

Vermessungskunde

II

Winkel- und Streckenmeßgeräte, Polygonierung,
Triangulation und Trilateration

von

Walter Großmann

und

Heribert Kahmen

Dreizehnte, völlig neubearbeitete
und erweiterte Auflage

mit 187 Figuren



1983

Walter de Gruyter · Berlin · New York

SAMMLUNG GÖSCHEN 2161

Dr.-Ing., Dr. E. h. *Walter Grossmann* †
em. Professor an der Technischen Universität Hannover

Dr.-Ing. *Heribert Kahmen*
Professor an der Technischen Universität Hannover

Die Gesamtdarstellung umfaßt noch folgende Bände:
Band I: Stückvermessung und Nivellieren 15., erweiterte Auflage 1976.
(Sammlung Göschchen Band 2160).
Band III: Trigonometrische und barometrische Höhenmessung, Tachymetrie und Abstecken von Geraden und Kurven; Ingenieurgeodäsie 11., erweiterte Auflage 1979. (Sammlung Göschchen Band 2162).

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Grossmann, Walter:

Vermessungskunde / von Walter Grossmann u. Heribert Kahmen. – Berlin ; New York : de Gruyter
(Sammlung Göschchen ; . . .)

NE: Kahmen, Heribert [Bearb.]

2. → Grossmann, Walter: Winkel- und Streckenmessgeräte, Polygonierung, Triangulation und Trilateration

Grossmann, Walter:

Winkel- und Streckenmessgeräte, Polygonierung, Triangulation und Trilateration / von Walter Grossmann u. Heribert Kahmen. – 13., völlig neubearb. u. erw. Aufl. – Berlin ; New York : de Gruyter, 1983.

(Vermessungskunde / von Walter Grossmann u. Heribert Kahmen ; 2) (Sammlung Göschchen ; 2161)

ISBN 3-11-009601-3

NE: Kahmen, Heribert [Bearb.]; 2. GT

© Copyright 1983 by Walter de Gruyter & Co., vormalig G. J. Göschchen'sche Verlagshandlung, J. Guttentag, Verlagsbuchhandlung, Georg Reimer, Karl J. Trübner, Veit & Comp., 1 Berlin 30 – Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden – Printed in Germany – Satz und Druck: Arthur Collignon GmbH, 1 Berlin 30 – Buchbinder: Lüderitz & Bauer, Buchgewerbe GmbH, 1 Berlin 61

Vorbemerkung

Verfasser der 1. bis 7. Auflage (1910 bis 1949) dieses Bandes II „Vermessungskunde“ war Prof. Dr.-Ing. *Paul Werkmeister*. 1959 erschien eine vollständige Neubearbeitung (8. Aufl.) von Prof. Dr.-Ing. *Walter Großmann*, die im Zuge der Neuauflagen von 1963, 1967, 1971, 1975 um alle wichtigen Neuerungen erweitert worden ist. Nach dem Tode von Prof. Großmann bearbeitete Prof. Dr.-Ing. *Heribert Kahmen* die 13. Auflage neu.

Die Bände Vermessungskunde I, II und III sind so geschrieben, daß sie für eine Einführung in das Vermessungswesen und nachfolgend für ein vertieftes Studium verwendet werden können. In erster Linie dienen sie als Fachliteratur für Studierende der Fachbereiche Vermessungswesen, Kartographie, Bauingenieurwesen, Architektur, Raum- und Landesplanung, Geographie und weiterer Geowissenschaften. Bei der schnellen Fortentwicklung von Techniken und Methoden sollen sie all denjenigen eine Hilfe sein, die um ihre Fort- und Weiterbildung bemüht sind.

Besonderer Dank gebührt: Dr.-Ing. *Heinz Watermann* für zahlreiche Diskussionen und die Bearbeitung vieler praktischer Beispiele, Dipl.-Ing. *Werner Weise* für die Bearbeitung von Aufgaben aus dem Bereich der Ausgleichsrechnung, *Hans-Jürgen Kramer* für das Anfertigen vieler neuer Zeichnungen.

Inhalt

Symbolverzeichnis	11
1. Der Theodolit und das Messen von Richtungen und Winkeln	13
1.1 Richtungen, Horizontal-, Vertikal und Positionswinkel ..	13
1.2 Der Theodolit	14
1.2.1 Der äußere Aufbau	14
1.2.2 Die Achsen	15
1.2.2.1 Die Vertikal- oder Stehachse	15
1.2.2.2 Die Horizontal- oder Kippachse	18
1.2.2.3 Die Ziellinie des Fernrohres	19
1.2.2.4 Vertikalstellen der Stehachse	19
1.2.3 Die Kreise	20
1.2.3.1 Der Horizontalkreis	20
1.2.3.2 Der Vertikal- oder Höhenkreis	21
1.2.4 Klemme, Feintrieb, Kreistrieb	23
1.2.5 Kreisablese- und Kreisabstuvorrichtungen	27
1.3 Optische Theodolite	27
1.3.1 Die Kreisablesevorrichtungen	27
1.3.2 Die Ablesemikroskope	28
1.3.2.1 Das Strichmikroskop	30
1.3.2.2 Das Skalenmikroskop	31
1.3.2.3 Das Strichmikroskop mit optischem Mikrometer	32
1.3.2.4 Das Koinzidenzmikroskop	34
1.3.3 Klassifizierung der optischen Theodolite	41
1.3.3.1 Theodolite niederer Genauigkeit	42
1.3.3.2 Theodolite mittlerer Genauigkeit	43
1.3.3.3 Theodolite hoher Genauigkeit	43
1.3.3.4 Theodolite höchster Genauigkeit	45
1.4 Elektronische Theodolite	48
1.4.1 Vorrichtungen für die elektronische Kreisabstuvung	48
1.4.2 Steuerung und Überwachung elektronischer geodätischer Meßgeräte	49
1.4.3 Analog-Digital-Wandlung der Winkel	52
1.4.3.1 Elektronische Interpolatoren mittlerer Genauigkeit	54
1.4.3.2 Elektronische Interpolatoren hoher Genauigkeit	55
1.4.4 Klassifizierung der elektronischen Theodolite	57

