* (74c). In den vorangehenden Ausführungen haben wir angenommen, daß Fadendurchgänge oder Kontaktbeobachtungen gemacht worden seien. Die Reduktion auf die Zeit des Durchganges durch den Almukantarat des Mittelfadens ist nach der Beziehung (4) respektive (5b), Seite 33, zu berechnen. Das Prismenastrolab enthält in der vom Hersteller gelieferten Form kein Fadennetz, so daß nur der Moment der Koinzidenz der beiden Bilder beobachtet werden kann. Es besteht dann nicht die Möglichkeit, die mittleren Fehler in verschiedenen Azimuten durch die Zahl der beobachteten Fadendurchgänge — wenigstens angenähert — gleich groß zu machen.

Bei der Ableitung des Gewichtes, das der Fehlergleichung (75c) beizulegen ist, behalten wir die Annahme, daß die Zahl der Faden- oder Kontaktbeobachtungen gleich n sei, bei; die resultierende Gewichtsformel ist leicht auf den Fall, daß als Beobachtungszeiten nur Koinzidenzmomente vorliegen, zu spezialisieren; man hat nur $n = 1$ zu setzen und an Stelle der Vergrößerungszahl V den doppelten Betrag $2\,V$ einzuführen, weil die Relativgeschwindigkeit der beiden Sternbilder gegeneinander doppelt so groß ist als die Geschwindigkeit der Bewegung des einzelnen Bildes gegenüber einem festen Faden.

Es sei ε_l der wahre Fehler der fingierten Beobachtungsgrößen in den Fehlergleichungen (75c). Da l_i durch die Beziehung

$$l_i = \zeta_i - z_0 - dr_i$$

definiert ist, wird ε_l gleich dem wahren ε_ζ von ζ_i minus dem wahren Fehler von dr_i. Diesen dürfen wir vernachlässigen, da die Änderungen dr_i der Refraktion sehr klein sind. Dagegen führen wir einen Fehler ein, der anomale Refraktionsverhältnisse als Folge einer Zenitablenkung erfaßt, und bezeichnen diesen Fehler mit ε_r, so daß

$$\varepsilon_l = \varepsilon_\zeta + \varepsilon_r$$

wird.

Führt man den wahren Fehler ε_ζ auf die wahren Fehler ε_{U_i}, ε_{α_i}, ε_{p_i} zurück, so erhält man

$$\varepsilon_l = \varepsilon_{U_i} \sin p_i \sin q_i - (\varepsilon_{\alpha_i} \sin p_i \sin q_i - \varepsilon_{p_i} \cos q_i) + \varepsilon_r.$$

Der ε_l entsprechende mittlere Fehler wird also gleich

$$m_l^2 = m_{U_i}^2 \sin^2 p_i \sin^2 q_i + m^{*2} + m_r^2.$$

Führt man hierin m_{U_i} auf die Komponenten a_0 und b_0 sowie auf die Zahl n zurück, so wird

$$m_l^2 = \frac{1}{n}\left(\frac{b_0^2}{V^2} + a_0^2 \sin^2 p_i \sin^2 q_i\right) + m^{*2} + m_r^2. \tag{77a}$$

Faßt man die vom Sternort unabhängigen Glieder zusammen und setzt

$$m_0^2 = \frac{b_0^2}{n V^2} + m^{*2} + m_r^2$$

und führt für den Faktor von a_0^2 das gleichwertige Produkt $\sin^2 a_i \sin^2 \Phi_0$ ein, so erhält man als Gewicht g_i von l_i den Ausdruck:

$$g_i = \frac{\text{constans}}{m_0^2 + \frac{1}{n}\, a_0^2 \sin^2 \Phi_0 \sin^2 a_i}. \tag{77b}$$

Wird nur die Koinzidenz des reflektierten Bildes mit dem direkten beobachtet, so ist zu setzen

$$m_0^2 = \frac{b_0^2}{(2V)^2} + m^{*2} + m_r^2 \tag{78a}$$

und

$$g_i = \frac{\text{constans}}{m_0^2 + a_0^2 \sin^2 \Phi_0 \sin^2 a_i}. \tag{78b}$$

Für die Konstanten der Formel (78b) hat Dr. E. HUNZIKER*) aus seinen nach der Aug- und Ohrmethode angestellten Beobachtungen die folgenden Zahlenwerte abgeleitet:

$$m_0^2 = (0{,}''867)^2 = 0{,}75,$$
$$a_0^2 = (1{,}''421)^2 = 2{,}02.$$

Der Wert von $a_0 = 1{,}''412 = 0{,}^s094$ stimmt mit dem für diese Fehlerkomponente aus Meridianbeobachtungen abgeleiteten Wert $0{,}^s10$ gut überein. Über-

*) Band 19 der «Astronomisch-geodätischen Arbeiten in der Schweiz», Seite 45.

nimmt man aus Meridianbeobachtungen den Wert von $b_0 = 4^s\!,7$, so wird mit $2V = 140$

$$\left(\frac{b_0}{2V}\right)^2 = (0^s\!,0336)^2 = (0'',50)^2.$$

Setzt man den Wert von m^{*2} zu $(0'',30)^2$ an, so läßt sich der Wert von m_r^2 abschätzen; die Beziehung (78a) gibt

$$m_r^2 = 0{,}75 - 0{,}25 - 0{,}09 = 0{,}41,$$

also

$$m_r = \pm\, 0'',64.$$

Dieser große Betrag ist nicht sehr wahrscheinlich, wenn er ausschließlich der anomalen Refraktion zur Last gelegt werden müßte. Doch erfaßt die Beziehung (78a) sicher nicht alle systematischen Einflüsse, wie zum Beispiel Änderungen des Prismenwinkels infolge von Temperaturänderungen. Nimmt man m^* und m_r gleich groß an, nämlich zu $\pm 0'',30$, so folgt aus der Beziehung (78a) der Wert

$$b_0 = 7^s\!,05.$$

Da man die Koinzidenz zweier Sternbilder nicht so genau auffassen kann wie den Moment der Bisektion beim Durchgang des Sternbildes durch einen festen Faden, so ist zu erwarten, daß man aus Astrolabbeobachtungen einen größeren Wert der Komponente b_0 erhält als aus Meridiandurchgängen; doch wird man die Vergrößerung vom Wert $4^s\!,7$ auf $7^s\!,05$ nicht ausschließlich diesem Umstand zur Last legen dürfen; man wird bei der Verteilung des Wertes 0,75 von m_0^2 auf einzelne Komponenten neben b_0, m^* und m_r noch nach weiteren Fehlerquellen suchen müssen.

ZAHLENBEISPIEL

Ort: Astronomische Anstalt der Universität Basel, Bernoullianum.
Instrument: Prismenastrolab.
Beobachter: Th. Niethammer.
Zeit: 17. Juli 1919.

