

Heft 8

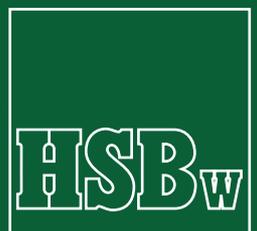
München, Dezember 1982

Axel Geiger

Entwicklung und Erprobung
eines Präzisionsneigungstisches
zur Kalibrierung
geodätischer Instrumente

SCHRIFTENREIHE

Wissenschaftlicher Studiengang Vermessungswesen
Hochschule der Bundeswehr München

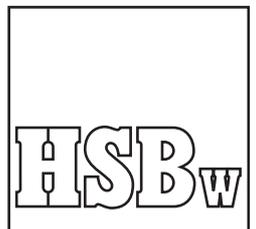


Axel Geiger

Entwicklung und Erprobung
eines Präzisionsneigungstisches
zur Kalibrierung
geodätischer Instrumente

SCHRIFTENREIHE

Wissenschaftlicher Studiengang Vermessungswesen
Hochschule der Bundeswehr München



Der Druck dieses Heftes wurde aus Haushaltsmitteln der Hochschule der Bundeswehr München gefördert.

Vollständiger Abdruck der vom Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen der Hochschule der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades einer Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Albert Schödlbauer
1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Caspary
2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Schnädelbach, TU München

Die Dissertation wurde am 06.10.1982 bei der Hochschule der Bundeswehr München, D-8014 Neubiberg, Werner-Heisenberg-Weg 39, eingereicht und durch den Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen am 20.12.1982 angenommen.

Verantwortlich für die Herausgabe der Schriftenreihe:

Prof. Dr. G. Neugebauer
Dipl.-Ing. J. Peipe

Bezugsnachweis:

Studiengang Vermessungswesen
im Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen
Hochschule der Bundeswehr München
Werner-Heisenberg-Weg 39
8014 Neubiberg

ISSN 0173-1009

Inhaltsverzeichnis

TEIL A: Entwicklung und Justierung des Präzisionsneigungstisches

	SEITE
<u>1. Einleitung</u>	6
<u>2. Interferometrie</u>	9
2.1 Interferenzerscheinungen	9
2.2 Michelson-Interferometer	9
2.3 Laserinterferometer	10
2.3.1 Allgemeines	10
2.3.2 Optischer Aufbau	10
2.3.3 Meßwerterfassung	10
2.4 Laserinterferometeranlage von Hewlett Packard	14
2.4.1 Optische Bauteile	15
2.4.2 Empfänger	17
2.4.3 Auswertegeräte	17
2.4.4 Automatischer Kompensator	18
2.4.5 Genauigkeit und Auflösung	18
<u>3. Beschreibung des Neigungstisches</u>	20
3.1 Zielsetzungen	20
3.2 Mechanischer Aufbau	21
3.3 Anordnung der Meßoptik	24
3.4 Bestimmung der Neigung	25
<u>4. Justierung des Neigungstisches</u>	32
4.1 Justierbedingungen	32
4.2 Justiermöglichkeiten	34
4.3 Justierverfahren	35
4.4 Durchführung der Justierung	36
4.4.1 Zusammenstellung der wichtigsten Justiervorgänge	36
4.4.2 Ausführliche Beschreibung der Justiermethoden	37
4.4.2.1 Horizontierung der Invarplatte	37
4.4.2.2 Vororientierung des Strahlengangs	37
4.4.2.3 Justierung der optischen Bauteile mit Autokollimation	38
4.4.2.4 Justierung der optischen Bauteile mit Autoreflexion	41
4.4.2.5 Ausrichten des Laserstrahls	42

	SEITE	
4.5	Genauigkeit der Justierung	44
4.6	Messung des Reflektorenabstandes	45
4.6.1	Indirekte Messung mit drei Spiegelkeilen	46
4.6.2	Interferometrische Messung auf einer Komparatorbank	53
4.6.3	Zusammenstellung der Ergebnisse	60
<u>5.</u>	<u>Analyse der systematischen und zufälligen Fehler</u>	61
5.1	Systematische Fehler	61
5.1.1	Einfluß windschiefer Meßstrahlen oder zueinander geneigter Reflektoren	61
5.1.2	Einfluß der Brechungskoeffizienten	63
5.1.3	Einfluß der Reflektorhöhen	65
5.1.4	Einfluß des Reflektorenabstandes	66
5.1.5	Zusammenstellung der systematischen Fehler	67
5.2	Zufällige Fehler	68
5.2.1	Systemgenauigkeit des Laserinterferometers	68
5.2.2	Einfluß der Temperatur auf den Abstand	68
5.2.3	Stabilität des Neigungstisches	68
5.2.4	Laserdrift	71
5.2.5	Zusammenstellung der zufälligen Fehler	72
5.3	Zusammenfassende Genauigkeitsabschätzung der Neigungsmessung	73
<u>6.</u>	<u>Umbau des Neigungstisches</u>	75
6.1	Einbau gleicher Reflektoren und Interferometer	75
6.2	Einbau einer Invarplatte	76
6.3	Einbau eines Schrittmotors	76
<u>TEIL B:</u>	<u>Untersuchung und Kalibrierung geodätischer Instrumente</u>	78
<u>7.</u>	<u>Kalibrierung eines photoelektrischen Autokollimators</u>	78
7.1	Beschreibung des Instrumentes	79
7.2	Kalibrierung	80
7.2.1	Meßanordnung	80
7.2.2	Kalibrierung des gesamten Meßbereiches	81
7.2.3	Kalibrierung des Skalenwertes einer Bogenminute	82
7.3	Zusammenfassung der Ergebnisse	84

	SEITE	
<u>8.</u>	<u>Kalibrierung elektronischer Neigungsmesser</u>	86
8.1	Zielsetzung	86
8.2	Beschreibung der untersuchten Neigungsmesser	86
8.2.1	TESA Minilevel	86
8.2.2	SCHAEVITZ LSRP	88
8.3	Meßanordnung	90
8.4	Auswertemodell	90
8.5	Genauigkeit der Neigungsmesser	91
8.5.1	TESA Minilevel	91
8.5.2	SCHAEVITZ LSRP	93
8.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	96
<u>9.</u>	<u>Kompensatoruntersuchungen an Sekundentheodoliten</u>	98
9.1	Allgemeine Überlegungen	98
9.2	Wirkungsweise eines Kompensators	99
9.3	Einteilung der Kompensatoren	101
9.4	Anforderungen an Kompensatoren	102
9.5	Kompensatorfehler	103
9.5.1	Kompensationsfehler	103
9.5.2	Einspielfehler	104
9.5.3	Umkehrspanne	104
9.6	Bestimmung der Kompensatorfehler	105
9.6.1	Vorbemerkungen	105
9.6.2	Bestimmung der Zieleinstellfehler	105
9.6.3	Bestimmung der Koinzidenzfehler	106
9.6.4	Bestimmung der Kompensationsfehler	107
9.6.5	Bestimmung der Umkehrspanne	111
9.6.6	Bestimmung der mittleren Einspielfehler	112
9.7	Zusammenfassung der Ergebnisse	113
<u>10.</u>	<u>Zusammenfassung</u>	114
	Nachwort	117
	Lebenslauf	118
	Literaturverzeichnis	119

TEIL A: Entwicklung und Justierung des Präzisionsneigungstisches

1. Einleitung

Am Institut für Geodäsie der Hochschule der Bundeswehr München wurde vom Verfasser ein neuartiger Neigungstisch gebaut. Er wurde so konstruiert, daß er Sollneigungsdifferenzen anzeigt. Bei der Entwicklung des Neigungstisches wurde hauptsächlich an Kalibrierungsaufgaben gedacht und zwar für:

1. Flüssigkeitslibellen aller Art, speziell Sekundenlibellen
2. Elektronische Neigungsmesser (elektronische Libellen)
3. Autokollimatoren
4. Mikrometerschrauben
5. Libellenprüfer
6. Kompensatoren in Nivellieren und Theodoliten.

Neben der Eignung für die Untersuchung und Kalibrierung dieser Instrumente sollte der Neigungstisch möglichst so konzipiert werden, daß auch künftige, noch nicht klar definierbare Aufgaben damit bewältigt werden können. Aus diesen Überlegungen leitet sich folgendes Leistungsbild des Neigungstisches ab:

1. Der Neigungsbereich beträgt mehrere Gon
2. die Standardabweichung einer gemessenen Neigungsänderung ist kleiner als $\pm 0,01$ mgon
3. die Konstruktion ist zur Untersuchung von Kompensatoren in Theodoliten und Nivellieren geeignet
4. die Belastbarkeit beträgt circa 300 N.

Der große Neigungsbereich erschien wünschenswert, um moderne elektronische Neigungsmesser, die Meßbereiche von einigen Gon aufweisen, in ihrem gesamten Arbeitsbereich untersuchen zu können.

Die hohe Meßgenauigkeit wird benötigt, da die Reproduzierbarkeit der Neigungsbeobachtungen einiger als Prüflinge vorgesehener Neigungsmesser derzeit bei 0,03 mgon liegt.

Da die Forderung nach hoher Meßgenauigkeit bei großer Belastbarkeit und großem Meßbereich mit mechanischen Mitteln nur schwierig

zu realisieren ist, wurde eine Lösung gewählt, die die Neigungsbestimmung auf die interferometrische Messung eines Wegunterschiedes zurückführt.

Dieses Konzept hat den Vorteil, daß es einen besonders einfachen mechanischen Aufbau ermöglicht. Es bot sich außerdem an, da ein Laserinterferometer der Firma Hewlett Packard am Institut für Geodäsie bereits vorhanden war, das zur Messung des Wegunterschiedes benutzt werden konnte.

Abbildung 1 zeigt den Neigungstisch mit der Laserinterferometeranlage.

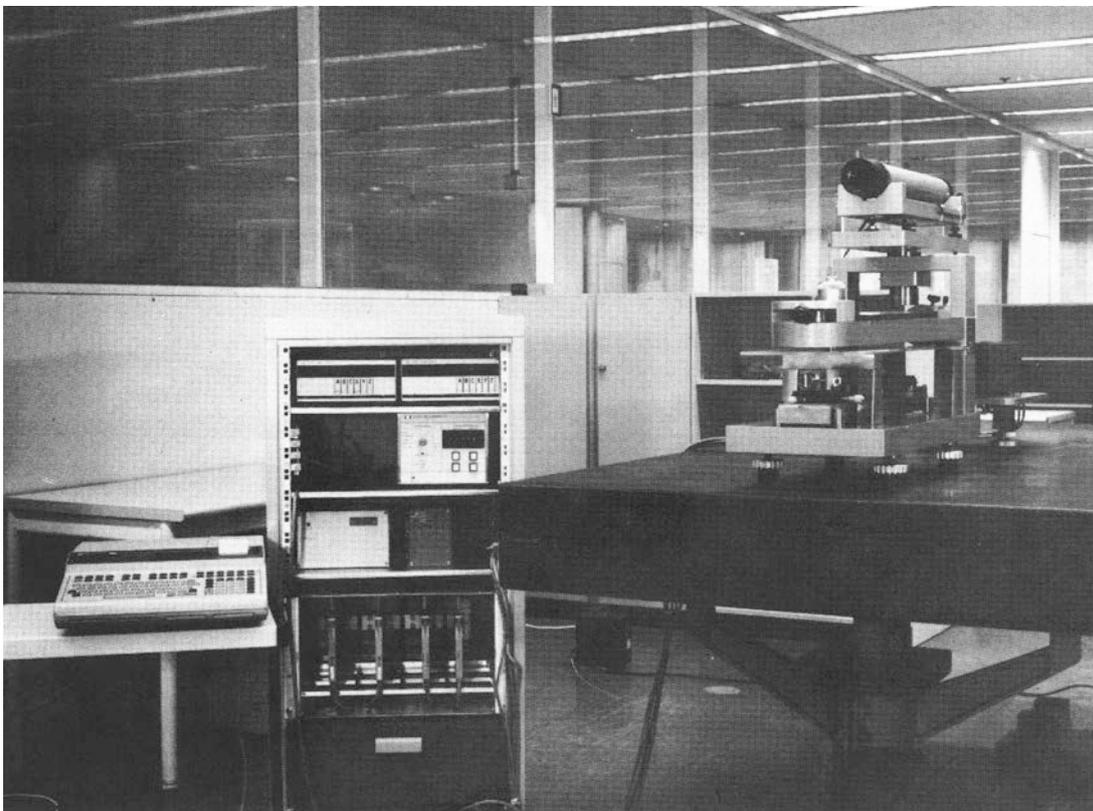


Abb. 1: Neigungstisch mit Laserinterferometeranlage

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in zwei Teile. Im ersten Teil wird der Neigungstisch ausführlich beschrieben und unter-

sucht. Der zweite Teil enthält Anwendungen zur Kalibrierung geodätischer Instrumente.

2. Interferometrie

Um das Verständnis der Wirkungsweise des Laserinterferometers zu erleichtern, werden im folgenden einige Grundlagen erläutert.

2.1 Interferenzerscheinungen

Bei der Interferometrie wird als Maßeinheit die Lichtwellenlänge benutzt. Wegen der Kleinheit der Lichtwellenlänge und der Möglichkeit, auf interferometrische Weise noch Bruchteile einer Lichtwellenlänge zu messen, ist die Interferometrie für präzise Messungen geeignet. Es treten zwei Formen von Interferenzen auf, die für Entfernungsmessungen verwendet werden:

- Überlagerung von Wellen gleicher Amplitude und Frequenz beziehungsweise Wellenlänge, zwischen denen lediglich eine Phasendifferenz besteht.
- Überlagerung von Wellen gleicher Amplitude und Phase, wenn ein geringfügiger Unterschied in der Frequenz besteht. Die resultierende Schwingung heißt Schwebung.

2.2 Michelson-Interferometer

Das klassische Michelson-Interferometer (Abbildung 2) benutzt die Interferenz von phasenverschobenen Wellen.

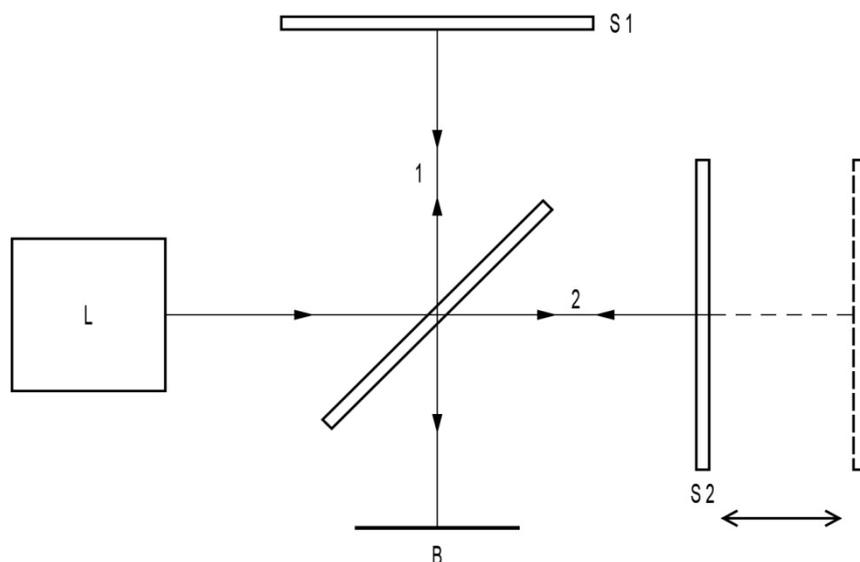


Abb. 2: Michelson-Interferometer

Das von einer monochromatischen Quelle L ausgesandte Licht trifft auf einen halbdurchlässigen Spiegel und wird dort in zwei Teilstrahlen gleicher Intensität aufgespalten. Der Referenzstrahl (1) wird von dem festen Planspiegel S1, der Meßstrahl (2) vom beweglichen Planspiegel S2 reflektiert. Beide Strahlen überlagern sich am halbdurchlässigen Spiegel und ergeben am Beobachtungsort B ein Interferenzbild. Bewegt man den Spiegel S2, so entstehen in B Minima und Maxima der Lichtenergie, je nachdem, ob der Gangunterschied der beiden Strahlen $n\lambda$ oder $(2n+1)\lambda/2$ beträgt. Ausgehend von einem Anfangszustand können bei einer Bewegung des Spiegels S2 die durchlaufenden Minima und Maxima gezählt werden, die im Abstand von $\lambda/4$ aufeinander folgen, da das Licht den doppelten Verschiebeweg durchläuft.

2.3 Laserinterferometer

2.3.1 Allgemeines

Durch die rasche Entwicklung der Lasertechnologie hat die interferentielle Meßtechnik in den letzten Jahren an Bedeutung zugenommen. Aufgrund der ausgezeichneten räumlichen und zeitlichen Kohärenz sowie weiterer Vorteile besitzt Laserlicht nahezu vollständige Interferenzfähigkeit. Laser sind daher - es werden praktisch nur Helium-Neon-Laser verwendet - bei der Interferometrie herkömmlichen Lichtquellen weit überlegen.

2.3.2 Optischer Aufbau

Laserinterferometer werden vorwiegend nach zwei Prinzipien gebaut, die in Abbildung 3 dargestellt sind. Beide haben gemeinsam, daß der Laserstrahl nach der Strahlenteilung an den Reflektoren parallel reflektiert wird. Als Reflektoren werden dabei Tripelprismen benutzt, die die Eigenschaft haben, die Strahlen auch bei Neigungen und Drehungen parallel zu reflektieren.

2.3.3 Meßwerterfassung

Es werden zur Bestimmung der Verschiebungsrichtung und zur Interpretation der Interferenzen zwei Methoden eingesetzt: die Gleichspannungstechnik und die Wechselspannungstechnik.

Bei der Wechselspannungstechnik, die am meisten Verwendung findet, wird ein Laser benötigt, der gleichzeitig zwei Wellenlängen ausstrahlt. Bei einem Interferometer, das die Längenänderungen mit Hilfe von Frequenzmessungen bestimmt, strahlt der Laser zwei Wellenlängen λ_1 und λ_2 beziehungsweise zwei Frequenzen f_1 und f_2 aus.

Die Wellenlänge λ_i und die Frequenz f_i sind über die fundamentale Gleichung

$$\lambda_i f_i = c \tag{1}$$

$c \approx 300\,000 \text{ km/sec}$ (Lichtgeschwindigkeit)

verbunden.

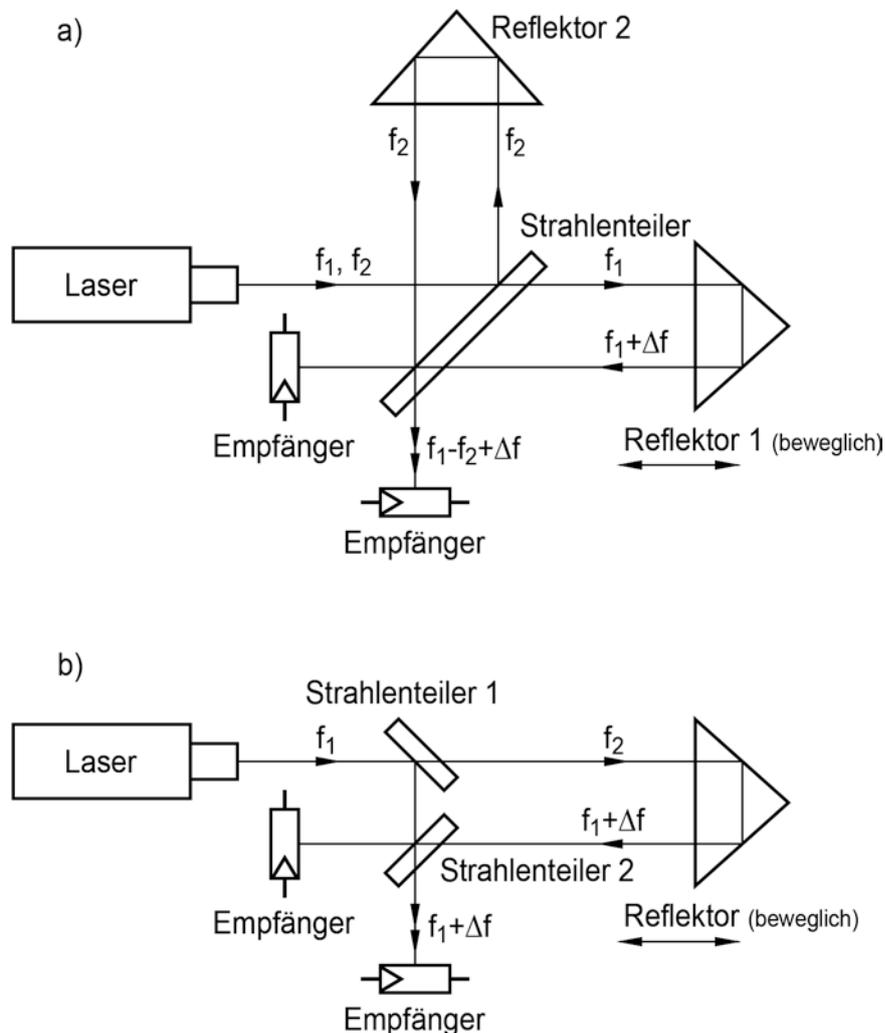


Abb. 3: Laserinterferometer-Bauarten
 a) 1 Strahlenteiler - 2 Reflektoren
 b) 2 Strahlenteiler - 1 Reflektor

Voraussetzung für eine Interferenz ist, daß beide Strahlungen gleichartig polarisiert sind und einander überlagern. Durch diese Interferenz bei geringem Frequenzunterschied wird das Gesamtlicht mit der Differenzfrequenz

$$\nu_1 = f_1 - f_2 \quad (2)$$

hell dunkel moduliert. Diese Differenzfrequenz kann im Bereich von circa 1 bis 500 MHz mit Fotodioden in ein elektrisches Signal umgewandelt werden. Im optischen Teil des Interferometers werden die beiden Frequenzen am Strahlenteiler wegen ihrer orthogonalen, linearen Polarisation getrennt und nach den Reflexionen wieder vereinigt. Dabei erfährt die Frequenz f_1 bei einer Verschiebung des beweglichen Reflektors eine Frequenzverschiebung Δf aufgrund des Dopplereffektes. Die Differenzfrequenz ν_2 ist gleich

$$\nu_2 = f_1 - f_2 + \Delta f \quad (3)$$

Die Dopplerfrequenzverschiebung Δf kann als Funktion der Verschiebungsgeschwindigkeit $v(t)$ dargestellt werden:

$$\Delta f = f_1 \frac{2 v(t)}{c} \quad (4)$$

Für die Differenzfrequenz ν_2 folgt daraus

$$\nu_2 = \nu_1 + f_1 \frac{2 v(t)}{c} \quad (5)$$

Aus Gleichung (4) ergibt sich die Verschiebungsgeschwindigkeit $v(t)$

$$v(t) = (\nu_2 - \nu_1) \frac{c}{2 f} \quad (6)$$

oder

$$v(t) = \frac{\lambda_1}{2} (\nu_2 - \nu_1) \quad (6a)$$

durch Einsetzen aus Gleichung (1).

Die Entfernungsänderung Δs des Reflektors ist dann

$$s = \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt \quad (7)$$

oder eingesetzt

$$\Delta s = \frac{\lambda_1}{2} \int_{t_1}^{t_2} (\mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1) dt = \frac{\lambda_1}{2} \left(\int_{t_1}^{t_2} \mathbf{v}_2 dt - \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{v}_1 dt \right) . \quad (8)$$

Das Zeitintegral über die beiden Differenzfrequenzen \mathbf{v}_1 und \mathbf{v}_2 wird in zwei Zählereinheiten gemessen. Ein Subtrahierer bildet die Differenz der Zählerstände und zeigt die Entfernungsänderung Δs als Vielfaches der halben Wellenlänge λ_1 an.

Das Meßverfahren wird auch als Laser-Doppler-Interferometrie bezeichnet. Es hat den großen Vorteil, daß es gegen Luftturbulenzen und Erschütterungen weitgehend unempfindlich ist, da, wie bereits ausgeführt, Bewegungsänderungen in Frequenzänderungen umgewandelt werden. Die Frequenzänderungen stellen ein digitales Meßsignal dar und unterliegen nicht den üblichen Problemen bei der direkten Zählung der Interferenzstreifen mit herkömmlichen Interferometern. Amplitudenänderungen haben somit keinen Einfluß auf die Meßgenauigkeit. Es müssen nur Wechselspannungen verstärkt und ausgewertet werden. Schaltungen, die nur Wechselspannungen verarbeiten, sind wesentlich genauer realisierbar und empfindlicher als solche, die auch Gleichspannungen verarbeiten.

Bei der Gleichspannungstechnik verwendet man einen Laser, der nur eine Frequenz sendet, oder man wählt mit Hilfe von Polarisatoren aus einem Zweifrequenzlaser eine Frequenz aus.

Das Meßsignal fällt elektrisch als Gleichspannungssignal an. In diesem Falle benötigt man Schaltungen, die Gleichspannungsamplituden verarbeiten und auswerten können.

Zur Bestimmung der Verschiebungsrichtung des Reflektors werden im Interferometer optisch zwei Interferenzsysteme erzeugt, die zueinander phasenstarr um einen bestimmten Betrag, vorzugsweise $\pi/2$, verschoben sind. Ein auf dieser Technik beruhendes Laserinterferometer wurde von der Physikalisch Technischen Bundesanstalt in Braunschweig entwickelt, das in KUNZMANN (1979) genau beschrieben wird.

2.4 Laserinterferometeranlage von Hewlett Packard

Das für den Präzisionsneigungstisch verwendete Laserinterferometer der Firma Hewlett Packard (Typenbezeichnung "Laser Transducer System 5501") beruht auf dem Prinzip der Wechselspannungsmethode.

Das Funktionsblockdiagramm (Abbildung 4) soll die Wirkungsweise verdeutlichen.

Als Längenstandard dient die Wellenlänge des He-Ne-Lasers. Durch den Einfluß eines axial liegenden Magnetfeldes wird die Neonlinie in zwei Teillinien entgegengesetzter zirkularer Polarisation mit zwei um 1,8 MHz voneinander abweichenden Frequenzen f_1 und f_2 aufgespalten. Nach orthogonaler linearer Polarisation wird der Laserstrahl aufgeweitet, kollimiert und zu einem Referenzstrahlenteiler geführt. Dort wird ein kleiner Teil der beiden Frequenzen zur Steuerung des Lasers und als Referenzfrequenz ($f_1 - f_2$) ausgeblendet. Der Hauptanteil verläßt den Laser Transducer in Richtung auf ein Interferometer. Dieses trennt den Laserstrahl in die zwei Teilstrahlen mit den Frequenzen f_1 und f_2 auf und lenkt diese auf den fest beziehungsweise den beweglichen Reflektor. Je nach Bewegungsrichtung erfährt f_1 eine Dopplerverschiebung von plus oder minus Δf . Der vom festen Reflektor zurückkommende Referenzstrahl f_2 und der dopplerverschobene Meßstrahl ($f_1 \pm \Delta f$) werden in einem Empfänger gemischt, wobei die Differenzfrequenz ($f_1 - f_2 \pm \Delta f$) entsteht. Die Referenz- und die Meßsignale werden über Wechselstromverstärker zu Triggerkreisen geführt. Zur Erhöhung der Auflösung werden die Frequenzen verdoppelt und die Perioden in getrennten Vorwärtszählern aufsummiert. Ein Subtrahierer bildet kontinuierlich die Differenzfrequenz der beiden Zähler. Wegen der Frequenzverdopplung ist die angezeigte Grundeinheit ein Vielfaches einer viertel Wellenlänge.

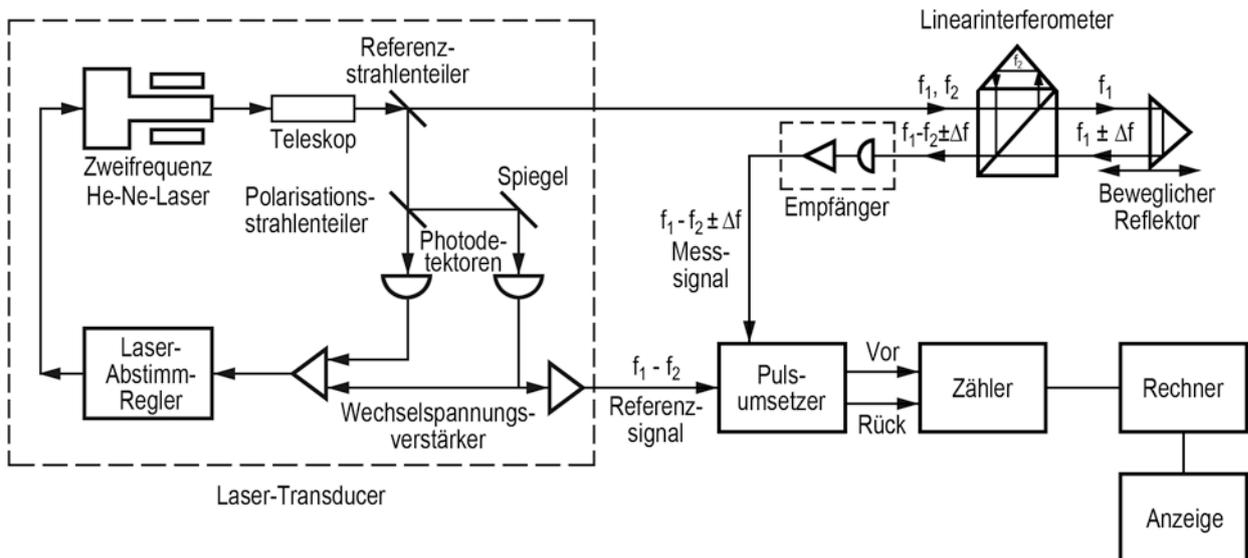


Abb. 4: Funktionsblockdiagramm des Laser Transducers von Hewlett Packard

2.4.1 Optische Bauteile

Zur vereinfachten zeichnerischen Darstellung der Strahlengänge in den Reflektoren werden die Reflektoren so gedreht, daß die Projektionen zweier Kanten in der Zeichenebene zusammenfallen. So können der räumliche Reflektor und der zugehörige Strahlengang zweidimensional dargestellt werden.

Der Strahlenteiler (Abbildung 5) teilt den einfallenden Strahl im Verhältnis 1 : 1 auf. Die eine Hälfte wird rechtwinkelig zur Einfallrichtung an der planparallelen Platte abgelenkt. Die zweite Hälfte passiert die Platte und breitet sich in der Einfallrichtung weiter aus, jedoch um 0,8 mm parallel nach unten versetzt.

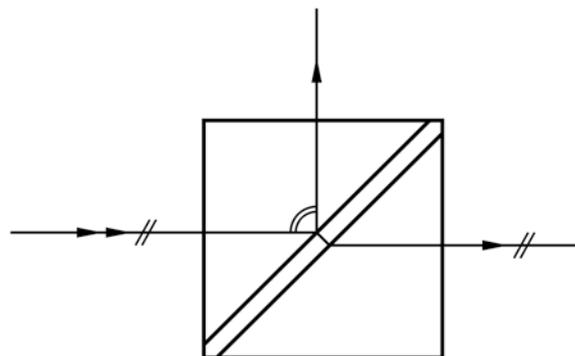


Abb. 5: Strahlenteiler

Der Polarisationsstrahlenteiler A des Linearinterferometers (Abbildung 6) trennt die beiden Frequenzen f_1 und f_2 . Der Strahlenteil mit der Frequenz f_2 wird zum Referenzprismenreflektor B umgelenkt, während der mit der Frequenz f_1 auf den beweglichen Reflektor C fällt. Die Reflektoren haben die Eigenschaft, den einfallenden Strahl parallel zu sich selbst zu reflektieren. Bewegungen des Reflektors C in Strahlrichtung erzeugen den beschriebenen Dopplereffekt.

Nach den Reflexionen an A, B und C vereinigen sich die beiden parallelversetzten Teilstrahlen wieder am Polarisationsstrahlenteiler A, wo sie das Interferometer überlagert verlassen.

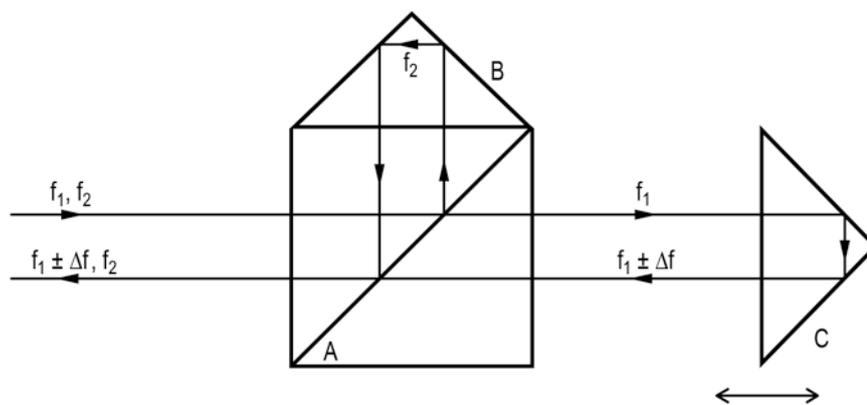


Abb. 6: Linearinterferometer mit Prismenreflektor

Im Einstrahlinterferometer (Abbildung 7) fällt der Laserstrahl wie beim Linearinterferometer auf einen Polarisationsstrahlenteiler A, der die Frequenzen trennt. Die Besonderheit besteht darin, daß sie Strahlen in sich selbst zurückgeworfen werden. Damit die reflektierten Strahlen nicht zurück zum Laser, sondern zum Empfänger gesandt werden, müssen nach der Trennung der beiden Frequenzen f_1 und f_2 die Schwingungsebenen beider Wellen um 100° gedreht werden. Dies geschieht mit Hilfe zweier Viertelwellenplättchen B, die einen Gangunterschied zwischen den beiden senkrecht zueinander schwingenden Wellen um jeweils $\lambda/4$ hervorrufen. Dies hat zur Folge, daß nach der Reflexion an den Prismenreflektoren der umgelenkte Strahl mit der Frequenz f_2 ungehindert den Strahlenteiler passiert, während der Strahl mit der Frequenz $f_1 \pm \Delta f$ nun reflektiert wird. So gelangen beide

Strahlen koaxial und in Bezug auf den Ausgangsstrahl senkrecht abgelenkt zum Empfänger.

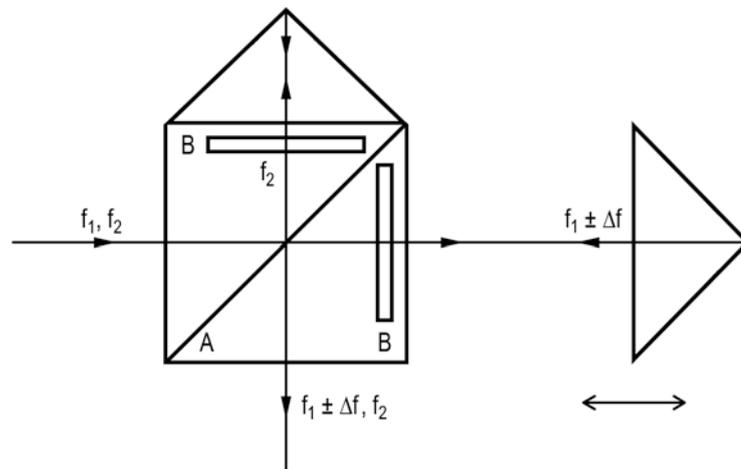


Abb. 7: Einstrahlinterferometer mit Prismenreflektor

2.4.2 Empfänger

Der vom Interferometer kommende überlagerte Laserstrahl, der die Frequenzen $f_1 \pm \Delta f$ und f_2 enthält, liefert einem Empfänger, dessen wichtigster Bestandteil eine Fotodiode ist, die Information zur Bildung der dopplermodulierten Differenzfrequenz ($f_1 - f_2 \pm \Delta f$). Dieses Meßsignal wird verstärkt und an die angeschlossenen Auswertegeräte weitergegeben.

2.4.3 Auswertegeräte

Die in dem Empfänger umgewandelten dopplermodulierten Impulse entsprechen Streckenänderungen in Einheiten einer viertel Wellenlänge des Laserlichts. Die Aufbereitung der Impulse für die Weiterverarbeitung oder Ausgabe macht eine umfangreiche Elektronik notwendig.

Basiselemente sind Zählereinheiten, die in Form von Steckkarten in einem Kopplergehäuse untergebracht sind. Sie erhalten die Meßsignale vom Empfänger und das Referenzsignal vom Laser Transducer. Weitere Bestandteile sind Baugruppen, die die Umformung des jeweiligen Zählerstandes, der zunächst nur Vielfache der gemessenen Lichtwellen angibt, in metrische Einheiten der gewünschten Auflösung vornehmen.

In der Standardausführung beträgt die Auflösung des Systems eine viertel Wellenlänge. Dies entspricht bei $\lambda \approx 0,635 \mu\text{m}$ etwa $0,16 \mu\text{m}$. Da eine Auflösungserweiterung um den Faktor 10 bei der benutzten Anlage verwendet wird, entspricht die Auflösung etwa $0,016 \mu\text{m}$. Die Ausgabe der berechneten metrischen Längenänderung geschieht auf einer vierzehnstelligen Anzeige, die mit 7-Segment-Leuchtdioden bestückt ist.

Die gesamte Laserinterferometeranlage Hewlett Packard 5501 wird mit einem über ein Interface angeschlossenen Hewlett Packard-Tischrechner 9825A gesteuert. Meßwerte und Ergebnisse können auf einem Drucker oder Plotter in beliebiger Form dargestellt werden. Die Meßdaten werden auf Magnetbändern registriert.

2.4.4 Automatischer Kompensator

Die Wellenlänge des Laserlichts im Vakuum ist sehr genau bekannt. In Luft ist die Wellenlänge kleiner, da die Lichtgeschwindigkeit hier geringer als im Vakuum ist. Die Lichtgeschwindigkeit in Luft ist eine Funktion der Luftzusammensetzung, der Temperatur, des Luftdrucks und der Luftfeuchtigkeit. Es ist deshalb erforderlich, diese Faktoren genau zu ermitteln, um die Wellenlänge des Laserstrahls zu bestimmen. Dies geschieht mit einer automatischen Kompensationseinrichtung, die, mit Fühlern ausgestattet, die Messung des Luftdrucks, der Lufttemperatur und der Luftfeuchtigkeit durchführt. Mit diesen Meßwerten wird der wirksame Brechungsindex ermittelt und damit die aktuelle Wellenlänge des Laserlichts in der Luft berechnet.