1.5	Horizontieren und Zentrieren der Meßgeräte	57
1.5.1	Horizontieren und Zentrieren mit einem Schnurlot	58
1.5.2	Horizontieren und Zentrieren mit einem starren Lot	60
1.5.3	Horizontieren und Zentrieren mit einem optischen Lot ..	61
1.5.4	Zwangszentrierung	63
1.6	Untersuchung und Berichtigung des Theodolits	66
1.6.1	Die Achsenfehler	66
1.6.1.1	Der Zielachsenfehler	67
1.6.1.2	Der Kippachsenfehler	68
1.6.1.3	Der Stehachsenfehler	70
1.6.2	Die Exzentrizitätsfehler	70
1.6.2.1	Kreisteilungsexzentrizität und Zeigerarmknickung	71
1.6.2.2	Exzentrizität der Zielachse	72
1.6.3	Die Kreisteilungsfehler	73
1.6.4	Die mechanischen Fehler in der Praxis	73
1.7	Die Horizontalwinkelmessung	74
1.7.1	Allgemeine Regeln	74
1.7.2	Die einfache Winkelmessung	74
1.7.3	Die Richtungs- oder Satzmessung	75
1.7.4	Die Repetitionswinkelmessung	77
1.7.5	Besondere Winkelmeßverfahren	78
1.7.5.1	Die Winkelmessung mit Horizontschluß	78
1.7.5.2	Die Winkelmessung in allen Kombinationen	79
1.7.5.3	Die Sektorenmethode	79
1.8	Orientierung mit Vermessungskreiseln	80
1.8.1	Die Grundlagen	80
1.8.2	Der Pendelkreisel	81
1.8.3	Der mechanische Aufbau	83
1.8.4	Beobachtungsverfahren bei Aufsatzkreiseln	85
1.8.5	Gerätekonstante und Meridiankonvergenz	87
2.	Distanzmessung mit Distanzmeßgeräten	89
2.1	Grundlagen der Distanzmessung mit elektromagnetischen Wellen	90
2.1.1	Prinzip der Impulsverfahren	90
2.1.2	Prinzip der Phasenvergleichsverfahren	91
2.1.3	Träger und Modulation der Träger	95
2.1.4	Vereinfachte Modelle elektrooptischer Distanzmesser ...	96
2.1.5	Ein vereinfachtes Modell der Mikrowellen-Distanzmesser	99
2.1.6	Bausteine elektronischer Distanzmesser	100
2.2	Instrumentelle Fehlerquellen; Kalibrierung	108
2.3	Einflüsse der Refraktion	111

2.4	Korrekturen wegen Ausbreitungsgeschwindigkeit	113
2.5	Geometrische Reduktionen	114
2.5.1	Reduktionsformel bei bekanntem Höhenunterschied	117
2.5.2	Reduktion der Schrägstrecke mittels Zenitwinkeln	119
2.6	Spezielle Refraktionsmodelle für Mikrowellen	123
2.7	Elektrooptische Distanzmesser	124
2.7.1	Elektrooptische Distanzmesser des Nahbereichs und mittlerer Reichweite	124
2.7.2	Elektrooptische Distanzmesser größerer Reichweite	129
2.7.3	Reflektoren und sonstiges Zubehör	136
2.8	Mikrowellendistanzmesser	138
2.8.1	Reichweite, Genauigkeit, Aufbau der Geräte	138
2.8.2	Ausgesuchte Mikrowellendistanzmeßgeräte	140
2.9	Indirekte Streckenmessung mit Basislatte	143
2.9.1	Grundlagen	143
2.9.2	Einrichtung und Aufstellung der Basislatte	144
2.9.3	Parallaktische Winkelmessung mit dem Theodolit	145
2.9.4	Die Anordnung der Messung	145
2.9.4.1	Basis am Ende	145
2.9.4.2	Basis in der Mitte	146
3.	Elektronische Tachymeter	147
3.1	Unterscheidungsmerkmale der elektronischen Tachymeter	147
3.2	Elektronische Tachymeter und interaktive Vermessungs- und Kartiersysteme	153
4.	Grundaufgaben der ebenen Koordinatenrechnung, Koordinatensysteme	156
4.1	Rechtwinklige Koordinaten, Polarkoordinaten	156
4.1.1	Berechnung rechtwinkliger Koordinaten aus Polarkoordinaten (Erste Grundaufgabe)	158
4.1.2	Berechnung von Polarkoordinaten aus rechtwinkligen Koordinaten (Zweite Grundaufgabe)	159
4.2	Koordinatentransformation	160
4.2.1	Ähnlichkeitstransformation	160
4.2.2	5-Parameter Transformation	165
4.3	Systeme rechtwinkliger Koordinaten	165
4.3.1	Die Soldnerschen Koordinaten	166
4.3.2	Die Gaußschen Koordinaten	167
4.3.3	Reduktion gemessener Größen auf ihren Wert in der Gaußschen Abbildung	169
4.3.4	Die Gauß-Krügerschen Meridianstreifensysteme	175

4.3.5	Das Universal Transverse Mercator Grid System (UTM-System)	177
5.	Bestimmung von Lagepunkten	178
5.1	Arten der Punktbestimmung	178
5.1.1	Arten der numerischen Punktbestimmung	178
5.1.2	Arten der technischen Hilfsmittel	179
5.2	Unsicherheiten bei der Bestimmung und Definition von Lagepunkten	182
5.3	Vorbereitende Berechnungen	183
5.3.1	Zentrieren beobachteter Richtungen und Strecken	184
5.3.2	Orientieren beobachteter Richtungen	192
5.4	Punktbestimmung durch Richtungsmessungen	194
5.4.1	Vorwärtseinschneiden	195
5.4.2	Vorwärtseinschneiden durch polares Anhängen und Geradenschnitt	195
5.4.3	Mehrfaches Vorwärtseinschneiden durch eine Ausgleichung	198
5.4.4	Genauigkeit des Vorwärtseinschneidens	202
5.4.5	Rückwärtseinschneiden als Schnitt von drei Geraden	203
5.4.6	Mehrfaches Rückwärtseinschneiden durch Ausgleichung	206
5.4.7	Genauigkeit des Rückwärtseinschneidens	209
5.5	Punktbestimmung durch Distanzmessungen	210
5.5.1	Einfacher Bogenschnitt	211
5.5.2	Mehrfacher Bogenschnitt durch eine Ausgleichung	213
5.5.3	Genauigkeit des einfachen Bogenschnitts	217
5.6	Punktbestimmung durch kombinierte Richtungs- und Distanzmessungen	219
5.6.1	Eindeutige Punktbestimmung mit Hilfe der Ähnlichkeits- transformation	220
5.6.2	Punktbestimmung mit Hilfe der Helmerttransformation	221
5.6.3	Genauigkeit der mit Richtungen und Strecken berechneten Punkte	224
5.7	Polare Aufnahme von Objektpunkten	225
5.7.1	Polare Aufnahme von einem Festpunkt aus	227
5.7.2	Polare Aufnahme bei freier Stationierung und zwei ange- messenen Festpunkten	228
5.7.3	Polare Aufnahme bei freier Stationierung und mehr als zwei angemessenen Festpunkten	229
5.7.4	Genauigkeit der polar aufgenommenen Punkte	231
5.8	Polygonometrische Punktbestimmung	233
5.8.1	Anlage und Messen von Polygonnetzen	234
5.8.1.1	Ringpolygone, Polygonzüge, Polygonnetze	234