Das verwendete Prismenastrolab besitzt kein Fadennetz, so daß die einzelne Durchgangszeit nur auf der Beobachtung des Koinzidenzmomentes beruht. Die beobachteten Uhrzeiten, die Azimute der Sterne und die scheinbaren Sternörter sind in der Tabelle 1 zusammengestellt. Die Uhrzeiten sind nach der Aug- und Ohrmethode beobachtet und angenähert auf Sternzeit reduziert worden.

Tabelle 1

	τ Drac	δ Boot	110 Herc
Beobachtete Uhrzeit U_i . .	$16^h56^m37^s\!,78$	$17^h34^m22^s\!,36$	$17^h38^m25^s\!,51$
Rektaszension α_i	19 17 11,17	15 12 16,88	18 42 14,17
Poldistanz p_i	$16^0\,47'\,27'',87$	$56^0\,22'\,56'',63$	$69^0\,31'\,43'',51$
Azimut a	$199^0\!,5$	$75^0\!,4$	$329^0\!,0$

Die Berechnung der fingierten Beobachtungsgrößen nach der Beziehung (75 a) ist in der zweiten Tabelle gegeben; es sind folgende Näherungswerte verwendet worden:

$$u_0 = 0,$$
$$\Phi_0 = 42^0 26' 22{,}''00,$$
$$z_0 = 30\ 00\ 32{,}00.$$

Die Korrektion dr_i wegen der Änderung der Refraktion ist nicht angebracht worden.

Tabelle 2

	τ Drac	δ Boot	110 Herc
$U + u_0 - \alpha_i = \ldots$	$-2^h20^m33{,}^s39$	$+2^h22^m05{,}^s48$	$-1^h03^m48{,}^s66$
$\cos p_i \ldots$	9,981 0773	9,743 2333	9,543 7419
$\sin p_i \ldots$	9,460 7215	9,920 5153	9,971 6690
$\cos p_i \cos \Phi \ldots$	9,849 1283	9,611 2843	9,411 7929
$\cos (U_i + u_0 - \alpha_i) \ldots$	9,912 6242	9,910 5626	9,982 9442
$\sin p_i \sin \Phi \ldots$	9,289 9034	9,749 6972	9,800 8509
$\sin p_i \sin \Phi \cos (U + u_0 - \alpha)$	9,202 5276	9,660 2598	9,783 7951
$\log (a) - \log (b) = \ldots$	0,646 6007	0,048 9755	0,372 0022
Add.-log. $\ldots$	0,088 3599	0,277 2323	0,153 6983
$\cos \zeta_i \ldots$	9,937 4882	9,937 4921	9,937 4934
$\zeta_i = \ldots$	$30^0 00' 34{,}''92$	$30^0 00' 31{,}''73$	$30^0 00' 30{,}''66$

Die unbekannten Verbesserungen folgen aus den Gleichungen:

$$dz - 0{,}943\, d\Phi + 0{,}334\, du \sin \Phi = +\, 2{,}''92,$$
$$dz + 0{,}252\, d\Phi - 0{,}968\, du \sin \Phi = -\, 0{,}27,$$
$$dz + 0{,}857\, d\Phi + 0{,}515\, du \sin \Phi = -\, 1{,}34;$$

die Auflösung führt zu folgenden Werten der Unbekannten z, Φ und u:

$$z = 30^0 00' 32{,}''00 + dz = 30^0 00' 32{,}''58$$
$$\Phi = 42\ 26\ 22{,}00 + d\Phi = 42\ 26\ 19{,}61$$
$$u = 0 + du = +\, 0{,}^s026.$$

Der Wert von u ist wegen der täglichen Aberration noch um

$$\delta u = +\, 0{,}^s021 \cos z = +\, 0{,}^s018$$

zu verbessern.

Die mittleren Fehler von u und von Φ können wir mit Hilfe der Beziehung (76b) abschätzen, da die drei Sterne sehr nahe in Azimutunterschieden von 120^0 beobachtet sind. Die Formel (77a) gibt mit $n = 1$ und mit $2\,V$ an Stelle von V

$$m_l^2 = \left(\frac{b_0}{2V}\right)^2 + a_0^2 \sin^2 p_i \sin^2 q_i + m^{*2} + m_r^2.$$

Als Faktor von a_0^2 führen wir den Mittelwert der drei Sterne, das ist 0,41, ein; es wird dann

$$m_l^2 = \left(\frac{b_0}{2V}\right)^2 + 0{,}41\, a_0^2 + m^{*2} + m_r^2.$$

Übernehmen wir die Zahlenwerte

$$\left(\frac{b_0}{2V}\right)^2 + m^{*2} + m_r^2 = 0{,}75,$$

$$a_0^2 = 2{,}02,$$

so erhält man

$$m_l^2 = 0{,}75 + 0{,}41 \cdot 2{,}02 = 1{,}58 = (1''{,}26)^2;$$

es wird also ($\sin \Phi = 0{,}675$):

$$m_u \sin \Phi = m_\Phi = \sqrt{\frac{2}{3}}\, 1''{,}26 = \pm\, 1''{,}03,$$

$$m_u = \pm\, 0^s{,}10.$$

---

b) Die simultane Bestimmung der Zeit, der Polhöhe und des Azimutes zweier Richtungen mit Hilfe von Vertikaldurchgängen [9a)]

1. *Die Funktionaldeterminante.* Es seien A_i, B_i, C_i die partiellen Ableitungen der Funktion

$$y_i = \operatorname{cotg} a \sin(U_i + u - \alpha_i) + \operatorname{cotg} p_i \sin \Phi - \cos \Phi \cos(U_i + u - \alpha_i) \qquad (79)$$

nach u, a und Φ:

$$A_i = \frac{\partial y_i}{\partial u} = \frac{\cos \Phi \sin z_i + \sin \Phi \cos z_i \cos a}{\sin a \sin p_i},$$

$$B_i = \frac{\partial y_i}{\partial a} = -\frac{\sin z_i}{\sin a \sin p_i},$$

$$C_i = \frac{\partial y_i}{\partial \Phi} = \frac{\cos z_i}{\sin a}.$$

Die Funktionaldeterminante J der drei Funktionen y_i ($i = 1, 2, 3$) in bezug auf u, a und Φ als Unbekannte kann dann in der folgenden Form geschrieben werden:

$$J = S A_1 (B_2 C_3 - B_3 C_2),$$

worin S die durch zyklische Vertauschung entstehende Summe bezeichnet. Da

$$B_2 C_3 - B_3 C_2 = -\frac{\sin(z_2 - z_3)}{\sin^2 a \sin p_2 \sin p_3}$$

ist, wird

$$J \cdot \sin^3 a \sin p_1 \sin p_2 \sin p_3 = -S(\cos \Phi \sin z_1 + \sin \Phi \cos z_1) \sin(z_2 - z_3).$$

Da aber

$$S \sin z_1 \sin(z_2 - z_3) = 0,$$
$$S \cos z_1 \sin(z_2 - z_3) = 0$$

ist, wird J identisch gleich null; es besteht also eine Abhängigkeit zwischen den drei Unbekannten u, a und Φ.