2.4.5 Genauigkeit und Auflösung

Zur Bestimmung der Systemgenauigkeit des Laserinterferometers werden die folgenden Abschätzungen angestellt.

Die Unsicherheit in der Kenntnis der Vakuumwellenlänge eines Helium-Neon-Lasers ist kleiner als 1×10^{-7} . Die Frequenzstabilität des Lasers in Vakuum ist laut Angaben des Herstellers $\pm 5 \times 10^{-7}$. Um die Wellenlänge des Lasers in Luft zu bestimmen, müssen, wie in 2.4.4 ausgeführt, die Lufttemperatur, der Luft-

druck und die Luftfeuchtigkeit gemessen werden. Hierbei werden folgende Standardabweichungen angenommen:

$$\begin{aligned} \text{Lufttemperatur: } & \pm 0,5 \text{ K} \cong \pm 5 \times 10^{-7} \times \text{Länge} \\ \text{Luftdruck: } & \pm 0,2 \text{ mb} \cong \pm 1 \times 10^{-7} \times \text{Länge} \\ \text{Luftfeuchte: } & \pm 20\% \text{ RF} \cong \pm 3 \times 10^{-7} \times \text{Länge} \end{aligned}$$

Die angegebenen relativen Fehler beziehen sich dabei auf mittlere Bedingungen.

Abbildung 8 gibt einen graphischen Überblick über die Genauigkeit des Laserinterferometers. Die Grafik zeigt deutlich, daß nur, wenn Längen von wenigen Zentimetern gemessen werden, die Einflüsse der Meteorologie und der Frequenzstabilität vernachlässigbar klein sind. Unter der Voraussetzung, daß die Fehler voneinander unabhängig sind, ergibt sich aus diesen Annahmen, unter Einbeziehung der Genauigkeit der Laserfrequenz und der Auflösung, nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz die Systemgenauigkeit des Laserinterferometers im Sinne einer Standardabweichung zu $\pm 0,8 \times 10^{-6}$. Diesen Wert kann man auch als Maß für die innere Genauigkeit des Laserinterferometers ansehen.

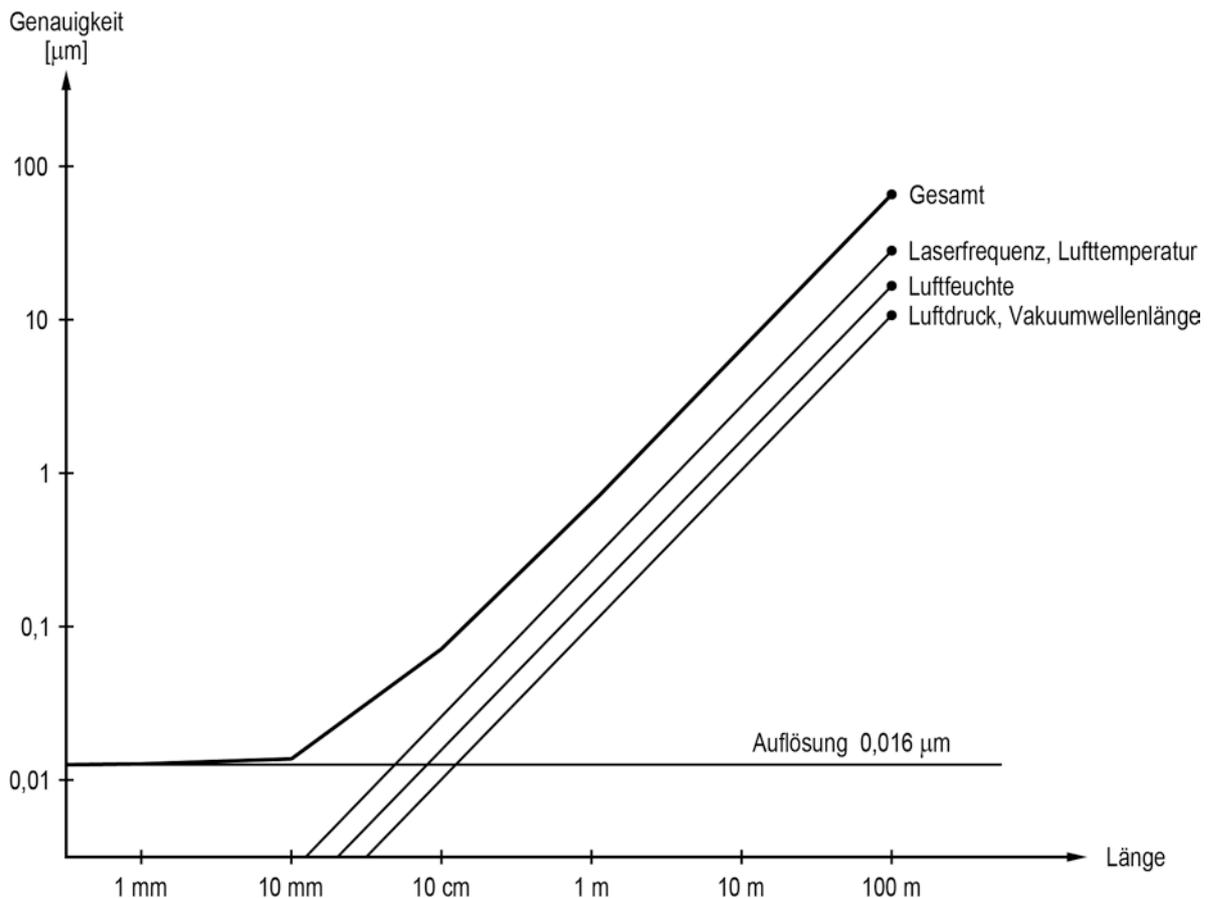


Abb. 8: Genauigkeit des Laserinterferometers

3. Beschreibung des Neigungstisches

3.1 Zielsetzungen

Die bisher gebauten Neigungstische, zumeist Libellenprüfer genannt, sind nahezu alle mechanischer Art (zum Beispiel Freiburger und Askania Libellenprüfer; Breithaupt Likon). Einige sind zur Genauigkeitssteigerung mit Zusatzeinrichtungen versehen worden [zum Beispiel GIGAS (1952), HÖPCKE (1953)]. Sie dienen hauptsächlich zur Kalibrierung von Röhrenlibellen. Für diese Zwecke reicht ein Neigungsbereich von ungefähr 0,1 gon aus.

Der neu zu entwickelnde Neigungstisch sollte jedoch als Prüfgerät für möglichst viele Arten von Neigungsmessungen konstruiert werden. Besonders gedacht worden ist an die Untersuchung und Kalibrierung von elektronischen Neigungsmessern, Röhrenlibellen, Kompensatoren in Theodoliten und Nivellieren, Mikrometerschrauben, Autokollimationsfernrohren und Libellenprüfern.

Die meisten dieser Instrumente und Geräte haben einen Neigungsbereich von weniger als 0,1 gon. Auch hier würde der Meßbereich eines mechanischen Libellenprüfers ausreichen. Seit mehreren Jahren werden aber auch elektronische Neigungsmesser eingesetzt, die einen Neigungsbereich von einigen Gon aufweisen. Auch bei geodätischen Messungen gibt es Anwendungsfälle [MÖHLENBRINK (1980), CHRZANOWSKI und FISEKCI (1982)], bei denen diese relativ großen Neigungsänderungen vorkommen.

Ein Teil der geodätischen Instrumente, die auf dem Neigungstisch kalibriert werden sollen, ist für hohe Genauigkeit ausgelegt, die bis zu einer Standardabweichung von 0,03 mgon reichen (zum Beispiel elektronische Präzisionslibellen). Von dem Prüfgerät muß daher eine noch höhere Genauigkeit gefordert werden. Als angestrebte Genauigkeit für den gesamten Meßbereich wurde eine Standardabweichung von 0,01 mgon festgelegt. Um diese extrem hohe Genauigkeitsforderung zu erfüllen, wird die Neigungsbestimmung indirekt durch interferometrische Änderung von Weglängen durchgeführt.

Die Neigungsplatte sollte so groß dimensioniert werden, daß gleichzeitig mehrere Prüflinge kalibriert werden können.

Der gesamten Konstruktion sollte eine hohe Stabilität zugrunde gelegt werden, um eine große Belastbarkeit und Unempfindlichkeit gegen Fremdeinflüsse zu gewährleisten. Als Werkstoff für den Neigungstisch empfahl sich Grauguß, da dieser sehr schwingungsdämpfend ist.

In letzter Zeit sind zwei andere Neigungsmeßeinrichtungen in der Literatur vorgestellt worden. MAURER und SCHNÄDELBACH (1980) haben ein Prüfinstrument entwickelt, dessen Meßprinzip ebenfalls interferometrisch ist. Kurz vor Fertigstellung der vorgelegten Arbeit erschien von INCZÉDY und KRAUS (1981) eine Veröffentlichung, in der ein Neigungstisch beschrieben wird, dem auch ein interferometrisches Meßprinzip zugrunde liegt. Der Neigungsbereich beträgt $\pm 30'$, die Genauigkeit $0,2''$ für $10'$ Neigung.

3.2 Mechanischer Aufbau

Der Neigungstisch hat vier Hauptbestandteile (Abbildung 9): eine Grundplatte (1), eine Neigungsplatte (2), einen Träger der elektrooptischen Bauteile (4) und einen Kollimator (3).

Die Grundplatte ist rechteckig und besteht aus stark verripptem Grauguß GG 25. Vier biegegunstig verteilte Stellschrauben an der Unterseite erlauben eine genaue Horizontierung der Platte. Form und Größe der Stellschrauben sind der Belastung angepaßt und gewähren eine hohe Standfestigkeit.

Die dreipunktgelagerte Neigungsplatte besteht ebenfalls aus verripptem Grauguß. Die hohe Zahl der Versteifungsrippen wurde gewählt, um Gewicht zu sparen und die Biegesteifigkeit der Platte zu erhöhen. Die beiden Gußplatten wurden nach der Bearbeitung nachgeglüht, um Restspannungen zu beseitigen.

Die drei Auflagerpunkte sind in der Form eines "T" angeordnet. Zwei gehärtete Kugelpfannen mit Stahlkugeln bilden die Lager, über welche die Neigungsplatte kippbar ist.

Eine Präzisionsmikrometerschraube (5) mit nichtdrehender Spindel ist "hängend" eingebaut. Sie ist gegen einen Stahlbolzen

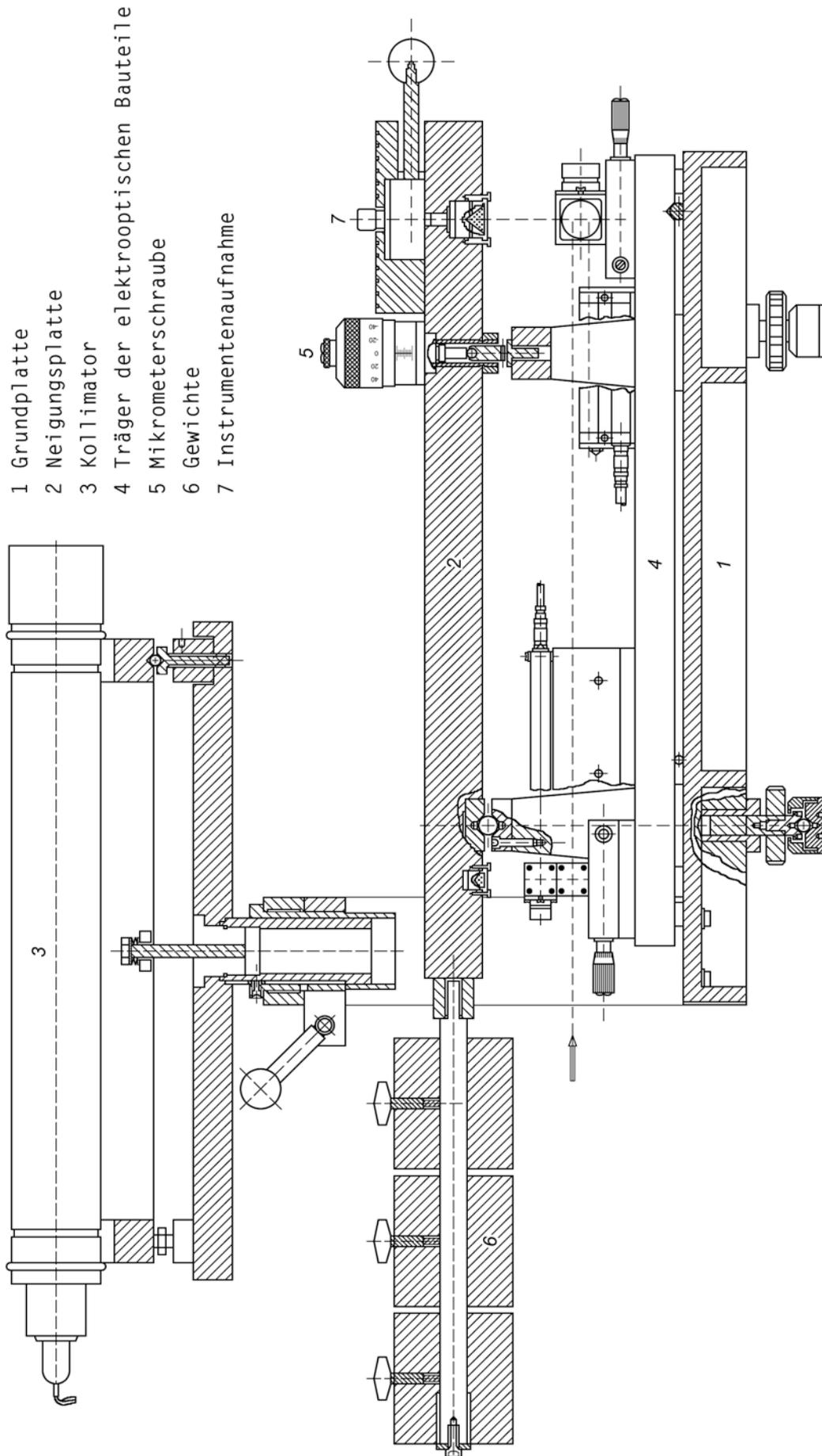


Abb. 9: Längsschnitt des Neigungstisches (Maßstab = 1:5)

mit einer eingesetzten, gehärteten Stahlkugel abgestützt. Die Mikrometerschraube hat einen Verstellbereich von 25 Millimetern bei einer Teilung von 2/1000 Millimeter. Damit kann die Neigungsplatte bei einem Radius von etwa 400 mm um circa ± 2 gon gekippt werden.

Zur Vergrößerung des Neigungsbereiches kann wahlweise eine andere Präzisionsmeßschraube mit einem Verstellweg von 50 Millimetern verwendet werden, die den Neigungsbereich auf circa ± 4 gon vergrößert.

Zur Entlastung der Mikrometerschraube sind an der Neigungsplatte drei Schiebegewichte (6) angebracht, die den Druck auf die Meßspindel regulieren und es ermöglichen, bei allen Messungen mit gleicher Belastung zu arbeiten.

An einem Ende der Neigungsplatte befindet sich ein Aufnahmeteller mit einer Normanzugsschraube, der dafür vorgesehen ist, Theodolite und Nivelliere aufzunehmen.

Auf der Neigungsplatte ist für die Aufnahme weiterer Prüflinge (z.B. elektronische Neigungsmesser oder Röhrenlibellen) eine plangeschliffene und gehärtete Stahlplatte mit einem rechtwinkligen Koordinatenraster (2 x 2 cm) angebracht.

Die zur Optik und Elektronik (zwei Interferometer, ein Strahlenteiler, zwei Empfänger) gehörenden Bauteile des Laserinterferometers sind auf einem abnehmbaren Invarträger montiert, der spannungsfrei auf Stahlrollen gelagert auf der Grundplatte liegt. Zum Ausrichten der beiden senkrechten Laserstrahlen sind die optischen Bauteile auf zwei kleinen Justiertellern befestigt.

Ein Kollimator von Wild (Typ T4A, Brennweite 540 mm) stellt bei Messungen mit Theodoliten und Nivellieren das Ziel dar. Eine stabile, stufenlose Höhenverstellung erlaubt eine Anpassung an die verschiedensten Typen und Fabrikate. Der Kollimator ist zur genauen Horizontierung wälzbar gelagert.

Die Abbildung 10 zeigt eine Seitenansicht des Neigungstisches. Die Instrumentenaufnahme trägt einen Theodoliten, und auf der

Stahlplatte befinden sich zwei elektronische Neigungsmesser.

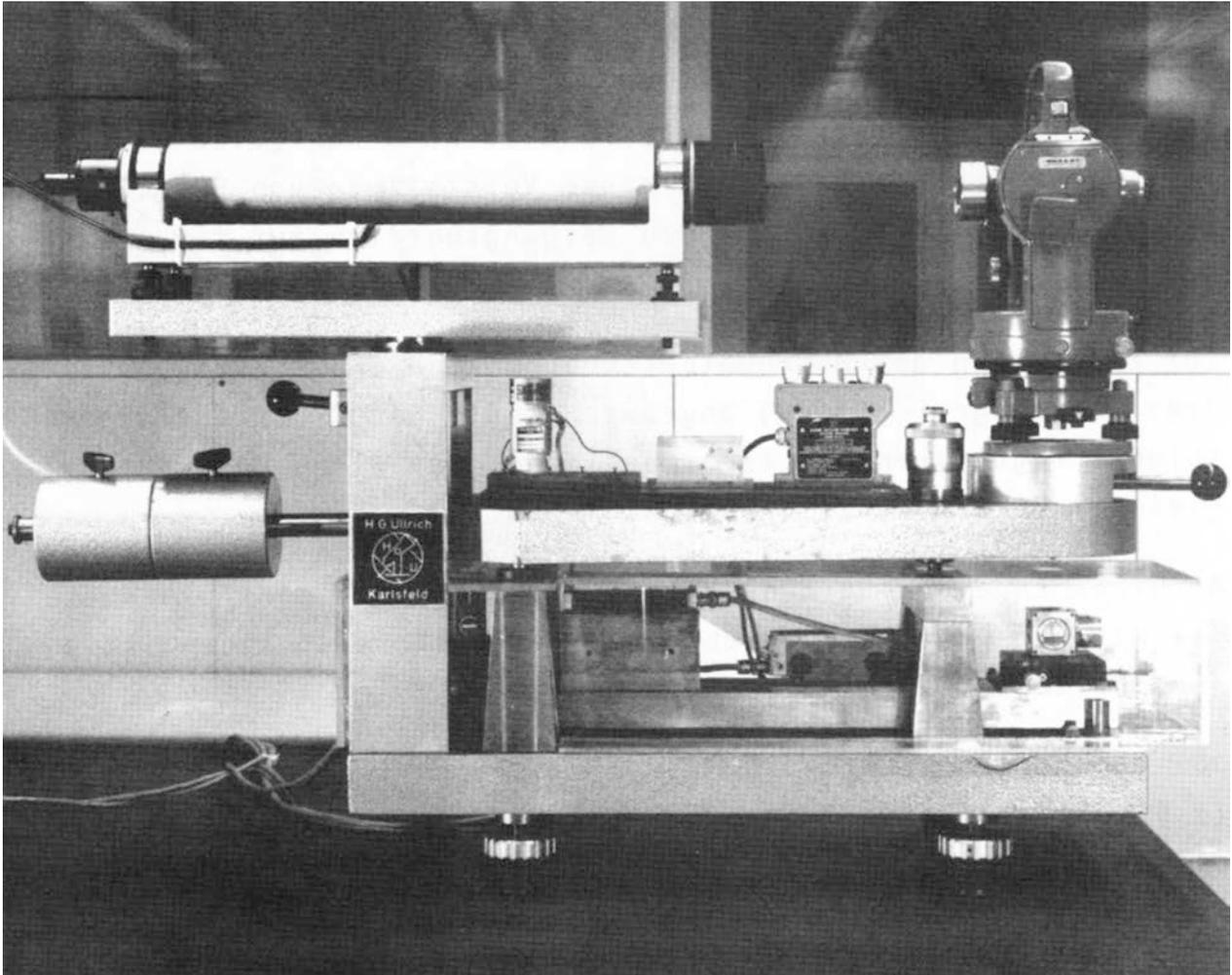


Abb. 10: Seitenansicht des Neigungstisches mit Theodolit und elektronischen Neigungsmessern

3.3 Anordnung der Meßoptik

Um mit dem Laserinterferometer Neigungsänderungen messen zu können, wurde ein zweiachsiges Meßsystem entwickelt. Abbildung 11 gibt die schematische Anordnung der verwendeten optischen Bauteile sowie den dazugehörigen Strahlengang wieder.

Das gebräuchlichere und kostengünstigere der von Hewlett Packard angebotenen Interferometer ist das Linearinterferometer. Dieses wurde für eine der Achsen verwendet. Für die zweite Achse war es aus Platzgründen notwendig, ein Einstrahlinterferometer einzu-

bauen. Die gesamte Konstruktion wäre sonst zu hoch geworden, da beim Linearinterferometer der Empfänger parallel zum einfallenden Strahl angeordnet sein muß. Das hätte zur Folge gehabt, daß der circa 15 cm lange Empfänger in vertikaler Anordnung hätte montiert werden müssen. Beim etwas kleineren Einstrahlinterferometer wird der dopplermulierte Meßstrahl senkrecht zum einfallenden Strahl abgelenkt. Die Fertigungstoleranzen sind für beide Interferometer und Reflektoren die gleichen, so daß die Verwendung dieser verschiedenen Bauteile keinen Nachteil darstellt.

Der Strahlenteiler und das Einstrahlinterferometer, die die gleichen Dimensionen haben, sind fest miteinander verschraubt. Im folgenden wird die senkrechte Achse vom Einstrahlinterferometer zum Einstrahlreflektor als X-Achse und die dazu parallele Achse vom Linearinterferometer zum Linearreflektor als Y-Achse bezeichnet.

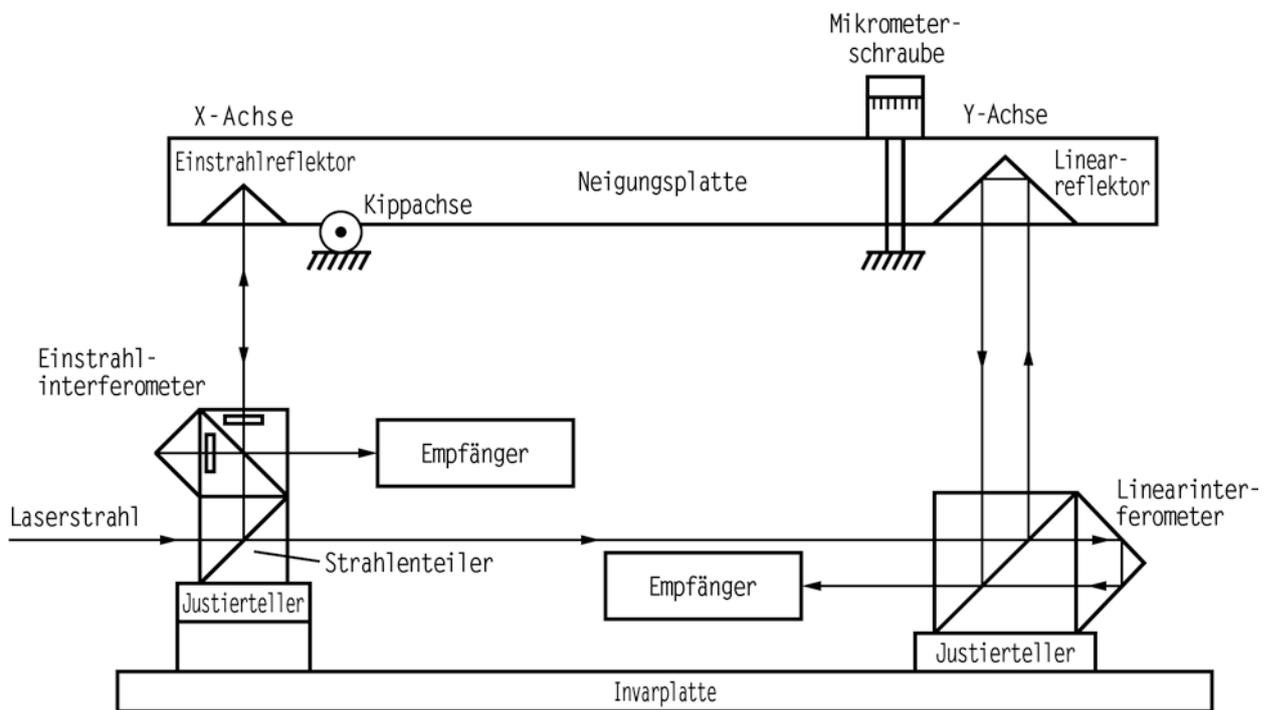


Abb. 11: Meßoptik und Strahlenverlauf

3.4 Bestimmung der Neigung

Die Bestimmung von Neigungen wird auf die Messung von Wegunterschieden zurückgeführt (Abbildung 12). Die folgenden Ableitungen werden auf eine in der Ausgangsstellung horizontale Neigungsplatte bezogen.

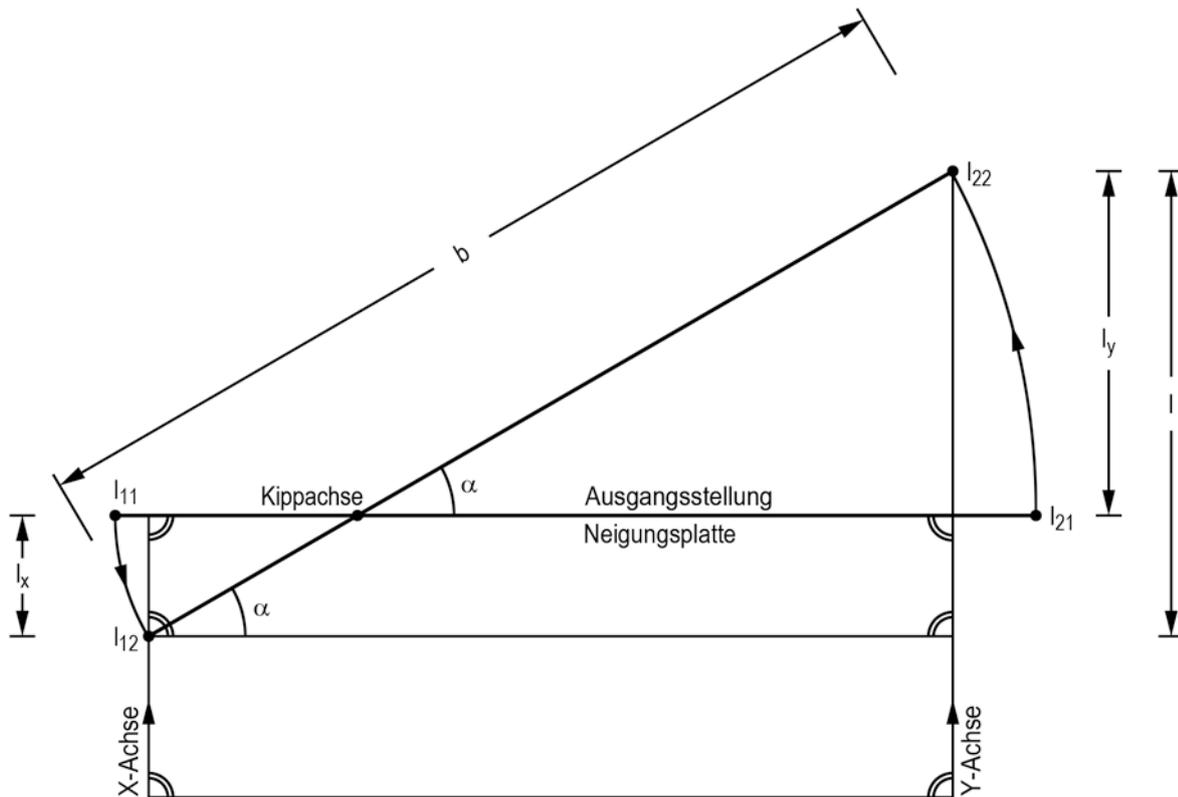


Abb. 12: Bestimmung der Neigung

In dieser horizontalen Ausgangsstellung seien die entsprechenden Ablesungen der X- und Y-Achse l_{11} und l_{21} . In der um den Winkel α geneigten Stellung seien die Ablesungen der X- und Y-Achse l_{12} und l_{22} . Die Wege in Richtung der X- und Y-Achse ergeben sich zu

$$l_x = l_{12} - l_{11} \quad (9)$$

$$l_y = l_{22} - l_{21} \quad (10)$$

Der Gesamtweg beziehungsweise der Wegunterschied l ist daher

$$l = l_x + l_y \quad (11)$$

Der Neigungswinkel α lässt sich nun bestimmen aus

$$\alpha = \arcsin \frac{l}{b} \quad (12)$$

l ist dabei die Summe der Entfernungsänderungen nach Gleichung (11) und b (~ 505 mm) ist der konstante Abstand zwischen den beiden Reflektoren der Neigungsplatte. Während l mit den Interferometern sehr genau gemessen wird, kann b nicht direkt bestimmt werden. Über die Abstandsmessung b wird in 4.6 berichtet.

Die beschriebene Meßanordnung erlaubt die präzise Bestimmung von Neigungsänderungen, die bei Kalibrieraufgaben hauptsächlich

benötigt werden. Die Neigungsänderungen werden als Differenz zweier gemessener Neigungen ermittelt, die sich auf die Ausgangsstellung des Tisches beziehen. Wenn es gelingt, mit einer exakt horizontalen Anfangsstellung des Tisches die Messungen zu beginnen, so erhält man absolute Neigungswinkel.

Gleichung (12) bedarf aufgrund folgender Überlegungen noch einiger Korrekturglieder. Dazu betrachte man einen Reflektor (Abbildung 13) in seiner Ausgangslage, das heißt der Strahl trifft senkrecht in A auf die horizontale Eintrittsfläche und verläßt den Reflektor in B symmetrisch zur optischen Achse PV (P = Pol, V = Vertex). Der Reflektor werde nun um die Kippachse K um den Winkel α gedreht. Dabei verlagern sich P nach P' und V nach V'. Betrachtet man nun denselben Strahl, der jetzt in A' in den Reflektor eintrifft, so wird dieser nicht um α , sondern um den Winkel γ abgelenkt, wobei

$$\gamma = \arcsin \frac{\sin \alpha}{n} \quad (13)$$

und n der Brechungsindex des Reflektorglases ist. Die optische Weglänge e_G (G = Glas) in einem Reflektor ist unabhängig von der Eintrittsstelle des Strahles, nicht aber vom Drehwinkel α .

Sie ist für

$$\alpha = 0 \rightarrow e_G = 2nd \quad (14)$$

$$\alpha \neq 0 \rightarrow e'_G = 2nd \frac{1}{\cos \gamma} \quad (15)$$

wenn d die Höhe des Reflektors ist.

Gleichung (15) kann man sich geometrisch veranschaulichen, wenn man denjenigen Strahl auswählt, der bei geneigtem Reflektor genau durch V' geht. Dieser trifft in C' in den Reflektor ein und in C' auch wieder aus. Dieser Strahl hat dabei die geometrische Länge

$$C'V' = 2d \frac{1}{\cos \gamma} \quad .$$

Aus Gleichung (14) und (15) folgt, daß die optische Weglänge um

$$2\Delta e_G = e'_G - e_G = 2nd \left(\frac{1}{\cos \gamma} - 1 \right) \quad (16)$$

Da die Symmetrieachse des Reflektors jedoch durch P'V' definiert ist, muß die Messung um

$$\Delta e_L = d \tan \gamma \sin \alpha \quad (18)$$

verbessert werden.

Damit ergibt sich die Gesamtverbesserung $\Delta e'$ zu

$$\Delta e' = \Delta e_G + \Delta e_L$$

$$\Delta e' = n d \left(1 - \frac{1}{\cos \gamma} \right) + d \tan \gamma \sin \alpha \quad (19)$$

$$\Delta e' = d \left(n - \frac{n}{\cos \gamma} + \tan \gamma \sin \alpha \right). \quad (19a)$$

Ähnliche geometrische Überlegungen sind bei RUEGER (1978) zu finden, der die Auswirkung eines fehlerhaft ausgerichteten Reflektors bei der elektrooptischen Distanzmessung untersucht. Setzt man in die dort angegebene Formel die für die Konstruktion des Neigungstisches zutreffenden Werte ein, so ergibt sich genau die in Gleichung (19a) angegebene Verbesserung $\Delta e'$. Da sich bei der Neigungsmessung aufgrund der Anordnung der Kippachse die beiden Reflektoren gegensinnig bewegen, aber α und γ für die beiden Reflektoren jeweils gleich sind, ist nur die Differenz Δe der Gesamtverbesserung Δe_1 (Reflektor der Y-Achse) und Δe_2 (Reflektor der X-Achse) maßgebend.

$$\Delta e = \Delta e_1 - \Delta e_2 \quad (20)$$

mit

$$\Delta e_1 = d_1 \left(n_1 - \frac{n_1}{\cos \gamma_1} + \tan \gamma_1 \sin \alpha \right) \quad (19b)$$

$$\Delta e_2 = d_2 \left(n_2 - \frac{n_2}{\cos \gamma_2} + \tan \gamma_2 \sin \alpha \right) \quad (19c)$$

wobei n_1 und n_2 die Brechungskoeffizienten der jeweiligen Reflektoren sind. Somit ergibt sich Δe zu

$$\Delta e = d_1 \left(n_1 - \frac{n_1}{\cos \gamma_1} + \tan \gamma_1 \sin \alpha \right) - d_2 \left(n_2 - \frac{n_2}{\cos \gamma_2} + \tan \gamma_2 \sin \alpha \right) \quad (20a)$$

Bei gleicher Höhe d_1 und d_2 der Reflektoren und gleichen Brechungskoeffizienten n_1 und n_2 wäre die Verbesserung $\Delta e = 0$. Da der Linearreflektor eine Höhe von $d_1 = 18,95$ mm und der Einstrahlreflektor eine Höhe von $d_2 = 9,65$ mm hat, beträgt die Differenz $d_1 - d_2 = 9,30$ mm.

Bringt man nun an den gemessenen Wegunterschied l die Verbesserung Δe an, so ergibt sich der verbesserte Neigungswinkel α' zu

$$\alpha' = \arcsin \frac{l + e}{b} \quad (21)$$

$$\alpha' = \arcsin \frac{l + \left[d_1 \left(n_1 - \frac{n_1}{\cos \gamma_1} + \tan \gamma_1 \sin \alpha \right) - d_2 \left(n_2 - \frac{n_2}{\cos \gamma_2} + \tan \gamma_2 \sin \alpha \right) \right]}{b} \quad (21a)$$

Der verbesserte Neigungswinkel α kann mit ausreichender Genauigkeit aus der ursprünglichen Gleichung (12) bestimmt werden.

Mit den am Anfang von 3.4 getroffenen Vereinbarungen ergeben sich die Vorzeichen l , Δe_G und Δe_L immer richtig. Dabei hat Δe_G immer entgegengesetztes Vorzeichen zu l und Δe_L , das heißt die optische Weglänge im Reflektor ist immer zu lang und die Weglänge in Luft ist stets zu kurz. Aufgrund dieser Vereinbarung ergibt sich:

$$\alpha > 0 \text{ wenn } l_y > 0, l_x < 0 \text{ und damit auch } l > 0$$

(dieser Fall trifft für die Zeichnung in Abbildung 12 zu),

$$\alpha < 0 \text{ wenn } l_y < 0, l_x > 0 \text{ und damit auch } l < 0.$$

Für alle weiteren Ausführungen wird der Einfachheit halber

$$l : = l + \Delta e$$

und

$$\alpha : = \alpha'$$

gesetzt, das heißt mit l und α werden ab jetzt die verbesserten Meßwerte bezeichnet. Wegen der Abhängigkeit der Verbesserung von der Neigung der Reflektoren muß bei jeder Stellung des Tisches die Kenntnis der Neigung vorausgesetzt werden. Aus praktischen Gründen bietet sich daher an, die Messung stets mit horizontaler Ausgangsstellung zu beginnen.

Die Auswirkung der Reflektorneigung α auf die Längenänderungsmessung und damit auf die Änderung der Neigungsbestimmung zeigt Abbildung 14. Man erkennt sogleich, daß es selbst bei kleinsten Tischneigungen notwendig ist, diesen Einfluß zu berücksichtigen, wenn das mit 0,01 mgon gesetzte Genauigkeitsziel nicht gefährdet werden soll.

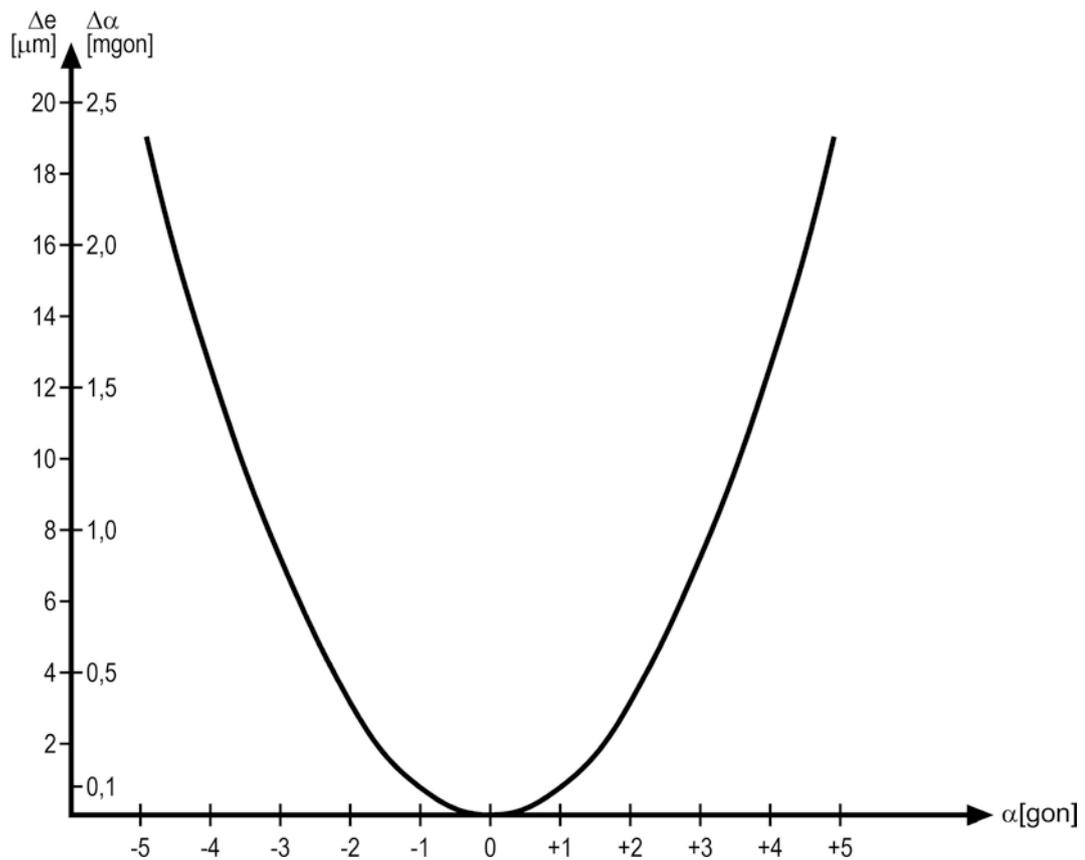


Abb. 14: Einfluß der Reflektorneigung auf die Längenmessung und Neigungsbestimmung

4. Justierung des Neigungstisches

Der Justierung des Neigungstisches kommt entscheidende Bedeutung zu, wenn man die hohe Genauigkeit der Laserinterferometermessung auf die Neigungsmessung übertragen möchte.