5.8.1.2	Auswahl der Neupunkte	235
5.8.1.3	Messen der Seiten und Winkel	236
5.8.2	Berechnen der Polygone	237
5.8.2.1	Beidseitig angeschlossene Polygonzüge	238
5.8.2.2	Berechnung des Ringpolygons	245
5.8.2.3	Einseitig angeschlossene und freie Polygonzüge	248
5.8.3	Auffinden grober Beobachtungsfehler	248
5.8.4	Die Genauigkeit der Polygonierung	249
5.8.4.1	Die Fehlertheorie des gestreckten Zuges	249
5.8.4.2	Die amtlichen Fehlergrenzen	251
5.8.5	Sonderfälle der Polygonierung	252
5.8.5.1	Anschluß an unzugängliche Punkte	252
5.8.5.2	Ausschalten kurzer Seiten	253
5.9	Punktbestimmung in Netzen	255
5.9.1	Gestaltung von Netzen	255
5.9.2	Näherungsverfahren für die Berechnung kleinerer durch Richtungs- und Distanzmessungen bestimmter Netze ...	256
6.	Punktbestimmung durch Satellitenverfahren	259
6.1	Punktbestimmung mit dem Transit Navigation Satellite System	259
6.2	Punktbestimmung mit dem Satellitensystem NAVSTAR/ GPS	264
7.	Grundlagen der Landesvermessung	267
7.1	Ältere Lagefestpunktfelder	268
7.2	Anlage und Beobachtung neuer Lagefestpunktfelder ...	273
Anhang	278
A.	Kurze Einführung in die Matrizenrechnung	278
B.	Ausgleichsalgorithmus für vermittelnde Beobachtungen	281
Literaturverzeichnis	287
Sachverzeichnis	291

Symbolverzeichnis

1. Meßwerte

R	Richtungen
Z	Zenitdistanzen
D^A	am Entfernungsmesser abgelesene Distanz
T, T'	Temperatur des trockenen bzw. feuchten Thermometers
p	Luftdruck

2. Abgeleitete bzw. reduzierte Meßergebnisse

r	Richtungen
r°	orientierte Richtung
t	Richtungswinkel
z	Zenitdistanzen
z'	Zenitdistanzen (beeinflußt durch Refraktion)
D	geometrische Weglänge
S^R	Schrägstrecke
S^0	Strecke in Meereshöhe
S	ellipsoidische Länge
s	Strecke im Gauß-Krüger-Koordinatensystem
H	Höhe über NN
ΔH	Höhendifferenz
β	Brechungswinkel (Polygonzug)

3. Koordinaten

	<i>rechtwinklige Koordinaten</i>
x, y	in nordorientierten Abbildungssystemen
$x', y'; \xi, \eta$	in örtlichen Systemen
	<i>Polarkoordinaten</i>
s, t	in nordorientierten Abbildungssystemen
s', t'	in örtlichen Systemen

4. Statistik

$s(\cdot)$	empirische Varianz
$\sigma(\cdot)$	theoretische Varianz
m_p	mittlerer Punktfehler

1. Der Theodolit und das Messen von Richtungen und Winkeln

1.1 Richtungen, Horizontal-, Vertikal- und Positionswinkel

Für viele Aufgaben im Vermessungswesen sind Punkte P_1, P_2, \dots in einem kartesischen Koordinatensystem durch Koordinatenberechnungen zu bestimmen. Die Koordinaten werden aus gemessenen Richtungen und Distanzen berechnet (Abb. 1.1).

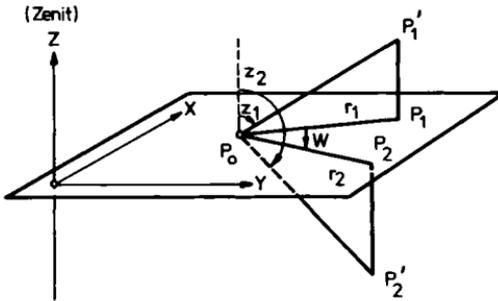


Abb. 1.1. Horizontal- und Vertikalwinkel

Die gemessenen Richtungen sollen sich möglichst einfach auf die Koordinatenachsen beziehen. Die Lotrichtung können Geräte sehr einfach anzeigen. In der Geodäsie läßt man daher die z -Achse mit der Lotrichtung zusammenfallen, die xy -Bezugsfläche ist dann eine Horizontalebene. Für die Orientierung horizontaler Richtungen r_1, r_2, \dots in bezug auf die x -Achse gibt es rechnerische [5] und instrumentelle Verfahren [1.8].

Winkel berechnen sich aus der Differenz zweier Richtungen. Je nach Lage in einer horizontalen oder vertikalen Ebene unterscheidet man zwischen Horizontal- und Vertikalwinkeln. In Abb. 1.1. bilden die Projektionen der Geraden $P_0P'_1$ und $P_0P'_2$ auf die Horizontalebene den Horizontalwinkel w . Bei den Vertikalwinkeln unterscheidet man zwischen Zenitwinkeln und Höhenwinkeln. Die Strahlen zu den Zielpunkten $P'_1P'_2, \dots$ bilden mit der durch den Standpunkt P_0 gehenden Richtung zum Zenit die Zenitwinkel z . Die Strahlen zu den Zielpunkten und ihre Projektionen auf die Horizontalebene durch P_0 schließen Höhenwinkel $(\pi/2 - z)$ ein.

Der Winkel $P'_1P_0P'_2$ heißt Positionswinkel; dieser wird mit einem Sextanten gemessen. Für die Geodäsie hat dieser Winkel keine Bedeutung.

1.2 Der Theodolit

1.2.1 Der äußere Aufbau

Das Instrument, mit dem sich sowohl Horizontal- wie Vertikalwinkel messen lassen, ist der Theodolit. Der Aufbau eines einfachen Theodoliten geht aus Abb. 1.2 hervor.

Der Theodolit besteht aus einem festen und einem um eine vertikale Achse – Stehachse – drehbaren Teil. Der bewegliche Teil ist eine Stütze, die die Stehachse und Kippachse miteinander verbindet. Letztere ist in Kippachslagern der Stütze gelagert. Sie trägt das Fernrohr und den mit einer Altgrad- oder Gonteilung versehenen Vertikalkreis. Die Stehachse ist ein Teil der Stütze. Die Stehachsbuchse verbindet den Theodoliten mit dem horizontalisierbaren Unterbau – z. B. einem Dreifuß oder Kugelfuß – und trägt den ebenfalls mit einer Altgrad- oder Gonteilung ausgestatteten Horizontalkreis. Die Ableseeinrichtungen für den Horizontal- und Vertikalkreis befinden sich in der Stütze. Der Unterbau ist über Dreifußschrauben mit einer Libelle horizontalisierbar. Die Verbindung zwischen der Stehachsbuchse und dem Dreifuß kann fest sein oder in einer Zwangszentrierung abnehmbar [1.5.4].