Es sei Z' ein beliebig gewählter Punkt des Instrumentenvertikales und $\Phi' = PZ'$ seine Poldistanz. Ist a' das Azimut, unter welchem der Meridian

PZ' den Vertikal schneidet, und t_i' der Stundenwinkel des Sternes (α_i, p_i) von diesem willkürlich gewählten Meridian aus, so besteht die Beziehung

$$y_i' = \operatorname{cotg} a' \sin t_i' + \operatorname{cotg} p_i \sin \Phi - \cos \Phi \cos t_i' = 0.$$

Da die Funktionaldeterminante von y_i' $(i = 1, 2)$ in bezug auf a' und Φ' als Unbekannte nicht verschwindet, wenn $z_1 \neq z_2$ ist, so gibt es unendlich viele zusammengehörige Wertepaare a' und Φ', von denen jedes die Lage des Instrumentenvertikales gegenüber dem Pol P bestimmt; die Lage des Zenites Z im Vertikal bleibt aber unbestimmt, auch wenn die Durchgangszeiten U_i von mehr als 2 Sternen beobachtet werden.

Unter den unendlich vielen Wertepaaren von a' und Φ' sind zwei durch spezielle Werte ausgezeichnet, nämlich:

1. das Paar, in dem $a' = 90^0$ ist, so daß der Meridian PZ' senkrecht zum Vertikal steht, und
2. das Paar, in dem $\Phi' = 90^0$ ist.

Im ersten Fall sei $Z' = Z_0$ der Fußpunkt des von P auf den Vertikal gefällten Lotes, der über dem Horizont des Beobachtungspunktes liegt; es sei t_0 der Stundenwinkel und $p_0 = PZ_0$ die Poldistanz von Z_0. Es wird dann

$$t_1' = t_1 - t_0,$$
$$t_2' = t_2 - t_0.$$

Da $a' = 90^0$ ist, lauten die Beziehungen $y_i' = 0$ $(i = 1, 2)$:

$$\operatorname{cotg} p_1 \sin p_0 - \cos p_0 \cos (t_1 - t_0) = 0,$$
$$\operatorname{cotg} p_2 \sin p_0 - \cos p_0 \cos (t_2 - t_0) = 0.$$

Eliminiert man hieraus p_0, so wird

$$\operatorname{tg} p_0 \equiv \operatorname{tg} p_1 \cos (t_1 - t_0) = \operatorname{tg} p_2 \cos (t_2 - t_0), \tag{80}$$

und wenn man hierin $(t_2 - t_0)$ mittels

$$t_2 - t_0 = (t_1 - t_0) - (t_1 - t_2)$$

auf $(t_1 - t_0)$ zurückführt, so erhält man die Beziehung

$$\operatorname{cotg} (t_1 - t_0) = \frac{\operatorname{cotg} p_1 \operatorname{tg} p_2 \sin (t_1 - t_2)}{1 - \operatorname{cotg} p_1 \operatorname{tg} p_2 \cos (t_1 - t_2)}. \tag{81}$$

Im zweiten Fall, wo $\Phi' = 90^0$ ist, ist $Z' = Z_0'$ der Schnittpunkt des Vertikals mit dem Äquator. Ist t_0' der Stundenwinkel von Z_0', so wird

$$t_1' = t_1 - t_0',$$
$$t_2' = t_2 - t_0',$$

und die Beziehungen $y_i' = 0$ lauten mit $a' = a_0'$:

$$\operatorname{cotg} a_0' \sin (t_1 - t_0') + \operatorname{cotg} p_1 = 0,$$
$$\operatorname{cotg} a_0' \sin (t_2 - t_0') + \operatorname{cotg} p_2 = 0.$$

Die Elimination von a_0' führt zu

$$-\operatorname{tg} a_0' \equiv \operatorname{tg} p_1 \sin(t_1 - t_0') = \operatorname{tg} p_2 \sin(t_2 - t_0').$$

Setzt man in diesen Beziehungen

$$t_1 - t_0' = 90^0 + (t_1 - t_0),$$
$$t_2 - t_0' = 90^0 + (t_2 - t_0),$$

so geht sie über in die Beziehung (80); es ist aber

$$t_0 - t_0' = 90^0,$$

denn es steht der Stundenkreis des Punktes $(a' = 90^0,\ \Phi' = p_0)$ senkrecht auf dem Stundenkreis des Punktes $(a' = a_0',\ \Phi' = 90^0)$, weil Z_0' Pol zu PZ_0 als Polare ist.

2. *Die Reduktionsformeln.* Werden die Durchgänge von je zwei Sternen durch zwei *verschiedene* Vertikale mit derselben Uhr beobachtet, so wird das Zenit des Beobachtungsortes als Schnittpunkt der beiden Vertikale bestimmt. Es seien

U_1, U_2 die Uhrzeiten, zu welchen sich die Sterne (α_1, p_1), (α_2, p_2) im Vertikal des Azimutes a respektive $a + 180^0$ und

U_3, U_4 die Uhrzeiten, zu welchen sich die Sterne (α_3, p_3), (α_4, p_4) im Vertikal des Azimutes b respektive $b + 180^0$ befunden haben.

Wir fällen von P die Lote auf die beiden Vertikale; es seien

t_a, t_b die Stundenwinkel der Fußpunkte dieser Lote und

p_a, p_b ihre Poldistanzen.

t_i $(i = 1, 2, 3, 4)$ seien die Stundenwinkel der vier Sterne im Moment des Durchganges durch den Vertikal a respektive b.

Zur Abkürzung setzen wir

$$t_{12} = t_1 - t_2; \quad t_{34} = t_3 - t_4$$

und

$$t_i - t_a = t_{ia} \qquad (i = 1, 2),$$
$$t_i - t_b = t_{ib} \qquad (i = 3, 4).$$

Die Uhrkorrektion u, die Poldistanz Φ des Zenites und die Azimute a und b der beiden Vertikale lassen sich dann in folgender Weise ermitteln. Die Differenzen t_{ia} und t_{ib} ergeben sich gemäß (81) aus den folgenden Beziehungen:

$$\left.\begin{aligned} \operatorname{cotg} t_{1a} &= \frac{\operatorname{cotg} p_1 \operatorname{tg} p_2 \sin t_{12}}{1 - \operatorname{cotg} p_1 \operatorname{tg} p_2 \cos t_{12}}, \quad t_{2a} = t_{1a} - t_{12}, \\ \operatorname{cotg} t_{3b} &= \frac{\operatorname{cotg} p_3 \operatorname{tg} p_4 \sin t_{34}}{1 - \operatorname{cotg} p_3 \operatorname{tg} p_4 \cos t_{34}}, \quad t_{4b} = t_{3b} - t_{34}. \end{aligned}\right\} \tag{82}$$