Deswegen wurden verschiedene Möglichkeiten und Verfahren entwickelt und erprobt, um die Justierbedingungen der gesamten Neigungstischanlage herzustellen. Für die Justierung und auch für die eigentlichen Messungen ist ein stabiler Aufbau von großer Wichtigkeit. Der Neigungstisch wurde vor allem als stationäre Anlage konzipiert. Sie kann aber auch transportiert werden.

Der Neigungstisch steht auf einer 1000 kg schweren Granitplatte, die auf drei Gußpfeilern ruht. Diese sind in einen 37 m langen, unterirdischen Stahlbeton-Wandträger eingegossen. Für die Durchführung der Justierungen wird noch ein zweiter Granittisch verwendet, der ebenfalls über drei Gußpfeiler mit demselben Stahlbetonträger Verbindung hat. Mit diesen Einrichtungen ist ein äußerst stabiler Meßaufbau gewährleistet.

4.1 Justierbedingungen

Um fehlerfreie Neigungswerte zu erhalten, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- 1) Der vom Laser Transducer ausgesandte Strahl und der vom Strahlenteiler um 0,8 mm nach unten versetzte Strahl müssen mit den Strahlen der X- und Y-Achse rechte Winkel bilden. Da sich alle Neigungsmessungen auf die Lotrichtung beziehen, wird man aus praktischen Gründen den vom Laser ausgesandten Strahl horizontieren, so daß die Strahlen der X- und Y-Achse räumlich senkrecht und damit auch parallel sein müssen.

Daraus folgen die weiteren Bedingungen:

- 2) Die Planplatte im Strahlenteiler muß 50 gon zur Horizontalen geneigt sein
- 3) Die Ein- und Austrittsfläche des Einstrahlinterferometers

müssen horizontal sein

- 4) Die Eintrittsfläche des Linearinterferometers muß senkrecht, die Austrittsfläche muß horizontal sein
- 5) Die Eintrittsflächen der beiden beweglichen Reflektoren müssen parallel sein
- 6) Die Eintrittsflächen der beiden beweglichen Reflektoren müssen bei horizontaler Neigungsplatte horizontal sein.

Die sich aus den genannten Bedingungen ergebenden rechten Winkel und Parallelitäten sind in Abbildung 15 dargestellt.

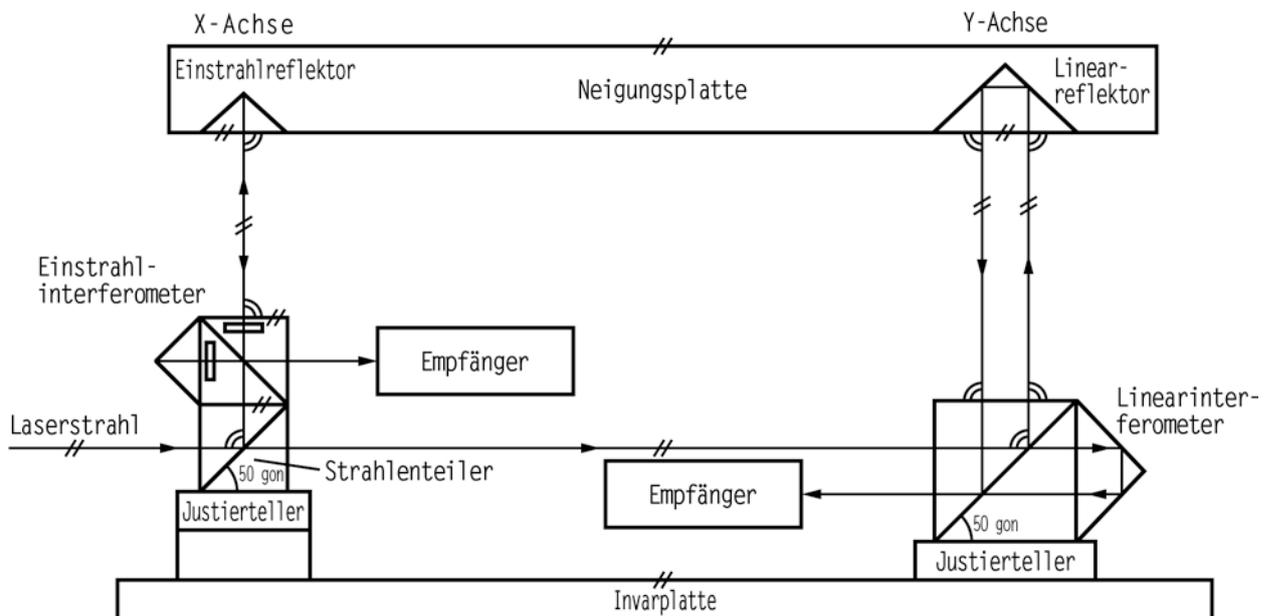


Abb. 15: Graphisch dargestellte Justierbedingungen

Voraussetzung für die Erfüllbarkeit dieser Bedingungen ist, daß die optischen Bauteile präzise bearbeitet sind. Im einzelnen müssen folgende Forderungen an die Bauteile gestellt werden:

- 1) Die Ein- und Austrittsfläche des Einstrahlinterferometers müssen parallel sein, das heißt der senkrecht einfallende Strahl muß das Interferometer unabgelenkt passieren.
- 2) Das Linearinterferometer muß den einfallenden Strahl senkrecht ablenken.
- 3) Der Einstrahlreflektor muß den einfallenden Strahl in

sich reflektieren, das heißt einfallender und reflektierter Strahl müssen zusammenfallen.

- 4) Einfallender und reflektierter Strahl des Linearreflektors müssen parallel sein.

Der Hersteller garantiert, daß diese Bedingungen "innerhalb enger Toleranzen" eingehalten werden. Alle optischen Bauteile werden im Werk nach strengen Maßstäben überprüft, wovon sich der Autor anlässlich eines Besuches selbst überzeugen konnte. Unabhängige Untersuchungen wurden vor einigen Jahren von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig durchgeführt. Die Abweichungen von den Sollwerten lagen durchschnittlich im Bereich von einem Milligon. Diese Ergebnisse bestätigen die hohe Qualität der optischen Bauteile und damit ihre Eignung für Präzisionsmessungen (siehe auch 5.1.1).

4.2 Justiermöglichkeiten

Um die im vorigen Abschnitt aufgestellten Bedingungen zu erfüllen, können folgende Bauteile horizontal beziehungsweise justiert werden:

- 1) die Grund- beziehungsweise Invarplatte mit vier Stellschrauben, die unter der Grundplatte angebracht sind
- 2) der Strahlenteiler, das Einstrahlinterferometer und das Linearinterferometer mit Hilfe der von Hewlett Packard gefertigten Justierteller, die zwei zueinander senkrechte Kippschrauben haben
- 3) die beiden beweglichen Tripelprismen an je vier Justierschrauben mit Federn
- 4) die Neigungsplatte mit der Präzisionsmikrometerschraube
- 5) der Laser Transducer an drei Stellschrauben, die unter einer Verbindungsplatte angebracht sind.

Der Kollimator, der wälzbar ist und als Ziel bei Theodolit- und Nivellieruntersuchungen dient, ist mit einer Justierschraube zur

Horizontierung versehen.

4.3 Justierverfahren

Es wurden drei Justierverfahren getestet und angewendet, die zunächst nur kurz vorgestellt werden.

Die ausführlichen Beschreibungen, Erläuterungen und Genauigkeitsabschätzungen dazu erfolgen in 4.4.2.

a) Visuelle Methode

Eine visuelle Ausrichtung aller optischen Bauteile ist sehr einfach durchzuführen, wenn die Abstände zwischen den Bauteilen größer als 50 cm sind. Es gelingt durch wechselseitiges Drehen der Fußschrauben und seitliches Verschieben des Lasertisches, und durch Drehen der beiden Kippschrauben der Justierteller, einen zentrischen Laserstrahlengang zu erzeugen und die optischen Bauteile auf der Invarplatte im Sinne einer Vororientierung auszurichten.

b) Autoreflexionsmethode

Dieser Methode liegt der Gedanke zugrunde, daß das Spannungssignal im Empfänger ein Maximum erreicht, wenn der Laserstrahl senkrecht auf einen Planspiegel fällt. Wird der Planspiegel horizontal gestellt, so ist der Laserstrahl senkrecht.

c) Autokollimationsmethode

Bei dieser Methode wird das Prinzip der Autokollimation verwendet. Fallen das Fadenkreuz eines Autokollimationsfernrohres und sein an einer optischen Fläche reflektiertes Bild zusammen, so steht die optische Fläche senkrecht zur Autokollimationsachse.

Von diesen drei Methoden erwiesen sich die visuelle und die Autokollimationsmethode am geeignetsten.

Die visuelle Methode ist die Grundlage der Grobjustierung. Sie wird immer angewendet, unabhängig davon, ob danach noch mit der Autokollimationsmethode eine Feinjustierung zur Genauigkeits-

steigerung erfolgt.

Die Autoreflexionsmethode ergab keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Dennoch kann sie zur groben Überprüfung der Justierung nach der Autokollimationsmethode verwendet werden.

4.4 Durchführung der Justierung

4.4.1 Zusammenstellung der wichtigsten Justiervorgänge

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Schritte der vorläufigen und endgültigen Justierungen zusammengestellt. Dabei ist die Reihenfolge von entscheidender Bedeutung.

- 1) Horizontieren der Invarplatte mit einem elektronischen Neigungsmesser (zum Beispiel Talyvel) durch Drehen an den vier Fußschrauben
- 2) Grobjustierung von Laserstrahl und Interferometern mit Lasertisch und Justiertellern: der Laserstrahl muß zentrisch zu den Lochblenden des Strahlenteilers und des Linearinterferometers sein (visuelle Methode)
- 3) Justierung der beiden Interferometer durch Autokollimation
 - a) Abnehmen der Neigungsplatte
 - b) Horizontieren des Autokollimators
 - c) Aufstellen und Horizontieren eines Planspiegels über dem Einstrahlinterferometer
 - d) Justierung der X-Achse durch Kippen des Justiertellers (Autokollimation)
 - e) Aufstellen und Horizontieren des Planspiegels über dem Linearinterferometer
 - f) Justierung der Y-Achse durch Kippen des Justiertellers (Autokollimation)
- 4) Justierung der beiden beweglichen Reflektoren durch Autokollimation
 - a) Anbringen je eines Planspiegels vor den Eintrittsflä-

chen der Reflektoren

- b) Horizontieren der Neigungsplatte mit der Talyvel
 - c) Justierung der beiden Reflektoren mit je vier Justierschrauben durch Autokollimation
- 5) Feinjustierung des Laserstrahls (visuelle Methode)
- a) Abnehmen der Neigungsplatte
 - b) Aufstellen und Horizontieren eines Planspiegels über den Interferometern
 - c) Aufstellen des Lasertisches in circa 10 m Entfernung
 - d) Justierung des Lasertisches: der reflektierte Laserstrahl muß zentrisch in die Laserlochblende fallen
 - e) Horizontieren der Neigungsplatte
 - f) Aufstellen des Lasertisches am ursprünglichen Platz

4.4.2 Ausführliche Beschreibung der Justiermethoden

Die folgenden Ausführungen geben zusätzliche Erläuterungen zu den im vorausgegangenen Abschnitt chronologisch zusammengefaßten Justiervorgängen.

4.4.2.1 Horizontierung der Invarplatte

Als erstes wird die auf circa 2 µm plangeschliffene Invarplatte, die die optischen Bauteile trägt, mit Hilfe der vier Stellschrauben und eines elektronischen Neigungsmessers horizontiert. Da vier Stellschrauben vorhanden sind, erfolgt die Horizontierung iterativ, wobei der elektronische Neigungsmesser jeweils um 100 gon umgesetzt wird.

4.4.2.2 Vororientierung des Strahlenganges

Im nächsten Schritt werden der Laserstrahl und die optischen Bauteile visuell ausgerichtet. Dazu werden vor den Strahlenteiler und vor das Linearinterferometer passende Lochblenden magnetisch befestigt. Durch Drehen an den drei Fußschrauben des Lasertisches und an den beiden Mikrometerschrauben der Justiertel-

ler gelingt es innerhalb weniger Minuten, den Laserstrahl genauer als 1 mm auszurichten.

Für die visuell durchgeführten Horizontier- und Justierverfahren wird generell die dafür vorgesehene kleine Lochblende (Durchmesser 3 mm) am Laser Transducer verwendet. Für alle anderen Verfahren sowie die Lasermessungen selbst muß die große Lochblende gewählt werden (Durchmesser 7,6 mm).

Die mit der visuellen Methode erzielte Genauigkeit reicht bereits für viele Anwendungen aus. Wird jedoch eine Genauigkeit der Neigungsmessung in der Größenordnung von $\pm 0,01$ mgon angestrebt, so muß in weiteren Schritten die erreichte Justierung verbessert werden.

4.4.2.3 Justierung der optischen Bauteile mit Autokollimation

Die Bedingungen für die beiden Interferometer und Reflektoren lauten, daß die ein- und die austretenden Strahlen senkrecht zu den optischen Flächen stehen müssen. Um dies zu erreichen, bietet sich die Autokollimationsmethode an. Für die Anwendung dieser Methode wurde eine Meßbrücke aus Aluminium angefertigt (Abbildung 16). Wenn die Neigungsplatte abgenommen wird, kann diese Brücke über den Interferometern aufgestellt werden.

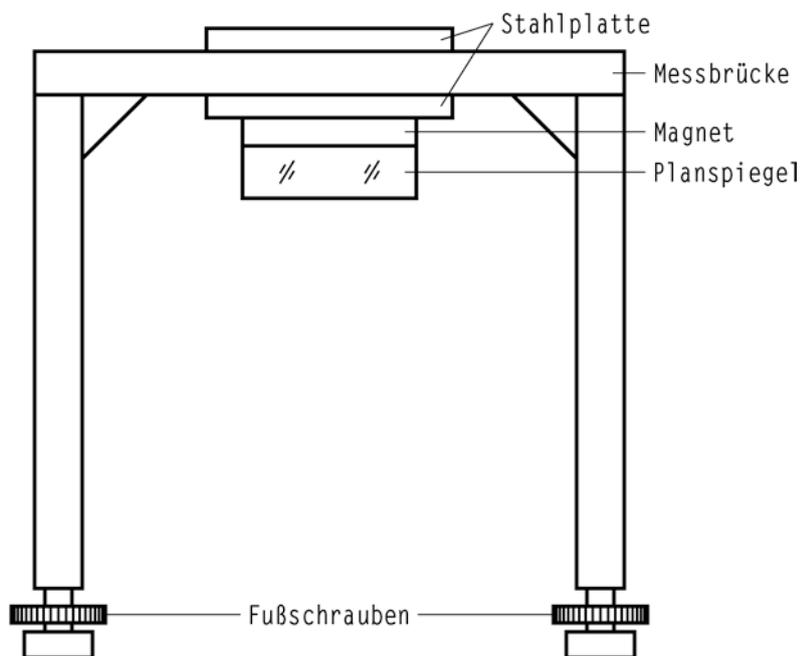


Abb. 16: Meßbrücke mit Planspiegel

Auf und unter der Meßbrücke wurden zwei dünne, gehärtete Stahlplatten befestigt, die mit einer Genauigkeit von $\pm 1 \mu\text{m}$ eben und parallel zueinander sind. Die Meßbrücke wird mit Hilfe eines elektronischen Neigungsmessers und ihrer drei an den Stützen befindlichen, feingängigen Fußschrauben mit einer Genauigkeit von $\pm 1 \text{ mgon}$ horizontalisiert. An der unteren Stahlplatte wird sodann ein Planspiegel mit präzise gearbeiteten Auflagerflächen, der mit einem Magneten versehen ist, angebracht. Es kann deshalb angenommen werden, daß damit auch der Planspiegel mit der gleichen Genauigkeit von $\pm 1 \text{ mgon}$ horizontalisiert ist.

Als weiteres Meßinstrument wird der photoelektrische Autokollimator von Rank, Taylor, Hobson, Typ TA 53, verwendet. Eine ausführliche Beschreibung findet sich in Abschnitt 7.1.

Die Reihenfolge der folgenden Justierungen ist sehr wichtig. Als erstes müssen die X-Achse, dann die Y-Achse und danach die beiden Reflektoren justiert werden.

Abbildung 17 zeigt den Versuchsaufbau für die Justierung der X-Achse. Der Autokollimator wird auf die gleiche Höhe wie der Strahlenteiler gebracht und mit Hilfe eines senkrechten Planspiegels horizontalisiert. Nach Entfernen der Neigungsplatte wird die horizontale Meßbrücke über das Einstrahlinterferometer gestellt. Auf das Einstrahlinterferometer muß noch ein Viertelwellenplättchen aufgelegt werden, damit die Strahlen in das Autokollimatorfernrohr zurückgesandt werden. Im Gesichtsfeld des Autokollimators werden neben dem Fadenkreuz drei reflektierte Bilder des Fadenkreuzes sichtbar, die zur Deckung gebracht werden müssen. Reflektierende Flächen sind der Planspiegel und die Eintritts- und die Austrittsfläche des Einstrahlinterferometers. Durch Drehen der beiden Kippschrauben des Justiertellers wird diese Justierbedingung erfüllt. Danach wird die Meßbrücke über das Linearinterferometer gestellt und horizontalisiert. Der für die X-Achse beschriebene Justiervorgang wird auch für die Y-Achse angewendet.

Das Ziel der Justierung ist erreicht, wenn für die beiden Interferometer Autokollimation vorliegt. Die X- und die Y-Achse stehen dann räumlich senkrecht. Dies wird erst durch mehrfaches Umsetzen

der Meßbrücke erfüllt, da der Justiervorgang iterativ ist. Die optimale Ausrichtung des Autokollimators wird jeweils durch vorsichtiges Verschieben und Drehen erreicht.

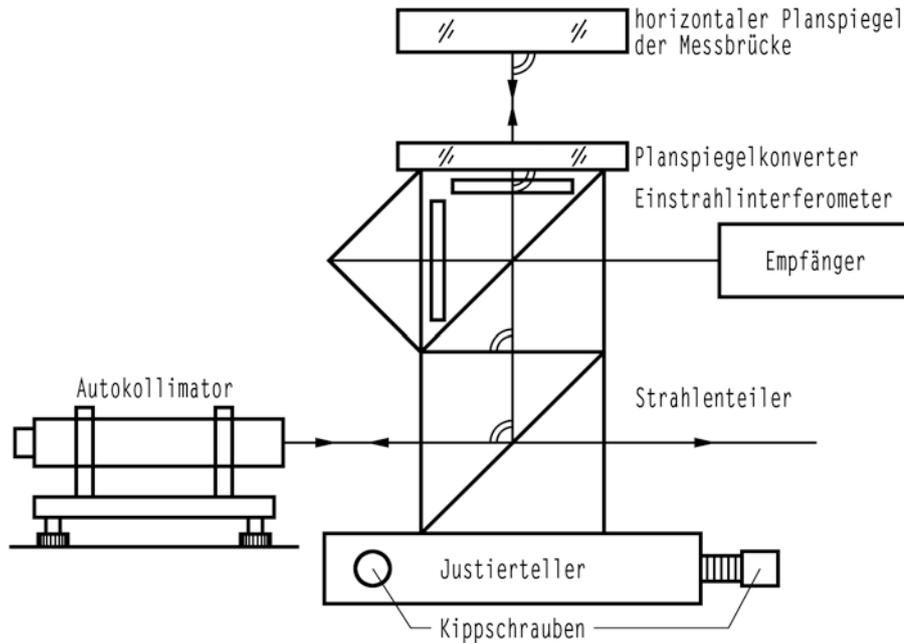


Abb. 17: Justierung der X-Achse mit Planspiegel und Autokollimator

Die sich anschließende Justierung der beiden beweglichen Reflektoren hat zum Ziel, daß ihre Eintrittsflächen parallel und bei horizontaler Neigungsplatte horizontal ausgerichtet sind. Für diese Justierung wird die Meßbrücke entfernt, die Neigungsplatte aufgelegt und horizontaliert. Die vorher durchgeführte Justierung der X- und Y-Achse darf dabei nicht verändert werden. Der Meßvorgang ist ähnlich dem der Justierung der X- und Y-Achse. Da die reflektierten Bilder der Eintrittsflächen der Reflektoren im Autokollimator nur sehr undeutlich sind, wurde auf den beiden Eintrittsflächen ein Planspiegel mit Spezialfett befestigt. Mit Hilfe von Autokollimation werden der Einstrahl- und der Linearreflektor so justiert, daß das Fadenkreuz des Autokollimators und seine reflektierten Bilder zusammenfallen. Reflektierte Bilder kommen von den horizontalen Eintritts- und Austrittsflächen der Interferometer und den Eintrittsflächen der beweglichen Reflektoren. Für diese Justierungen sind an den Fassungen der Reflektoren je vier Justierschrauben angebracht.

Abbildung 18 zeigt schematisch die beiden Reflektoren mit den Planspiegeln und Justierschrauben. Die Reihenfolge, nach welcher die Reflektoren justiert werden, ist hier belanglos.

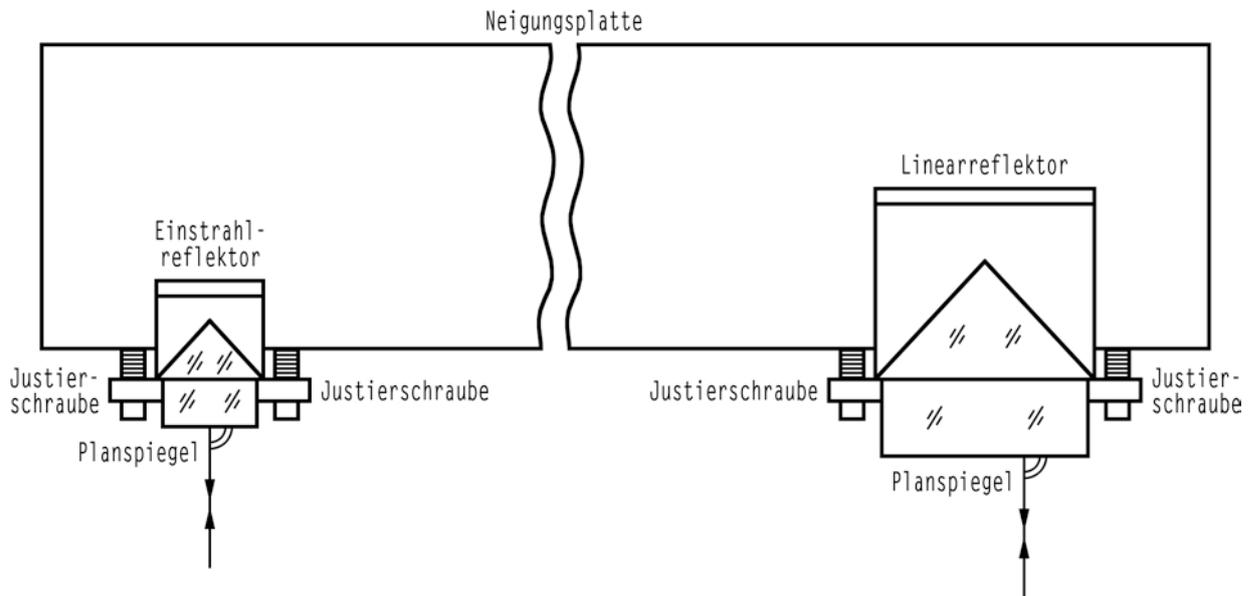


Abb. 18: Justierung der beiden Reflektoren mit Planspiegeln durch Autokollimation

4.4.2.4 Justierung der optischen Bauteile mit Autoreflexion

Die von Hewlett Packard entwickelte Autoreflexionsmethode [Hewlett Packard Application Note 197-2, Laser and Optics, 5501A] dient ebenfalls zur Justierung von optischen Bauteilen. Sie stellt ein von der Autokollimationsmethode unabhängiges Verfahren dar. Das Prinzip besteht darin, das Spannungssignal, das der von einem Planspiegel reflektierte Laserstrahl im Empfänger erzeugt, zu maximieren. Nach Werksangaben kann so eine Ausrichtgenauigkeit von $\pm 4,5$ mgon erzielt werden. Für die Durchführung kann die beschriebene Meßbrücke mit Planspiegel verwendet werden. An den Empfänger wird ein analoges Voltmeter zur Spannungsmessung angeschlossen. Mit den beiden Kippschrauben des Justiertellers sucht man das Maximum der Spannungsanzeige. Abbildung 19 zeigt die schematische Meßanordnung für die Y-Achse. Das gesuchte Spannungsmaximum, das nach den Angaben des Herstellers eng begrenzt und ausgeprägt ist, konnte bei keiner der beiden Achsen exakt definiert werden, so daß sich dieses Verfahren nicht be-

friedigend anwenden ließ.

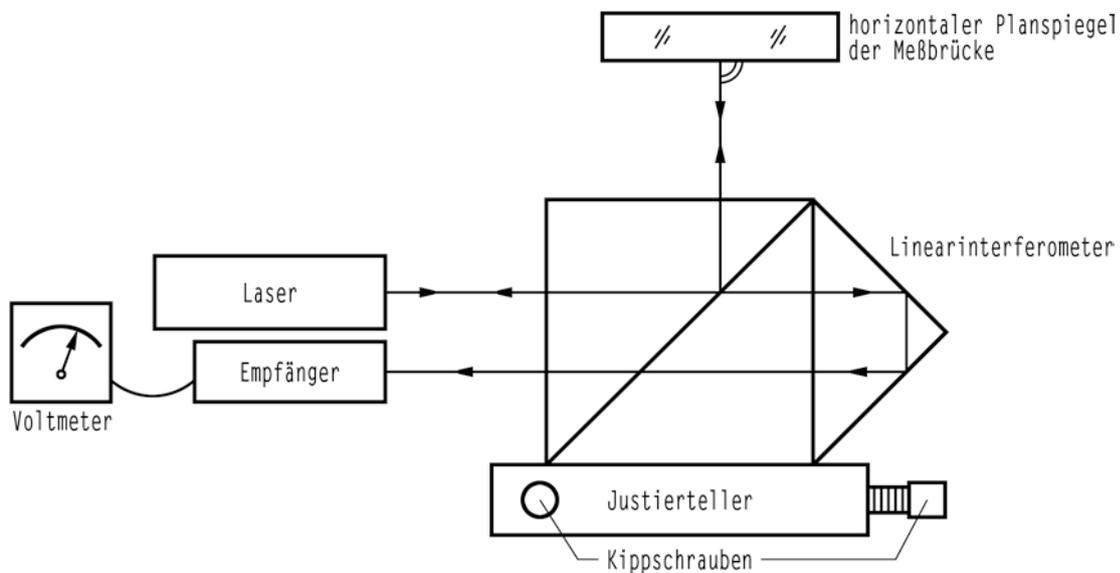


Abb. 19: Justierung der Y-Achse mit Planspiegel und Voltmeter (Autoreflexionsmethode)

Dieses Problem wurde mit leitenden Ingenieuren von Hewlett-Packard besprochen, die dafür keine eindeutige Erklärung haben. Die bisherigen Erfahrungen mit dieser Methode beschränken sich auf einachsige Systeme, so daß das Versagen in dem besonderen Aufbau des zweiachsigen Systems begründet sein muß.

Die Autoreflexionsmethode kann als selbständiges Verfahren nicht eingesetzt werden. Trotzdem können mit diesem Verfahren die anderen Justierungen grob überprüft werden.

4.4.2.5 Ausrichtung des Laserstrahls

Der Laserstrahl wird horizontiert, indem ein Planspiegel mit geschliffenen Auflagen auf die horizontierte Invarplatte gesetzt wird. Der Laser Transducer wird für diese Justierung in einem Abstand von circa 10 m vom Neigungstisch auf einen zweiten Granittisch gestellt. Diese Abstandsvergrößerung erleichtert die Horizontierung und steigert ihre Genauigkeit.

Zur Begrenzung des Strahlenkegels wird die kleine Blende gewählt, die noch mit einem weißen Papierring versehen wird, um den zurückkommenden Laserstrahl gut sichtbar zu machen. Mit Hilfe der

hinteren Fußschraube des Lasertisches wird nun der vom Planspiegel reflektierte Laserstrahl so eingestellt, daß er genau in die Öffnung der kleinen Blende fällt. Der weiße Papierring erleichtert die Überprüfung der Horizontierung; in der Sollstellung darf kein Laserlicht auf das Papier fallen. Auf diesem Wege kann der Laserstrahl mit einer Genauigkeit von ± 3 mgon horizontalisiert werden.

Mit diesem Justiervorgang kann der Laserstrahl zwar horizontal, nicht jedoch seitlich ausgerichtet werden, da der senkrechte Planspiegel auf der Invarplatte nicht exakt ausgerichtet werden kann. Außerdem konnte der Planspiegel aus Platzgründen nicht in den Strahlengang aufgestellt werden, so daß der Laserstrahl seitlich am Strahlenteiler vorbeigeht.

Besser geeignet zur horizontalen und seitlichen Ausrichtung erwies sich eine Versuchsanordnung unter Verwendung der Meßbrücke mit dem horizontalisierten Planspiegel (Abbildung 20). Der Justiervorgang ist identisch mit dem eben beschriebenen. Mit Hilfe der hinteren Fußschraube des Lasertisches, der in einem Abstand von circa 10 m auf dem zweiten Granittisch steht, wird der vom horizontalen Planspiegel reflektierte Laserstrahl so eingestellt, daß er genau in die Öffnung der kleinen Blende fällt. Die Horizontierung kann protokolliert werden, indem die Meßbrücke über das zweite Interferometer gestellt wird. Die seitliche Ausrichtung geschieht durch Drehen an den beiden vorderen Fußschrauben sowie durch Verschieben des Lasertisches, bis der Laserstrahl mittig in die Blende fällt. Diese Justierung ist ein iterativer Meßvorgang, so daß die Meßbrücke einige Male umgesetzt werden muß.

Die gesamte Neigungstischanlage ist nun justiert. Allerdings ist es noch erforderlich, den Laser Transducer, der während der gesamten Justiervorgänge circa zehn Meter vom Neigungstisch entfernt auf einem zweiten Granittisch steht, wieder an den ursprünglichen Platz zu stellen. Die Horizontierung des Laserstrahls bleibt dabei erhalten, da sich beide Granittische auf gleicher Höhe befinden, absolut horizontal sind und ihre Ebenheit nach Herstellerangaben und nachweislich eigener Messungen

besser als $\pm 10 \mu\text{m}$ sind. Bei Nichtvorhandensein eines zweiten Granittisches könnte die horizontale Lage des Laserstrahls auch mit Hilfe einer Libelle, die auf dem Lasertisch angebracht wird, fixiert werden. Die seitliche Justierung erfolgt wiederum mit der eben ausführlich beschriebenen Methode.

Die für eine einwandfreie Neigungsmessung einzuhaltenden Bedingungen sind bei Anwendung der beschriebenen Justiermethoden erfüllt.

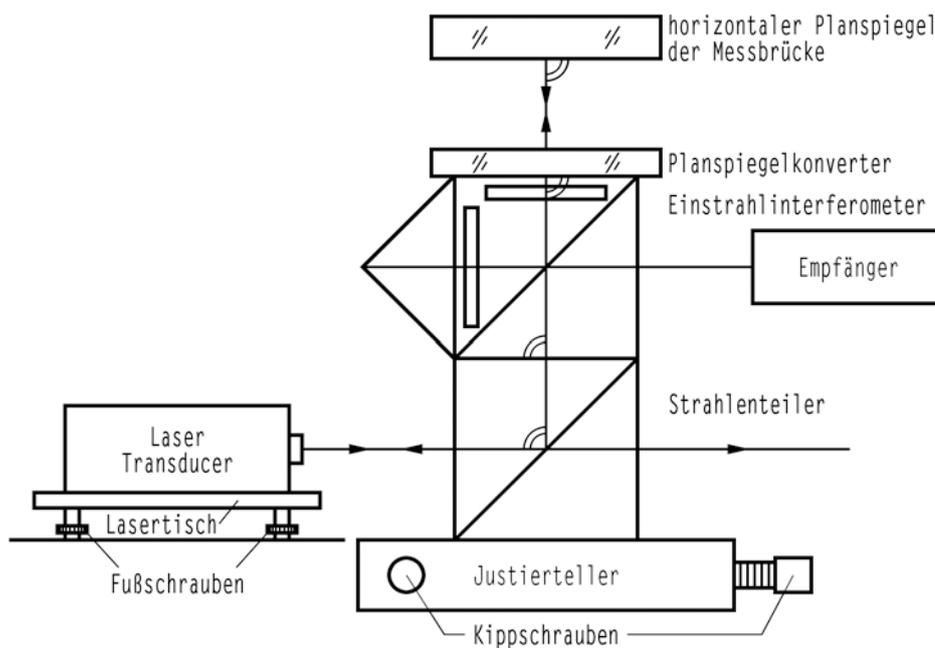


Abb. 20: Ausrichtung des Laserstrahls mit dem Planspiegel und Lasertisch

4.5 Genauigkeit der Justierung

Die Genauigkeit der Ausrichtung der X- und Y-Achse hängt von der Genauigkeit der Justierung der optischen Bauteile und des Laserstrahls ab.

Die Autokollimationsmethode hat theoretisch eine Genauigkeit von circa $\pm 2 \text{ mgon}$, wenn man voraussetzt, daß die Meßbrücke, der Planspiegel der Meßbrücke und der Autokollimator jeweils mit einer Genauigkeit von $\pm 1 \text{ mgon}$ horizontaliert sind. Führt man jedoch mehrere unabhängige Justierungen mit dieser optischen Methode durch, so ergeben sich an den Kippschrauben der beiden

Justierteller mittlere Abweichungen von einem Teilstrich, der einem Neigungswinkel von ungefähr 10 mgon entspricht.

Die Justierung nach der visuellen Methode hat eine Genauigkeit von circa ± 20 mgon. Mehrere unabhängig durchgeführte Justiervorgänge ergaben mittlere Abweichungen von zwei Teilstrichen an den Kippschrauben der beiden Justierteller.

Die angegebenen Genauigkeiten konnten durch einen Vergleich der mit der optischen und mit der visuellen Methode erhaltenen Ableisungen an den Kippschrauben bestätigt werden. Obwohl sich mit der visuellen Methode, die nur einen geringen Aufwand erfordert, sehr gute Ergebnisse erzielen lassen, darf nicht übersehen werden, daß sich die äußerst wichtige Justierung der beweglichen Reflektoren nur mit der Autokollimationsmethode durchführen läßt.

Auch für die Ausrichtung der beiden Reflektoren wird eine Genauigkeit von ± 10 mgon angenommen. Dies bestätigte sich in mehreren Wiederholungsmessungen mit dem Autokollimationsfernrohr.

Die Auswirkung der Justiergenauigkeit auf die Neigungswinkelmessung wird in Kapitel 5 beschrieben.

4.6 Messung des Reflektorenabstandes

Um den Neigungswinkel α berechnen zu können, muß nach Gleichung (21a) neben dem gemessenen Wegunterschied l der Abstand b bekannt sein.

b ist definiert als der Abstand zwischen den Symmetrieachsen der beiden Reflektoren. Wenn die Reflektoren gleiche Dimensionen haben, ist dies zugleich der Abstand zwischen den Nodalpunkten P beziehungsweise zwischen den räumlichen Ecken V der beiden Reflektoren (Abbildung 21). Der Nodalpunkt P liegt auf der Senkrechten zur Eintrittsfläche (in der Abbildung 21 dargestellt durch die Linie AA'), die durch die räumliche Ecke des Prismas (Vertex V) geht. Wenn d die Höhe des Prismas ist, so ist die Entfernung AA' nach P gleich $\frac{d}{n}$, wobei n der Brechungsindex des Prismenglases ist.