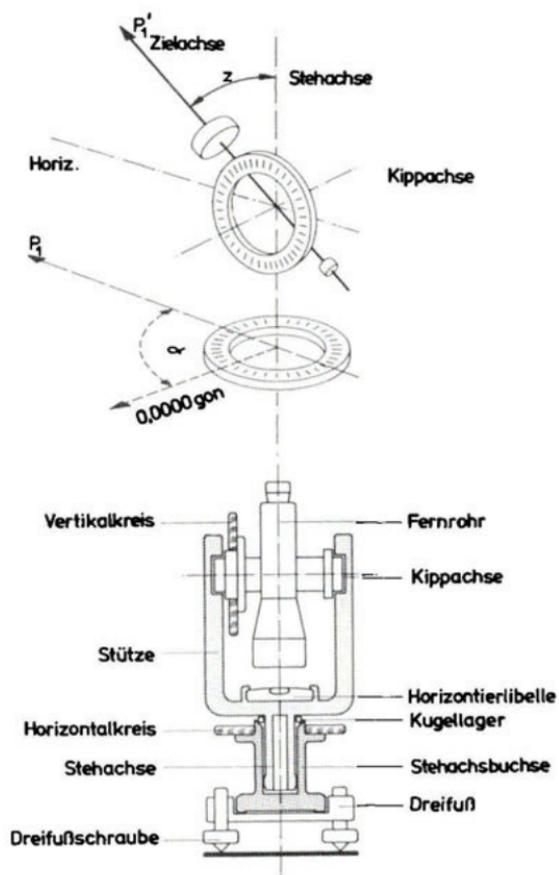


Abb. 1.2. Darstellung eines einfachen Theodolits

1.2.2 Die Achsen

1.2.2.1 Die Vertikal- oder Stehachse

Die Stehachse hat zwei Aufgaben: sie nimmt das Gewicht der Stütze auf und bewirkt, daß die Drehachse der Stütze mit dem

Zentrum der Teilung des Horizontalkreises zusammenfällt. Die Stehachse hat in unterschiedlichen Theodoliten verschiedene Formen. Ältere Theodolite haben konische Achsen, welche individuell angepaßt und häufiger gereinigt und geölt werden müssen; neuere sind ausschließlich mit Zylinderachsen ausgestattet, die sich besser für die Serienherstellung eignen und praktisch wartungsfrei sind. Die Achsen werden im allgemeinen aus gehärtetem Stahl hergestellt.

Günstige Reibungsverhältnisse ergeben sich durch Verkleinern der Berührungsflächen zwischen Achse und Buchse sowie durch Stützen und Führen der Achse mit Kugellagern. Es gibt Theodolite, bei denen ein unterer und oberer Führungsring das Zentrum der Stehachse und ihre Winkellage festlegen (Abb. 1.3). Das Gewicht der Stütze nimmt bei diesem System ein Stützkugellager am unteren Ende der Achse auf. Bei anderen Theodoliten werden die Winkellage und das Zentrum der Stehachse durch einen unteren Führungsring und ein Kugellager zwischen Achsbuchse und Achsflansch am oberen Ende festgelegt.

Das Kugellager nimmt dann gleichzeitig das Gewicht auf (Abb. 1.4). In dem Achssystem von Abb. 1.5 legt ein Planlager die Win-

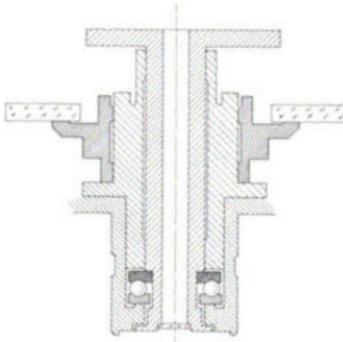


Abb. 1.3. Achssystem mit zwei Führungsringen und Stützkugellager (Beispiel Zeiss Th 42)

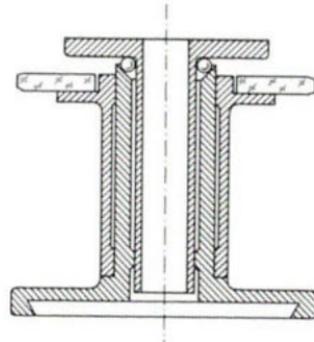


Abb. 1.4. Achssystem mit einem Führungsring und einem Kugellager (Beispiel Wild T2)

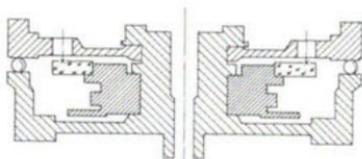


Abb. 1.5. Achssystem mit einem Planlager und Achszapfen (Beispiel Kern DKM 2)

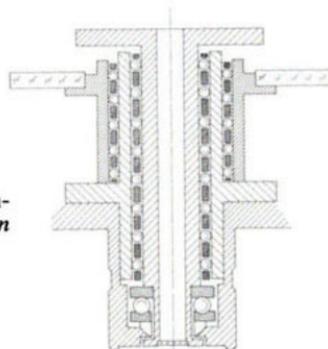


Abb. 1.6. Achssystem mit Kugelführungsachse (Beispiel Zeiss)

kellage fest und ein zusätzlicher Achszapfen das Zentrum; auch hier nimmt das Kugellager das Gewicht der Stütze auf. Die Kugelführungsachse (Abb. 1.6) ist im Gegensatz zur Zylinderachse kein gleitendes, sondern ein rollendes Achssystem. Das System ist absolut spielfrei, da der Durchmesser der Kugeln um wenige μm größer ist als der Spalt zwischen Achse und Buchse.

Im Hinblick auf die Anordnung der Stehachsen unterscheidet man ein- und zweiachsige Systeme. Bei Einachsern sind die Stehachsbuchse und der Teilkreis fest miteinander verbunden (Abb. 1.2). Bei zweiachsigen Systemen (Abb. 1.3 . . . 1.6) ist die feste Verbindung von Stehachsbuchse und Teilkreis aufgegeben. Der Kreis ist mit einer Kreisbuchse versehen und um die Stehachsbuchse drehbar; die Kreisbuchse und die Stehachse berühren sich dabei nicht. Die Buchse des Horizontalkreises wird so angepaßt, daß die Stehachse und die Kreisachse zusammenfallen. Ein verstellbarer Horizontalkreis bietet zusammen mit speziellen Meßanordnungen folgende Vorteile:

- kurzperiodische Teilungsfehler lassen sich weitgehend herabsetzen und grobe Ablesefehler aufdecken [1.7.3]
- unvermeidbare Schätzfehler bei der Ablesung werden durch Repetitionswinkelmessung verkleinert [1.7.4]
- bei Absteckungsarbeiten kann man bestimmte Meßwerte vorgeben.

Optische Theodolite höherer Genauigkeit haben normalerweise einen verstellbaren Teilkreis. Bei elektronischen Theodoliten sind die Vorteile der mechanischen Teilkreisverstellung durch elektronische Schaltvorgänge ersetzbar; elektronische Präzisions-theodolite haben daher nicht immer einen verstellbaren Horizontalkreis.