Die Längen der Lote p_a und p_b folgen dann aus

$$\left.\begin{aligned} \operatorname{tg} p_a &= \operatorname{tg} p_1 \cos t_{1a} \equiv \operatorname{tg} p_2 \cos t_{2a}, \\ \operatorname{tg} p_b &= \operatorname{tg} p_3 \cos t_{3b} \equiv \operatorname{tg} p_4 \cos t_{4b}. \end{aligned}\right\} \tag{83}$$

Eliminiert man Φ aus den Beziehungen

$$\cos t_a = \operatorname{tg} p_a \operatorname{cotg} \Phi,$$
$$\cos t_b = \operatorname{tg} p_b \operatorname{cotg} \Phi,$$

so folgt

$$\cos t_a \operatorname{cotg} p_a = \cos t_b \operatorname{cotg} p_b.$$

Führt man hierin t_b auf t_a zurück mittels

$$t_b = t_a - t_{ab}$$

und

$$\left.\begin{aligned} t_{ab} = (t_a - t_1) + (t_1 - t_3) + (t_3 - t_b), \end{aligned}\right\} \tag{84a}$$

so erhält man

$$\operatorname{cotg} t_a = \frac{\operatorname{cotg} p_b \operatorname{tg} p_a \sin t_{ab}}{1 - \operatorname{cotg} p_b \operatorname{tg} p_a \cos t_{ab}}. \tag{84b}$$

Der Uhrfehler wird dann gleich:

$$\begin{aligned} u &= t_a + t_{1a} - (U_1 - \alpha_1) = t_a + t_{2a} - (U_2 - \alpha_2) \\ &= t_b + t_{3b} - (U_3 - \alpha_3) = t_b + t_{4b} - (U_4 - \alpha_4). \end{aligned}$$

Die Poldistanz Φ des Zenites folgt aus

$$\operatorname{cotg} \Phi = \operatorname{cotg} p_a \cos t_a = \operatorname{cotg} p_b \cos t_b. \tag{85}$$

Die beiden Azimute werden gegeben durch die Beziehungen:

$$\left.\begin{aligned} \operatorname{cotg} a &= -\cos \Phi \operatorname{tg} t_a, \\ \operatorname{cotg} b &= -\cos \Phi \operatorname{tg} t_b. \end{aligned}\right\} \tag{86}$$

Die Lösung der Aufgabe, u, Φ, a und b zu ermitteln, erfordert die Durchrechnung der Gleichungen (82), (83), (84), (85) und (86).

Sind mehr als 2 Sterne in jedem der beiden Vertikale beobachtet worden, so daß zur Berechnung der Unbekannten die Vorschriften der Ausgleichsrechnung angewendet werden müssen, so hat man das Seite 131 auseinandergesetzte Verfahren sowohl auf den Vertikal a als auf den Vertikal b anzuwenden. Mit Hilfe der Näherungswerte u_0 und Φ_0 berechnet man Näherungswerte a_i und b_i der Azimute:

$$\operatorname{tg} a_i \text{ respektive } \operatorname{tg} b_i = -\frac{\operatorname{tg} p_i \operatorname{cosec} \Phi_0 \sin (U_i + u_0 - \alpha_i)}{1 - \operatorname{tg} p_i \operatorname{cotg} \Phi_0 \cos (U_i + u_0 - \alpha_i)}.$$

Die fingierten Beobachtungsgrößen werden, wenn a_0 und b_0, respektive $a_0 + 180^0$ und $b_0 + 180^0$ Näherungswerte der Azimute der beiden Vertikale sind, gleich:

$$\begin{aligned} l_{ai} &= a_i - a_0 \quad \text{respektive} \quad a_i - (a_0 + 180^0), \qquad (i = 1, 2, \ldots, n), \\ l_{bi} &= b_i - b_0 \quad \text{respektive} \quad b_i - (b_0 + 180^0), \qquad (i = 1, 2, \ldots, n'). \end{aligned}$$

Setzt man

$$x_a = da - du\cos\Phi_0,\qquad y_a = du\sin\Phi_0\cos a_0 + d\Phi\sin a_0 \tag{87}$$

und

$$x_b = db - du\cos\Phi_0,\qquad y_b = du\sin\Phi_0\cos b_0 + d\Phi\sin b_0, \tag{88}$$

so erhält man die folgenden Fehlergleichungen

$$\left.\begin{aligned} x_a\sin z_i \mp y_a\cos z_i &= l_{a\,i}\sin z_i + \lambda_{a\,i}, \qquad (i = 1, 2, \ldots, n)\\ x_b\sin z_i \mp y_b\cos z_i &= l_{b\,i}\sin z_i + \lambda_{b\,i}, \qquad (i = 1, 2, \ldots, n').\end{aligned}\right\} \tag{89}$$

Die Gewichte dieser Gleichungen sind gleich 1 zu setzen, wenn die Durchgangsbeobachtungen an soviel Fäden oder Kontakten gemacht werden, daß die Quadrate der mittleren Fehler der fingierten Beobachtungsgrößen $\operatorname{cosec}^2 z_i$ proportional werden.

Sind durch 2 getrennte Ausgleichungen die Unbekannten x und y berechnet, so folgen die gesuchten Verbesserungen der Näherungswerte aus den Beziehungen:

$$\left.\begin{aligned} du\sin\Phi_0\cdot\sin(a_0 - b_0) &= -\,y_a\sin b_0 + y_b\sin a_0,\\ d\Phi\cdot\sin(a_0 - b_0) &= +\,y_a\cos b_0 - y_b\cos a_0,\\ da &= +\,x_a + du\cos\Phi_0,\\ db &= +\,x_b + du\cos\Phi_0.\end{aligned}\right\} \tag{90}$$

Statt daß *ein* Beobachter mit demselben Instrument die Durchgänge in den beiden Vertikalen vom gleichen Stationspunkt aus beobachtet, kann man auch *zwei* Beobachter nebeneinander arbeiten lassen, indem der eine sein Instrument im Vertikal a, der andere sein Instrument im Vertikal b aufstellt. Wegen der unmittelbaren Nähe der beiden Aufstellungsorte kann derselbe Näherungswert Φ_0 und, wenn beide Beobachter dieselbe Uhr benützen, auch derselbe Näherungswert u_0 in die beiden Ausgleichungen eingeführt werden. Man hat dann aber in den Beziehungen (87/88) zwischen du_a und du_b einerseits und zwischen $d\Phi_a$ und $d\Phi_b$ andrerseits zu unterscheiden und hat vor der Auflösung du_b auf du_a und $d\Phi_b$ auf $d\Phi_a$ mittels der linearen Breiten- und Längenunterschiede der beiden Aufstellungsorte zurückzuführen.

3. *Berücksichtigung der täglichen Aberration.* Sind die scheinbaren Örter, die der Berechnung der fingierten Beobachtungsgrößen zugrunde gelegt werden, wegen der täglichen Aberration nicht verbessert worden, so hat man die auf gleiches Gewicht reduzierten Beobachtungsgrößen $l_{a\,i}\sin z_i$ respektive $l_{b\,i}\sin z_i$ zu verbessern um den Betrag

$$-\,0{,}''322\sin\Phi\cos a^* \quad\text{respektive}\quad -\,0{,}''322\sin\Phi\cos b^*,$$

wobei für a^* respektive b^* die in die Richtung des Sternes fallenden Azimute des Instrumentenvertikales einzuführen sind.