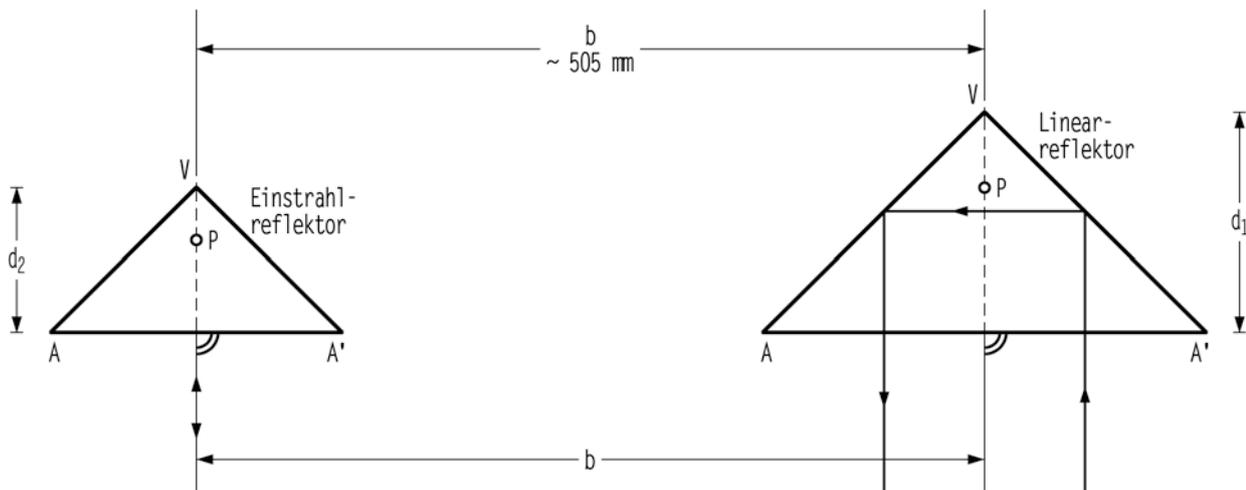


Abb. 21: Graphische Darstellung des Abstandes b

Die angestrebte Genauigkeit der Neigungsmessung hängt entscheidend von der präzisen Bestimmung des Abstandes b ab. Daher wurde diesen Messungen besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Ein fehlerhafter Wert für b wirkt sich wie ein Maßstabsfehler aus, der die Ergebnisse in erster Näherung proportional zum Betrag einer gemessenen Neigungsänderung verfälscht.

Es wurden zwei unabhängige Meßverfahren entwickelt, die in den folgenden Abschnitten beschrieben werden.

4.6.1 Indirekte Messung mit drei Spiegelkeilen

Mit diesem Meßverfahren, das auf einem Vorschlag von Professor Dr. Kunzmann (Physikalisch Technische Bundesanstalt, Braunschweig) basiert, ist nur eine indirekte Bestimmung von b möglich. Ein fester Neigungswinkel α , der in Form eines Spiegelkeiles vorgegeben ist, wird dabei als Winkelnormale benutzt. Abbildung 22 zeigt einen Spiegelkeil in Ansicht und Schnittbild.

Die Firma B. Halle, Berlin, stellte in Sonderanfertigung drei solcher Spiegelkeile her, die Winkel von etwa $20'$, $50'$ und $80'$ verkörpern. Die Keile sind aus Quarzglas "Suprasil" gefertigt und durch optischen Kontakt mit einer Grundplatte aus Quarzglas "Herasil" verbunden. Die Ebenheit der beiden Spiegeloberflächen wurde mit $\lambda/20$ angegeben. Die Auflageflächen der würfelförmigen Metallfassung sind planparallel.

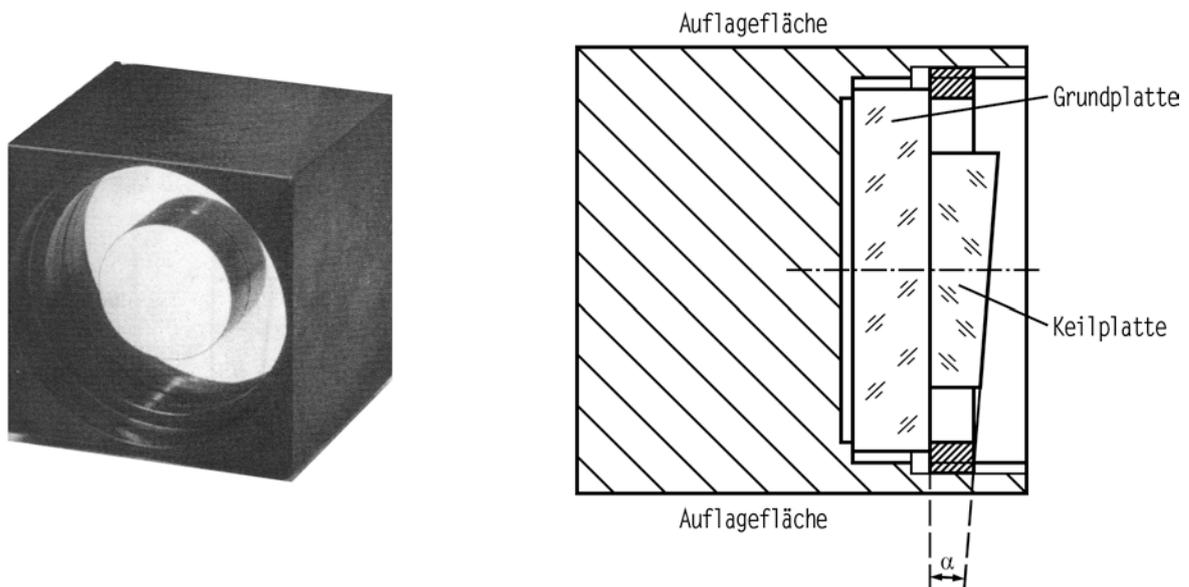


Abb. 22: Ansicht und Schnittbild eines Spiegelkeiles

Die genauen Winkel der drei Spiegelkeile wurden von den Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, mit einem Universal-Winkelmeßkomparator (Meßbereich: 360°; Meßunsicherheit: $\pm 0,15''$ bei $P = 99,7\%$; digitaler Ziffernschritt: $0,1''$) bestimmt. Als Zielfernrohr diente dabei der hochschuleigene, photoelektrische Autokollimator von Rank, Taylor, Hobson, so daß zur indirekten Messung des Abstandes b dieselbe Gerätekombination benutzt werden konnte wie bei der Kalibrierung. Für die Keilwinkel gelten laut Prüfbericht 857/80 der PTB folgende Werte:

Spiegelkeil 1 (20'): $\alpha = 19'17,90''$

Spiegelkeil 2 (50'): $\alpha = 51'09,14''$

Spiegelkeil 3 (80'): $\alpha = 82'51,10''$

Als "Unsicherheit" der Meßwerte wird $\pm 0,2''$ ($P = 95\%$ nach DIN 1319) angegeben.

Eine Sichtprüfung vor den Messungen bei der PTB ergab, daß die Keile nicht zur Auflagefläche ausgerichtet waren. Mit Hilfe eines Autokollimators wurden die Keile in eine senkrecht zur Auflagefläche gerichtete Lage gedreht. Die Empfindlichkeit der Justierung war nicht fein genug, so daß ein restlicher Pyrami-

dalfehler (FLÜGGE, 1954) zwischen Auflagefläche und den beiden Spiegelkeilflächen von circa $\pm 25''$ verblieb. Der dadurch entstandene Meßfehler liegt jedoch mit $\pm 0,0001''$ weit unterhalb der Meßgenauigkeit.

Zur indirekten Bestimmung des Abstandes b wurde die folgende Meßanordnung gewählt (Abbildung 23).

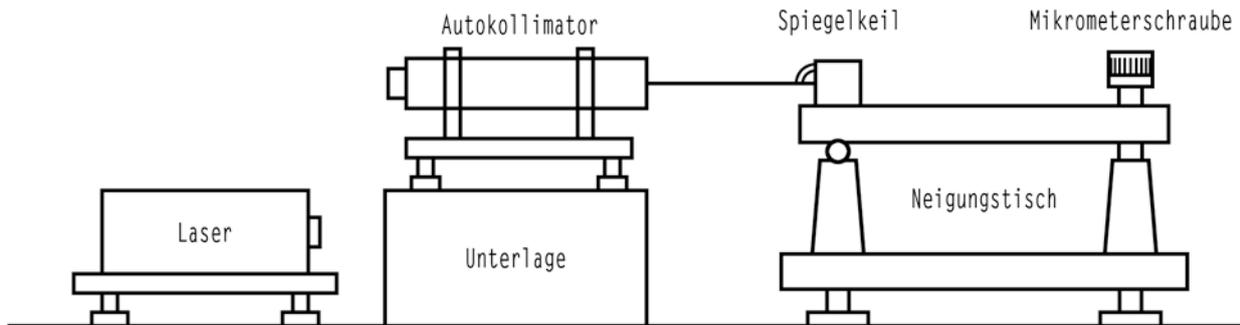


Abb. 23: Meßanordnung zur indirekten Bestimmung des Abstandes b mit Hilfe von Spiegelkeilen

Der Spiegelkeil wird auf die Neigungsplatte über der Kippachse des Tisches gestellt und mit dem rechtwinkligen Koordinatengitter der Stahlplatte ausgerichtet. Der Autokollimator wird im Abstand von circa 20 cm hinter dem Spiegelkeil auf gleicher Höhe aufgebaut. Der Laser steht hinter dem Autokollimator. In der stabilen Unterlage des Autokollimators befindet sich eine Öffnung für den Laserstrahl. Die Messung wird in den folgenden Schritten durchgeführt (siehe auch Abbildung 24):

- 1) Näherungsweise Horizontierung der Neigungsplatte
- 2) Herstellen der Autokollimation an der Grundplatte des Spiegelkeils durch Drehen der Mikrometerschraube der Neigungsplatte und Ablesen des Meßwertes l_1 an der Anzeige des Laserinterferometers
- 3) Herstellen der Autokollimation an der Keilplatte durch Drehen der Mikrometerschraube und Ablesen des Meßwertes l_2 .

Das Prinzip der Keilwinkelmessung soll Abbildung 24 verdeutlichen.

Der Neigungsbereich kann verdoppelt werden, indem der Spiegelkeil nach Drehung um 200 gon um seine horizontale Achse erneut aufgesetzt wird. Durch dieses Messen in zwei "Lagen" ergibt sich eine sehr gute Kontrolle der Justierung des Neigungstisches:
 $l = l_2 - l_1$ muß bis auf das Vorzeichen gleich sein.

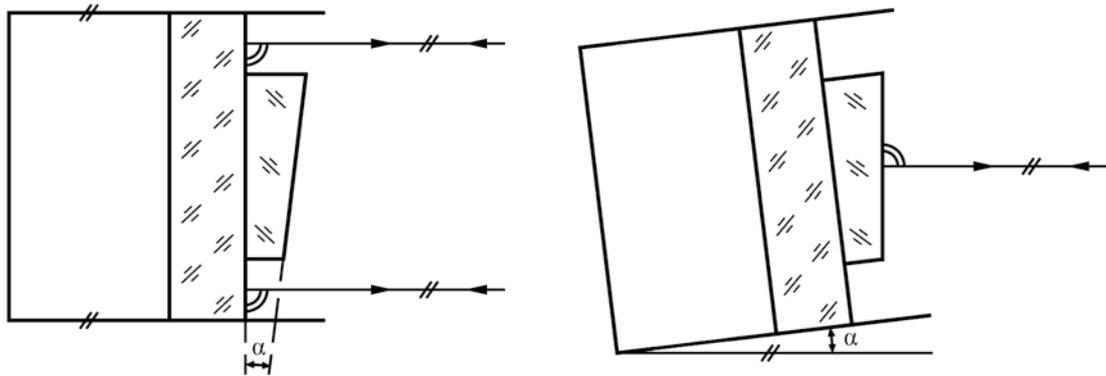


Abb. 24: Prinzip der Keilwinkelmessung

Horizontale Lage: Autokollimation an der Grundplatte (links)

Geneigte Lage: Autokollimation an der Keilplatte (rechts)

Um sicherzustellen, daß die Neigung, die dem Tisch erteilt wird, identisch mit dem Keilwinkel α ist, muß der Versuchsaufbau folgende Bedingungen erfüllen:

- 1) Die Zielachse des Autokollimators wird näherungsweise horizontalisiert. Dies wird mit einem auf der horizontalen Neigungsplatte befindlichen, senkrechten Planspiegel erreicht.
- 2) Die Auflagefläche und die Grundplatte des Spiegelkeils müssen senkrecht aufeinander stehen.
- 3) Autokollimator und Spiegelkeil müssen die gleiche Höhe haben, das heißt der Strahlquerschnitt muß zentrisch auf die Spiegelflächen treffen. Zur Erleichterung wurde aus weißem Karton eine Zielhilfe gefertigt, mit der die Höhengleichheit auf 1 mm genau hergestellt werden konnte.
- 4) Die Spiegelkeile und das Autokollimationsfernrohr müssen so zueinander ausgerichtet werden, daß die Zielachse senkrecht zur Kippachse der Neigungsplatte ist. Dies

wird iterativ durch abwechselndes seitliches Klopfen an dem Spiegelkeil und dem Autokollimationsfernrohr bei Kippen der Neigungsplatte erreicht.

Für die weiteren Messungen mit den anderen Spiegelkeilen wird der Autokollimator nicht mehr verstellt.

- 5) Die Spiegelkeile müssen sich über der Kippachse des Neigungstisches befinden, um Höhenänderungen des optischen Keilmittelpunktes zu minimieren.

Es wurden pro Spiegelkeil vier Meßreihen, also je zwei an der oberen und unteren Auflagefläche durchgeführt. Eine Meßreihe besteht aus je fünf Messungen an der Grund- und der Keilplatte, so daß fünf Differenzen l zur Mittelung erhalten werden. Jeder Meßwert ist das Mittel aus zwei nacheinander durchgeführten Einstellungen. Bei den drei Spiegelkeilen ergeben sich insgesamt 12 Meßreihen.

Um Luftturbulenzen auszuschalten, wurde zwischen dem Autokollimationsfernrohr und den Spiegelkeilen ein Papprohr angebracht, in dem der Strahlengang gegen Störeinflüsse (zum Beispiel Klimaanlage) abgeschirmt ist.

Mit der Mikrometerschraube der Neigungsplatte gelingt die Null-einstellung des Zeigers des photoelektrischen Detektors nur auf einen Teilstrich genau. Dies entspricht im ungünstigsten Fall einem Winkel von $0,02$ mgon. Die Genauigkeit kann erheblich verbessert werden, wenn der Zeiger des Detektors abgelesen wird und die dieser Ablesung entsprechende Längenverbesserung an den Meßwert l angebracht wird.

Bei der Messung stellte sich heraus, daß bei Spiegelkeil Nr. 2 und Nr. 3 die vorher aufgestellte Bedingung 2) nicht genau eingehalten wurde. Dies hatte zur Folge, daß bei Autokollimation an der Grundplatte die Ablesung $l_1 \neq 0$ ist. Deshalb ist es mathematisch nicht exakt,

$$l = l_1 + l_2$$

zu bilden und aus Gleichung (21a) den Abstand b

$$b = \frac{1}{\sin \alpha}$$

zu berechnen. Die korrekte Lösung ergibt sich aus

$$\alpha_1 = \arcsin \frac{l_1}{b} \quad (21b)$$

$$\alpha_2 = \arcsin \frac{l_2}{b} \quad (21c)$$

$$\alpha = \alpha_2 - \alpha_1 = \arcsin \frac{l_2}{b} - \frac{l_1}{b}, \quad (22)$$

wobei α der gegebene Keilwinkel ist.

Der gesuchte Abstand b läßt sich durch Umformung von Gleichung (22) aus

$$b = \sqrt{\frac{l_1^2 + l_2^2 - 2 l_1 l_2 \cos \alpha}{\sin^2 \alpha}} \quad (23)$$

bestimmen.

Von den insgesamt 12 Meßreihen soll eine Meßreihe als Beispiel angegeben werden (Tabelle 1). Der Mittelwert l_m wird dabei nicht zur Berechnung von b , sondern nur zur Bestimmung der Standardabweichung s_{l_m} verwendet.

Die Ergebnisse aller Messungen zur Bestimmung von b werden in Tabelle 2 zusammengefaßt.

Dabei ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung des mit Spiegelkeil Nr. 2 und Nr. 3 bestimmten Abstandes b , während beim Spiegelkeil Nr. 1 eine Abweichung von 0,135 mm auftritt. Dabei ist jedoch zu beachten, daß sich Fehler in l umso mehr auswirken, je kleiner die Winkel sind. Dasselbe gilt auch für die Standardabweichungen der Spiegelkeilwinkel, die mit jeweils $s_\alpha = \pm 0,03$ mgon angegeben werden.

Im folgenden wird der Einfluß der Standardabweichungen s_α und s_{l_m} auf die Genauigkeit des Abstandes b untersucht. Durch Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes auf

$$b = \frac{1}{\sin \alpha}$$

ergibt sich s_b zu

$$s_b = \pm \sqrt{\left(\frac{l \cdot \cos \alpha}{\sin^2 \alpha} \cdot \frac{s_\alpha}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{l}{\sin \alpha} \cdot s_{l_m}\right)^2} .$$

Durch Einsetzen erhält man folgende Werte (siehe auch Tabelle 2):

$$\text{Keil Nr. 1 : } s_b = \pm \sqrt{0,042^2 + 0,023^2} = \pm 0,048 \text{ mm}$$

$$\text{Keil Nr. 2 : } s_b = \pm \sqrt{0,016^2 + 0,019^2} = \pm 0,025 \text{ mm}$$

$$\text{Keil Nr. 3 : } s_b = \pm \sqrt{0,010^2 + 0,006^2} = \pm 0,012 \text{ mm}$$

Die Standardabweichungen zeigen, daß die Differenz der Basislänge durchaus im Rahmen der Meßgenauigkeit liegt, das heißt der mit der Keil Nr. 1 bestimmte, recht klein ausfallende Wert ist wahrscheinlich kein Ausreißer im statistischen Sinne.

In diesem Zusammenhang muß erwähnt werden, daß der Kalibrierfehler s_α des Keilwinkels bei der Basisbestimmung wie ein systematischer Fehler wirkt, der durch Wiederholungsmessungen nicht verringert werden kann.

Spiegel- keil Datum Zeit	Lasermessung l_1, l_2 Mittel (mm)	$l = l_2 - l_1$ (mm)	Mittelwert l_m (mm)	Abstand b_i (mm)	Mittelwert b_m (mm)
Nr. 2 (50') 25.09.81 9:25 - 9:40	-1,64804	+7,51044	$l_m = +7,51120$ $s_{l_m} = \pm 0,00024$ $s_i = \pm 0,00054$ $n = 5$	504,757	$b_m = 504,807$ $s_{b_m} = \pm 0,016$ $s_i = \pm 0,036$ $n = 5$
	5,86240			504,826	
	-1,64917	+7,51119		504,807	
	-1,64914			504,853	
	5,86205	+7,51189		504,793	
	5,86222				
	-1,64967	+7,51100			
	-1,64951				
	5,86149				

Tab. 1: Beispiel einer Meßreihe zur indirekten Bestimmung des Abstandes b

Keil	Mittelwert l_m (mm)	Standard- abweichung s_{l_m} (mm)	Abstand b_i (mm)	Standard- abweichung s_b (mm)
Nr. 1 (20')	2,83291	$\pm 0,00013$	504,650	$\pm 0,048$
Nr. 2 (50')	7,51080	$\pm 0,00029$	504,781	$\pm 0,025$
Nr. 3 (80')	12,16443	$\pm 0,00015$	504,781	$\pm 0,012$

Tab. 2: Bestimmungen des Abstandes b aus dem Mittel von je 20 Spiegelkeilmessungen

Aus den drei Einzelwerten b_i und den zugehörigen Standardabweichungen

$(504,650 \pm 0,048)$ mm $(504,781 \pm 0,025)$ mm $(504,781 \pm 0,012)$ mm,

wird als Endergebnis der Keilwinkelmessungen der Abstand b als allgemeines arithmetisches Mittel bestimmt:

$$b = (504,775 \pm 0,011) \text{ mm}$$

4.6.2 Interferometrische Messung auf einer Komparatorbank

Die Entfernung zwischen den beiden räumlichen Reflektorecken wird auf einer Komparatorbank interferometrisch gemessen. Folgender Versuchsaufbau wurde dazu gewählt (Abbildung 25).

Die Neigungsplatte wird auf den verschiebbaren Meßschlitten des 30 Meter-Präzisionslängenkomparators des Instituts für Geodäsie der Hochschule der Bundeswehr München gelegt. Das Komparatormeißsystem besteht aus dem für den Neigungstisch verwendeten Hewlett Packard-Laser-Transducer zur interferometrischen Längenmessung und dem photoelektrischen Meßmikroskop Leitz MPV. Das Meßmikroskop wird an einer Brücke fest installiert. Die Neigungsplatte wird mit Hilfe der beiden Reflektoren und des Meßmikroskops sorgfältig ausgerichtet, um das Abbe'sche Komparatorprinzip (Prüfling und Normal sollen in der gleichen Achse angeordnet sein) einzuhalten. Zur Abstandsmessung wird ein Linearreflektor auf dem Meßschlitten magnetisch befestigt. Die räumlichen Ecken

des Einstrahl- beziehungsweise Linearreflektors werden mit dem Meßmikroskop visuell eingestellt und die dazugehörigen Ablesungen des Laserinterferometers notiert. Der Abstand b ergibt sich aus der Differenz der jeweiligen Ablesungen.

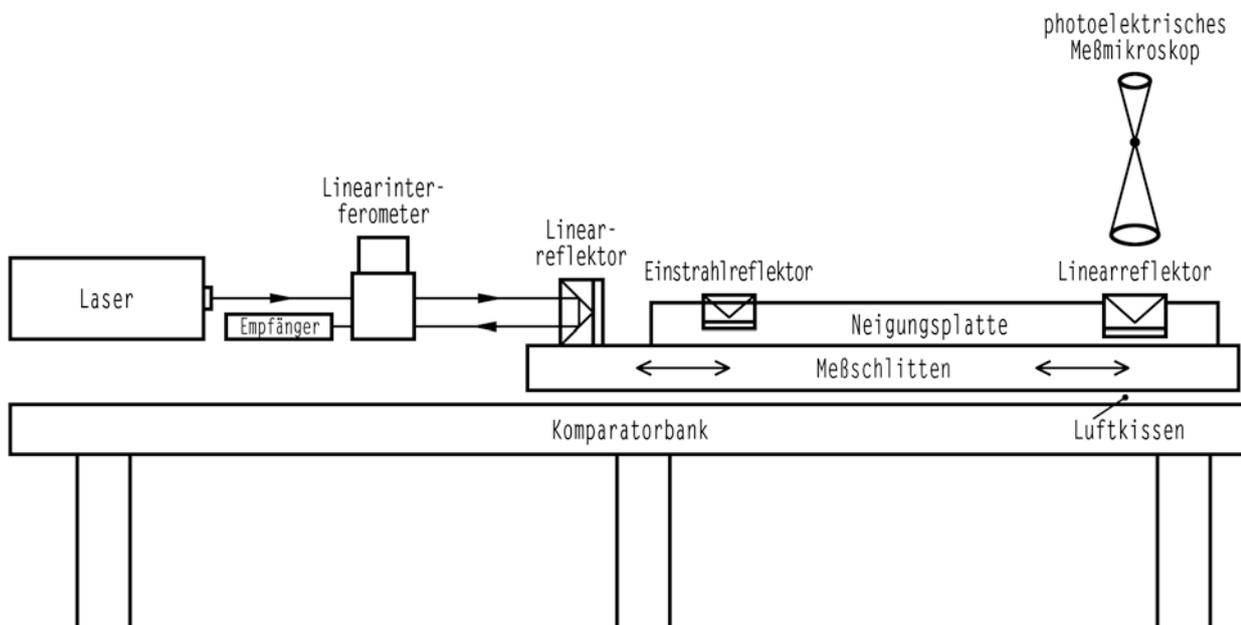


Abb. 25: Meßanordnung zur Bestimmung des Abstandes b auf der Komparatorbank

Beim Betrachten der beiden Reflektoren unter dem Meßmikroskop treten jedoch einige Probleme auf, die im folgenden näher untersucht werden.

Ein idealer Reflektor hat drei zueinander rechtwinkelige, messerscharfe Kanten, die im Grundriß jeweils einen Winkel von $133,3$ gon miteinander bilden, wenn die Strahleneintrittsfläche mit der Zeichenebene zusammenfällt.

Bei der Herstellung der Reflektoren brechen jedoch die Kanten unregelmäßig ab. Deshalb werden sie facettiert. Für die interferometrische Messung ist der Verlust der räumlichen Ecken ohne Belang, wohl aber für die Messung des Abstandes. Betrachtet man die beiden Reflektoren unter dem Meßmikroskop, so ergeben sich die folgenden Bilder (Abbildung 26). Es fällt hierbei auf, daß die Facetten des Einstrahl- und Linearreflektors unterschiedliche Breiten haben.

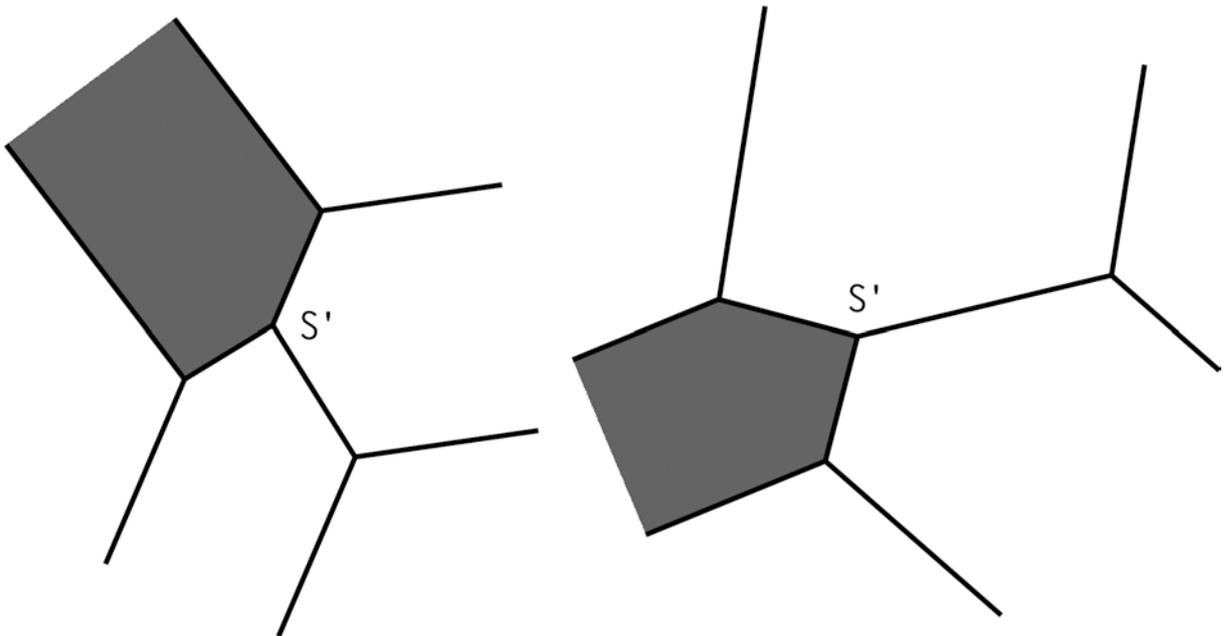


Abb. 26: Einstrahlreflektor ($M \sim 10:1$) Linearreflektor ($M \sim 10:1$)

Die bei der Facettierung entstehende Verschneidungsfigur ist ein unregelmäßiger Stern. Dabei ist der Schnittpunkt S' der drei Kanten des Sterns keineswegs identisch mit der Projektion der räumlichen Ecke V' . Die Lage von S' hängt von der Tiefe der Facetten ab. Die gesuchte, unsichtbare räumliche Ecke V liegt auf dem Schnittpunkt der ursprünglichen Reflektorkanten I, II und III (Abbildung 27). V' und S' fallen nur bei einem Reflektor

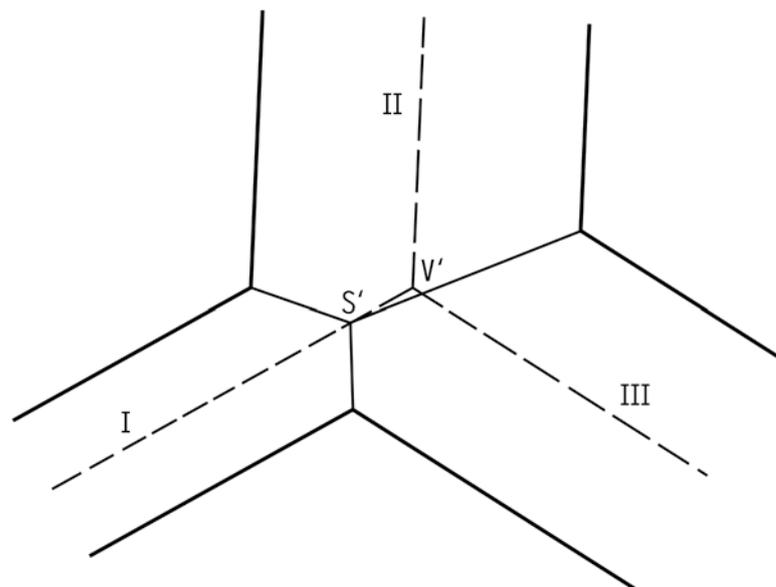


Abb. 27: Zusammenhang zwischen dem Verschneidungspunkt S' und der Projektion der gesuchten räumlichen Ecke V' am Beispiel des Linearreflektors

mit drei gleich breiten und normalen Facetten zusammen.

Der gesuchte Punkt V' wird nun durch folgende Meßanordnung bestimmt. Die Begrenzungen der drei Facetten werden mit Hilfe der Mikrometerschrauben des Meßschlittens eingestellt, und zwar pro Kante je fünf eindeutig definierte Punkte (Abbildung 28). Damit erhält man für die rechtwinkligen Koordinaten im System des Meßschlittens.

Um die Verbindung zur eigentlichen Messung des Abstandes zwischen den beiden Reflektoren herzustellen, werden jeweils an den drei Eckpunkten (1, 2, 3) zu den Mikrometereinstellungen auch die zugehörigen Laserinterferometermessungen durchgeführt. Zur Auswertung der Meßergebnisse werden für die drei Facetten je zwei Geradengleichungen aufgestellt. Die beiden Gleichungen jeder Facette werden gemittelt und die sich ergebenden drei Geraden zum Schnitt gebracht. Dabei entsteht ein fehlerzeigendes Dreieck, in dessen Schwerpunkt der gesuchte Punkt V' liegt.

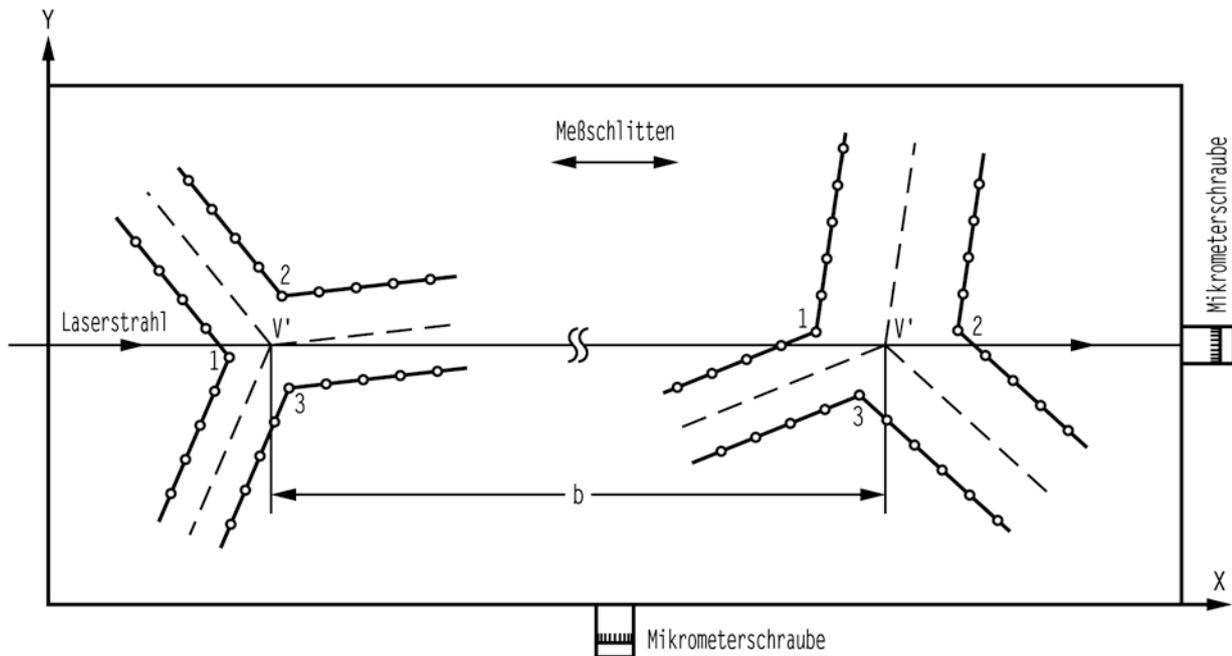


Abb. 28: Berechnung des Abstandes b zwischen den beiden Reflektoren

Die Mittelung je zweier Geradengleichungen ist nur zulässig, wenn die Facettierung symmetrisch zu den ursprünglichen Kanten

I, II und III (Abbildung 27) erfolgte. In diesem Falle ist der Facettenwinkel $\delta = 150$ gon (Abbildung 29).

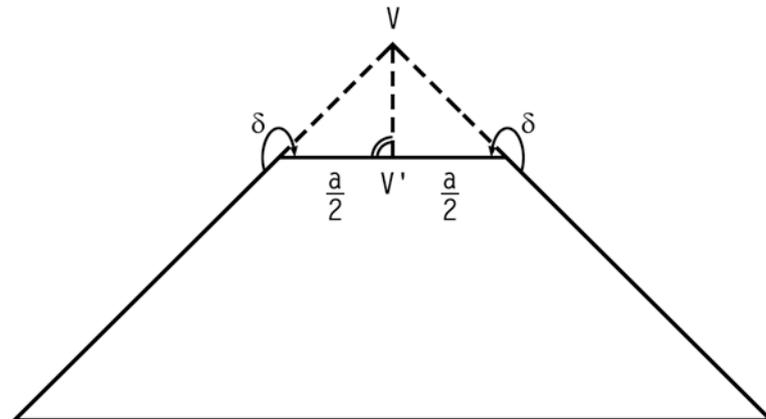


Abb. 29: Zusammenhang zwischen Facettenbreite a und Facettenwinkel δ

Die Winkel δ wurden auf dem Rundtisch einer Fräsmaschine (Strichteilung 1') mit einem Mikroskop mit 30-facher Vergrößerung für mehrere Reflektoren bestimmt. Bei einem Einstrahlreflektor ist die Bestimmung von δ problemlos, da die Facetten in der Projektion Geraden sind. Bei allen Linearreflektoren sind die Facetten etwas gerundet, wodurch die Winkelmessungen erschwert sind.

Die Abweichung $\Delta\delta$ vom Sollwinkel $\delta = 150$ gon schwankten bei 2 Einstrahlreflektoren und 3 Linearreflektoren zwischen 0 gon und 10 gon. Es wurden je ein Reflektor ausgewählt, der jeweils die geringsten Abweichungen $\Delta\delta$ aufwies:

Einstrahlreflektor	± 2	gon
Linearreflektor	$\pm 1,5$	gon

Die sich daraus ergebenden Fehler Δb der Abstandsmessung lassen sich berechnen aus (Abbildung 30):

$$\Delta b = \left(\frac{\frac{a}{4} \sqrt{2}}{\cos(50+\Delta\delta)} - \frac{a}{2 \cos \Delta\delta} \right) \cos \Delta\delta \quad (24)$$

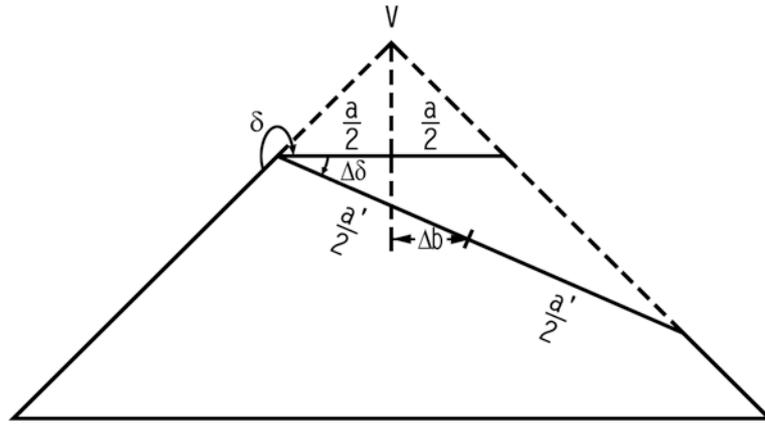


Abb. 30: Zusammenhang zwischen a , $\Delta\delta$ und Δb

Setzt man in die Gleichung (24) die Werte für $\Delta\delta$ und die mittlere Facettenbreite a ein, so wird das entsprechende Δb erhalten:

Einstrahlreflektor: $a = 0,32 \text{ mm}$, $\Delta\delta = \pm 2 \text{ gon}$ $\rightarrow \Delta b = \pm 5 \text{ }\mu\text{m}$

Linearreflektor: $a = 0,43 \text{ mm}$, $\Delta\delta = \pm 1,5 \text{ gon}$ $\rightarrow \Delta b = \pm 5 \text{ }\mu\text{m}$

Durch Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes ergibt sich der Einfluß von $\Delta\delta$ auf die Messung des Abstandes b zu $\Delta b = \pm 7 \text{ }\mu\text{m}$.

Dieser Wert ist etwa doppelt so groß wie die Einstellgenauigkeit der einzelnen Facettenpunkte, die zu $\pm 3 \text{ }\mu\text{m}$ ermittelt wurde.

Einstrahlreflektor				
Pkt.	Ablesung Mikrometer- schraube x (mm)	$x_{V'} - x_i$ (mm)	Lasermessung (mm)	$x_{V'} - x_i$ + Lasermessung (mm)
V'	(7,288)			
1	7,123	+ 0,165	+ 0,0031	+ 0,168
2	7,327	- 0,039	+ 0,2093	+ 0,170
3	7,387	- 0,099	+ 0,2690	+ 0,170
Mittel				+ 0,169

Tab. 3a: Zusammenstellung der Meßwerte am Einstrahlreflektor zur Bestimmung des Abstandes b

In Tabelle 3a und 3b sind alle Meßwerte zusammengestellt, aus denen der endgültige Abstand b berechnet wurde. Die eingestellten Punkte der beiden Prismen, bei denen Lasermessungen durchgeführt wurden, sind mit den Eckpunkten 1, 2 und 3 identisch. Der aus der Ausgleichung für V' erhaltene Wert ist in der Tabelle in Klammern gesetzt.