Bei Instrumenten für die Zwangszentrierung [1.5.4] bilden Stütze, Kreise und Achssystem ein in sich zusammenhängendes Teil, das mittels einer Klemmvorrichtung im Unterbau festgehalten und nach Lösen der Klemme herausgehoben werden kann (Abb. 1.51 ... 1.54).

1.2.2.2 Die Horizontal- oder Kippachse

Sie trägt den Vertikalkreis und ermöglicht das Auf- und Abwärtskippen des Fernrohres in der Vertikalen; sie ist senkrecht zur optischen Achse des Fernrohres angeordnet. Die zylindrischen Achszapfen der Kippachse ruhen normalerweise in V-Lagern (Abb. 1.7). Die Kippachse liegt dann auf zwei – um 45° von der Senkrechten entfernten – erhabenen Stellen auf. Die Achsführung ist spielfrei, da der wegen der kleinen Auflagefläche relativ hohe Druck den Fettfilm des Schmierfettes gleichmäßig verteilt.

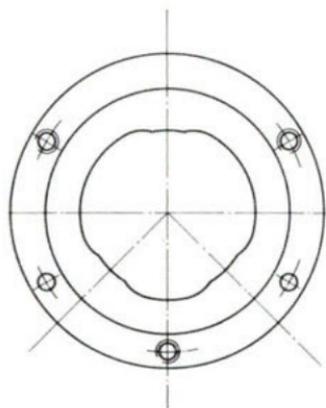


Abb. 1.7. Kippachslager (Kern DKM 2-A)

Bei vielen Instrumenten ist eines der Lager gegenüber der Stütze um kleine Beträge zu heben oder zu senken, damit die Kippachse senkrecht zur Stehachse eingestellt werden kann. Bei anderen Geräten läßt sich der Winkel zwischen Steh- und Kippachse durch einen keilförmigen Stehachsflansch verändern. Bei neueren Instrumenten kann nur der Hersteller die Kippachse einstellen.

Das Meßfernrohr befindet sich in der Mitte der Kippachse. Die Fernrohrstützen sollen so hoch sein, daß man das Fernrohr durchschlagen kann. Bei einigen speziellen Instrumenten ist das Fernrohr am Ende der Kippachse außerhalb der Lager befestigt [1.6.2.2].

Im Innern sind die Kippachsen normalerweise hohl, damit sie den optischen Strahlengang für die Teilkreisablesungen aufnehmen können.

1.2.2.3 Die Ziellinie des Fernrohres

Sie ist die Gerade durch den Schnittpunkt des Strichkreuzes und den Mittelpunkt des Objektivsystems. Die Definition gilt bei Einstellung auf ∞ [Band I, 52.3]. Ihre Lage kann durch Justieren in beschränktem Umfang verändert werden [1.6.11].

1.2.2.4 Vertikalstellen der Stehachse

Zum Horizontieren des Theodolits befinden sich auf der Stütze normalerweise eine oder zwei Flüssigkeitslibellen; einige elektronische Theodolite haben elektronische Libellen [Band I, 51]. Bei einer Winkelmeßgenauigkeit von 0,1 bis 2 mgon ist die Stehachse mit einer Toleranz von 1 mgon vertikal zu stellen. Normalerweise wird zunächst mit einer Dosenlibelle grob horizontiert. Das Feinhorizontieren erfolgt anschließend mit einer senkrecht oder parallel zur Kippachse angeordneten Präzisionslibelle. Bei Theodoliten mit einer elektronischen Libelle ist das Feinhorizontieren mit den Dreifußschrauben nur begrenzt erforderlich, wenn ein geräteinterner Rechner die Fehlereinflüsse der restlichen Stehachsschiefe korrigiert.

1.2.3 Die Kreise

1.2.3.1 Der Horizontalkreis

Er besteht entweder aus Glas oder bei einfachen Theodoliten aus Metall oder Kunststoff. Die Teilung ist im Uhrzeigersinn beziffert. In den meisten Ländern und bei astronomischen Messungen nutzt man Kreise mit Gradteilung. In den deutschsprachigen Ländern, Frankreich und einigen anderen Ländern werden für Vermessungsarbeiten Kreise mit Gon-Teilung bevorzugt. Die Teilung der Kreise stellt man mit speziellen Kreisteilmaschinen als Positiv oder Negativ her. Von diesem Original – auch Mutterkreis genannt – stellt man weitere Gebrauchskreise durch Kontaktkopien her. Für ein Negativ seien die Arbeitsgänge erläutert: Eine auf den Kreis aufgebrachte fotoempfindliche Lackschicht wird durch das Negativ belichtet und anschließend die Teilung und Bezifferung aus der Lackschicht gelöst. Danach bedampft man die glasblanken Stellen mit Chrom und wischt die restlichen Lackflächen ab; das Ergebnis ist ein Positiv von Teilung und Bezifferung. Die Teilstriche sind bei Glaskreisen einige μm breit.

Je größer der Durchmesser der Teilung ist, um so weniger wirken sich etwaige Teilungsfehler aus; der Teilkreisdurchmesser wird daher vielfach als Gütemerkmal für einen Theodoliten angesehen. Feldmeßtheodolite haben Kreisdurchmesser von 60 mm . . . 100 mm, wobei die Kreise meistens in 20' oder 30' oder in 0,5 gon unterteilt sind. Ablesemikroskope oder elektronische Abtastsysteme ermöglichen genauere Ablesungen durch Interpolation zwischen benachbarten Teilstrichen. Teilstrichfehler lassen sich durch besondere Anordnungen der Teilstriche, durch spezielle Abtastverfahren und besondere Meßanordnungen klein halten.

Die Abb. 1.8a, b, c zeigen Ausschnitte von Teilkreisen einiger Theodolite mit visueller Ablesung. Es gibt z. B. einfache Teilungen (a), Doppelkreisteilungen (b) und Doppelkreisteilungen mit Einzel- und Doppelstrichen (c). Die Abb. 1.9a, b, c zeigen Ausschnitte der Kreise elektronischer Theodolite; sie haben anstelle arabischer Ziffern binär codierte Ziffern oder keine Ziffern.