4. *Die mittleren Fehler von du, dΦ, da und db.* Die reduzierten Normalgleichungen, zu welchen die Fehlergleichungen (89) führen, schreiben wir in der Form:

$$x_a + \alpha_2' y_a = \chi_1'; \quad \text{Gewicht } [a'a']$$
$$y_a = \chi_2'; \quad \text{Gewicht } [b'b_1']$$

mit

$$\alpha_2' = \frac{[a'b']}{[a'a']},$$

und

$$x_b + \beta_2' y_b = \chi_1''; \quad \text{Gewicht } [a''a''],$$
$$y_b = \chi_2''; \quad \text{Gewicht } [b''b_1'']$$

mit

$$\beta_2' = \frac{[a''b'']}{[a''a'']}.$$

Die mit Hilfe der Beziehungen (90) berechneten Verbesserungen du, $d\Phi$, da und db sind lineare Funktionen der Unbekannten x_a, y_a, x_b, y_b; bezeichnen wir mit F irgendeine dieser Funktionen, so ist

$$F = F_1' x_a + F_2' y_a + F_1'' x_b + F_2'' y_b. \tag{A}$$

Hierin führen wir die Werte der Ausgleichungsunbekannten auf die voneinander unabhängigen, den ursprünglichen fingierten Beobachtungsgrößen vollständig äquivalenten Größen χ' und χ'' zurück; es ist

$$x_a = \chi_1' - \alpha_2' \chi_2'; \qquad x_b = \chi_1'' - \beta_2' \chi_2'';$$
$$y_a = \chi_2'; \qquad y_b = \chi_2''.$$

Führt man diese Werte in die Beziehung (A) ein und setzt zur Abkürzung

$$F_{21}' = F_2' - \alpha_2' F_1'; \qquad F_{21}'' = F_2'' - \beta_2' F_1'',$$

so erhält man

$$F = F_1' \chi_1' + F_{21}' \chi_2' + F_1'' \chi_1'' + F_{21}'' \chi_2''.$$

Sind nun m_1', m_2', m_1'', m_2'' der Reihe nach die mittleren Fehler von χ_1', χ_2', χ_1'', χ_2'', so wird der mittlere Fehler m_F von F gegeben durch den Ausdruck:

$$m_F^2 = F_1'^2 m_1'^2 + F_{21}' m_2'^2 + F_1''^2 m_1''^2 + F_{21}''^2 m_2''^2.$$

Die mittleren Fehler der Größen χ lassen sich aber zurückführen auf die mittleren Fehler des Gewichtes 1 in den beiden Ausgleichungen. Sind m' und m'' diese mittleren Fehler des Gewichtes 1, so ist

$$m_1'^2 = m'^2 / [a'a'], \qquad m_1''^2 = m''^2 / [a''a''],$$
$$m_2'^2 = m'^2 / [b'b_1'], \qquad m_2''^2 = m''^2 / [b''b_1''].$$

Mithin erhält man die folgenden Ausdrücke für m_F^2:

$$m_F^2 = m'^2 \left(\frac{F_1'^2}{[a'a']} + \frac{F_{21}'^2}{[b'b_1']} \right) + m''^2 \left(\frac{F_1''^2}{[a''a'']} + \frac{F_{21}''^2}{[b''b_1'']} \right).$$

Die Koeffizienten F_1', F_2', F_1'', F_2'' nehmen in den einzelnen Fällen die folgenden Werte an:

F	F_1'	F_2'	F_1''	F_2''
du	0	$-\dfrac{\sin b}{\sin\Phi\,\sin(a-b)}$	0	$+\dfrac{\sin a}{\sin\Phi\,\sin(a-b)}$
$d\Phi$	0	$+\dfrac{\cos b}{\sin(a-b)}$	0	$-\dfrac{\cos a}{\sin(a-b)}$
da	1	$-\dfrac{\sin b}{\sin(a-b)}\operatorname{cotg}\Phi$	0	$+\dfrac{\sin a}{\sin(a-b)}\operatorname{cotg}\Phi$
db	0	$+\dfrac{\sin b}{\sin(b-a)}\operatorname{cotg}\Phi$	1	$-\dfrac{\sin a}{\sin(b-a)}\operatorname{cotg}\Phi$

Man erhält damit die folgenden Ausdrücke für die Quadrate der mittleren Fehler von du, $d\Phi$, da und db:

1. *Mittlerer Fehler m_u von du*:

$$m_u^2 = \left(\frac{m'^2}{[b'\,b_1']}\sin^2 b + \frac{m''^2}{[b''\,b_1'']}\sin^2 a\right)\operatorname{cosec}^2\Phi\,\operatorname{cosec}^2(a-b).$$

2. *Mittlerer Fehler m_Φ von $d\Phi$*:

$$m_\Phi^2 = \left(\frac{m'^2}{[b'\,b_1']}\cos^2 b + \frac{m''^2}{[b''\,b_1'']}\cos^2 a\right)\operatorname{cosec}^2(a-b).$$

3. *Mittlerer Fehler m_a von da*:

$$m_a^2 = m'^2\left(\frac{1}{[a'\,a']} + \frac{1}{[b'\,b_1']}\left(\frac{\sin b\operatorname{cotg}\Phi}{\sin(a-b)} + \alpha_2'\right)^2\right) + \frac{m''^2}{[b''\,b_1'']}\,\frac{\operatorname{cotg}^2\Phi\,\sin^2 a}{\sin^2(a-b)}.$$

4. *Mittlerer Fehler m_b von db*:

$$m_b^2 = \frac{m'^2}{[b'\,b_1']}\,\frac{\operatorname{cotg}^2\Phi\,\sin^2 b}{\sin^2(b-a)} + m''^2\left(\frac{1}{[a''\,a'']} + \frac{1}{[b''\,b_1'']}\left(\frac{\sin a\operatorname{cotg}\Phi}{\sin(b-a)} + \beta_2'\right)^2\right).$$

5. *Die günstigsten Beobachtungsumstände.* Es seien ε_i $(i = 1, 2, 3, 4)$ die wahren Fehler der 4 fingierten Beobachtungsgrößen l_i, von welchen sich die beiden ersten auf den Vertikal a und die beiden letzten auf den Vertikal b beziehen; die Sterne seien zu verschiedenen Seiten des Zenites beobachtet.