Linearreflektor				
Pkt.	Ablesung Mikrometer- schraube x (mm)	$x_{V'} - x_i$ (mm)	Lasermessung (mm)	$x_{V'} - x_i$ + Lasermessung (mm)
V'	(7,332)			
1	7,044	+ 0,288	- 504,9261	- 504,638
2	7,628	- 0,296	- 504,3417	- 504,638
3	7,206	+ 0,126	- 504,7765	- 504,650
Mittel				- 504,638

Tab. 3b: Zusammenstellung der Meßwerte des Linearreflektors zur Bestimmung des Abstandes b

Die Differenz der beiden Mittelwerte aus Tabelle 3b und 3a (wobei der 3. Wert des Linearreflektors unberücksichtigt bleibt, da Punkt 3 nicht eindeutig einstellbar ist) ergibt den gesuchten Abstand b :

$$b = \text{Lasermessung } V' \text{ (Linearreflektor)} - \text{Lasermessung } V' \text{ (Einstrahlreflektor)}$$

$$|b| = | - 504,638 - 0,169 | \text{ [mm]} = 504,807 \text{ mm}$$

Hätte man fälschlicherweise Punkt S' als Projektion der räumlichen Ecke V' angenommen, so wäre der Abstand b um $\sim 0,1$ zu lang ermittelt worden.

Bei der gemeinsamen Ausgleichung der sechs Geradengleichungen der drei Facetten zur Ermittlung der beiden Schnittpunkte V' ergeben sich folgende mittlere Punktfehler:

Linearreflektor: $s_{V'} = \pm 6,4 \mu\text{m}$

Einstrahlreflektor: $s_{V'} = \pm 2,0 \mu\text{m}$

Aus diesen beiden Werten läßt sich nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz die Standardabweichung des Abstandes $s_b = \pm 6,7 \mu\text{m}$ berechnen.

4.6.3 Zusammenstellung der Ergebnisse

Vergleicht man die nach den beiden unabhängigen Verfahren bestimmten Abstände b :

Indirekte Bestimmung mit Spiegelkeilen: $b_1 = (504,775 \pm 0,011) \text{ mm}$,

Interferometrische Bestimmung: $b_2 = (504,807 \pm 0,007) \text{ mm}$,

so ergibt sich eine gute Übereinstimmung. Bei der Frage, welcher Abstand nun für die Neigungsbestimmung genommen werden soll, können drei Auffassungen vertreten werden:

- 1) Die direkte, interferometrische Bestimmung ist die etwas genauere Methode. Der gemessene Abstand b_1 wird für die Neigungsbestimmung verwendet.
- 2) Die indirekte Bestimmung mit den drei Spiegelkeilen ergibt drei unabhängige Werte. Alle Messungen erfolgen mit eingebauter Neigungsplatte. Diese Methode ermöglicht die Kalibrierung des gesamten Systems.
- 3) Das gewogene arithmetische Mittel aus der indirekten und der interferometrischen Bestimmung ergibt den wahrscheinlichsten Wert, da bekanntlich geringe Restsystematiken bei allen Meßverfahren auftreten, denen auf diesem Weg entgegengewirkt werden kann.

Die Entscheidung fiel auf die dritte Variante. Damit bekommt man als endgültigen Abstand b das allgemeine arithmetische Mittel:

$$b = (504,798 \pm 0,006) \text{ mm},$$

das zur Berechnung der Neigungswinkel α in Gleichung (21a) eingeführt wird. Die Standardabweichung $s_b = \pm 6 \mu\text{m}$ ergibt sich durch Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes.

5. Analyse der systematischen und zufälligen Fehler

Im folgenden werden alle Fehler - getrennt nach systematischen und zufälligen - untersucht, die die Neigungsmessung beeinflussen. Diese Fehlerbetrachtungen dienen zur Abschätzung der Genauigkeit der Neigungsmessung.

5.1 Systematische Fehler

Als systematische Fehler werden die Abweichungen betrachtet, um die sich die in Gleichung (21a) auftretenden Konstanten von ihren bei der Auswertung verwendeten Zahlenwerten unterscheiden. Die eingesetzten Werte wurden als Ergebnisse eigener Messungen festgelegt. Ferner wirken Abweichungen von den Justierbedingungen systematisch verfälschend. Die in Abschnitt 4.5 ausgeführten Abschätzungen zeigen jedoch, daß diese Fehlerquellen bis auf den in 5.1.1 beschriebenen Effekt von untergeordneter Bedeutung sind und wegen der Genauigkeit der verwendeten Justierverfahren praktisch keinen Einfluß haben.

5.1.1 Einfluß windschiefer Meßstrahlen oder zueinander geneigter Reflektoren

Windschiefe Meßstrahlen oder zueinander geneigte Reflektoren führen zu unterschiedlichen Einfallswinkeln α und $\alpha + \Delta\alpha$ der Laserstrahlen (Abbildung 31) und damit zu systematischen Fehlern der Wegänderungen l_x und l_y (siehe auch Abbildung 12).

Gleichung (20a)

$$\Delta e = d_1 \left(n_1 - \frac{n_1}{\cos \gamma_1} + \tan \gamma_1 \sin \alpha \right) - d_2 \left(n_2 - \frac{n_2}{\cos \gamma_2} + \tan \gamma_2 \sin \alpha \right) \quad (20a)$$

gibt die Abhängigkeit der Verbesserungen Δe vom Einfallswinkel α an.

Der Einfluß windschiefer Meßstrahlen oder zueinander geneigter Reflektoren auf die Messung l folgt aus

$$d(\Delta e)_\alpha = \frac{\delta(\Delta e)}{\delta\alpha_1} d\alpha_1 - \frac{\delta(\Delta e)}{\delta\alpha_2} d\alpha_2 \quad ,$$

wobei $\Delta\alpha_1 = -\Delta\alpha_2$ gesetzt wird. Dies bedeutet, daß der ungünstigste Fall angenommen wird. $d(\Delta e)_\alpha$ stellt den sich ergebenden Längenfehler dar.

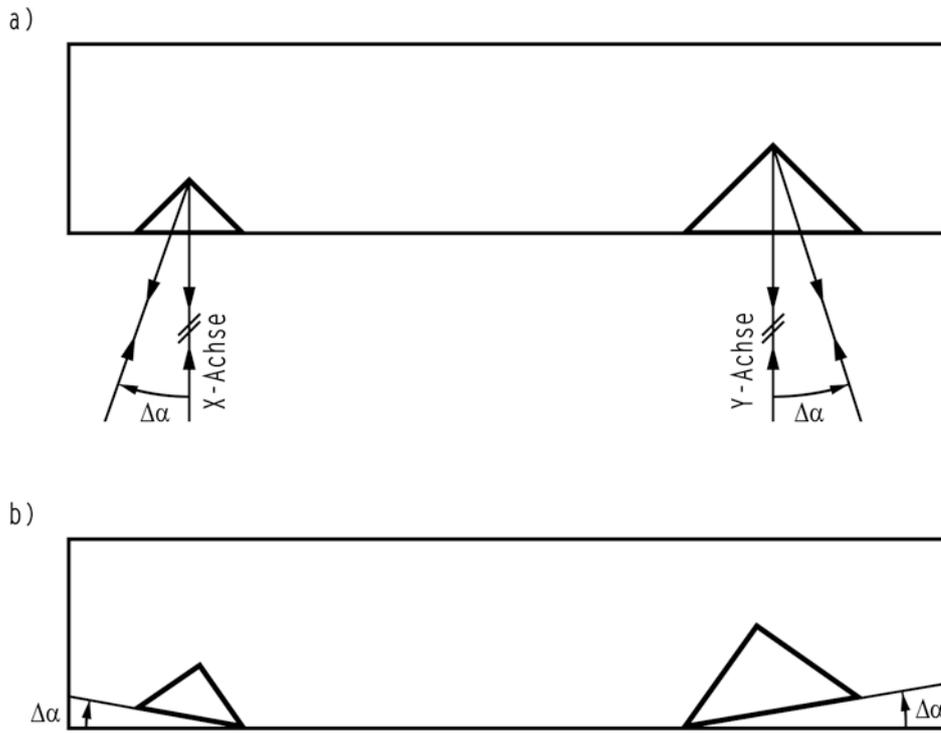


Abb. 31: a) windschiefe Meßstrahlen
b) zueinander geneigte Reflektoren

In Abbildung 32 sind für einige $\Delta\alpha$ in Abhängigkeit von α die Längenfehler und die sich daraus ergebenden Neigungsfehler $d\alpha$ graphisch dargestellt.

Nimmt man für die Justiergenauigkeit der beiden Achsen und der beiden Reflektoren jeweils ± 10 mgon an, so ergibt sich ein Meßfehler $d(\Delta e)_\alpha$ von $\pm 0,076 \mu\text{m}$ bei einem maximalen Meßwert $l \approx \pm 17,4 \text{ mm}$.

Der Einfluß auf den maximalen Neigungswinkel $\alpha = \pm 2,2 \text{ gon}$ beträgt $d\alpha = \pm 0,010 \text{ mgon}$. Die Fehlerbetrachtung zeigt auch, daß die festgestellten Winkelabweichungen von den Reflektorsollwerten, die durchschnittlich ein Milligon (siehe 4.1) betragen, auf die Neigungsbestimmung praktisch keinen Einfluß haben.

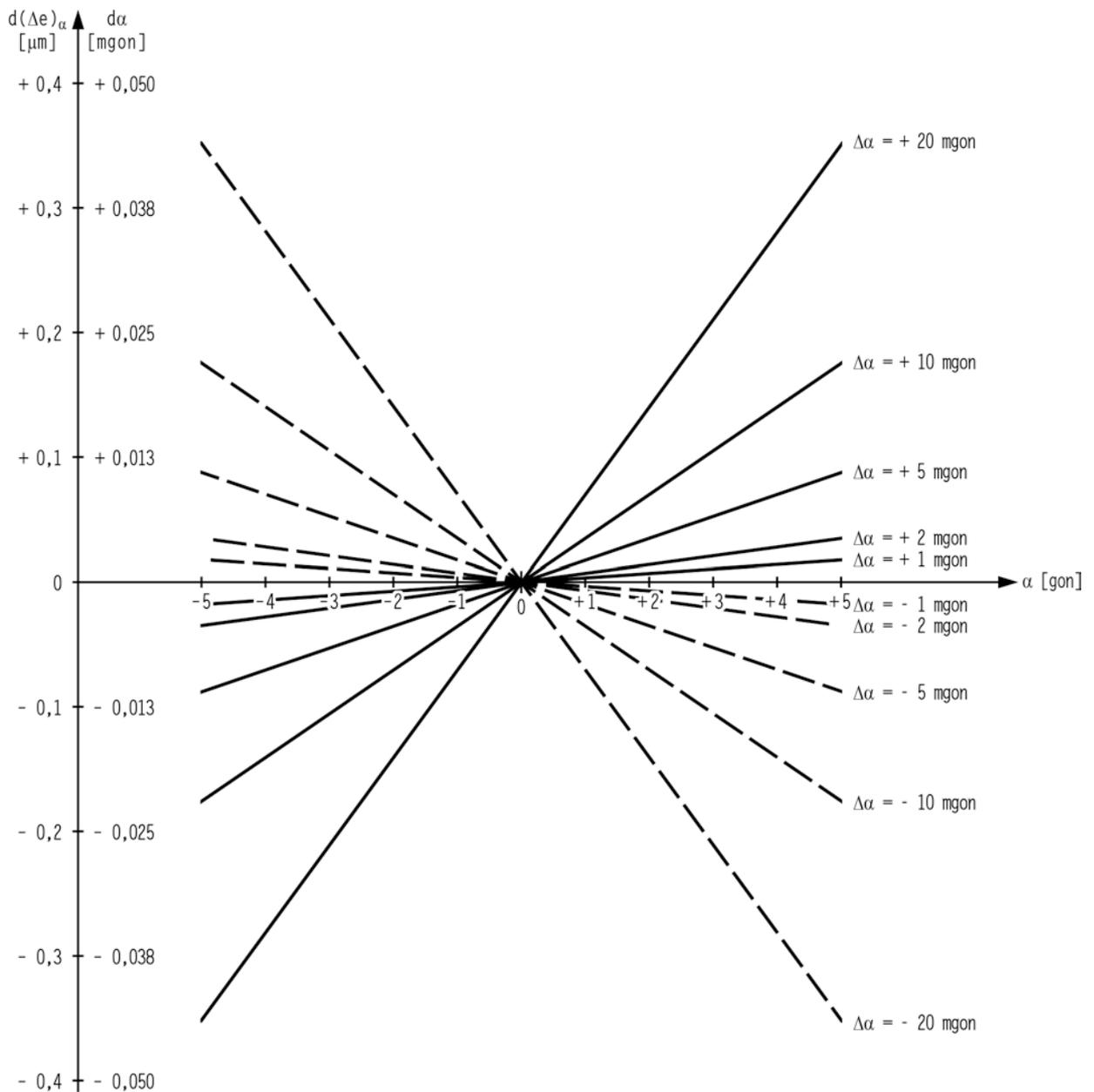


Abb. 32: Einfluß windschiefer Meßstrahlen oder zueinander geneigter Reflektoren

5.1.2 Einfluß der Brechungskoeffizienten

Nach Gleichung (20a) müssen die Brechungskoeffizienten n_1 und n_2 der beiden Reflektoren bekannt sein, um die Verbesserung Δe zu berechnen. Der Einfluß fehlerhafter Brechungskoeffizienten auf

den Wert von 1 beträgt

$$d(\Delta e)_n = \frac{\partial[\Delta e]}{\partial n_1} dn_1 - \frac{\partial(\Delta e)}{\partial n_2} dn_2$$

wobei $dn_1 = -dn_2$ gesetzt wird. Dies bedeutet, daß der ungünstigste Fall angenommen wird. $d(\Delta e)_n$ stellt den sich ergebenden Längenfehler dar.

Abbildung 33 zeigt für verschiedene Neigungen α die Abhängigkeit zwischen den Abweichungen dn vom Sollbrechungskoeffizienten $n = 1,515$ und der Längen- und Neigungsmessung.

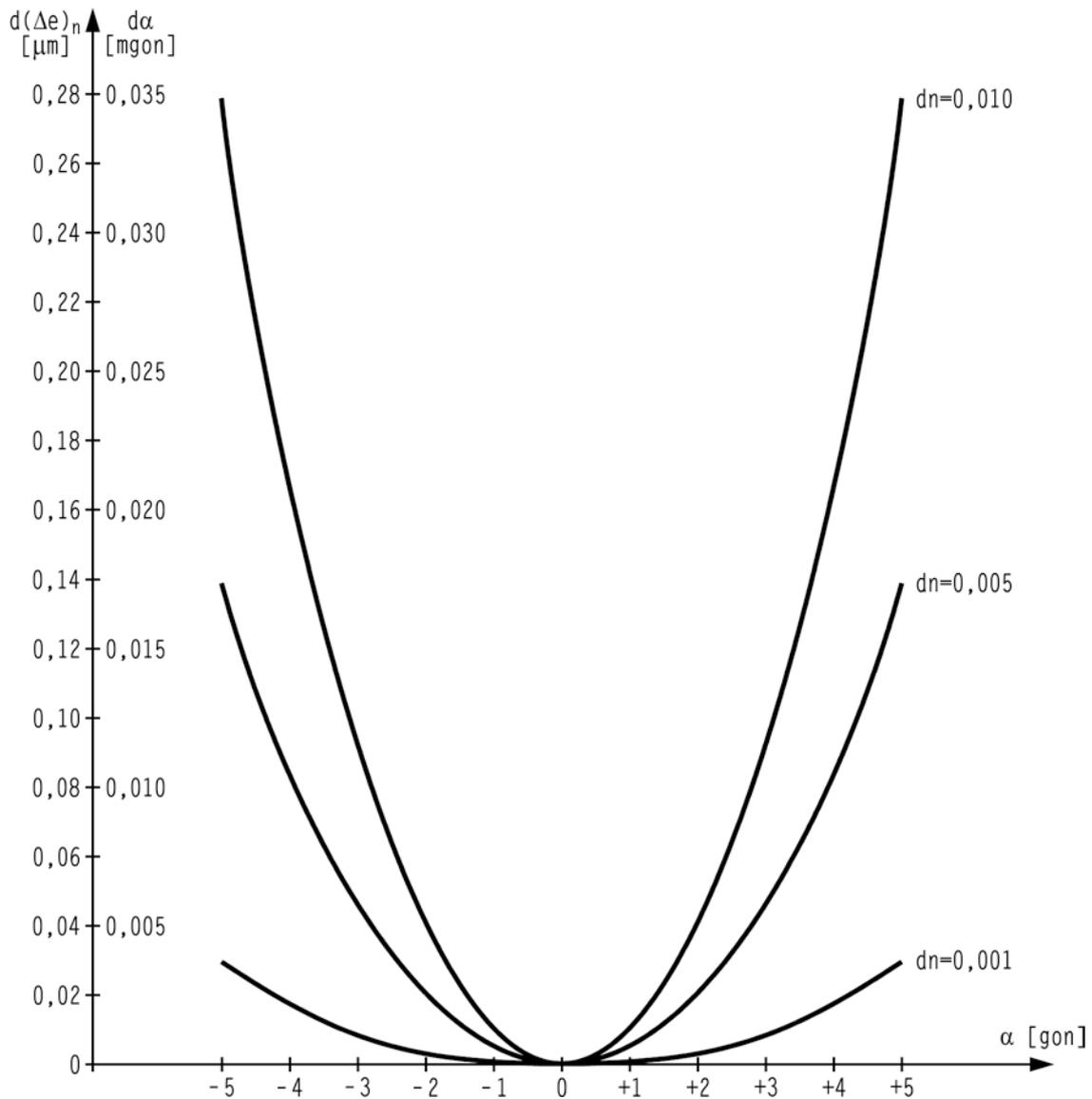


Abb. 33: Einfluß verschiedener Brechungskoeffizienten auf die Längen- und Neigungsmessung

Nimmt man für die Abweichung vom Sollbrechungskoeffizienten einen Fehler $dn = \pm 0,005$ an, der laut Werksangaben realistisch ist, so ergibt sich ein Meßfehler von $\pm 0,028 \mu\text{m}$, bezogen auf den maximalen Meßwert $l \approx \pm 17,4 \text{ mm}$. Der Einfluß auf den maximalen Neigungswinkel $\alpha = \pm 2,2 \text{ gon}$ beträgt $d\alpha = \pm 0,004 \text{ mgon}$.

5.1.3 Einfluß der Reflektorhöhen

Nach Gleichung (20a) gehen auch die Höhen d_1 und d_2 der beiden Reflektoren in die Bestimmung der Verbesserung Δe mit ein. Maßgebend ist bei der vorliegenden Meßanordnung die Differenz $\Delta d = d_1 - d_2$. Der Einfluß der Genauigkeit der Reflektorhöhen auf die Messung l folgt aus

$$d(\Delta e)_d = \frac{\partial(\Delta e)}{\partial(\Delta d)} d(\Delta d) ,$$

wobei $d(\Delta e)_d$ den Längenfehler darstellt. In Abbildung 34 sind für einige Abweichungen Δd in Abhängigkeit von α die Längenfehler und die sich daraus ergebenden Neigungsfehler $d\alpha$ graphisch dargestellt.

Nimmt man für die Meßgenauigkeit der beiden Reflektorhöhen jeweils $\Delta d = \pm 0,05 \text{ mm}$ an - die Höhen wurden mit einer Präzisions-schublehre, die eine Ablesegenauigkeit von $0,02 \text{ mm}$ hat, gemessen - so ergibt sich ein Meßfehler $d(\Delta e)_d$ von $\pm 0,024 \mu\text{m}$, bezogen auf den maximalen Meßwert $l \approx \pm 17,4 \text{ mm}$. Der Einfluß auf den maximalen Neigungswinkel beträgt $d\alpha = \pm 0,003 \text{ mgon}$.

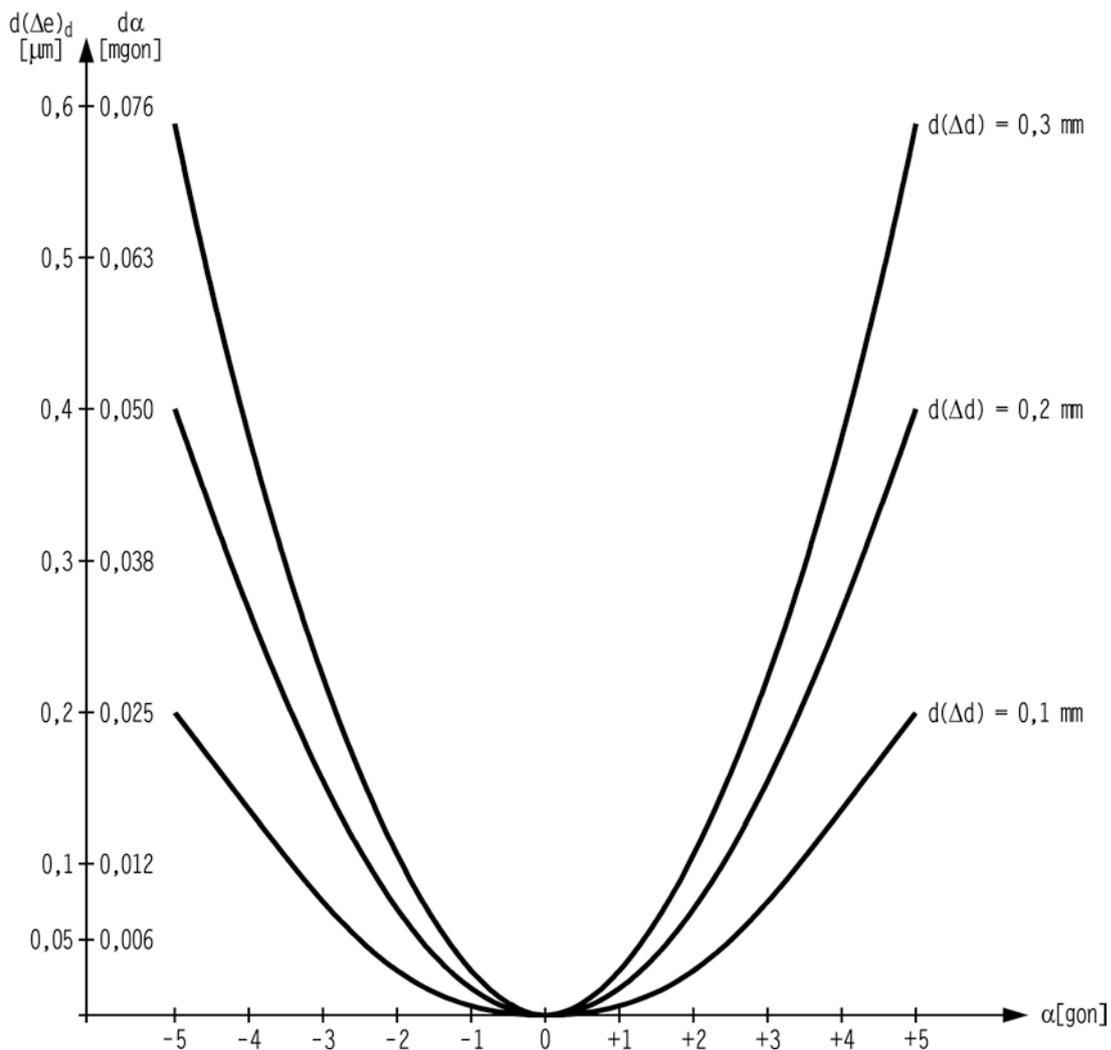


Abb. 34: Einfluß der Genauigkeit der Reflektorhöhenmessung auf die Längen- und Neigungsmessung

5.1.4 Einfluß des Reflektorenabstandes

Die Standardabweichung s_b des Abstandes b wurde in 4.6.3 zu $\pm 6 \mu\text{m}$ geschätzt. Dieser Wert überträgt sich auf den größten meßbaren Winkel $\alpha = \pm 2,2 \text{ gon}$ als Standardabweichung von $\pm 0,026 \text{ mgon}$. Wie bereits ausgeführt wurde, wirkt sich ein Fehler in b wie ein Maßstabsfehler aus, der in erster Näherung die Ergebnisse proportional zum Betrag der gemessenen Neigungsänderung verfälscht:

$$d\alpha = \tan\alpha \frac{db}{b}$$

Die eingangs geforderte Genauigkeit von $\pm 0,01$ mgon wurde also nicht für den gesamten Meßbereich erfüllt. Wegen der Unsicherheit der Basislänge b muß der Meßbereich auf circa $\pm 1,0$ gon beschränkt werden, wenn die angestrebte Standardabweichung von $\pm 0,01$ mgon nicht überschritten werden soll.

5.1.5 Zusammenstellung der systematischen Fehler

Alle systematischen Fehler sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Zum Vergleich ist auch nochmals die Auflösung angegeben.

Systematische Fehler	Bezeichnung	Geschätzte Größe	Max. Einfluß Längenmessung $d(\Delta e)$ [μm]	Max. Einfluß Neigungsmessung $d\alpha$ [mgon]
Windschiefe Meßstrahlen geneigte Reflektoren	$d\alpha$	± 10 mgon	$\pm 0,076$	$\pm 0,010$
Abweichung v. Sollbrechungskoeffizienten n	dn	$\pm 0,005$	$\pm 0,028$	$\pm 0,004$
Genauigkeit der Reflektorhöhen d_1 und d_2	$d(\Delta d)$	$\pm 0,05$ mm	$\pm 0,024$	$\pm 0,003$
Genauigkeit des Abstandes b	db	± 6 μm	± 6	$\pm 0,026$
Auflösung		$\pm 0,016$ μm	$\pm 0,016$	$\pm 0,002$

Tab. 4: Einfluß der systematischen Fehler auf die Längen- und Neigungsmessung

Die angegebenen Fehler beziehen sich immer auf den maximalen Neigungswinkel. Bei Prüfung der Einzelwerte fällt auf, daß die systematischen Fehler $d\alpha$, dn und $d(\Delta d)$ alle $\leq \pm 0,010$ mgon sind. Faßt man diese drei Fehler zusammen, so ergibt sich ein Fehler von $\pm 0,011$ mgon.

Der Einfluß des systematischen Fehlers $db = \pm 6$ μm auf die Neigungsmessung ist mit $\pm 0,026$ mgon etwa doppelt so groß wie die drei erstgenannten Fehler zusammen. Der Fehler db ist jedoch, wie bereits erwähnt wurde, in erster Näherung nur als Maßstabsfaktor zu verstehen.

5.2 Zufällige Fehler

Die Quelle zufälliger Fehler der Neigungsmessungen sind neben der Systemauflösung vor allem im Einfluß der Meteorologie auf den Laserstrahl und im Wirken äußerer Einflüsse wie Temperatur, Erschütterungen und Instabilitäten auf den Neigungstisch zu vermuten.

5.2.1 Systemgenauigkeit des Laserinterferometers

In 2.4.5 "Genauigkeit und Auflösung" wird die Systemgenauigkeit der Laserinterferometeranlage unter Einbeziehung der Laserfrequenz, der Lufttemperatur, des Luftdrucks und der Luftfeuchte zu $\pm 0,8 \times 10^{-6}$ geschätzt. Dieser Wert repräsentiert die innere Genauigkeit des Laserinterferometers. Der Einfluß auf die Längenmessung beträgt $d_l = \pm 0,14 \mu\text{m}$ und auf die Neigungsmessung $d\alpha = \pm 0,002 \text{ mgon}$, jeweils bezogen auf den maximalen Meßwert.

5.2.2 Einfluß der Temperatur auf den Abstand

Eine Änderung der Lufttemperatur beeinflusst die Materialtemperatur der Neigungsplatte und damit den Abstand b zwischen den beiden Reflektoren. Messungen in dem klimatisierten Laborraum, wo der Neigungstisch aufgebaut ist, ergaben Temperaturschwankungen von $\pm 1 \text{ K}$. Bei einem Ausdehnungskoeffizienten von $\alpha = 11,5 \times 10^{-6}$ für Guß ergibt sich dabei eine Basisänderung $\Delta b = \pm 6 \mu\text{m}$, die bei maximaler Neigung einem Winkelfehler $d\alpha = \pm 0,026 \text{ mgon}$ entspricht. Diese Abschätzung zeigt, daß zur Erreichung der geforderten Genauigkeit von $\pm 0,01 \text{ mgon}$ für den gesamten Meßbereich die Temperatur gemessen und ihr Einfluß berücksichtigt werden muß. Unter der Annahme, daß die Temperaturmessung mit einer Standardabweichung von $\pm 0,2 \text{ K}$ durchführbar ist, wird der durch die Unsicherheit der Temperaturerfassung verbleibende zufällige Fehler auf $\pm 0,005 \text{ mgon}$ begrenzt.

5.2.3 Stabilität des Neigungstisches

Während einer Langzeitmessung wurden an einer Talyvel täglich mehrere Ablesungen durchgeführt, um die Stabilität des Neigungstisches zu untersuchen (Abbildung 35). Die Talyvel stand dabei

in Längsrichtung auf der Neigungsplatte. Sie blieb während der gesamten Messungen stets eingeschaltet und unberührt. Die angezeigte Neigungsänderung während der Meßdauer von 13 Tagen betrug 0,27 mgon (letzte minus erste Ablesung), was einem Durchschnittswert von circa 0,001 mgon pro Stunde entspricht. Die angezeigte Neigungsänderung verläuft dabei vorwiegend in einer Richtung. Zwischenzeitlich wurde jedoch eine Neigungsänderung angezeigt, die etwa den zehnfachen Betrag des Durchschnittswertes annahm. Nach circa zwei Tagen kehrte die Anzeige auf die durchschnittliche Neigung zurück. Eine Aussage, ob es sich bei den Meßwerten um eine echte Neigungsänderung oder nur um eine Nullpunktsdrift der Talyvel handelt, ist kaum möglich. Andererseits liegt die angezeigte Neigungsänderung innerhalb der Genauigkeit der Lasermessung.

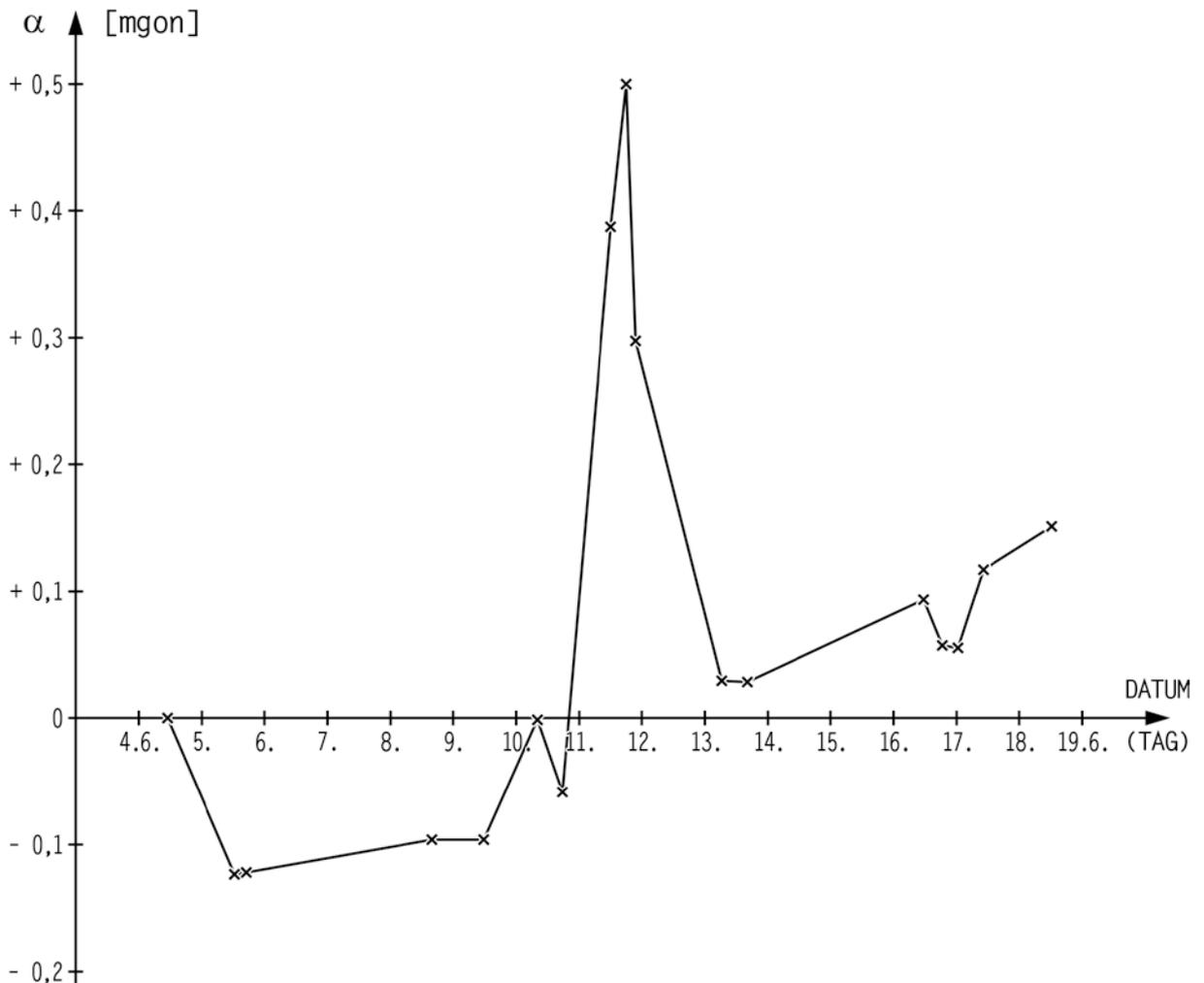


Abb. 35: Untersuchung der Stabilität des Neigungstisches durch Talyvelmessungen

Ein zweites, unabhängiges Verfahren zur Bestimmung der Stabilität des Neigungstisches ist durch die Lasermessung selbst möglich (Abbildung 36). Dazu wurden an einigen Tagen in regelmäßigen Abständen Neigungsablesungen durchgeführt, ohne den Neigungstisch zu berühren. Die Laseranlage blieb während der gesamten Meßdauer eingeschaltet. Die durchschnittliche, angezeigte Neigungsänderung betrug 0,006 mgon pro Stunde, wobei die Richtung der Neigungsänderung beide Vorzeichen annahm. Dieser durchschnittliche Meßwert ist etwa sechsmal größer als der mit der Talyvel gemessene und weist außerdem entgegengesetztes Vorzeichen auf.

Im folgenden wird untersucht, ob die angezeigte Neigungsänderung auf eine Laserdrift zurückgeführt werden kann.

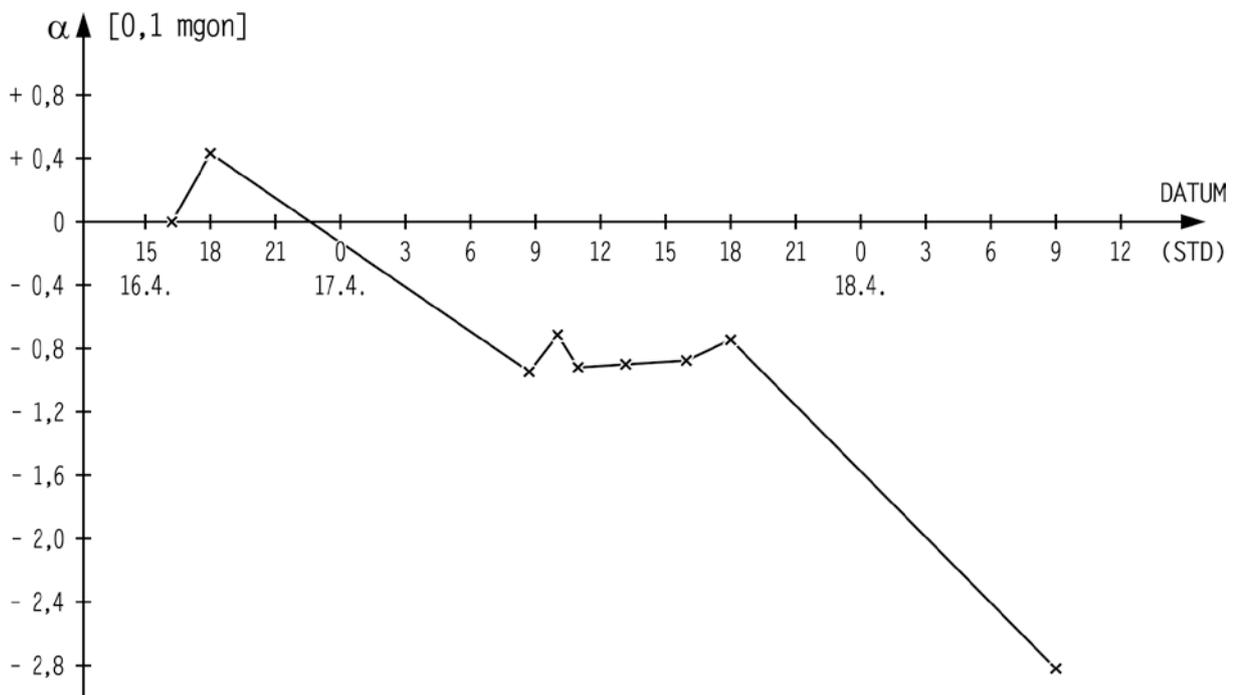


Abb. 36: Untersuchung der Stabilität des Neigungstisches durch Lasermessungen

5.2.4 Laserdrift

Eine Drift des Laserstrahls wirkt in derselben Weise wie wind-schiefe Meßstrahlen oder zueinander geneigte Reflektoren (siehe Abschnitt 5.1.1). Für die Parallelität der beiden Achsen wurde dabei eine Standardabweichung von ± 10 mgon angenommen, deren Einfluß auf die Standardabweichung $d\alpha = \pm 0,010$ mgon, bezogen auf den maximalen Neigungswinkel, beträgt.