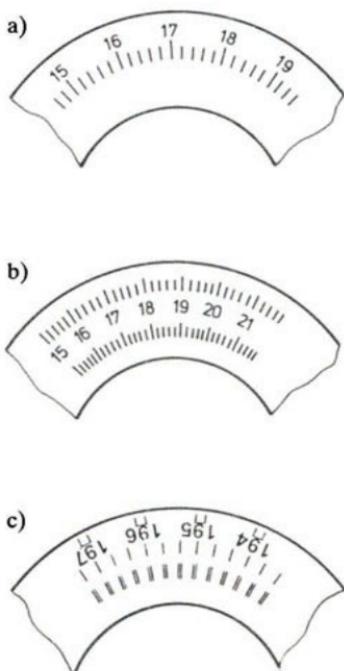


Abb. 1.8. Ausschnitte von Teilkreisen einiger Theodolite mit visueller Ablesung (Kern)

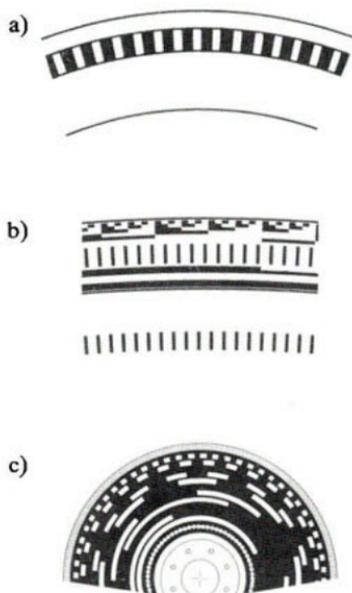


Abb. 1.9. Ausschnitte von Teilkreisen einiger Theodolite mit elektronischer Kreisabtastung

- a) Wild TC1, Kern E1, ...
- b) Zeiss Elta 2
- c) Hewlett Packard HP 3820

1.2.3.2 Der Vertikal- oder Höhenkreis

Er steht senkrecht auf der Kippachse; das Zentrum seiner Teilung liegt in ihr. Er wird wie der Horizontalkreis hergestellt; bei einigen Theodoliten hat er einen kleineren Durchmesser als der Horizontalkreis. Während bei der Horizontalwinkelmessung der Teilkreis feststeht und die Stütze sich bewegt, sitzt der Höhenkreis fest auf der Kippachse und macht alle Bewegungen des Fernrohres mit. Die Ablesevorrichtung ist stützenfest angebracht. Da sich die Vertikalwinkel auf die Richtung zum Zenit beziehen (Abb. 1.1), liegen der Ableseindex und das Zentrum des Kreises

auf einer in Lotrichtung zeigenden Verbindungslinie. Eine vereinfachte Darstellung einer von Hand einstellbaren Ableseeinrichtung zeigt Abb. 1.10.

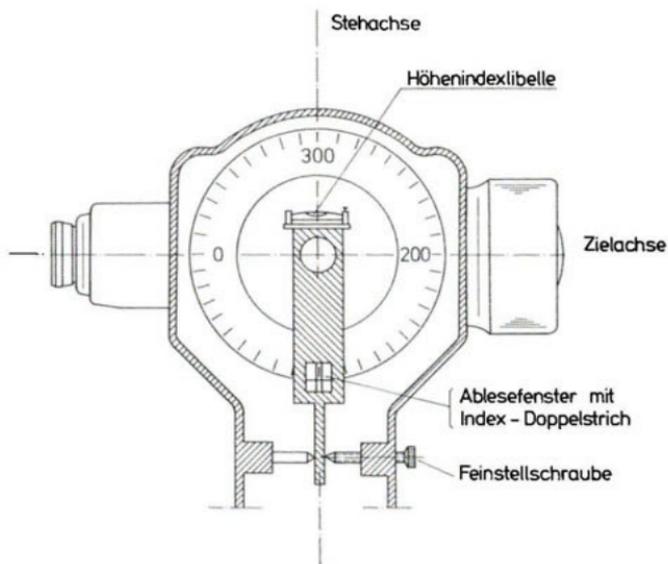


Abb. 1.10. Vereinfachte Darstellung der Höhenkreisablesung

In dieser schematischen Zeichnung besteht die Ablesevorrichtung aus einem Rahmen, der den Ableseindex und eine Höhenindexlibelle trägt. Mit einer Feinstellschraube kann der Rahmen geringfügig um eine Achse bewegt werden, die mit der Kippachse zusammenfällt. Bei richtig justierter Höhenindexlibelle verläuft die Linie durch den Ableseindex und das Zentrum des Kreises in Richtung zum Zenit, wenn die Höhenindexlibelle von dem Beobachter mit der Feinbewegungsschraube eingestellt ist. Bei den meisten neuen Instrumenten stellt der Ableseindex sich mit einem der Schwerkraft gehorchenden Kompensator automatisch in die Ausgangslage ein [Band III, 12.3]. Der Höhenkreis ist mei-

stens, wie Abb. 1.10 zeigt, so geteilt, daß nicht Höhenwinkel, sondern Zenitwinkel abgelesen werden [1.1].

Wie Abb. 1.1 und 1.10 zeigen, liegt das Zentrum der Vertikalwinkel in dem Schnittpunkt von Steh-, Kipp- und Zielachse. Bei Höhenberechnungen muß daher der lotrechte Abstand der Kippachse von dem Bodenpunkt berücksichtigt werden.

1.2.4 Klemme, Feintrieb, Kreistrieb

Um das Fernrohr genau ausrichten und bestimmte Kreislagen einstellen zu können, müssen die gegeneinander drehbaren Teile des Theodolits fest miteinander gekoppelt und zusätzlich mit einem Feintrieb um kleine Winkel gegeneinander verstellbar sein.

Diese Vorgänge lassen sich unter anderem mit

- Klemmen und Feintrieben
- einer Kreisklemme oder
- einem Kreistrieb mit Zahnrad und Ritzel

ausführen.

Während der Horizontalwinkelmessung befestigt man zeitweilig die Stütze mit einer Klemme an der Stehachsbuchse. Über einen Feintrieb läßt sich die Stütze dann noch um kleine Winkel um die Stehachse drehen. Eine einfache Ausführung zeigt Abb. 1.11. Mit einer Schraube S und einem Klemmstück K wird ein mit einem Ausleger versehener Ring R fest an die Achsbuchse gepreßt. Die Feinbewegungsschraube F und ihre Gegenfeder G schließen einen Zapfen Z ein, der mit der Stütze verbunden ist. Der Feintrieb ermöglicht kleine Drehungen der Stütze. Bei Instrumenten höherer Genauigkeit läßt sich die Einstellgenauigkeit durch eine zusätzliche Hebelübertragung steigern. In einigen neueren Geräten sind die Klemme und der Feintrieb coaxial angeordnet. Ein Beispiel zeigt Abb. 1.12. Durch Drehen der Klemmschraube S preßt sich das Klemmstück K gegen die Stehachsbuchse Stb . Beim Drehen des Feintriebs F drückt ein Bolzen B gegen den Hebelarm H , dessen Bewegung sich mit einem weiteren Bolzen Bo auf die Stütze überträgt.

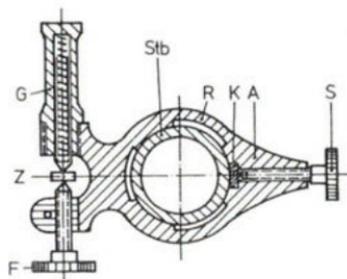


Abb. 1.11. Klemme mit Seitenfeintrieb

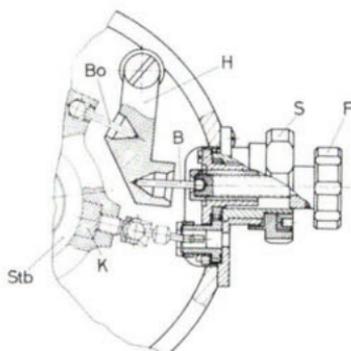


Abb. 1.12. Klemme mit koaxialem Feintrieb (*Breithaupt*)

Die Höhenklemme legt die Kippachse gegenüber der Stütze fest. Der Höhenfeintrieb ermöglicht das genaue Einstellen vertikaler Richtungen. Im Prinzip entsprechen die Konstruktionen denen, die der Horizontalwinkelmessung dienen. Unterschiedliche Ausführungen zeigen die Abb. 1.13, 1.23.