Die wahren Fehler der 4 unbekannten Verbesserungen du, $d\Phi$, da und db seien ε_u, ε_Φ, ε_a und ε_b; sie werden durch die folgenden Beziehungen mit den voneinander unabhängigen wahren Fehlern ε_i verbunden:

$$\sin z_1(\varepsilon_a - \varepsilon_u\cos\Phi) - \cos z_1(\varepsilon_u\sin\Phi\cos a + \varepsilon_\Phi\sin a) = \varepsilon_1\sin z_1,$$

$$\sin z_2(\varepsilon_a - \varepsilon_u\cos\Phi) + \cos z_2(\varepsilon_u\sin\Phi\cos a + \varepsilon_\Phi\sin a) = \varepsilon_2\sin z_2,$$

$$\sin z_3(\varepsilon_b - \varepsilon_u\cos\Phi) - \cos z_3(\varepsilon_u\sin\Phi\cos b + \varepsilon_\Phi\sin b) = \varepsilon_3\sin z_3,$$

$$\sin z_4(\varepsilon_b - \varepsilon_u\cos\Phi) + \cos z_4(\varepsilon_u\sin\Phi\cos b + \varepsilon_\Phi\sin b) = \varepsilon_4\sin z_4.$$

Durch Auflösung dieser Gleichungen nach ε_u, ε_Φ, ε_a und ε_b als Unbekannten erhält man folgende Darstellung:

$$\varepsilon_u \sin\Phi \sin(a-b) = +(\varepsilon_1-\varepsilon_2)\frac{\sin z_1 \sin z_2}{\sin(z_1+z_2)}\sin b - (\varepsilon_3-\varepsilon_4)\frac{\sin z_3 \sin z_4}{\sin(z_3+z_4)}\sin a,$$

$$\varepsilon_\Phi \sin(a-b) = -(\varepsilon_1-\varepsilon_2)\frac{\sin z_1 \sin z_2}{\sin(z_1+z_2)}\cos b + (\varepsilon_3-\varepsilon_4)\frac{\sin z_3 \sin z_4}{\sin(z_3+z_4)}\cos a,$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_a = \Big\{&\varepsilon_1 \sin z_1\left(\cos z_2 + \sin z_2 \frac{\sin b}{\sin(a-b)}\cot\Phi\right)\\ &+\varepsilon_2 \sin z_2 (\cos z_1 - \sin z_1)\frac{\sin b}{\sin(a-b)}\cot\Phi\Big\}\cdot\operatorname{cosec}(z_1+z_2)\\ &-(\varepsilon_3-\varepsilon_4)\frac{\sin z_3 \sin z_4}{\sin(z_3+z_4)}\frac{\sin a}{\sin(a-b)}\cot\Phi,\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_b = &-(\varepsilon_1-\varepsilon_2)\frac{\sin z_1 \sin z_2}{\sin(z_1+z_2)}\frac{\sin b}{\sin(b-a)}\cot\Phi\\ &+\Big\{\varepsilon_3 \sin z_3\left(\cos z_4 + \sin z_4 \frac{\sin a}{\sin(b-a)}\cot\Phi\right)\\ &+\varepsilon_4 \sin z_4 (\cos z_3 - \sin z_3)\frac{\sin a}{\sin(b-a)}\cot\Phi\Big\}\cdot\operatorname{cosec}(z_3+z_4).\end{aligned}$$

Von den wahren Fehlern ε gehen wir zu den mittleren Fehlern m über. Dabei machen wir wieder die Annahme, es seien die Durchgangsbeobachtungen an soviel Fäden oder Kontakten angestellt oder beruhen auf soviel Pointierungen, daß die mittleren Fehler m_i, die den wahren Fehlern ε_i entsprechen, $\operatorname{cosec} z_i$ proportional werden; dieser Annahme entsprechend setzen wir

$$m_i^2 \sin^2 z_i = m^2 = \text{constans}.$$

Zur Vereinfachung der Schreibweise führen wir die folgenden Abkürzungen ein:

$$f(a,b) = \frac{\sin^2 a}{\sin^2(a-b)}, \qquad g(a,b) = \frac{\cos^2 a}{\sin^2(a-b)},$$
$$F(z_i,z_k) = \frac{\sin^2 z_i + \sin^2 z_k}{\sin^2(z_i+z_k)}, \quad G(z_i,z_k) = \frac{\cos^2 z_i + \cos^2 z_k}{\sin^2(z_i+z_k)}.$$

Die Quadrate der mittleren Fehler von du, $d\Phi$, da und db lassen sich dann in folgender Form schreiben:

$$\left.\begin{aligned}m_u^2 \sin^2\Phi &= m^2\{F(z_1,z_2)\,f(b,a) + F(z_3,z_4)\,f(a,b)\},\\ m_\Phi^2 &= m^2\{F(z_1,z_2)\,g(b,a) + F(z_3,z_4)\,g(a,b)\},\\ m_a^2 &= m^2\Big\{G(z_1,z_2) + \big(F(z_1,z_2)\,f(b,a) + F(z_3,z_4)\,f(a,b)\big)\cot^2\Phi\\ &\quad + 2\,\frac{\sin z_2\cos z_2 - \sin z_1 \cos z_1}{\sin(z_1+z_2)}\,\frac{\sin b}{\sin(a-b)}\cot\Phi\Big\},\\ m_b^2 &= m^2\Big\{G(z_3,z_4) + \big(F(z_3,z_4)\,f(a,b) + F(z_1,z_2)\,f(b,a)\big)\cot^2\Phi\\ &\quad + 2\,\frac{\sin z_4\cos z_4 - \sin z_3 \cos z_3}{\sin(z_3+z_4)}\,\frac{\sin a}{\sin(b-a)}\cot\Phi\Big\}.\end{aligned}\right\} \quad (91)$$

In den beiden letzten Beziehungen verschwinden rechter Hand die Glieder, welche den Faktor

$$2\,(\sin z_k \cos z_k - \sin z_i \cos z_i) \equiv \sin 2\,z_k - \sin 2\,z_i$$

enthalten in 2 Fällen, nämlich

a) wenn in jedem der beiden Vertikale die Sterne symmetrisch zum Zenit beobachtet werden, so daß

$$z_k = z_i$$

ist, und

b) wenn die Summe der Zenitdistanzen gleich 90^0 ist:

$$z_k + z_i = 90^0.$$

Im Falle a) setzen wir

$$z_1 = z_2 = z_a, \qquad z_3 = z_4 = z_b.$$

Die Ausdrücke für die Quadrate der mittleren Fehler lauten dann:

$$\left.\begin{aligned} m_u^2 \sin^2 \Phi &= \frac{m^2}{2}\left\{\sec^2 z_a\, f(b,a) + \sec^2 z_b\, f(a,b)\right\},\\ m_\Phi^2 &= \frac{m^2}{2}\left\{\sec^2 z_a\, g(b,a) + \sec^2 z_b\, g(a,b)\right\},\\ m_a^2 &= \frac{m^2}{2}\operatorname{cosec}^2 z_a + m_u^2 \cos^2 \Phi,\\ m_b^2 &= \frac{m^2}{2}\operatorname{cosec}^2 z_b + m_u^2 \cos^2 \Phi. \end{aligned}\right\} \tag{92}$$

Die Uhrkorrektion und die Polhöhe werden somit am genauesten bestimmt, wenn man in jedem Vertikal die beiden Sterne ins Zenit rücken läßt, so daß $\sec z = 1$ wird; das Azimut bleibt dann aber unbestimmt, denn es wird $m_a = m_b = \pm\infty$.