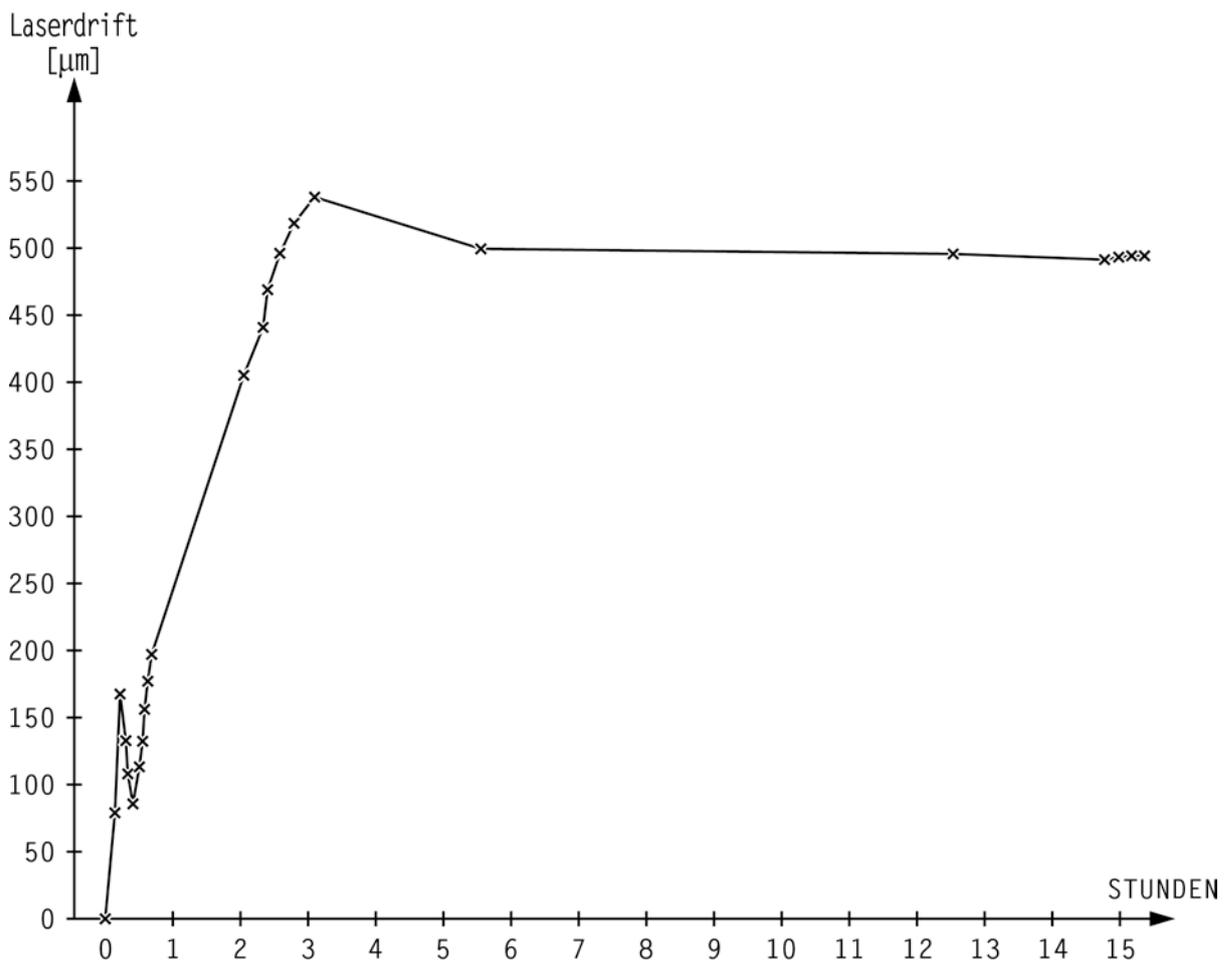


Abb. 37: Laserdrift

Die Laserdrift wurde in mehreren Versuchen mit einem photoelektrischen Vierquadrantendetektor, der auf einem Kreuzschlitten montiert war, bestimmt. In regelmäßigem Abstand wurde der Laser-

strahl auf den Vierquadrantendetektor zentriert, indem die Anzeige des Detektors durch Drehen an den beiden Mikrometerschrauben auf Null gebracht wurde. Beim Einschalten des Lasers ergab sich immer eine relativ große Drift (bis zu 1 mm/Stunde), die erst nach circa sechs Stunden abklang und dann einen Durchschnittswert von nur 6 μm pro Stunde annahm (Abbildung 37). Dies entspricht bei einer Entfernung des Lasers zum Detektor von 45 cm einer Winkeländerung von 0,8 mgon, die sich auf das Meßergebnis praktisch nicht auswirkt. Daraus folgt, daß die Laseranlage einige Stunden vor den eigentlichen Messungen beziehungsweise Justierungen eingeschaltet werden muß, wenn die Genauigkeit des Laserinterferometers ausgenutzt werden soll.

5.2.5 Zusammenstellung der zufälligen Fehler

Alle zufälligen Fehler sind in Tabelle 5 zusammengestellt, in der sich die angegebenen Fehler auf den maximalen Neigungswinkel beziehen.

Zufälliger Fehler	Einfluß auf Neigungsmessung
Systemgenauigkeit	$\pm 0,002$ mgon
Temperatur	$\pm 0,005$ mgon
Stabilität a) Talyvel b) Laser	0,001 - 0,01 (mgon/Std) 0,006 mgon/Std
Laserdrift	kein Einfluß

Tab. 5: Einfluß der zufälligen Fehler auf die Neigungsmessung

Der Einfluß einer Temperaturveränderung, deren Standardabweichung mit $\pm 0,2$ K angenommen wurde, liegt bei $\pm 0,005$ mgon.

In dem für die Stabilität angegebenen zufälligen Fehler sind auch die wahren Neigungsänderungen enthalten. Eine strenge Trennung von angezeigten und wahren Neigungsänderungen ist aufgrund der kleinen Meßwerte kaum möglich.

Der größere Neigungswert von 0,006 mgon/Stunde bei der Stabilitätsuntersuchung des Neigungstisches durch die Lasermessung im Vergleich zu den Talyvelmessungen könnte auch durch Temperaturänderungen verursacht worden sein.

Die angegebenen zufälligen Fehler für die Stabilität beziehen sich auf die Zeiteinheit 1 Stunde und können deshalb nur schwer mit anderen Fehlern verglichen oder zusammengefaßt werden.

Eine Laserdrift ist, wenn die Anlage mindestens sechs Stunden vor der eigentlichen Neigungsmessung eingeschaltet wird, praktisch ohne Einfluß auf das Meßergebnis.

Eine Zusammenfassung der zufälligen Fehler ist nur für die beiden in Tabelle 5 erstgenannten Fehler möglich. Der Schätzwert für den zufälligen Fehler der Neigungsmessung beträgt $\pm 0,005$ mgon.

5.3 Zusammenfassende Genauigkeitsabschätzung der Neigungsmessung

Von den systematischen Fehlerquellen erweist sich nur die Bestimmung der Basislänge als kritisch, deren Unsicherheit zu einer Standardabweichung von $\pm 0,026$ mgon für den maximalen Neigungswinkel von $\pm 2,2$ gon führt. Hier könnte Abhilfe durch eine Erhöhung der Anzahl der unabhängigen Bestimmungen oder durch konstruktive Maßnahmen, die im nächsten Kapitel vorgeschlagen werden, geschaffen werden. Alle anderen systematischen Fehler werden als unbedeutend abgeschätzt.

Bei den zufälligen Fehlern muß die Aussage etwas unsicherer bleiben, da einige Fehlerquellen wie Stabilität des Neigungstisches und Laserdrift nur ungenau abzuschätzen sind. Bei den Untersuchungen, die nur stichprobenhaft sein konnten, erwiesen sich die Auswirkungen als tolerierbar, da sie im Zeitraum von etwa 30 Minuten, der für eine Kalibrierung stets ausreichen sollte, weit unterhalb der gesetzten Genauigkeitsschranke blieben. Die Systemgenauigkeit von 0,002 mgon ist ebenfalls völlig ausreichend, wohingegen die Temperaturstabilität von ± 1 K im Komparatorraum nicht befriedigend ist. Wir jedoch die Temperatur mit einer Standardabweichung von $\pm 0,2$ K gemessen und als Korrektur angebracht, so wird der maximale Einfluß dieses Fehlers auf $\pm 0,005$

mgon begrenzt.

Eine strenge Zusammenfassung der Fehler ist wegen ihres unterschiedlichen Charakters nicht möglich. Man ist jedoch auf der sicheren Seite, wenn der maximale systematische Fehler mit $\pm 0,03$ mgon und der zufällige Fehler bei Berücksichtigung der Raumtemperatur und einer Meßdauer von 30 Minuten mit $\pm 0,01$ mgon geschätzt wird.

Das in der Einleitung formulierte Genauigkeitsziel ist damit nicht ganz erreicht. Nach den bisherigen Erfahrungen mit der derzeitigen Konstruktion läßt sich jedoch durch konstruktive Änderungen eine wesentliche Steigerung der Genauigkeit erzielen. Darüber wird im nächsten Abschnitt berichtet.

6. Umbau des Neigungstisches

Aufgrund der umfangreichen Erfahrungen und Untersuchungen sollen im folgenden einige Vorschläge zum Umbau des Neigungstisches unterbreitet werden, die jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr realisiert werden konnten.

6.1 Einbau gleicher Reflektoren und Interferometer

Aus Gleichung (20a)

$$\Delta e = d_1 \left(n_1 - \frac{n_1}{\cos \gamma_1} + \tan \gamma_1 \sin \alpha \right) - d_2 \left(n_2 - \frac{n_2}{\cos \gamma_2} + \tan \gamma_2 \sin \alpha \right) \quad (20a)$$

geht hervor, daß bei gleicher Höhe d_1 und d_2 und gleichen Brechungskoeffizienten n_1 und n_2 der Reflektoren die Verbesserung $\Delta e = 0$ wird.

Dies kann näherungsweise erreicht werden, wenn der Linearreflektor der Y-Achse durch einen Einstrahlreflektor ersetzt wird. Dabei ist es auch notwendig, das Linearinterferometer durch ein Einstrahlinterferometer zu ersetzen. Zusätzlich wird noch ein Strahlenumlenker benötigt. Abbildung 38 zeigt den Vorschlag zum Umbau des Neigungstisches.

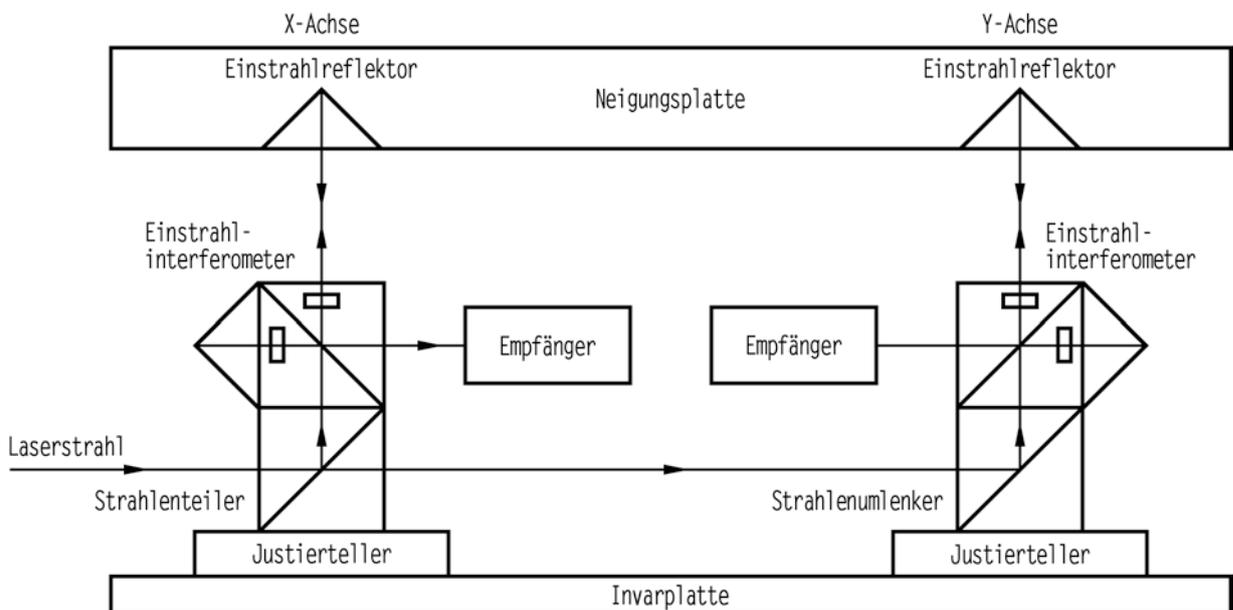


Abb. 38: Vorschlag zum Umbau des Neigungstisches

Da die Facetten des Einstrahlreflektors präziser bearbeitet sind als die des Linearreflektors (siehe Abschnitt 4.7.2), ergibt sich durch diese Änderung des optischen Aufbaus bei der interferometrischen Bestimmung des Prismenabstandes auf der Komparatorbank eine wesentlich höhere Genauigkeit. Nimmt man für beide Einstrahlreflektoren an, daß der Punkt V' mit derselben Genauigkeit von $s_{V'} = \pm 2,0 \mu\text{m}$ bestimmbar ist, so ergibt sich nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz die Standardabweichung des Abstandes zu $s_b = \pm 2,8 \mu\text{m}$. Der Einfluß auf die Genauigkeit der maximalen Neigung beträgt dann nur noch $\pm 0,01 \text{ mgon}$. Eine weitere wesentliche Steigerung der Genauigkeit ist zu erwarten, wenn das beschriebene Meßprogramm mehrfach wiederholt wird.

Durch diese Maßnahme wird die eingangs gestellte Forderung erfüllt, den Neigungswinkel α im gesamten Meßbereich von $\sim \pm 2,2 \text{ gon}$ mit einer Standardabweichung $s_\alpha \leq \pm 0,01 \text{ mgon}$ zu messen.

6.2 Einbau einer Invarplatte

Wie in Abschnitt 5.2.2 ausgeführt, ändert eine Temperaturschwankung von $\pm 1 \text{ K}$ den Abstand b zwischen den Reflektoren um $\pm 6 \mu\text{m}$. Wenn man nun die beiden Einstrahlreflektoren in eine Invarplatte einläßt, ändert sich bei derselben Temperaturschwankung der Abstand b wegen des geringeren Ausdehnungskoeffizienten von Invar nur um $\pm 0,6 \mu\text{m}$. Der dann noch verbleibende Winkelfehler $\delta\alpha = \pm 0,003 \text{ mgon}$ ist vernachlässigbar klein. Die Temperatur muß dann nicht mehr gemessen werden.

Die Invarplatte darf nur an einem Ende starr mit der Neigungsplatte verbunden sein, damit die größere Ausdehnung von Guß nicht auf das Invar übertragen wird.

6.3 Einbau eines Schrittmotors

Für die automatische Durchführung von Messungen mit dem Neigungstisch wird der Einbau eines Schrittmotors empfohlen. Der Schrittmotor kann über ein Interface mit dem angeschlossenen Hewlett Packard Tischrechner gesteuert werden. Mit Hilfe des Schrittmotors wird es möglich sein, die Neigungsplatte in beliebig wähl-

baren Intervallen an jede gewünschte Position zu bringen.

Ein weiterer Vorteil der automatischen Steuerung ergibt sich durch die vollkommen berührungslose Durchführung der Messungen.

Bei der Kalibrierung einiger elektronischer Neigungsmesser, bei denen die Meßsignale abgegriffen werden können, geschehen dann die Messungen ohne äußere Einwirkung vollkommen automatisch.

TEIL B: Untersuchung und Kalibrierung geodätischer Instrumente

Im zweiten Teil der vorliegenden Arbeit wird über Anwendungen des Neigungstisches berichtet. Von den zahlreichen Untersuchungen und Kalibrierungen, die an einem Autokollimator, an elektronischen Neigungsmessern und Kompensatoren von Sekundentheodoliten durchgeführt wurden, werden einige herausgestellt und ihre Ergebnisse diskutiert.

7. Kalibrierung eines photoelektrischen Autokollimators

Die Kalibrierung des photoelektrischen Autokollimators von Rank, Taylor, Hobson, Typ 53A, Instrumentennummer A42/21-283 (Abbildung 39), soll als erstes Anwendungsbeispiel für den Präzisionsneigungstisch angeführt werden.

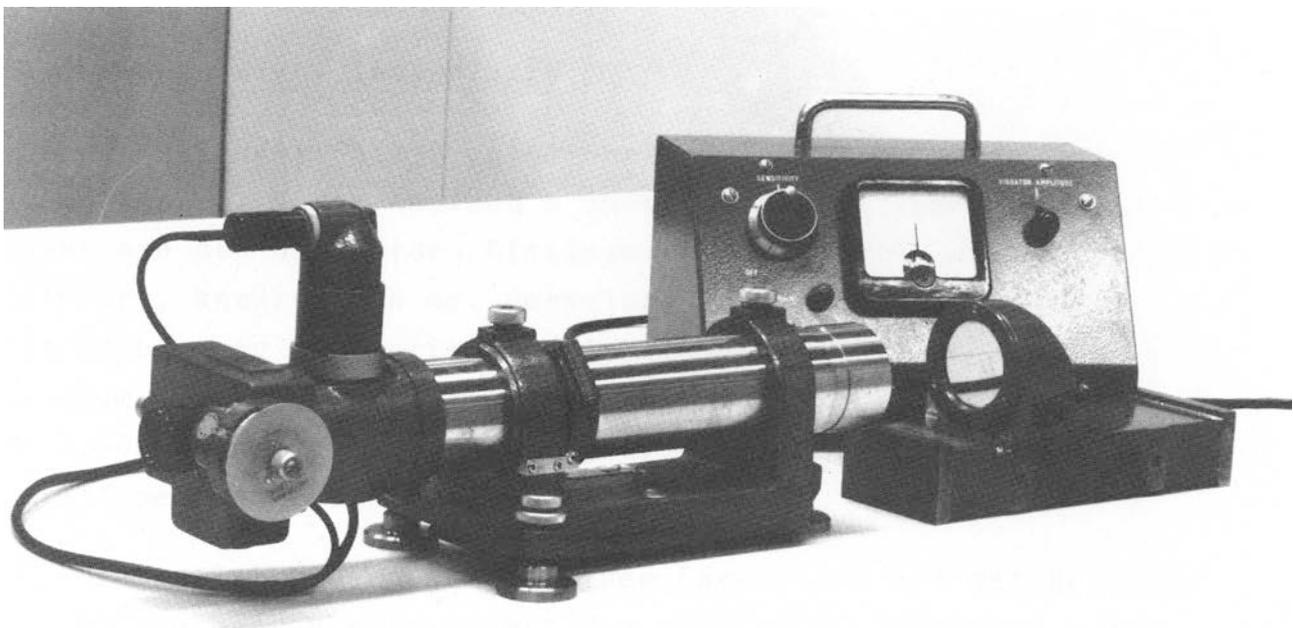


Abb. 39: Autokollimator mit photoelektrischer Anzeige

Autokollimatoren finden im Maschinenbau und in der Geodäsie vielseitige Verwendungsmöglichkeiten, so zum Beispiel beim Messen kleiner Winkel, beim Überprüfen der Geradheit von Führungsbahnen von Werkzeugmaschinen, beim Ausrichten von Tischen und bei der Bestimmung der Ebenheit von Maschinenbetten.

Der Autokollimator, über dessen Untersuchung berichtet wird, wurde bei der Justierung des Neigungstisches (Absatz 4.4.2.4 und 4.6.1) und bei der Überprüfung der Ebenheit des Granittisches (Absatz 4.4.2.6) bereits eingesetzt.

7.1 Beschreibung des Instrumentes

Bei einem Autokollimationsfernrohr befindet sich in der Brennebene des Objektivs ein Fadenkreuz, das ins Unendliche abgebildet wird. Wenn ein Planspiegel genau senkrecht in den Strahlenweg gebracht wird, so wird das Bild reflektiert und in der Brennebene abgebildet (Abbildung 40a). Wenn der Planspiegel jedoch um einen kleinen Winkel θ gegen die Kollimationsebene geneigt ist, erscheint das Spiegelbild des Fadenkreuzes um den Winkel 2θ versetzt (Abbildung 40b).

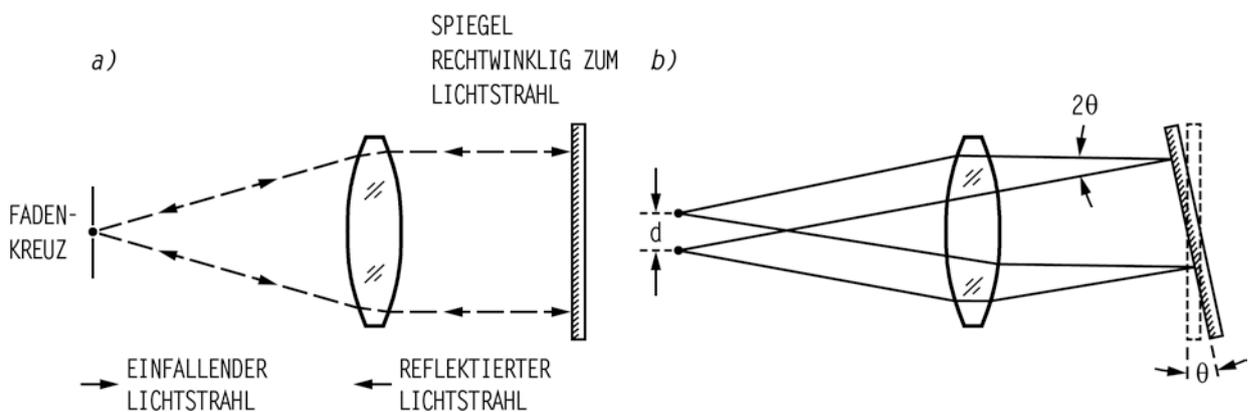


Abb. 40: Prinzip eines Autokollimators

Bei dem photoelektrischen Autokollimator (Abbildung 41) wird θ beziehungsweise d nicht visuell abgelesen, sondern mit Hilfe eines Detektors bestimmt. Der Detektor besteht aus einer Photozelle und einem mit einem Mikrometer gekoppelten Vibratorschlitz. Die Intensität des auf die Photozelle treffenden Lichtes hängt von der Position des schwingenden Schlitzes ab. Der Ausgangsstrom der Photozelle wird verstärkt und gelangt über einen Diskriminator an das Anzeigegerät, das praktisch die Asymmetrie angibt. Ist der Schlitz so positioniert, daß er symmetrisch um das reflektierte Fadenkreuz schwingt, so zeigt das Gerät Null an.

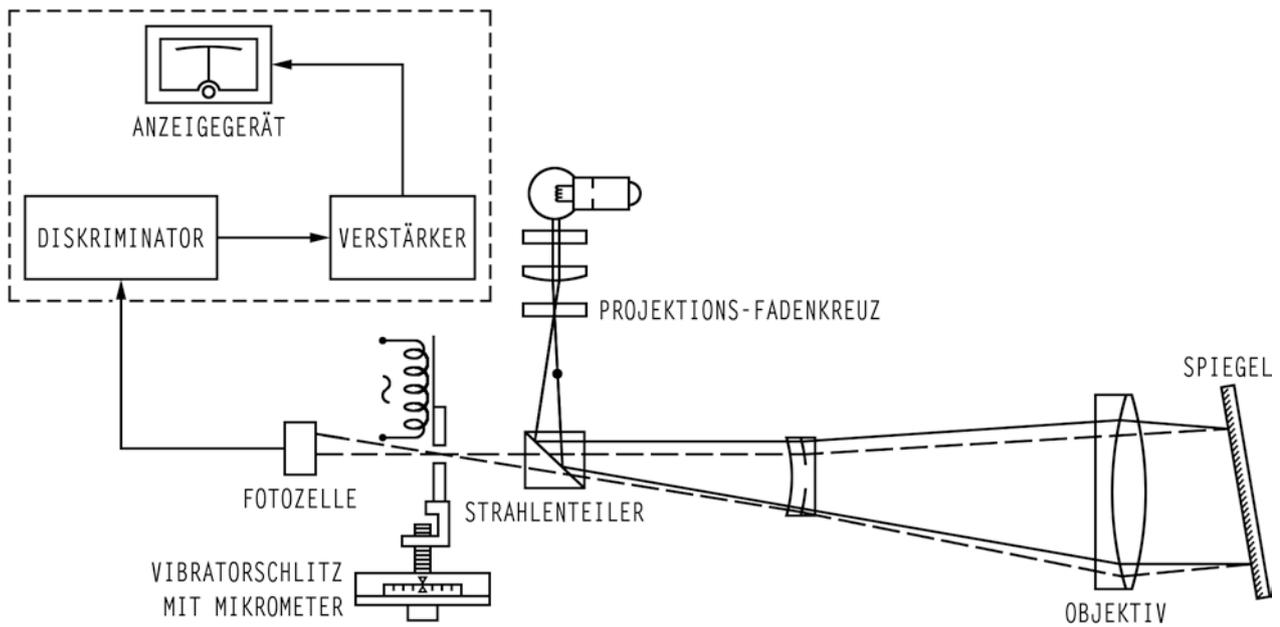


Abb. 41: Prinzip des photoelektrischen Autokollimators

Die wichtigsten technischen Angaben sind folgende:

Meßbereich: 10'; maximale Entfernung: 15 m; Vergrößerung: 43-fach;
Einstellgenauigkeit: 0,05"; Genauigkeit über das gesamte 10' In-
tervall: 2,0"; Genauigkeit für ein Intervall: 0,5"; Meßtrommelein-
teilung: 30"; kleinster direkt ablesbarer Meßwert: 0,1".

7.2 Kalibrierung

Ziel der Messungen war es, die Kennlinie des gesamten Meßbereichs von zehn Bogenminuten und die Wiederholgenauigkeit der Neigungsmessung zu bestimmen.

7.2.1 Meßanordnung

Die Meßanordnung (Abbildung 42) ist praktisch identisch mit der zur indirekten Bestimmung des Abstandes b mit Hilfe von Spiegelkeilen (Absatz 4.6.1). Der Planspiegel wird auf die Neigungsplatte über der Kippachse des Tisches gestellt und mit dem rechtwinkligen Koordinatenraster der Stahlplatte ausgerichtet. Der Autokollimator wird im Abstand von circa 20 cm hinter dem Planspiegel

auf gleicher Höhe aufgebaut. Der Laser steht hinter dem Autokollimator. In der stabilen Unterlage des Autokollimators befindet sich eine Öffnung für den Laserstrahl. Zur Vermeidung kurzzeitiger Anzeigeänderungen auf Grund von Turbulenzen wird der Luftweg zwischen Autokollimator und Planspiegel durch ein selbsttragendes Rohr geschützt.

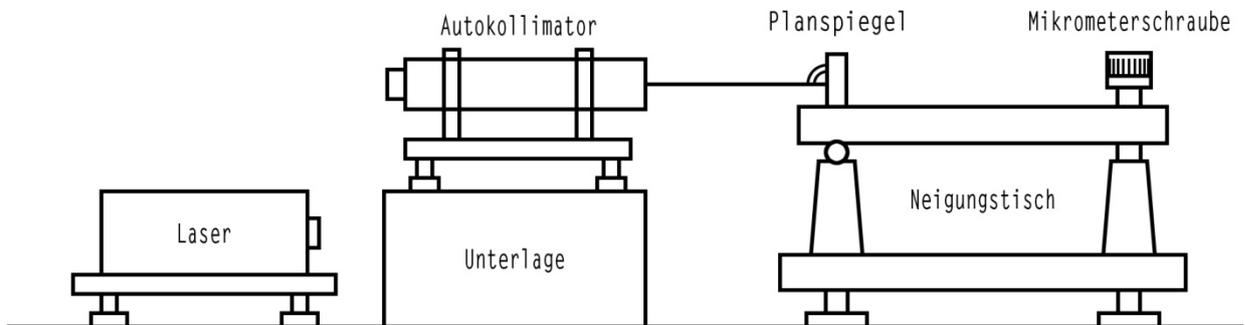


Abb. 42: Meßanordnung zur Autokollimatoruntersuchung

7.2.2 Kalibrierung des gesamten Meßbereiches

Als erstes wurde der gesamte Meßbereich untersucht, das heißt es wurden die beiden Randwerte $0'00,0''$ und $10'00,0''$ mit dem Autokollimator eingestellt und mit der tatsächlichen Neigung des Kippstisches verglichen. In Tabelle 6 sind beispielhaft die Ablesungen und Berechnungen der ersten Meßreihe angegeben.

Es wurden insgesamt drei Meßreihen durchgeführt, deren Ergebnisse in Tabelle 7 zusammengefaßt sind.

Die Ergebnisse zeigen eine gute Reproduzierbarkeit. Als gewogenes Mittel ergibt sich $\alpha = 10'01,51''$ mit einer Standardabweichung $s_\alpha = \pm 0,03''$. Die Abweichung vom Sollwert $10'00,0''$ beträgt $\Delta\alpha = \alpha (\text{Soll}) - \alpha (\text{Ist}) = 1,51''$. Dieser Wert liegt innerhalb der vom Hersteller angegebenen Toleranz von $2''$.

Auch der gemessene mittlere Einstellfehler an der Meßtrommel von $\pm 0,03''$ ist etwas kleiner als vom Hersteller genannt.

Mikrometer- einstellung Autokollimator	Ablesungen am Laserinterferometer [gon]				
10'00,0"	-0,083794	-0,083752	-0,083747	-0,083759	-0,083751
0'00,0"	0,101966	0,101968	0,101937	0,101942	0,101886
$\Delta\alpha_i$ [gon]	0,185760	0,185720	0,185684	0,185701	0,185637
$\Delta\alpha_i$ [°]	10'01,86"	10'01,73"	10'01,62"	10'01,67"	10'01,46"
10'00,0"	-0,083785	-0,083789	-0,083789	-0,083788	-0,083802
0'00,0"	0,101889	0,101758	0,101766	0,101805	0,101809
$\Delta\alpha_i$ [gon]	0,185674	0,185547	0,185555	0,185593	0,185611
$\Delta\alpha_i$ [°]	10'01,58"	10'01,17"	10'01,20"	10'01,32"	10'01,38"
$\Delta\alpha_m$ [gon]	0,185648	$\pm 0,000023$			
$\Delta\alpha_m$ [°]	10'01,50"	$\pm 0,07''$			

Tab. 6: Beispiel einer Meßreihe zur Kalibrierung des gesamten Meßbereiches

Meßreihe	Winkel α	s_α	Freiheitsgrad
1	10'01,50"	$\pm 0,07''$	9
2	10'01,53"	$\pm 0,05''$	15
3	10'01,50"	$\pm 0,06''$	11
Mittelwert	10'01,51"	$\pm 0,03''$	37

Tab. 7: Zusammenstellung der Ergebnisse zur Untersuchung des gesamten Meßbereiches

7.2.3 Kalibrierung des Skalenwertes einer Bogenminute

Ziel dieser Kalibrierung war es, den Skalenwert jedes einzelnen Minutenintervalls von 0' bis 10' zu bestimmen. Für diese Kalibrierung wurde jede einzelne Bogenminute an einer Meßtrommel des

Autokollimators eingestellt und mit der tatsächlichen Neigung des Kipptisches verglichen. Es wurden mehrere Meßreihen in Hin- und Rückgang durchgeführt. Für die Ausglei- chung der Messungen wurde ein lineares Modell verwendet. In Tabelle 8 sind beispielhaft die gemessenen und ausgeglichenen Kipptischneigungen sowie die Verbesserungen v der ersten Meßreihe (Hingang) angegeben.

Mikrometer- einstellung Autokollimator	Kipptisch- neigung α_i' [gon] gemessen	Kipptisch- neigung α_i' [gon] ausgeglichen	$v_i = \alpha_i' - \alpha_i$	
			[0,1 mgon]	["]
0'00,0"	0,101188	0,101292	+1,04	+0,33
1'00,0"	0,082816	0,082735	-0,81	-0,26
2'00,0"	0,064217	0,064178	-0,39	-0,13
3'00,0"	0,045679	0,045621	-0,58	-0,19
4'00,0"	0,027114	0,027064	-0,50	-0,16
5'00,0"	0,008577	0,008507	-0,70	-0,23
6'00,0"	-0,010022	-0,010050	-0,28	-0,09
7'00,0"	-0,028596	-0,028607	-0,11	-0,04
8'00,0"	-0,047213	-0,047164	+0,49	+0,16
9'00,0"	-0,065798	-0,065721	+0,77	+0,25
10'00,0"	-0,084380	-0,084278	+1,02	+0,33

Tab. 8: Beispiel einer Meßreihe zur Bestimmung des Skalenwertes für eine Bogenminute

In Abbildung 43 wurden für zwei Meßreihen die Verbesserungen v in Abhängigkeit der Neigung aufgetragen. Dabei fällt auf, daß die Verbesserungen nicht reproduzierbar sind. Es ist kein systematisches Verhalten zu erkennen. Daher erscheint es als nicht sinnvoll, für jedes Minutenintervall einen eigenen Skalenwert anzugeben. Der durchschnittliche Skalenwert einer Bogenminute ergibt sich aus dem in Tabelle 7 angegebenen Mittelwert 10'01,51", indem man diesen durch 10 teilt: 1'00,15". Die Abweichung vom Sollwert 1'00,00" beträgt $\Delta\alpha = \alpha(\text{Soll}) - \alpha(\text{Ist}) = +0,15"$.

Sie liegt innerhalb der vom Hersteller angegebenen Toleranz von 0,5".

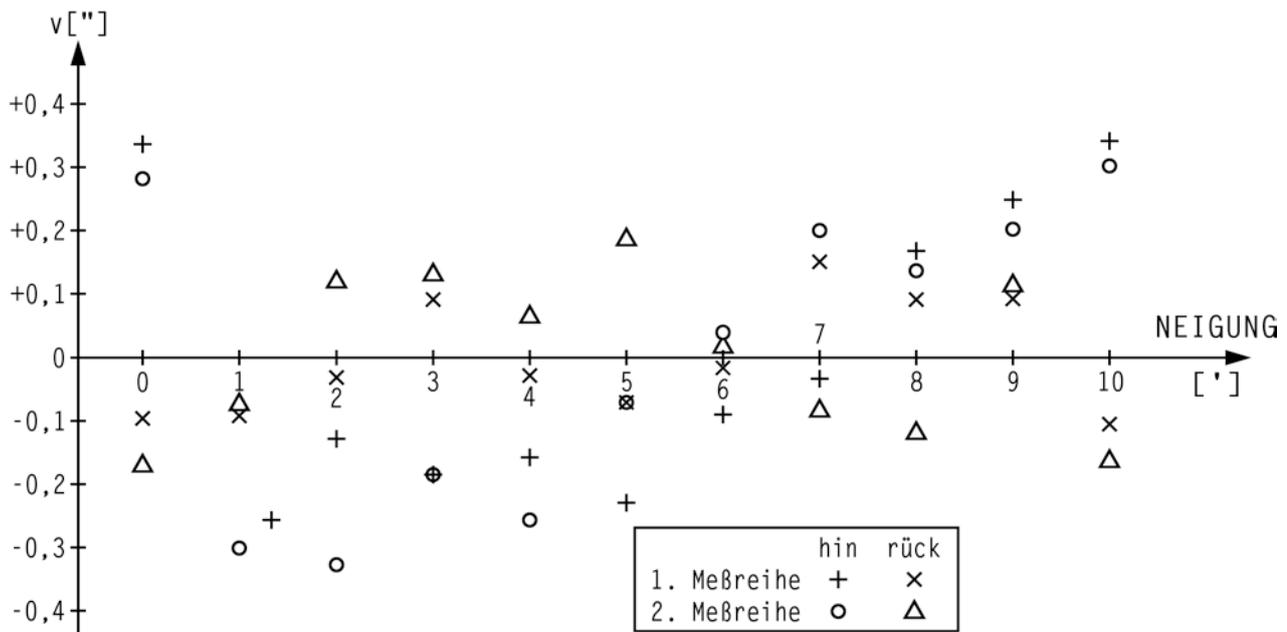


Abb. 43: Darstellung der Verbesserungen v nach der Ausgleichung über der Neigung pro Bogenminute für den Rank, Taylor, Hobson Autokollimator TA 53

Die Standardabweichungen der Meßreihen, die aus den Verbesserungen v geschätzt werden, liegen zwischen $\pm 0,03''$ und $\pm 0,08''$. Sie sind damit im Einklang mit den Standardabweichungen, die sich bei der Kalibrierung des gesamten Meßbereiches ergaben (Tabelle 7).

7.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Kalibrierungsmessungen an dem photoelektrischen Autokollimator von Rank, Taylor, Hobson ergaben für den gesamten Meßbereich einen Skalenwert von $10'01,51'' \pm 0,03''$, der 1,51" vom Sollwert abweicht.

Die Bestimmung eines eigenen Skalenwertes für jedes Minutenintervall erwies sich als nicht sinnvoll.

Für genaue Messungen kann ein Maßstabsfaktor

$$m = \frac{10'00,00''}{10'01,51''} = 0,99749 = 1 - 2,5 \cdot 10^{-3}$$

an die Ablesungen angebracht werden.

Die erzielten Ergebnisse sind, obwohl sie in Einklang mit den Herstellerangaben sind, dennoch nicht ganz befriedigend. Eigentlich müßten die Meßwerte besser reproduzierbar sein. Der Hauptgrund, daß dies nicht zutrifft, liegt in der Nichtstabilität der photoelektrischen Anzeige begründet. Bei allen Messungen, die sich über einige Zeitminuten erstrecken, wird eine relativ große Drift beobachtet. Dies kommt deutlich in den Ergebnissen der Tabelle 6 und Abbildung 43 zum Ausdruck. Die Drift liegt für beide Beispiele im Bereich von 0,2 mgon. Die Ursachen der Drift - vermutet werden Einflüsse von Wärme und Luftturbulenzen - sollten noch näher untersucht werden, um die dem photoelektrischen Autokollimator innewohnende Genauigkeit und Reproduzierbarkeit voll auszuschöpfen.

8. Kalibrierung elektronischer Neigungsmesser

8.1 Zielsetzung

Seit längerer Zeit ist zu beobachten, daß die elektronischen Neigungsmesser, obwohl sie ursprünglich für andere Zwecke konzipiert wurden, verstärkt auch in der Geodäsie Verwendung finden. Die meisten der angebotenen Instrumente haben einen relativ kleinen Meßbereich von weniger als 0,1 gon. Es werden aber auch elektronische Neigungsmesser angeboten, die Neigungsbereiche von mehreren Gon aufweisen.

Will man in der Praxis den gesamten Meßbereich ausnutzen, so müssen die Neigungsmesser kalibriert werden. Dazu eignet sich der Neigungstisch in besonderem Maße, da er über einen großen Neigungsbereich und eine hohe Genauigkeit verfügt.