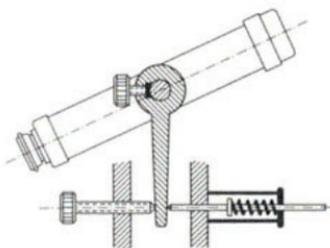


Abb. 1.13. Höhenklemme mit Höhenfeintrieb

Zweiachser bieten zusätzliche Möglichkeiten der Kreisverstellung. Es gibt unterschiedliche Anordnungen. Bei einfachen Theodoliten lagert vielfach die Kreisbuchse unter Reibung auf der Stehachsbuchse. Zum Verstellen koppelt man den Kreis vorübergehend mit einer Kreisklemme an die Stütze. Ein Beispiel für eine

Klemme zeigt Abb. 1.14. Die Klemme ist an der Stütze angebracht. Mit dem Kreis ist eine Scheibenmembran verbunden, die man durch einen an der Stütze sitzenden Hebel vorübergehend an der Stütze befestigen kann; der Kreis nimmt dann an der Bewegung der Stütze teil.

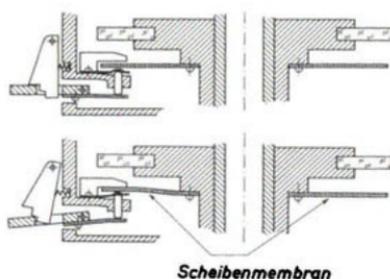


Abb. 1.14. Kreisklemme (*Jenoptik*)

Aufwendigere Theodolite haben zwei Klemmen je mit einem Feintrieb. Mögliche Anordnungen zeigt die Abb. 1.15. Bei einigen Instrumenten des Typs a) kann der Beobachter die Stütze mit dem Kreislager sowie mit der Achsbuchse koppeln und je fein dagegen verstellen; ist die Anordnung b) gegeben, so kann er die Stütze an dem Kreislager sowie das Kreislager an der Achsbuchse befestigen und je die einzelnen Teile gegeneinander bewegen.

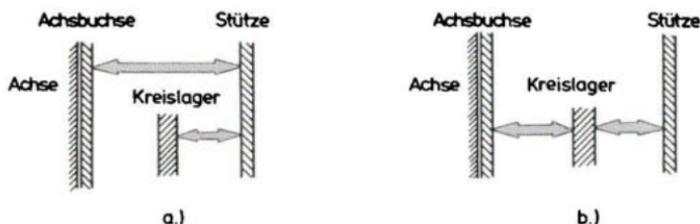


Abb. 1.15. Verschiedene Anordnungen für die Feinverstellung von Kreis und Stütze (z. B. a) *Zeiss Th42, Kern K1S, K1M*; b) *Wild T16, T1 ...*)

Die zuvor beschriebenen Konstruktionen mit Kreisklemmen ermöglichen:

- das Nullen oder Orientieren des Horizontalkreises
- die repetitive Winkelmessung.

Theodolite mittlerer, hoher und höchster Genauigkeit haben einen Kreistrieb mit Zahnrad und Ritzel, durch den sich der Horizontalkreis bei fester Verbindung zwischen Stütze und Stehachsbuchse drehen läßt. In der Konstruktion von Abb. 1.16 trägt die Kreisbuchse ein Zahnrad, in welches das Ritzel des Einstellknopfes greift. In der Ruhestellung wird das Ritzel durch eine Feder von der Scheibe weggedrückt.

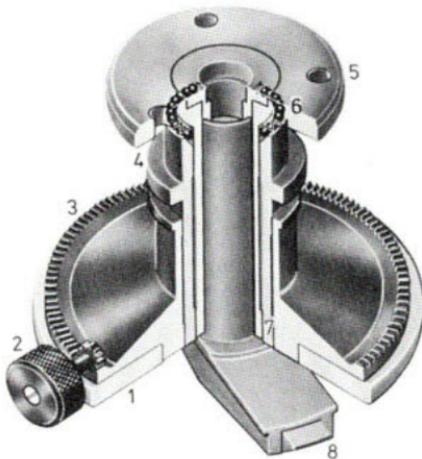


Abb. 1.16. Kreistrieb mit Zahnrad und Ritzel (Wild T2)

1 Horizontalkreis; 2 Einstellknopf; 3 Kreisbuchse; 4 Achsbuchse; 5 Stehachse; 6 Kugellager; 7 Gleitlager; 8 Kreisablesprisma

In elektronischen Theodoliten können die Vorteile der mechanischen Teilkreisverstellung durch elektronische Abtast- und Schaltvorgänge ersetzt werden; elektronische Theodolite haben daher teilweise feste Teilkreise.

1.2.5 Kreisablese- und Kreisabstastvorrichtungen

Die Richtungen der Zielachse lassen sich an den Kreisen mit einem Ablesemikroskop ablesen oder elektronisch abtasten. Die Art der Meßwerterfassung ist für die nachfolgende Meßwertverarbeitung von entscheidender Bedeutung. Obwohl die Theodolite von ihrem mechanischen Aufbau her weitgehend ähnlich sind, erscheint es daher zweckmäßig, zwischen *optischen Theodoliten* (Theodoliten mit optischer Kreisablesung) und *elektronischen Theodoliten* (Theodoliten mit elektronischer Kreisabstastung) zu unterscheiden. Mit elektronischen Theodoliten läßt sich von der Meßwerterfassung bis zur Datenverarbeitung und Dokumentation ein automatischer Datenfluß erzeugen; zusammen mit elektronischen Entfernungsmessern setzt man sie bevorzugt für großflächige Aufgaben mit umfangreichem Datenmaterial ein. Optische Theodolite sind erheblich preisgünstiger zu erwerben, andererseits jedoch weniger automationsfreudig; sie werden vorteilhaft für weniger umfangreiche Aufgaben eingesetzt.

1.3 Optische Theodolite

1.3.1 Die Kreisablesevorrichtungen

Sie sind allgemein als Meßmikroskop ausgebildet. Nur bei sehr einfachen Theodoliten dienen zum Ablesen ein Indexstrich und eine Lupe. Die Prinzipien der Ablesevorrichtungen beeinflussen weitgehend den Aufbau und die Genauigkeit der Theodolite. Bei den Meßmikroskopen unterscheidet man im wesentlichen zwischen:

- Strichmikroskopen
- Skalenmikroskopen
- Strichmikroskopen mit optischem Mikrometer und
- Koinzidenzmikroskopen mit optischem Mikrometer.