Stehen die beiden Vertikale senkrecht zueinander, so ist

$$f(a,b) + f(b,a) = g(a,b) + g(b,a) = 1. \tag{93}$$

Sind ferner die Zenitdistanzen in beiden Vertikalen gleich groß, so daß

$$z_a = z_b = z$$

zu setzen ist, so wird:

$$m_u^2 \sin^2 \Phi = m_\Phi^2 = \frac{m^2}{2}\sec^2 z,$$

$$m_a^2 = m_b^2 = \frac{m^2}{2}(\operatorname{cosec}^2 z + \sec^2 z \operatorname{cotg}^2 \Phi).$$

In der letzten Beziehung nimmt der Klammerausdruck den kleinstmöglichen Wert an für den Wert $z = z_0$, der die Bedingung

$$\operatorname{tg} z_0 = \sqrt{\operatorname{tg} \Phi}$$

erfüllt; es wird dann

$$m_a^2 = m_b^2 = \frac{m^2}{2}\operatorname{cosec}^2 \Phi.$$

In mittleren Breiten wird mit tg $\Phi = 1$:

$$z_0 = 45^0,$$

also

$$m_u^2 = 2\,m_\Phi^2 = m_a^2 = m_b^2 = 2\,m^2.$$

Im Falle b), wo $z_k + z_i = 90^0$ ist, wird

$$F(z_i, z_k) = G(z_i, z_k) = 1.$$

Somit lauten nun die Ausdrücke für die Quadrate der mittleren Fehler:

$$\left.\begin{aligned} m_u^2 \sin^2 \Phi &= m^2 \{ f(b, a) + f(a, b) \}, \\ m_\Phi^2 &= m^2 \{ g(b, a) + g(a, b) \}, \\ m_a^2 = m_b^2 &= m^2 + m_u^2 \cos^2 \Phi. \end{aligned}\right\} \quad (94)$$

Legt man jetzt die beiden Vertikale senkrecht zueinander, so erhält man wegen der Beziehungen (93):

$$m_u^2 \sin^2 \Phi = m_\Phi^2 = m_a^2 \sin^2 \Phi = m_b^2 \sin^2 \Phi = m^2.$$

Es werden also, ganz unabhängig davon, in welche Richtungen die zueinander senkrecht stehenden Vertikale fallen, die Uhrkorrektion und die beiden Azimute mit derselben Genauigkeit bestimmt; der mittlere Fehler dieser drei Größen verhält sich zum mittleren Fehler der Polhöhe wie cosec Φ zu 1.

Nach unseren Voraussetzungen ist es gleichgültig, an welcher Stelle des Vertikals die beiden Sterne beobachtet werden; es darf zum Beispiel $z_1 = 0^0$ und $z_2 = 90^0$ gewählt werden; bei der praktischen Durchführung wird man von dieser Wahl absehen und sich auf Sterne beschränken, die nicht zu nahe am Horizont den Vertikal passieren, um lateralen Refraktionsanomalien nicht einen zu starken Einfluß einzuräumen.

Will man auf einer Station nur das Azimut *einer* Richtung bestimmen und legt auf die gleichzeitige Bestimmung der Polhöhe keinen Wert, so kann man die Frage stellen, in welches Azimut der zweite Vertikal zu legen sei, damit das Azimut der Objektrichtung aus den Beobachtungen in beiden Vertikalen so genau als möglich hervorgehe. Wenn die Objektrichtung in den Meridian fällt, ist offenbar der zweite Vertikal ebenfalls in den Meridian zu legen. Fällt die Objektrichtung in den ersten Vertikal, so hat man den zweiten Vertikal wieder in den Meridian fallen zu lassen; denn aus Meridianbeobachtungen geht die Uhrkorrektion, deren Kenntnis zur Berechnung des Azimutes des im ersten Vertikal aufgestellten Instrumentes erforderlich ist, am genauesten hervor. Bei beliebiger Orientierung des Objektvertikales hat man den zweiten Vertikal aber nicht in den Meridian zu legen, wie aus Folgendem ersichtlich ist. Die Funktion

$$F(a, b) = f(a, b) + f(b, a) = \frac{\sin^2 a + \sin^2 b}{\sin^2 (a - b)},$$

von der die mittleren Fehler der Azimute der beiden Instrumentenvertikale abhängen, ist formal identisch mit der Funktion $F\,(v, v')$, welche die mittleren Fehler der Uhrkorrektion und des Instrumentenazimutes in der Meridianzeitbestimmungsmethode bestimmt (vergleiche Seite 83/84). Die dort gegebene Diskussion läßt sich auf $F(a, b)$ übertragen. Bei festgehaltenem Wert von a nimmt $F\,(a, b)$ einen Minimalwert an für einen Wert $b = b_0$, der die Bedingung

$$\operatorname{tg} b_0 = -\frac{\operatorname{tg} a}{1 + \operatorname{tg}^2 a}$$

oder die Bedingung

$$\operatorname{tg}(b_0 - a) = -2 \operatorname{tg} a$$

erfüllt. Es wird dann

$$F\,(a, b_0) = \frac{1}{2}\,(1 + \sin^2 a) < 1,$$

und die Funktion

$$G(a, b) = g\,(a, b) + g\,(b, a) = \frac{\cos^2 a + \cos^2 b}{\sin^2 (a-b)},$$

von welcher der mittlere Fehler m_Φ der Polhöhe abhängt, wird gleich

$$G(a, b_0) = \frac{1}{2}\,(1 + \cos^2 a + \operatorname{cosec}^2 a).$$

Am stärksten weicht der zweite Vertikal vom Meridian ab, wenn $a = a_m$ die Bedingung

$$\sin^2 a_m = \frac{1}{3}$$

erfüllt; es wird dann der a_m entsprechende Wert $b = b_m$ gegeben durch die Beziehung

$$\operatorname{tg} b_m = -\frac{1}{2\sqrt{2}}.$$

Es ist

$$a_m = 35^0 16' \quad \text{und} \quad b_m = -19^0 28'.$$

Ferner wird

$$F\,(a_m, b_m) = \frac{2}{3},$$

$$G\,(a_m, b_m) = 2\frac{1}{3}.$$

In der nachstehenden Tabelle sind zusammengehörige Werte von a, b_0, $F(a, b_0)$ und $G\,(a, b_0)$ angegeben.

a	b_0	$F(a, b_0)$	$G(a, b_0)$
0°00′	0°00′	0,500	∞
15 00	− 13 11	0,534	8,43
30 00	− 19 06	0,625	2,88
35 16	− 19 28	0,666..	2,333..
45 00	− 19 26	0,750	1,75
60 00	− 13 15	0,875	1,29
75 00	− 7 22	0,967	1,07
90 00	0 00	1,000	1,00