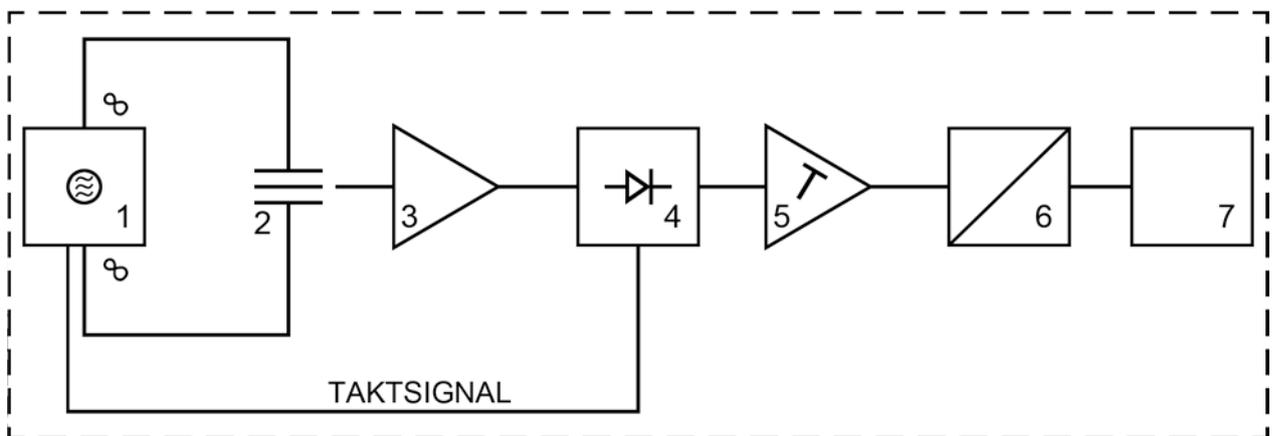
8.2 Beschreibung der untersuchten Neigungsmesser

Für die folgenden Untersuchungen wurden drei elektronische Neigungsmesser ausgewählt: zwei SCHAEVITZ, Typ LSRP, Nr. 3901 und 3902, und eine TESA, Typ Minilevel, Nr. 053.10021-5P.

Beide Typen zeichnen sich durch relativ große Meßbereiche und hohe Auflösungen aus.

8.2.1 TESA Minilevel (Abbildung 44)

Der Hersteller bezeichnet die Minilevel als autonomes elektronisches Nivelliergerät mit eingebauter Digitalanzeige von Neigungsrichtung und Winkelwert mit Hilfe von Flüssigkeitskristallen (LCD). Das Meßprinzip beruht auf den Pendeleigenschaften einer Massescheibe, die an drei Blattfedern zwischen zwei Elektroden aufgehängt ist. Die Massescheibe bildet mit den Elektroden einen Differentialkondensator, dessen Kapazitätsänderungen ein der Neigung entsprechendes elektrisches Signal erzeugt. Die in dem Differentialkondensator eingeschlossene Luft wirkt als pneumatische Schwingungsdämpfung. Die Speisung des Meß- und Anzeigesystems erfolgt mit handelsüblichen Batterien. Die Meßwerte können registriert werden. Für die Nulljustierung steht ein Potentiometer zur Verfügung.



1 = GEGENTAKTOSZILLATOR

3 = VERSTÄRKER

5 = SCHALTBARER VERSTÄRKER

7 = DIGITALANZEIGE

2 = DIFFERENTIALKONDENSATOR MIT
MASSENSCHEIBE

4 = PHASENEMPFINDLICHER GLEICHRICHTER

6 = ANALOG-DIGITAL-WANDLER

Abb. 44: TESA Minilevel mit Blockschaltbild

Die Minilevel verfügt über zwei Meßbereiche (Meßbereich I: $\pm 19,99 \text{ mm/m} \cong \pm 1^{\circ}08' \cong \pm 1,27 \text{ gon}$; Meßbereich II: $\pm 1,999 \text{ mm/m} \cong \pm 6'52'' \cong \pm 0,13 \text{ gon}$). Daraus ergibt sich für den kleinsten Skalenwert $0,01 \text{ mm/m}$ des Meßbereichs I ein Winkel von etwa $2''$ ($0,6 \text{ mgon}$) und für den kleinsten Skalenwert $0,001 \text{ mm/m}$ des Meßbereichs II ein Winkel von etwa $0,2''$ ($0,06 \text{ mgon}$). Als Abweichung der Anzeige gibt der Hersteller $\pm 10 \%$ des Anzeigewertes an. Das Gewicht beträgt $1,3 \text{ kg}$. Die Minilevel hat folgende Maße: Länge 150 mm , Breite 45 mm , Höhe 160 mm .

8.2.2 SCHAEVITZ LSRP (Abbildung 45)

Die SCHAEVITZ Neigungsmesser arbeiten nach dem Prinzip der Horizontalpendels. Wird der Neigungsaufnehmer, der mit $\pm 15 \text{ V}$ Gleichstrom gespeist wird, um den Winkel α geneigt, so versucht das Horizontalpendel ("Paddel") sich aufgrund der Schwerkraft in Richtung der Neigung zu bewegen. Jede so entstehende Bewegung wird durch einen Sensor in ein Steuersignal umgewandelt, das einem Drehmomentmotor zugeführt wird. Dieser erzeugt ein der Größe nach gleiches, aber entgegengerichtetes Drehmoment, das die seismische Masse in ihrer Lage festhält. Der Strom des Drehmomentmotors ist dem Neigungswinkel direkt proportional. Er wird durch einen Stabilisierungswiderstand R_0 geleitet, wodurch eine sehr genaue Ausgangsspannung erzeugt wird. An beiden Seiten des "Paddels" sind Begrenzer angebracht, um die Bewegung im ausgeschalteten Zustand anzuhalten. Beim Einschalten bewegt sich das "Paddel" automatisch in die Nullposition. In horizontaler Position ist das Ausgangssignal Null, bei Neigungen maximal $\pm 5 \text{ V}$, was bei dem LSRP $\pm 3^{\circ}$ entspricht.

Für die Untersuchungen wurden zwei LSRP Neigungsmesser (Durchmesser 35 mm , Höhe 40 mm , Gewicht je $0,2 \text{ kg}$) verwendet. Diese sind so aufeinander befestigt, daß sie als zweiachsiges Meßsystem verwendbar sind.

Da SCHAEVITZ kein Anzeigegerät anbietet, wurde ein Anzeigegerät von der Firma Ernst Frey, München, gefertigt, das die Meßwerte jeder Achse in Bogensekunden (Ablesung $0,1''$) digital darstellt. Der Anzeigebereich beträgt $\pm 200''$.

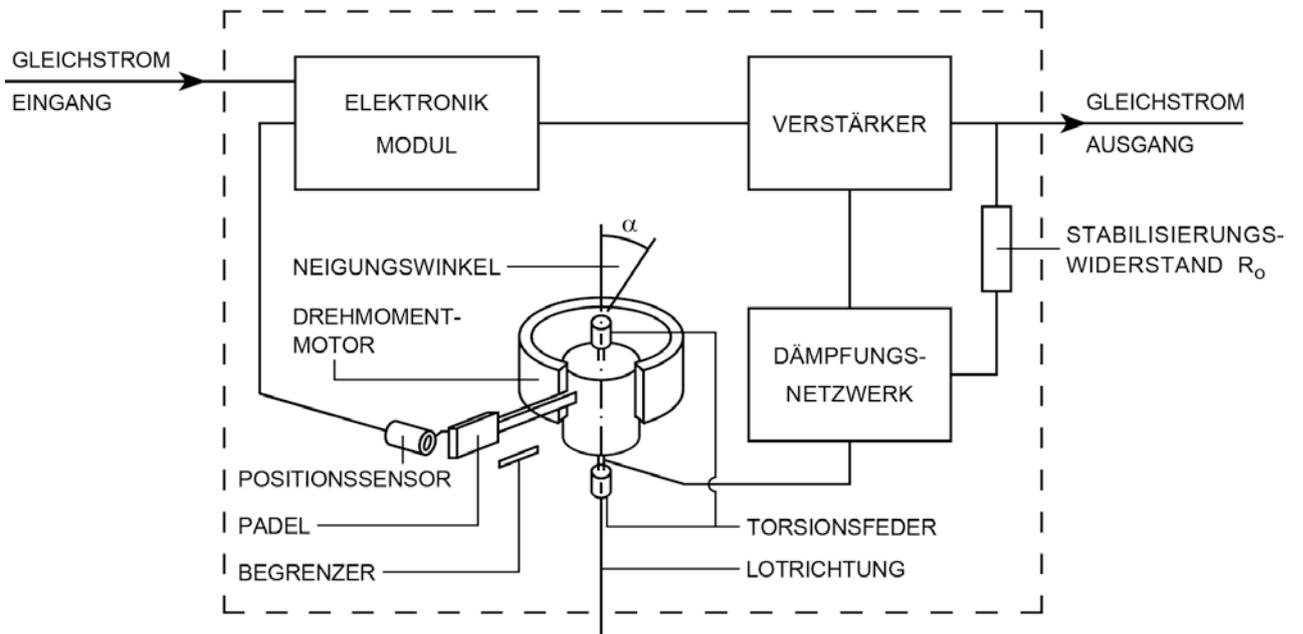
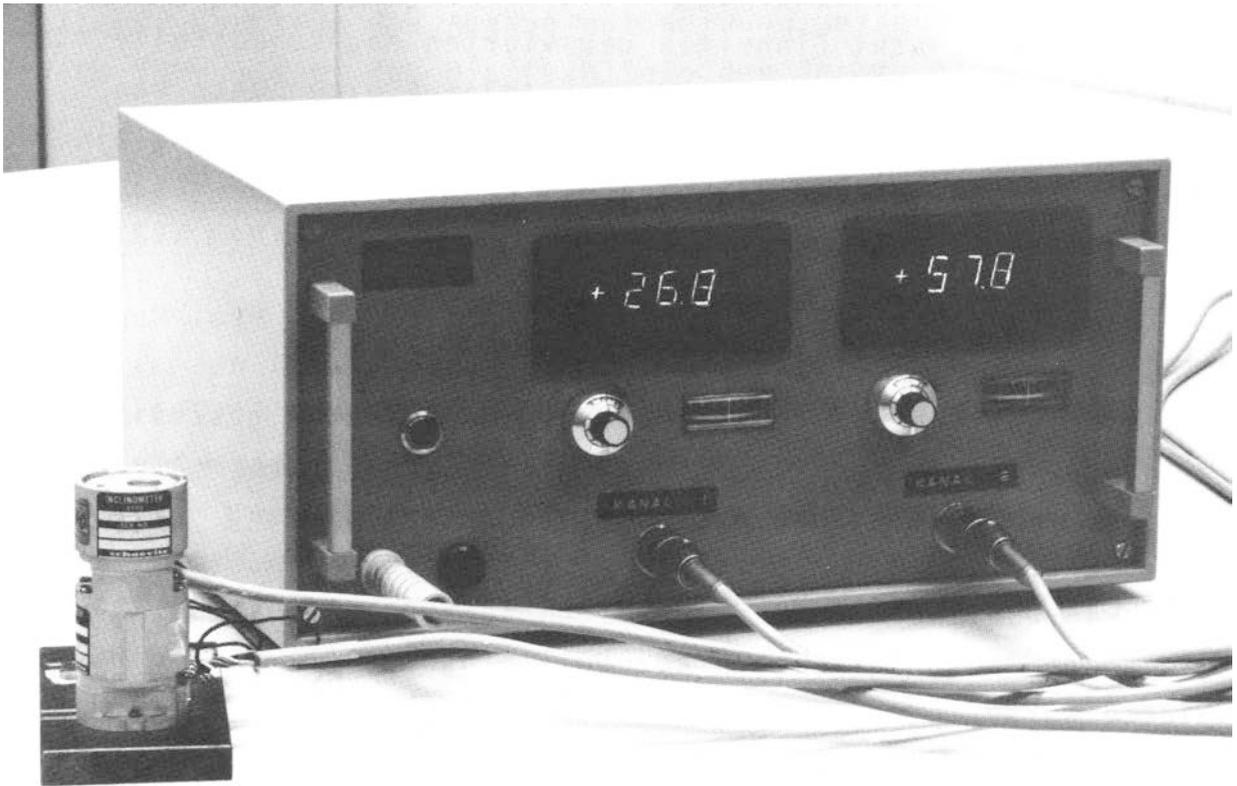


Abb. 45: SCHAEVITZ LSRP mit Anzeigegerät und Systemskizze

Da zusätzlich ein größerer Meßbereich untersucht werden sollte, wurde dazu das in der institutseigenen Datenerfassungsanlage "COMPULOG" eingebaute Digitalvoltmeter mit einer fünfstelligen Anzeige verwendet. Einer Bogensekunde Neigungsänderung entsprechen hier etwa acht Einheiten der vierten Nachkommastelle. Der Hersteller gibt als Linearität der Anzeige einen Wert von $\pm 0,02 \% \cong \pm 4,3''$ an. Darunter ist die größte Abweichung einer Einzelablesung von der Eichgeraden, bezogen auf den gesamten Meßbereich, zu verstehen.

8.3 Meßanordnung

Die elektronischen Neigungsmesser wurden auf der geschliffenen Neigungsplatte sorgfältig ausgerichtet. Sie wurden mehrere Stunden vor den Messungen eingeschaltet, um die während der Aufheizzeit auftretenden Verlagerungen (Drift) des Nullpunktes zu eliminieren. Bei horizontierter Neigungsplatte wurden die Ablesungen an den Neigungsmessern auf Null eingestellt. Die Neigungsplatte wurde in regelmäßigen Intervallen, die auf den Meßbereich abgestimmt sind, geneigt. Abgelesen wurden an den Anzeigegeräten die dazugehörigen digitalen Werte, die folgende Dimensionen haben:

Minilevel:	mm/m		
LSRP:	a) Anzeigegerät:	Bogensekunden	
	b) Digitalvoltmeter:	Volt	

Alle Messungen wurden in mehreren Meßreihen im Hin- und Rückgang durchgeführt.

8.4 Auswertemodell

Für die Auswertungen wurde das von CASPARY/GEIGER (1979) ausführlich beschriebene lineare Modell verwendet. In diesem Modell, das für alle zusammengehörigen Meßzeiten eine gemeinsame Steigung berechnet, werden nur die Additionskonstanten der Teilreihen verändert. Ein Maß für die Genauigkeit stellt die Standardabweichung s_0 dar, die bei den Ausgleichungen im linearen Modell aus den Verbesserungen geschätzt wird. Die Schätzung enthält neben dem mittleren Fehler des Neigungsmessers die mittleren

Systemfehler (Wiedergabefehler) und den (systematischen) Modellanpassungsfehler.

Die Verwendung eines linearen Modells setzt voraus, daß ein mittlerer Wert für die Angabe der Neigungsmesser ausreicht oder, anders formuliert, daß die Kennlinie der Geräte eine Gerade ist.

8.5 Genauigkeit der Neigungsmesser

8.5.1 TESA Minilevel

Die Ergebnisse zweier Meßreihen der TESA Minilevel, Meßbereich II, werden in den Abbildungen 46a (Neigungsbereich ± 10 mgon, Neigungsintervall 1 mgon) und 46b (Bereich ± 120 mgon, Neigungsintervall 10 mgon) sowie Tabelle 9 dargestellt.

Abb.	Neigungsbereich	Meßreihe	Gewichtseinheitsfehler s_0	Freiheitsgrad f	Angabe p (mgon/1 Digit)
46a	± 10 mgon	1	$\pm 0,0004$ mm/m = $\pm 0,024$ mgon	38	$0,060480 \pm 0,000038$
		2	$\pm 0,0006$ mm/m = $\pm 0,037$ mgon	38	$0,061189 \pm 0,000053$
46b	± 120 mgon	1	$\pm 0,0014$ mm/m = $\pm 0,085$ mgon	46	$0,061007 \pm 0,000010$
		2	$\pm 0,0026$ mm/m = $\pm 0,159$ mgon	6	$0,061108 \pm 0,000036$

Tab. 9: Schätzung der Meßgenauigkeit der TESA Minilevel

Abbildung 46a zeigt eine gute Anpassung an das lineare Modell. Die größten Verbesserungen liegen im Bereich von 0,06 mgon, was der kleinsten ablesbaren Einheit 0,001 mm/m entspricht. Das systematische Verhalten der Verbesserungen im Hin- und Rückgang läßt erwarten, daß durch eine höhere Auflösung des Meßsignals eine Genauigkeitssteigerung erzielbar ist. Erweitert man den Bereich auf ± 120 mgon (Abbildung 46b), so zeigt sich das systema-

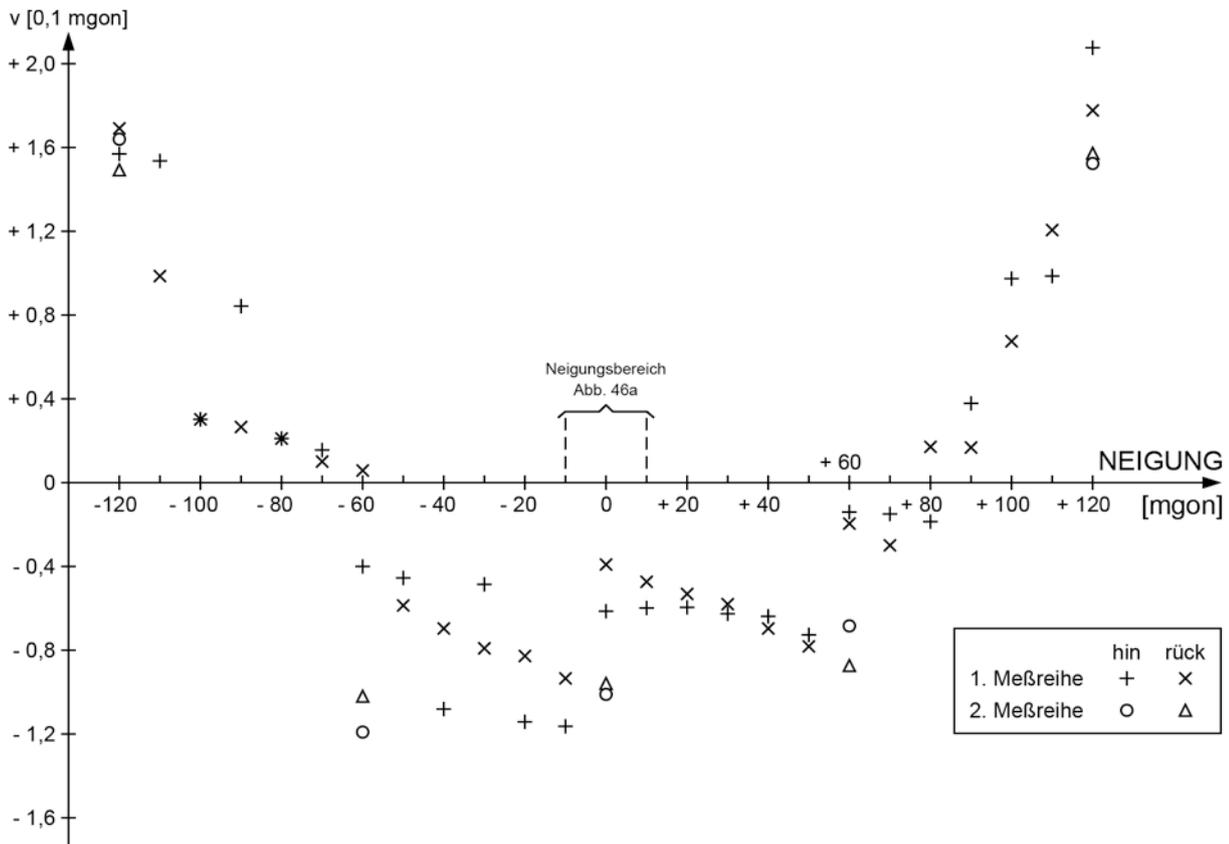
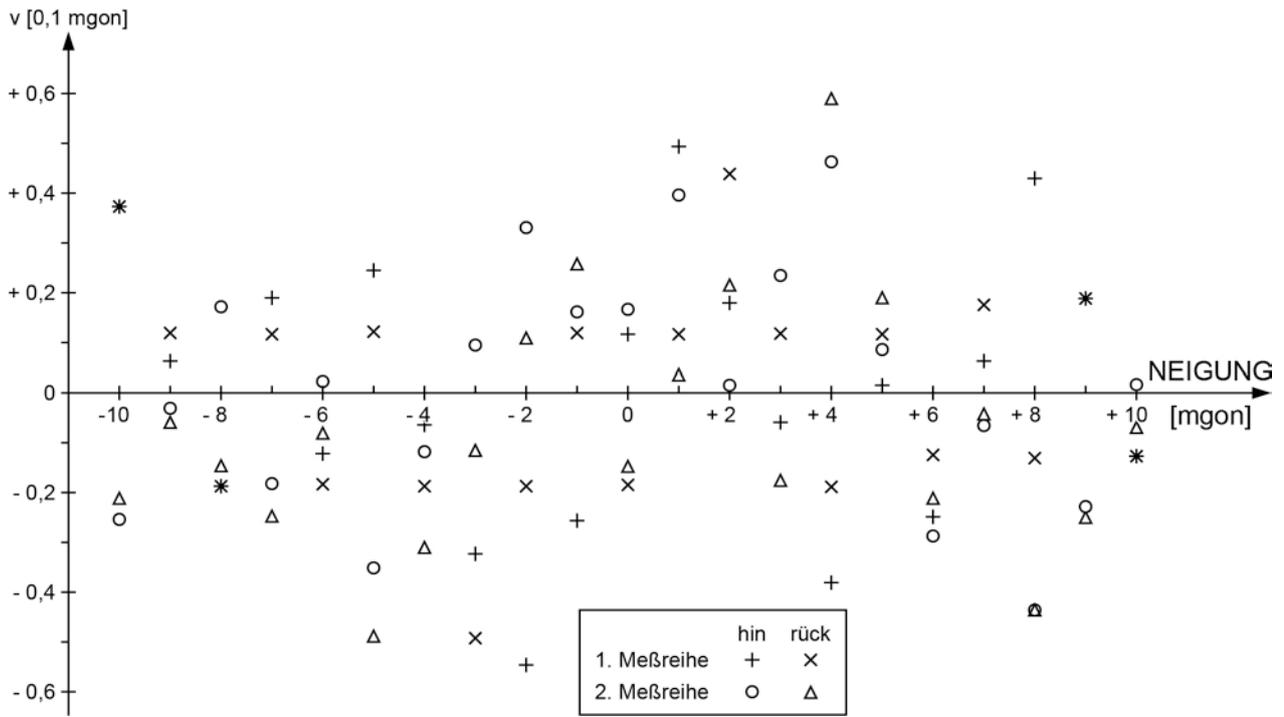


Abb. 46a und 46b: Darstellung der Verbesserungen nach der Ausglei-
 chung mit linearem Modell über der Neigung der
 TESA Minilevel, Meßbereich II

tische Verhalten der Verbesserungen noch ausgeprägter. Es erscheint daher als sinnvoll, durch einen Polynomansatz die Systematiken zu beseitigen.

Bei der Kalibrierung des Meßbereiches I ($\sim \pm 1,3$ gon), der zehnmal größer ist als Meßbereich II, zeigt die Kennlinie denselben systematischen Verlauf wie in Abbildung 46b dargestellt. Die Verbesserungen haben jedoch den zehnfachen Betrag. Daher ist auch für den größeren Meßbereich ein Polynomansatz erforderlich, wenn genauere Ergebnisse erhalten werden sollten.

Ein Vergleich der erzielten Ergebnisse mit den Herstellerwerten zeigt, daß die Minilevel bei weitem genauer mißt als es die vom Hersteller angegebene Abweichung des Anzeigewertes von $\pm 10\%$ erwarten läßt.

8.5.2 SCHAEVITZ LSRP

Die Ergebnisse einiger Meßreihen der beiden SCHAEVITZ Neigungsmesser LSRP zeigen die Abbildungen 47 (Bereich ± 60 mgon, Intervall 5 mgon) und 48 (Bereich - 1,4 gon bis + 2,0 gon, Intervall 20 mgon) sowie Tabelle 10.

Abbildung 47a zeigt eine gute Anpassung an das lineare Modell, während bei 47b ein systematisches Verhalten der Verbesserungen zu erkennen ist. Die Ergebnisse erwiesen sich bei weiteren Meßreihen mit dem LSRP 3902 als gut reproduzierbar. Durch einen Polynomansatz könnten diese Systematiken beseitigt werden. Für genaue Messungen ist es erforderlich, die Angabe p , die als Maßstabsfaktor zu verstehen ist, zu berücksichtigen. Die Standardabweichungen $s_0 = \pm 0,09''$ bis $\pm 0,18''$ liegen im Bereich des früher untersuchten SCHAEVITZ Neigungsmessers vom Typ LS0C, der einen Neigungsbereich von $\pm 1^\circ$ aufweist [CASPARY/GEIGER (1978)].

Sehr deutlich tritt die Nichtlinearität der Kennlinien der Neigungsmesser im großen Meßbereich auf (Abbildungen 48a und 48b). Bei Verwendung eines linearen Modells ist mit systematischen Fehlern bis zu $50''$ zu rechnen. Daher ist das lineare Modell nicht im ganzen Bereich anwendbar.

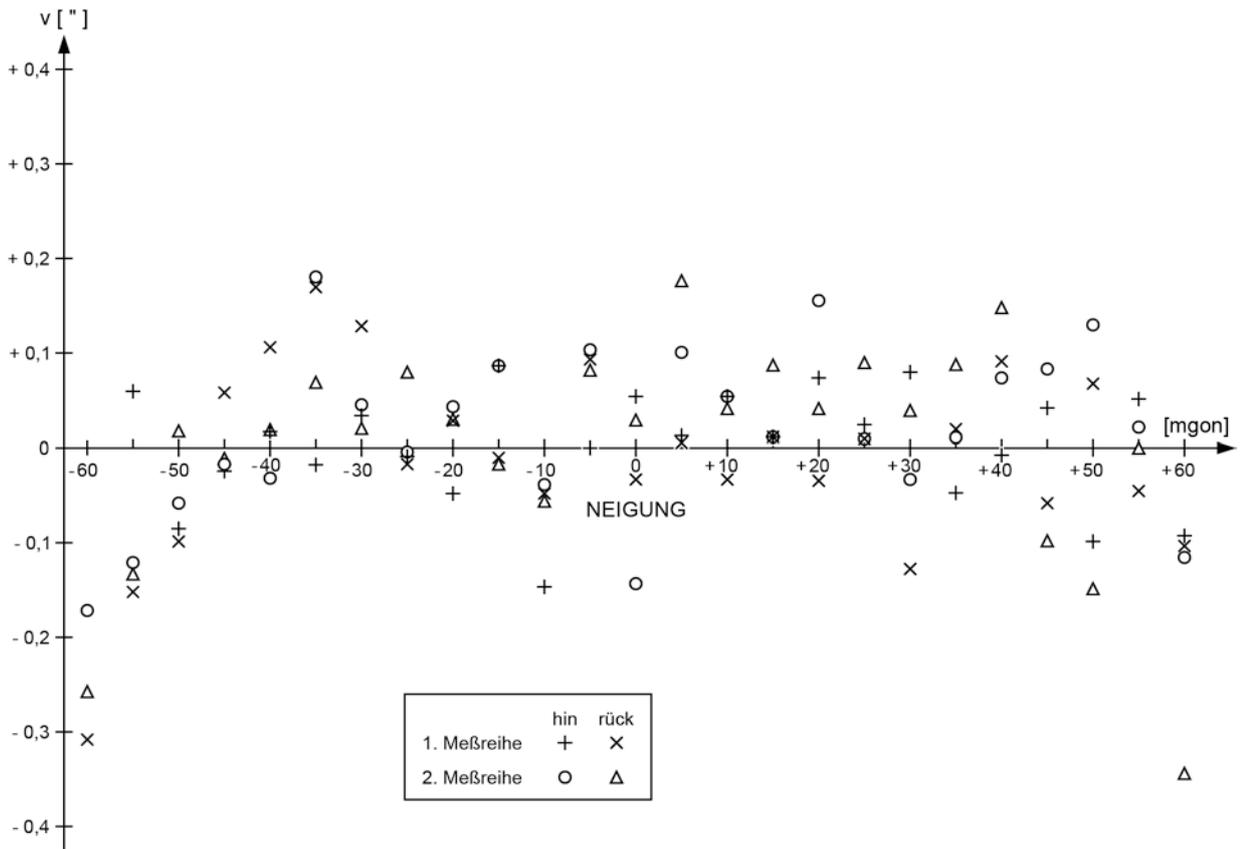


Abb. 47a: LSRP Nr. 3901

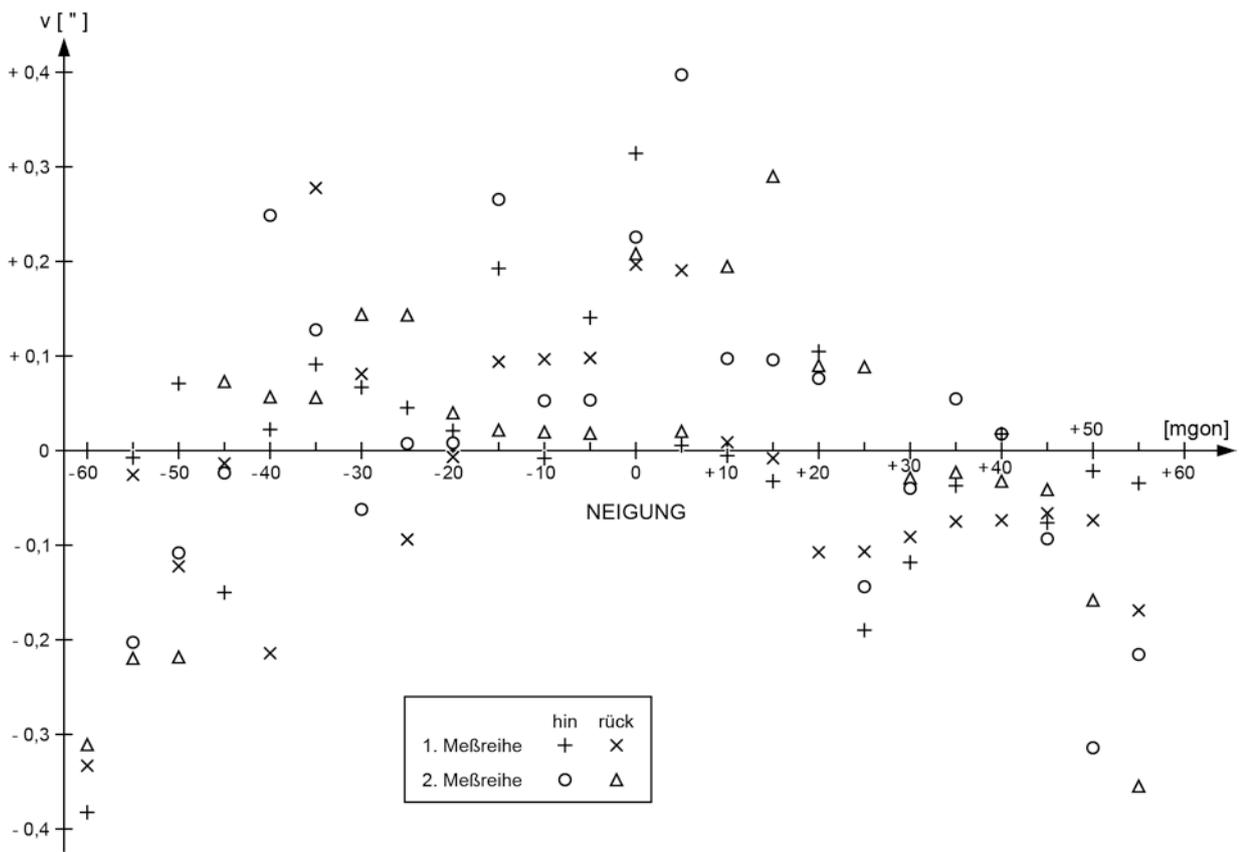


Abb. 47b: LSRP Nr. 3902

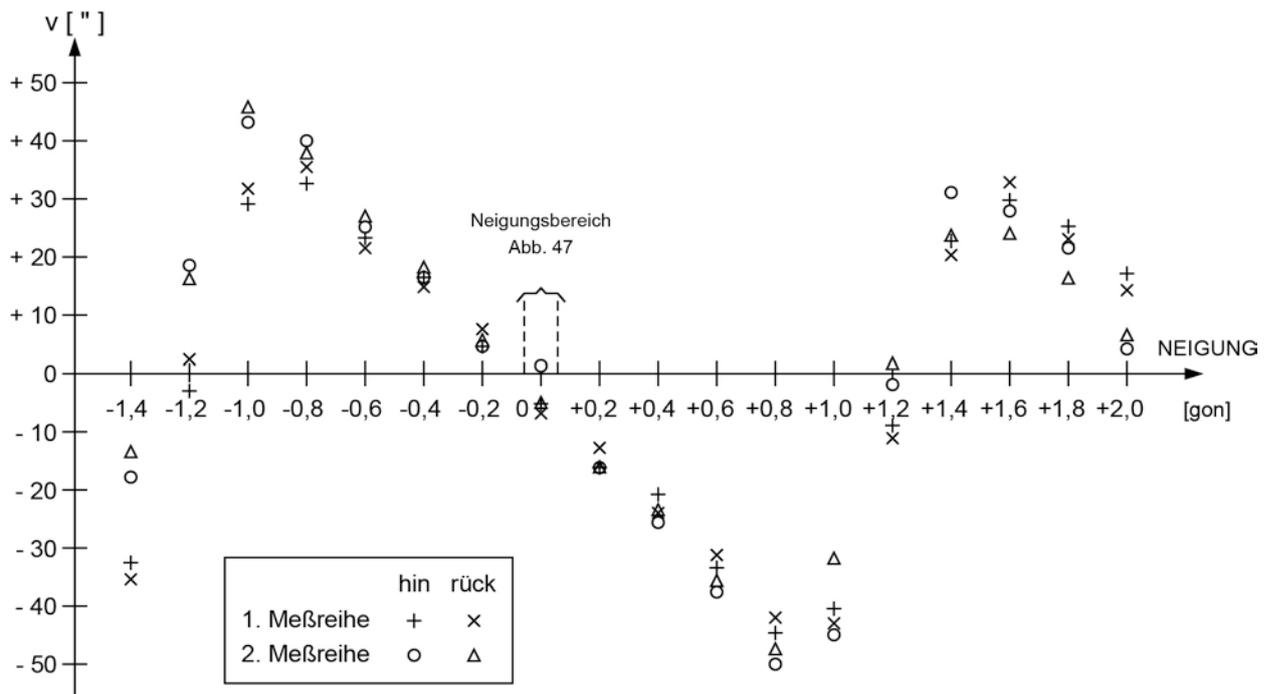


Abb. 48a: LSRP Nr. 3901

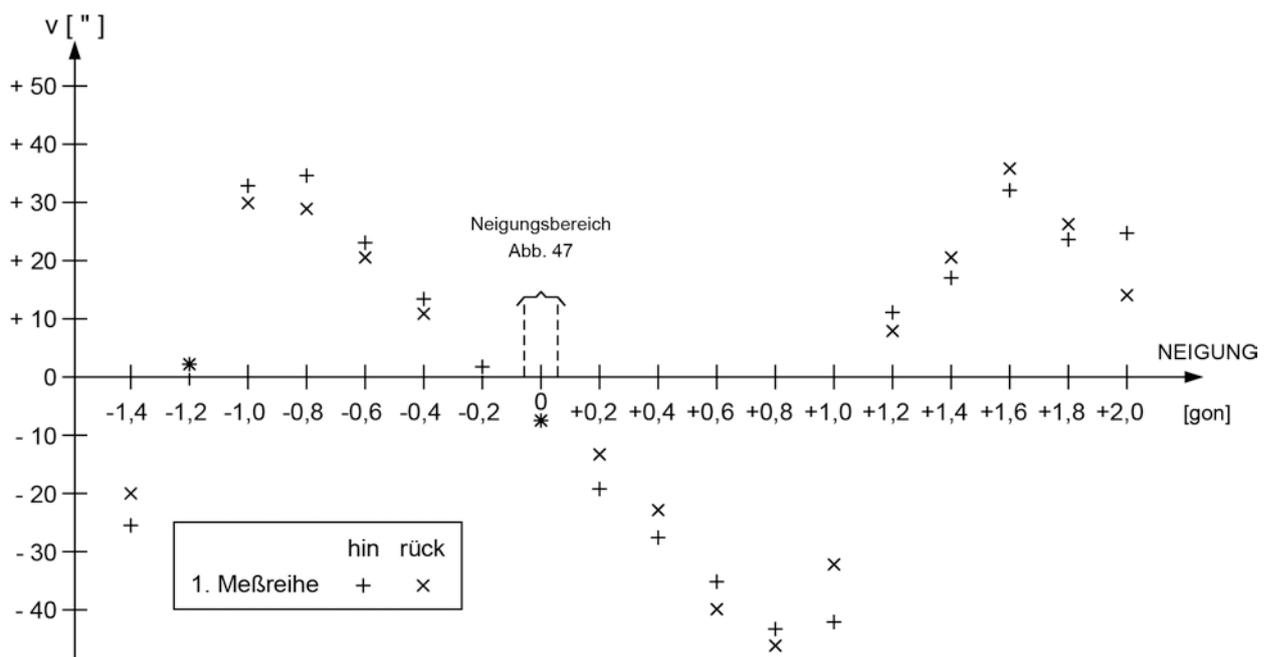


Abb. 48b: LSRP Nr. 3902

Abb. 47 und 48: Darstellung der Verbesserungen v nach der Ausgleichung mit linearem funktionalem Modell über der Neigung der beiden SCHAEVITZ Neigungsmesser LSRP

Abb.	Geräte Nr.	Neigungsbereich	Meßreihe	$s_0["]$	Freih. grad f	Angabe p ["] pro Skaleneinheit
47a	3901	± 60 mgon	1	$\pm 0,093$	44	$0,9905 \pm 0,0002$
			2	$\pm 0,113$	44	$0,9908 \pm 0,0002$
47b	3902	± 60 mgon	1	$\pm 0,144$	44	$0,9884 \pm 0,0003$
			2	$\pm 0,185$	44	$0,9884 \pm 0,0003$
48a	3901	-1,4 bis +2,0 gon	1	$\pm 27,3$	32	$7,828 \pm 0,011$
			2	$\pm 29,8$	34	$7,841 \pm 0,011$
48b	3902	-1,4 bis +2,0 gon	1	$\pm 27,2$	32	$7,770 \pm 0,010$
—	3901	+0,8 bis -0,8 gon	1	$\pm 1,59$	14	$7,9578 \pm 0,0002$
			2	$\pm 1,50$	14	$7,9586 \pm 0,0002$
—	3902	+0,8 bis -0,8 gon	1	$\pm 2,30$	14	$7,8876 \pm 0,0003$

Tab. 10: Schätzung der Meßgenauigkeit der beiden SCHAEVITZ Neigungsmesser LSRP

Die beiden Neigungsmesser zeigen im Rahmen der Meßgenauigkeit die gleichen Verbesserungen.