Während bei den ersten drei Vorrichtungen eine Ablesung nur eine Teilkreisstelle erfaßt, ermöglicht das Koinzidenzmikroskop das gleichzeitige Ablesen und Mitteln zweier Kreisstellen. In neueren Theodoliten verdrängen zunehmend elektronische

Kreisabtastsysteme [1.4] die optisch-mechanischen Ablesevorrichtungen.

1.3.2 Die Ablesemikroskope

Sie erhöhen die Auflösung der nur einige hundertstel bis zehntel Millimeter breiten Teilungsintervalle. Die optischen Systeme sind meistens in der Stütze und einem Tubus neben dem Fernrohr untergebracht (Abb. 1.17, 1.23).

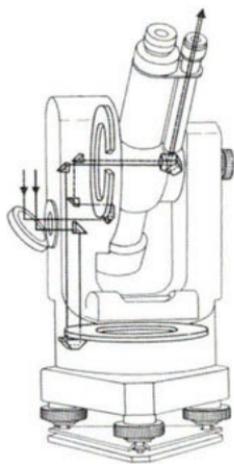


Abb. 1.17. Strahlengang eines Ablesemikroskops bei Theodoliten mit einer Ablesestelle

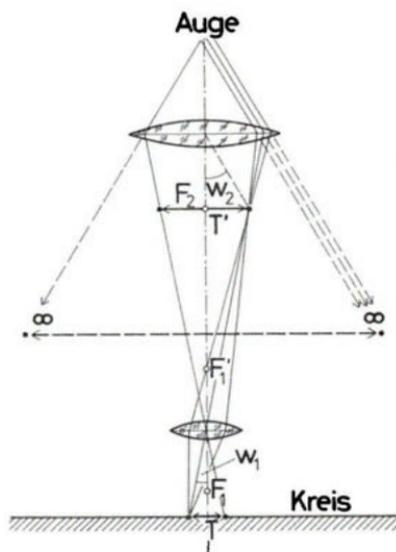


Abb. 1.18. Strahlengang im Ablesemikroskop

Zielen und Ablesen erfolgt schnell und einfach, wenn sich das Mikroskopokular neben dem Fernrohrkular befindet und beide Kreisbilder in jeder Beobachtungslage gleichzeitig sichtbar sind. Bei einigen Theodoliten haben die Bilder der Kreise unterschiedliche Farben. Die Ablesungen an Horizontal- und Vertikalkreis

sind dann klar zu unterscheiden und Verwechslungen praktisch ausgeschlossen. In der Regel sorgt ein Drehspiegel an einer Seite der Fernrohrstütze für die Beleuchtung. Bei Nachtbeobachtungen oder z. B. in Schächten benötigt man eine künstliche Lichtquelle; viele Theodolite haben hierfür als Zubehör eine elektrische Ansteckleuchte.

Neuere Theodolite haben in der Regel nur ein Ablesemikroskop. Der Strahlengang des Mikroskops (Abb. 1.18) entspricht weitgehend dem des Fernrohres; das Objektiv ist allerdings kurzbrennweitig. Der Gegenstand, ein Ausschnitt der Kreisteilung, befindet sich zwischen der einfachen und doppelten Brennweite. In der Bildebene des Mikroskops ist anstelle des Strichkreuzes eine Ablesemarke zu sehen, deren Abstand von dem vorhergehenden Teilstrich der Kreisteilung bestimmt werden muß. Die Ablesemarke kann ein Indexstrich, die Nullmarke einer Skala oder das Bild eines diametral liegenden Teilstriches sein.

Damit die Mikroskope einwandfreie Ablesungen ermöglichen, haben sie mehrere optische Bedingungen zu erfüllen. Es müssen infolgedessen entsprechende Justiermöglichkeiten vorhanden sein.

a) Damit ein scharfes Bild des Kreischnittes in der Ebene der Ablesemarke entsteht, muß der Abstand der Bildebene vom Objektiv – d. h. die Bildweite – geändert werden können.

b) Befindet sich in der Bildebene außer dem Nullstrich eine Skala, so muß, damit diese genau mit dem Bild eines entsprechenden Teilungsintervalls zusammenpaßt, die Gegenstandsweite geändert werden können. Ein etwaiger Unterschied zwischen der Skalenausdehnung und dem Bild des zugehörigen Teilungsintervalls wird als Maßstabsfehler (Run) bezeichnet. Das Erfüllen der Bedingung b) heißt daher auch Maßstabsfehlerbeseitigung (Runbeseitigung).

Mängel zu a) und b) können bei den heutigen Kompaktinstrumenten nur in den Werkstätten beseitigt werden.

Neben diesen beiden für die Justierung erforderlichen – objektiven – Einstellungsmöglichkeiten tritt noch eine subjektive For-

derung: Der jeweilige Beobachter muß, um die Ablesemarke in die für sein Auge günstigste Sehweite zu bringen, das Okular in der Okularfassung verschieben können.

1.3.2.1 Das Strichmikroskop

Das einfache Strichmikroskop Abb. 1.19 hat als Ablesemarke einen Strich, der normalerweise auf eine Glasplatte aufgedampft ist. Bei der Justierung braucht nur die erste der in 1.3.2 genannten Bedingungen erfüllt zu werden. Der Teilkreis eines Strichmikroskoptheodolits ist in der Regel in $10'$ oder 10 cgon eingeteilt. Zur Ablesung hat man lediglich den Abstand des Ablesestriches von den nächsten Teilstrichen auf $\frac{1}{10}$ des Teilkreisintervalls zu schätzen. Die Ablesegenauigkeit ist nicht sehr hoch; doch kann man sehr schnell und sicher ablesen. Abb. 1.20 a zeigt das Gesichtsfeld zweier Theodolite, in denen sowohl die Ablesungen am Vertikalkreis wie die am Horizontalkreis erscheinen.

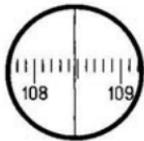
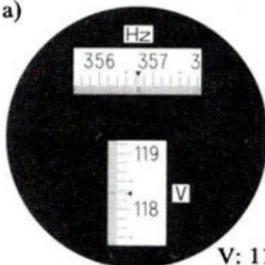


Abb. 1.19. Ablesung eines einfachen Strichmikroskops

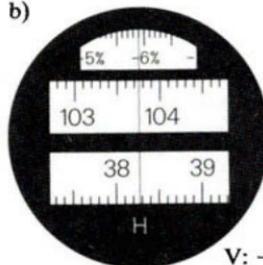
108,47 gon

a)



V: $118^{\circ} 17'$
H: $356^{\circ} 43'$

b)



V: $-5, 90\%$
V: $103,75$ gon
H: $38,28$ gon

Abb. 1.20. Sehfelder von Strichmikroskopen mit Horizontal- und Vertikalkreisablesung a) Wild T05 b) Kern K0-S