Die Quadrate der mittleren Fehler von du, $d\Phi$, da und db nehmen in den 3 Fällen

$$a = 0^0, \quad 35^0 16', \quad 90^0$$

die folgenden Werte an:

(m. F.)^2	$a = 0^0$	$a = 35^0 16'$	$a = 90^0$
m_u^2	$\frac{1}{2}\, m^2 \operatorname{cosec}^2 \Phi$	$\frac{2}{3}\, m^2 \operatorname{cosec}^2 \Phi$	$m^2 \operatorname{cosec}^2 \Phi$
m_Φ^2	∞	$\frac{7}{3}\, m^2$	m^2
$m_a^2 = m_b^2$	$m^2 \left(1 + \frac{1}{2} \operatorname{cotg}^2 \Phi\right)$	$m^2 \left(1 + \frac{2}{3} \operatorname{cotg}^2 \Phi\right)$	$m^2 \operatorname{cosec}^2 \Phi$

Da $\operatorname{cosec}^2 \Phi = 1 + \operatorname{cotg}^2 \Phi$ ist, ist im Falle $a = 90^0$ der mittlere Fehler m_a oder m_b größer als im Falle $a = 0^0$ und $a = 35^0 16'$. Der Gewinn an Genauigkeit, der im Falle $a < 90^0$ erzielt wird dadurch, daß der zweite Vertikal mit dem ersten den Winkel $a - b_0$ und nicht den Winkel $a - b = 90^0$ bildet, ist relativ bescheiden; denn es verhält sich der Faktor $(1 + \frac{1}{2} \operatorname{cotg}^2 \Phi)$ im Falle $a = 0^0$ zum Faktor $\operatorname{cosec}^2 \Phi = 1 + \operatorname{cotg}^2 \Phi$ im Falle $a = 90^0$ in mittleren Breiten ($\operatorname{cotg} \Phi = 1$) wie 3 zu 4. Diese geringe Steigerung der Genauigkeit wird erkauft durch den Verzicht auf die gleichzeitige Bestimmung des Azimutes einer zweiten Objektrichtung.

Der Ausdruck für m_a^2, der im Falle $a = 0^0$ gilt, kann dem Ausdruck für m_a^2 gegenübergestellt werden, der im Kapitel V, Seite 124, unter der Annahme abgeleitet worden ist, daß bei Verwendung der Methode B ergänzende Beobachtungen im Meridian oder nach der Zingerschen Methode im ersten Vertikal zum Zweck der Ermittlung der Uhrkorrektion gemacht werden. Es ist dort angenommen worden, daß die beiden im Meridian beobachteten Sterne sehr nahe Zenitsterne seien; es ist dann

$$m_u^2 = \frac{m^2}{2} \operatorname{cosec}^2 \Phi.$$

Hier ist vorausgesetzt worden, daß die im Azimut b beobachteten Sterne die Bedingung

$$z_3 + z_4 = 90^0$$

erfüllen, so daß, wenn $a - b = 90^0$ ist,

$$m_u^2 = m^2 \operatorname{cosec}^2 \Phi$$

wird. Trotzdem ist der mittlere Fehler des aus den Beobachtungen in den Vertikalen a und b_0 abgeleiteten Azimutes nicht größer, sondern gleich groß wie in der Methode B der direkten Azimutbestimmung, nämlich gleich

$$m_a^2 = m^2 \left(1 + \frac{1}{2} \operatorname{cotg}^2 \Phi\right).$$

Der scheinbare Widerspruch löst sich, wenn man beachtet, daß bei der Azimutbestimmung nach der Methode B des Kapitels V die Durchgangsbeobachtungen zum Zweck der Azimutbestimmung, auch wenn sie im Meridian stattfinden, völlig unabhängig sind von den Beobachtungen zum Zweck der Zeitbestimmung, daß aber hier, bei der simultanen Bestimmung, die Beobachtungen in beiden Vertikalen zusammenwirken; im Falle $a = b_0 = 0^0$ tragen alle Beobachtungen zur Bestimmung des gemeinsamen Azimutes *und* der Uhrkorrektion bei.

6. *Die Laplacesche Kontrollgleichung.* Soll die Laplacesche Gleichung in den beiden Vertikalen aufgestellt werden, so kommt es nur auf die beiden Unbekannten

$$x_a = da - du \cos \Phi,$$
$$x_b = db - du \cos \Phi$$

an. Die mittleren Fehler m_a' und m_b' von x_a und x_b sind gegeben durch die Ausdrücke (vergleiche Beziehung (74a), Seite 138):

$$m_a'^2 = m^2 \cdot G(z_1, z_2),$$
$$m_b'^2 = m^2 \cdot G(z_3, z_4).$$

Die Unbekannten x_a und x_b werden also am genauesten bestimmt, wenn man die Sterne am Horizont beobachtet (vergleiche Seite 139). Man wird aber in der praktischen Durchführung nicht unnötig über 60^0 Zenitdistanz hinausgehen, um anormale Refraktionsverhältnisse nicht einen starken Einfluß gewinnen zu lassen.

7. *Historische Bemerkungen.* Das hier behandelte Problem der simultanen Bestimmung ist schon von Daniel Bernoulli[9b)] gestellt und gelöst worden; seine Formulierung lautet:

> Connoissant les déclinaisons et les ascensions droites de quatre astres E, E', ε, ε', et l'intervalle de tems entre les momens où E se trouve dans un même vertical avec E', et où ε se trouve dans un même vertical avec ε', trouver l'heure de l'une des observations (et la hauteur du pole).

Bernoulli hat sich mit den Aufgaben der astronomisch-geographischen Ortsbestimmung abgegeben, als er sich um den Preis bewarb, den die Akademie der Wissenschaften zu Paris ausgeschrieben hatte für die beste Lösung des Problemes, die Länge eines Punktes auf dem Meere zu bestimmen. Um anzudeuten, daß es ihm mehr auf die zur Längenbestimmung erforderliche Zeit ankomme als auf die Polhöhe, hat er offenbar die letzten Worte der Formulierung in Klammern gesetzt.

Um das Jahr 1890 hat sich mit dieser Aufgabe W. F. Wislicenus[9c)], um 1935 F. Kepinski[9d)] und um 1940 E. Guyot[9e)] beschäftigt. Wislicenus und Guyot scheinen von der Behandlung der Aufgabe durch Bernoulli keine

Kenntnis gehabt zu haben; ob auch KEPINSKI nicht, steht dahin, da uns seine Abhandlung nicht zugänglich ist. WISLICENUS und GUYOT gehen nur auf die Bestimmung der Zeit und der Polhöhe ein und legen auf die gleichzeitige Ermittlung des Azimutes keinen Wert.

Die Frage der günstigsten Beobachtungsumstände wird schon von BERNOULLI aufgeworfen und besprochen; doch waren die Voraussetzungen, diese Frage einwandfrei zu behandeln, zu seiner Zeit noch nicht gegeben. WISLICENUS geht auch darauf ein; doch ist seine Behandlung unvollständig und nicht erschöpfend.