Beschränkt man den Arbeitsbereich auf + 0,8 bis - 0,8 gon, so erhält man die genauesten Ergebnisse. Das lineare Modell gibt dann das Verhalten mit $s_0 \approx \pm 1,5''$ bis $\pm 2,3''$ wieder. Die Angaben p ändern sich und nehmen dann die in der letzten Spalte der Tabelle 10 angegebenen Werte an.

8.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Kalibrierungen an den drei elektronischen Neigungsmessern zeigen die Wichtigkeit dieser Untersuchungen. Nur in einem Teil der Meßbereiche ergibt die Kennlinie eine Gerade, was die Verwendung einer mittleren Angabe p zuläßt.

Wenn jedoch größere Neigungen gemessen werden sollen, so muß die Nichtlinearität der Kennlinie berücksichtigt werden. Andernfalls werden die Messungen durch systematische Fehler verfälscht.

9. Kompensatoruntersuchungen an Sekundentheodoliten

9.1 Allgemeine Überlegungen

Höhenkreiskompensatoren legen einen Schenkel der Zenitdistanz fest und sind daher genauigkeitsbestimmend für die Zenitdistanzmessung. Systematische Fehler, die bei der Kompensation auftreten, müssen untersucht und eventuell beseitigt werden.

In der Literatur gibt es zwar zahlreiche Veröffentlichungen über Genauigkeitsuntersuchungen an Kompensatoren an Nivellieren, zum Beispiel KNUFINKE (1976), mit umfangreichen Literaturangaben. Über die Untersuchung von Kompensatoren in Sekundentheodoliten ist dagegen kaum etwas veröffentlicht worden [SOLTAU (1965), HALLERMANN (1970)]. FEIST (1972) und BAUCH (1974) untersuchten die in dem Universaltheodoliten Jenoptik Theo 002 verwendete Kompensatoreinrichtung. Allerdings haben die Ablaufkurven der Theodolitkompensatoren nicht ganz die Bedeutung wie bei automatischen Nivellieren, da hier die Horizontierung genauer durchgeführt werden kann.

Als weitere Anwendung für den Neigungstisch soll über die Kalibrierung von Sekundentheodoliten berichtet werden. Leider ist es nur möglich, die Kompensatorfehler auf dem Wege der Zenitdistanzmessung zu bestimmen. Deshalb spielen auch die Zieleinstell- und die Koinzidenzfehler eine Rolle, die abgespaltet werden müssen.

Für die eigentliche Bestimmung der Kompensatorfehler wird die hohe Genauigkeit des Neigungstisches nicht benötigt. Ein großer Vorteil besteht jedoch darin, daß die Zieleinstellfehler mit dem Neigungstisch sehr einfach und genau gemessen werden können (siehe 9.6.2).

Für die Untersuchung der Kompensatoren wurde je ein Instrument der vier gebräuchlichsten Typen von Sekundentheodoliten ausgewählt und zwar:

Zeiss Th2, Instr. Nr. 122894	Jenoptik Theo 010A, Instr. Nr. 800369
Wild T2, Instr. Nr. 206179	Kern DKM 2-A, Instr. Nr. 191671.

Natürlich kann aufgrund der kleinen Stichprobe kein Gesamturteil über Kompensatoren an Sekundentheodoliten abgeleitet werden. Dennoch sind erste Anhaltspunkte über das Verhalten dieser wichtigen Komponenten moderner Theodoliten zu erwarten. Die Messungen wurden größtenteils im Rahmen einer Diplomarbeit von APPELT und SCHMITT (1980) durchgeführt.

9.2 Wirkungsweise eines Kompensators

Unter dem Einfluß der Schwerkraft bezieht der Kompensator die Ablesung am Vertikalkreis auf die Lotrichtung am Beobachtungsort, indem er die in der Zielebene liegende Komponente der restlichen Stehachsneigung automatisch berücksichtigt. Die Wirkungsweise eines Neigungskompensators wird an Abbildung 49 erläutert.

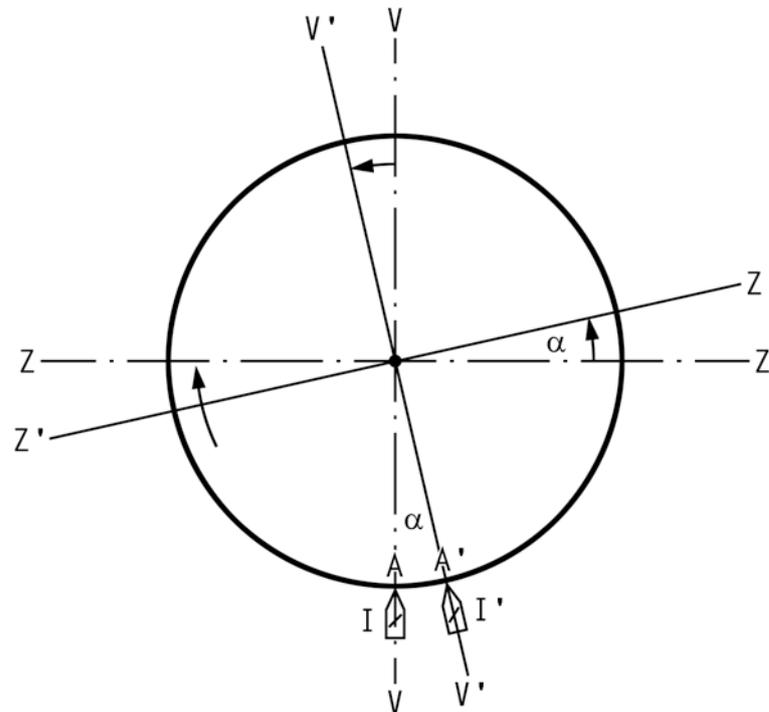


Abb. 49: Wirkungsweise eines Neigungskompensators

Bei streng lotrechter Stehachse VV und genauer Horizontierung der Zielachse ZZ des Fernrohres steht der Index I der Ablesestelle A am Vertikalkreis gegenüber. Die gemessene Zenitdistanz beträgt 100 gon . Wird ein Stehachsenfehler α erzeugt, weicht die Stehachse $V'V'$ jedoch vom Lot ab. Der Index befindet sich dann in I' . Da der Teilkreis diese Bewegung mitmacht, gelangt A nach A' , womit die Ablesung noch nicht fehlerhaft wäre. Erst die Rück-

drehung der Zielachse von Z'Z' nach ZZ beim Wiedereinstellen des Zieles bewirkt eine falsche Messung, weil dabei die dem Index I' gegenüberliegende Ablesestelle A' wieder nach A gelangt. Der am Index abzulesende Wert weicht also um α von der Sollablesung 100 gon ab.

Die Aufgabe eines Kompensators besteht nun darin, die Ablesestelle A so auf den Index der Strichplatte des Ablesemikroskops zu projizieren, daß stets der Sollwert abgelesen wird. Um die vom Neigungsfehler α befreite Ablesung A zu erhalten, sind verschiedene konstruktive Möglichkeiten entwickelt worden. Als wichtigste seien genannt:

- a) Einbau eines Kompensators in den Strahlengang des Ablesemikroskops
- b) Automatische Verschiebung des Indexstriches
- c) Automatische Verschiebung des Mikroskopobjektivs
- d) Erfassen der Lotabweichung durch Sensoren und rechnerische Verbesserung (Totalstationen)

Bei der unter a) genannten Konstruktion wird in das Mikroskop ein Kompensator eingeschaltet (Abbildung 50), der den Abbildungsstrahlengang in der Ebene durch D um einen Winkel β , der von der Stehachsneigung α abhängig ist, abknickt. Der Abbildung ist die Justierbedingung

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{a}{b} \cdot \frac{r}{s} = n = \text{const.}$$

zu entnehmen, die von SOLTAU (1965) als "Übersetzungsbedingung" bezeichnet wird. In dieser Arbeit können auch Einzelheiten zu den Konstruktionen b) und c) entnommen werden.

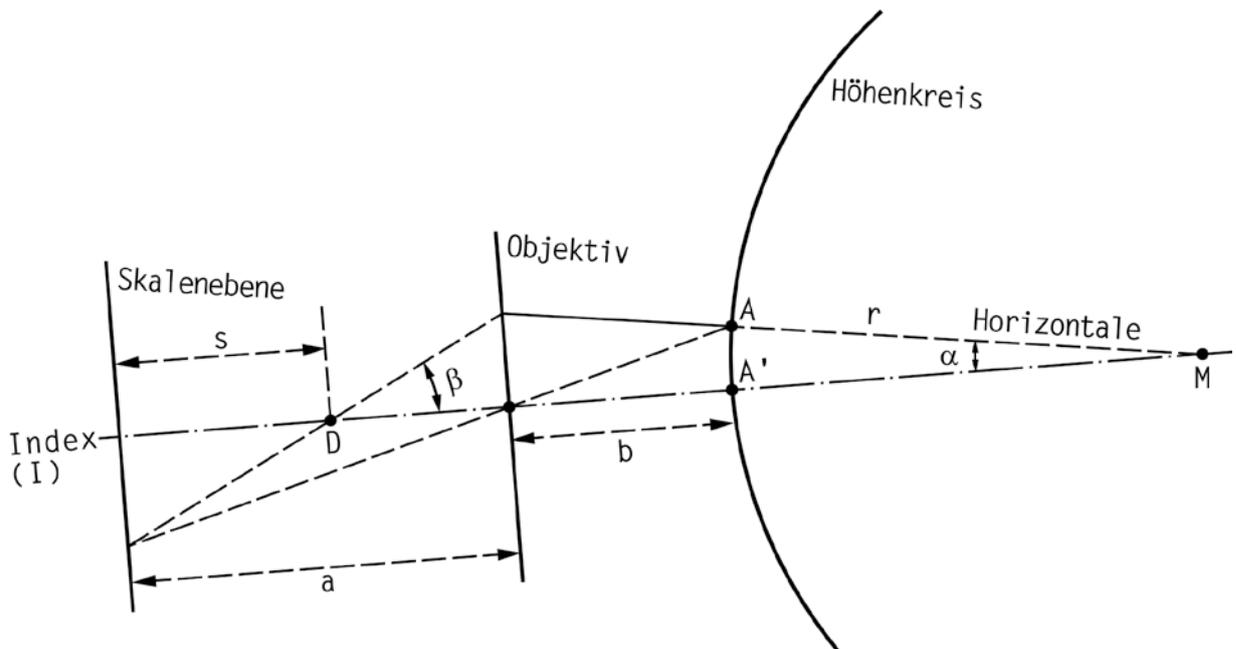


Abb. 50: Schematischer Strahlengang im Ablesemikroskop für den Höhenkreis

9.3 Einteilung der Kompensatoren

Zur Korrektur der Stehachsneigung sind neben den verschiedenen Anordnungen der Kompensatoren im Strahlengang auch für die Kompensatoren selbst verschiedene konstruktive Lösungen entwickelt worden. Allen Lösungswegen ist gemeinsam, daß ein Teil des Kompensators fest mit dem Instrument verbunden ist, während ein anderes Teil beweglich ist und der Schwerkraft unterliegt.

Die wichtigsten Kompensatoren lassen sich in drei Gruppen einteilen:

- a) das freischwingende Pendel
- b) Pendel mit erzwungenen Schwingungen - auch astasiertes Pendel genannt
- c) Flüssigkeitskompensatoren

Einen sehr guten Überblick (Abbildung 51) gibt die von GRÄBER (1980) aufgestellte Einteilung der Kompensatoren mit Angabe der Theodolite, die diese Kompensatoren eingebaut haben. Besonders gekennzeichnet sind die Kompensatoren, die im Rahmen dieser Ar-

bei untersucht wurden.

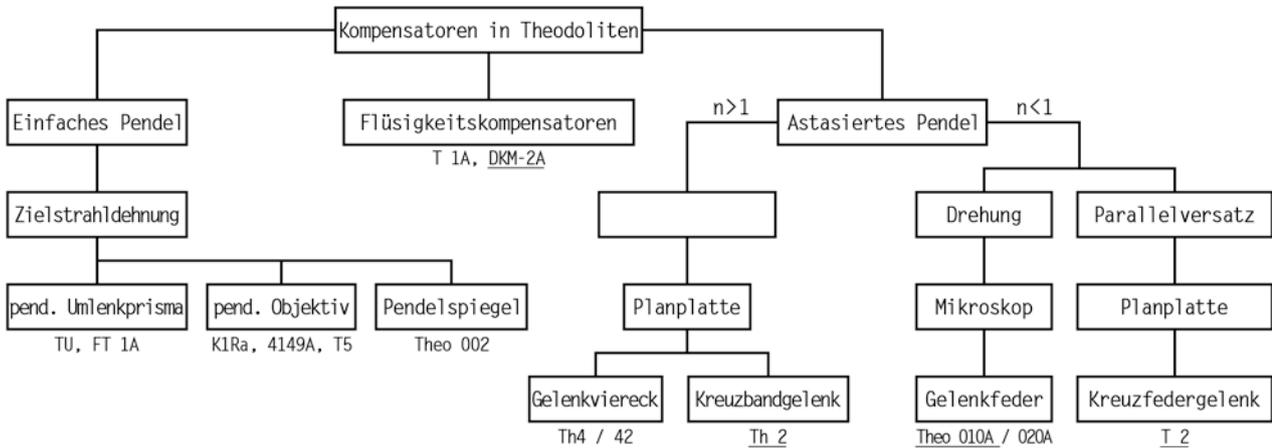


Abb. 51: Übersicht der wichtigsten Kompensatorprinzipien in Theodoliten

Die Theorie zu den Pendelkompensatoren wird ausführlich in HOFMANN (1958) behandelt.

9.4 Anforderungen an Kompensatoren

Prinzipiell können alle Kompensatoren als Pendel betrachtet werden. Das Pendel, das ein optisches Element steuert, nimmt gegenüber einer Basis eine bestimmte Stellung ein, die der jeweiligen Basisneigung entspricht. Das Pendel kann durch ein einfaches Pendel, ein astasiertes Pendel, eine Flüssigkeit oder eine Gasblase dargestellt werden. Unabhängig von der Konstruktion muß ein Kompensator verschiedene Bedingungen erfüllen:

- die Kompensatorfehler müssen kleiner sein als die anderen auf die Messung wirkenden Einflüsse (Zielfehler, Koinkidenzfehler, Kreisteilungsfehler)

- der Vergrößerungsfaktor des Pendels

$$n = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{\text{Neigung des Pendels relativ zur Basis}}{\text{Neigung der Basis relativ zur Horizontalen}}$$

muß im Arbeitsbereich linear sein

- der Nullpunkt muß zumindest für die Dauer der Messung konstant sein

- der Vergrößerungsfaktor muß weitgehend unabhängig von äußeren Einflüssen (Temperatur, elektrische und magnetische Felder) sein
- eine Resonanzfestigkeit gegenüber äußeren Schwingungen muß gewährleistet sein
- die Einspielzeit sollte nur einige Sekunden betragen
- es wird ein einfacher Aufbau, eine hohe Funktionssicherheit und eine lange Lebensdauer gefordert.

9.5 Kompensatorfehler

Die Arbeitsweise der Kompensatoren ist nicht fehlerfrei. HOFMANN (1958) und WENZEL (1969) unterscheiden entsprechend der wichtigsten Fehlerursachen Kompensationsfehler, Umkehrspanne, Einspielfehler und Temperatureinflüsse.

9.5.1 Kompensationsfehler

Nach HOFMANN verläuft rein theoretisch in einem bestimmten Bereich die Kompensation linear. Als mögliche Ursache für Abweichungen kommen innere Reibung und Deformationen in den Gelenken (zum Beispiel Durchbiegung der Aufhängebänder) in Betracht. Von besonderer Bedeutung ist die Einstellung des Vergrößerungsfaktors n , der beim mechanischen Pendel von der Justierung der pendelnden Teile und vom Abstand des Kompensatorschwerpunktes von der Aufhängung abhängt. Veränderungen eines einmal eingestellten Vergrößerungsfaktors sind durch Alterung der Bänder, mechanische Beanspruchung der Gelenke sowie Erschütterungen (Transport) von außen anzunehmen.

Bei Flüssigkeitskompensatoren sind derartige Erscheinungen nicht zu befürchten, da keine mechanisch schwingenden Teile vorhanden sind. Welche Einflüsse die Alterung der Flüssigkeit auf die Messungen ausüben kann, ist bisher nicht bekannt.

Eine Verfälschung der Vertikalwinkelmessung ist immer dann vorhanden, wenn der Vergrößerungsfaktor bei der Montage nicht exakt eingestellt wurde oder wenn nach der Justierung Veränderungen eingetreten sind. Der Einfluß auf die Beobachtungen wächst mit

der Abweichung der Stehachse vom Lot.

Der Kompensationsfehler wird systematisch. Er kann auch durch Messung in zwei Lagen nicht getilgt werden. Man erhält bei der trigonometrischen Höhenmessung ähnlich wie beim geometrischen Nivellement mit automatischen Nivellieren einen "schrägen Horizont".

9.5.2 Einspielfehler

Unter dem Einspielfehler eines Kompensators versteht man denjenigen Fehler, der entsteht, wenn das ausgelenkte Pendel nicht in seine ursprüngliche Lage zurückkehrt. Ursachen für die Abweichung von der Ausgangslage sind die innere Reibung und bleibende Deformationen in den Gelenken des Kompensators.

Die Instrumentenfirmer benutzen den Begriff "mittlerer Einspielfehler" und geben dafür bei Sekundentheodoliten einen Wert von $\leq \pm 0,1$ mgon an.

9.5.3 Umkehrspanne

Die Umkehrspanne ist der doppelte systematische Anteil des Einspielfehlers. Sie ergibt sich als Differenz zweier Vertikalkreisablesungen bei gleicher Stehachs- und Zielachsneigung, jedoch unterschiedlicher Einspielrichtung des Kompensators. Die Umkehrspanne wirkt wie der Kompensationsfehler systematisch. Auch sie kann durch Messung in zwei Lagen nicht getilgt werden.

Nach WENZEL (1969) wird die Umkehrspanne bei Pendelkompensatoren durch Hysterese des Bändermaterials hervorgerufen. Sie ist abhängig vom Auslenkungswinkel. Einen weiteren Einfluß übt die Temperatur des Kompensators auf den Betrag der Umkehrspanne aus.

An der freien Oberfläche von Kompensatorflüssigkeiten sind theoretisch keine Unterschiede bei Einspielen aus verschiedenen Einspielrichtungen anzunehmen.

9.6 Bestimmung der Kompensatorfehler

9.6.1 Vorbemerkungen

Die Bestimmung der Kompensatorfehler erfolgt über Vertikalwinkelmessungen. Diese sind nicht nur durch die Kompensatorfehler, sondern auch durch die Koinzidenz- und Zieleinstellfehler verfälscht. Von HILZ und HOFMEISTER (1979) wurden im Rahmen einer Diplomarbeit umfangreiche Messungen mit vier Sekundentheodoliten und drei verschiedenen Kollimatoren durchgeführt. Die untersuchten Kollimatoren waren ein Breithaupt Jusko Kollimator, Nummer 184081 (Brennweite $f = 600$ mm), der Rank, Taylor, Hobson Autokollimator TA 53, Nummer A42/21-283 ($f = 866$ mm) und der im Neigungstisch eingebaute Wild T4A ($f = 540$ mm) Kollimator.

Ziel dieser Untersuchungen war es, zuverlässige Schätzungen für den Einstell- und den Koinzidenzfehler zu erhalten, um eine Trennung der Fehleranteile der gemessenen Zenitdistanzen zu ermöglichen. Ferner sollte durch diese Untersuchungen ermittelt werden, bei welchen Kollimatoren der Einstellfehler am kleinsten wird, um so einen Hinweis für die Auswahl des Gerätes für die Kompensatoruntersuchungen zu erhalten.

9.6.2 Bestimmung der Zieleinstellfehler

Der Theodolit wird auf der Instrumentenaufnahme befestigt und horizontalisiert. Das Theodolitfadencross wird mit der Mikrometerschraube der Neigungsplatte auf den horizontalen Strich des Fadencrosses des eingebauten Kollimators Wild T4A exakt eingestellt und der Lasermeßwert an der Anzeige abgelesen. Die Messungen wurden zehnmal wiederholt, wobei jeweils das Ziel neu eingestellt wurde. Mit diesem Meßverfahren konnten die Zieleinstellfehler der vier untersuchten Theodolite direkt bestimmt werden.

Als Ergebnis der Bestimmung der Zieleinstellfehler s_z einer Einstellung ersieht man aus Tabelle 11, daß mit den vier untersuchten Theodoliten am gleichen Kollimator jeweils die gleiche Genauigkeit erzielt wurde. Die angegebenen Standardabweichungen sind das Mittel für beide Beobachter. Sie gelten sowohl für den Einzel- als auch den Doppelfaden. Die geringen Unterschiede sind

statistisch nicht signifikant.

Des Weiteren rechtfertigen die Ergebnisse die Entscheidung, den Wild T4A Kollimator für die Kompensatoruntersuchungen zu verwenden.

Kollimator	T4A	TA 53	Jusko
Theodolit	[0,1 mgon]	[0,1 mgon]	[0,1 mgon]
Th2	± 0,95	± 1,08	± 0,86
Theo 010 A	± 1,00	± 1,17	± 0,84
T2	± 0,90	± 1,20	± 0,84
DKM 2-A	± 0,80	± 1,33	± 0,86
Mittel s_z	± 0,91	± 1,20	± 0,85
Freiheitsgrad f	1280	960	960

Tab. 11: Zusammenstellung der Zieleinstellfehler s_z

9.6.3 Bestimmung der Koinzidenzfehler

Zur Bestimmung des Koinzidenz- oder Ablesefehlers s_A führten HILZ und HOFMEISTER je drei MeBreihen mit 40 Beobachtungen durch. Eine Beobachtung war dabei das Mittel je einer Koinzidenz links und rechts. Aufgrund der Ergebnisse zweier Rangdispersionstests nach SIEGEL und TUKEY ist es erlaubt, sowohl für jeden Beobachter die drei MeBreihen zu mitteln als auch für die beiden Beobachter ein gemeinsames Mittel zu bilden (Tabelle 12).

Neben dem Mittel s_A ist der Koinzidenzfehler für eine Koinzidenz angegeben.

Theodolit	s_A (Beob. A)	s_A (Beob. B)	s_A (Mittel)	$s_A \sqrt{2}$
Th2	$\pm 0,69$	$\pm 0,71$	$\pm 0,70$	$\pm 0,99$
Theo 010 A	$\pm 1,00$	$\pm 0,89$	$\pm 0,95$	$\pm 1,34$
T2	$\pm 0,87$	$\pm 0,96$	$\pm 0,92$	$\pm 1,30$
DKM 2-A	$\pm 1,01$	$\pm 0,86$	$\pm 0,94$	$\pm 1,33$

Tab. 12: Zusammenstellung der Koinzidenzfehler s_A
(Dimension: 0,1 mgon, Freiheitsgrad $f = 240$)

9.6.4 Bestimmung des Kompensationsfehlers

Zur Bestimmung des Kompensationsfehlers – in der Literatur auch Kompensationsrestfehler oder Ablauffehler genannt – wird der Theodolit auf der Instrumentenaufnahme befestigt und bei horizontaler Neigungsplatte horizontalisiert. Die Theodolitstehachse wird durch Drehen der Mikrometerschraube der Neigungsplatte in regelmäßigen Intervallen geneigt. Zu jeder Stehachsneigung, die interferometrisch gemessen wird, wird das Fadenkreuz des horizontalen Kollimators angezielt und die entsprechende Zenitdistanz abgelesen. Arbeitet der Kompensator fehlerfrei, so muß innerhalb des Kompensatorbereiches (von ± 30 bis ± 60 mgon) immer dieselbe Zenitdistanz gemessen werden. Alle Messungen werden in Hin- und Rückgang in nur einer Fernrohrlage durchgeführt. Eine Messung in zwei Lagen brächte außer dem Höhenindexfehler keine zusätzlichen Erkenntnisse. Aus dem Verlauf der gemessenen Zenitdistanzen läßt sich der Kompensationsfehler bestimmen, der, wie bereits ausgeführt, systematisch wirkt und auch durch Messung in zwei Lagen nicht getilgt werden kann. Der Kompensationsfehler wird oft als Verhältnis angegeben, zum Beispiel 1: 300. Dies bedeutet, daß bei einer Neigung der Basis (Stehachsfehler) von 30 mgon die Ziellinienänderung 0,1 mgon beträgt.

Eine Auswahl der Messungen zur Bestimmung der Kompensationsfehler der vier untersuchten Sekundentheodoliten ist in den folgenden Abbildungen 52, 53, 54 und 55 graphisch dargestellt. Bei die-

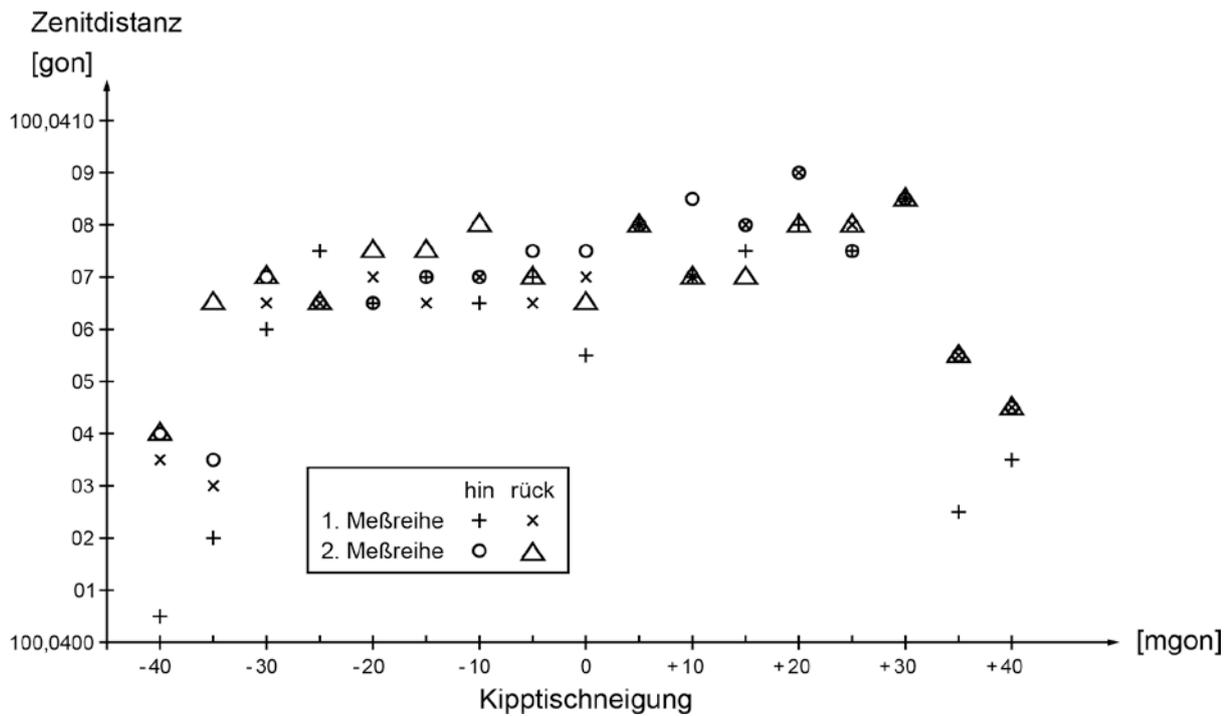


Abb. 52: Messungen zur Bestimmung der Kompensationsfehler des Sekundentheodolits Zeiss Th2, Nr. 122894

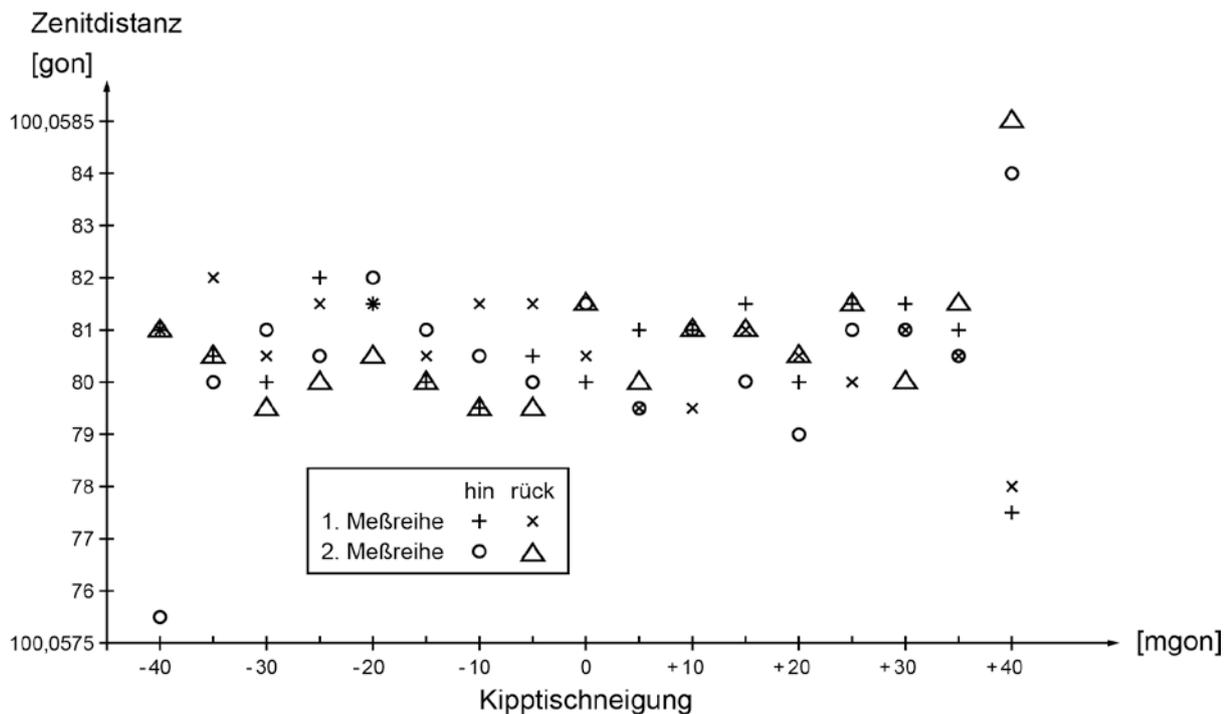


Abb. 53: Messungen zur Bestimmung der Kompensationsfehler des Sekundentheodolits Jenoptik Theo 010A, Nr. 800369

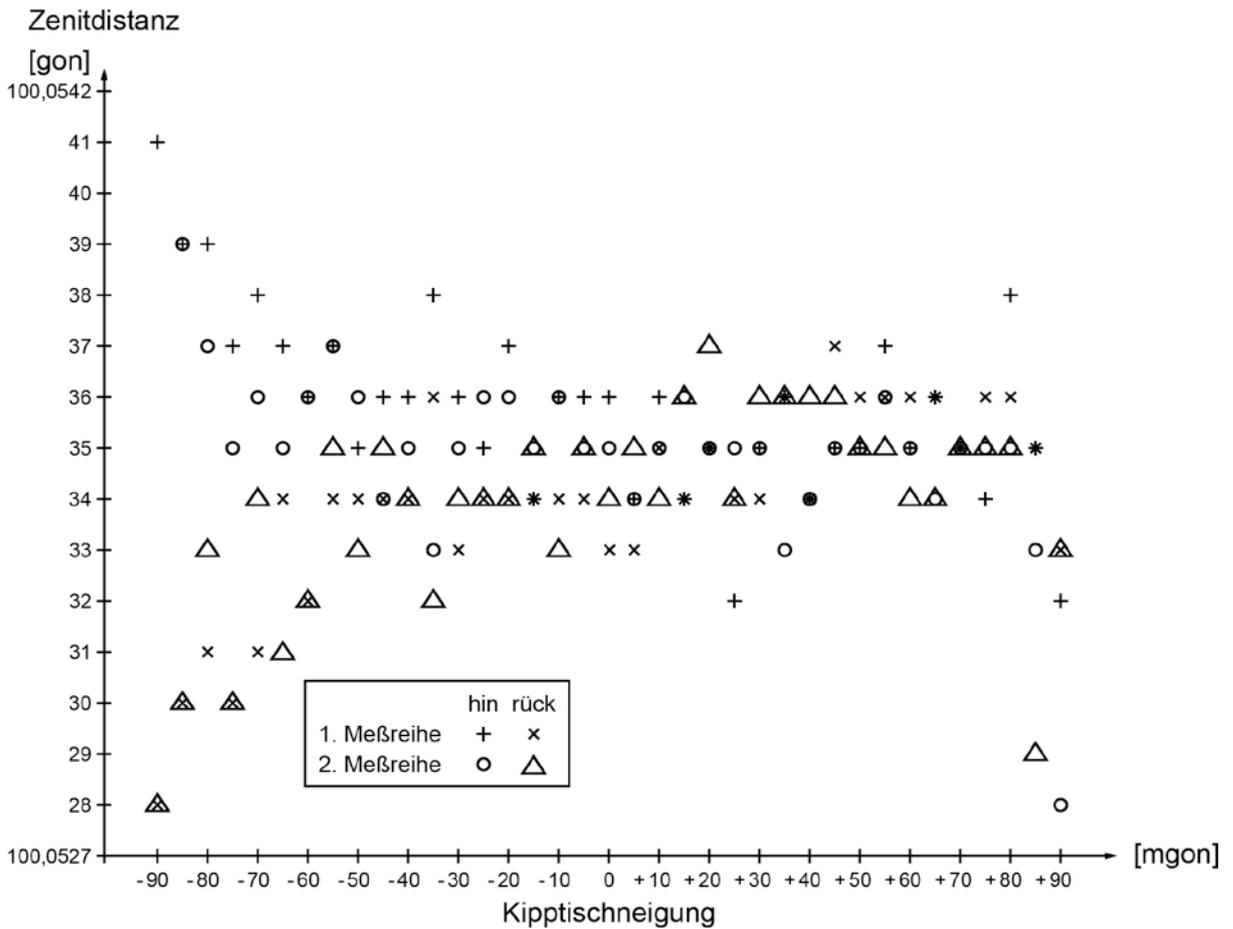


Abb. 54: Messungen zur Bestimmung der Kompensationsfehler des Sekundentheodolits Wild T2, Nr. 206179

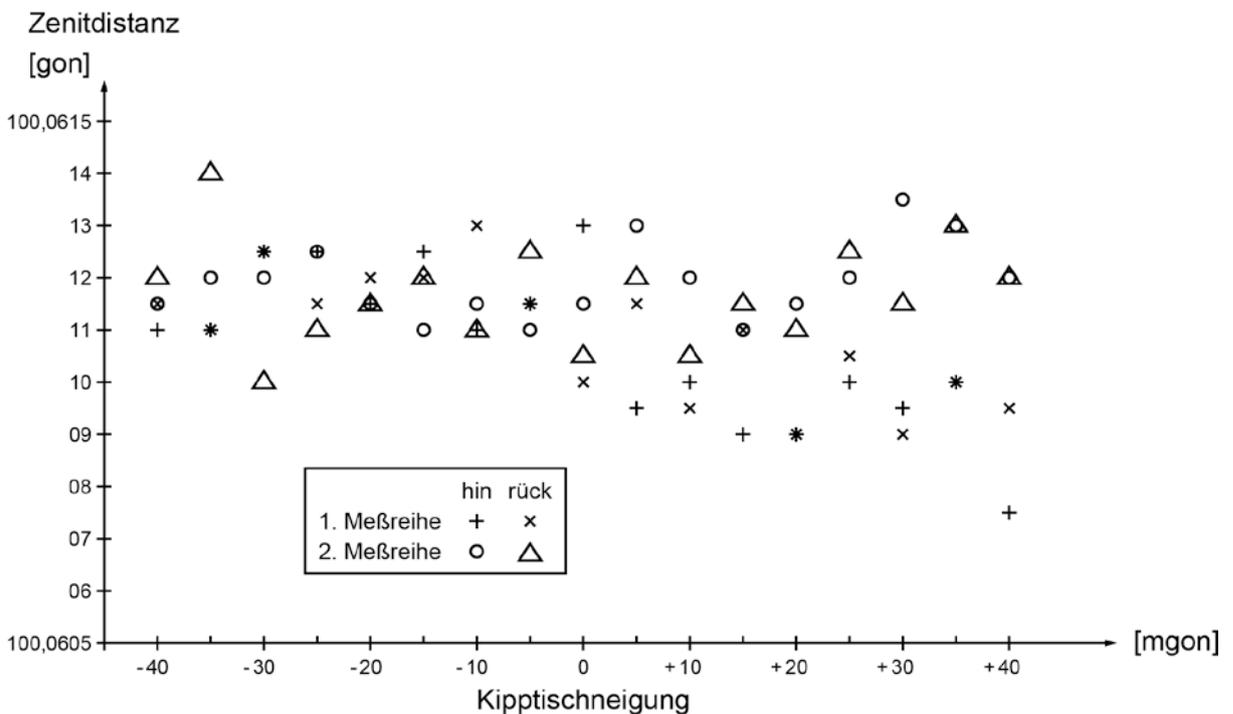


Abb. 55: Messungen zur Bestimmung der Kompensationsfehler des Sekundentheodolits Kern DKM 2-A, Nr. 191671

sen Messungen wurden gleichzeitig auch die Arbeitsbereiche der Kompensatoren bestimmt. Anhand der Herstellerangaben ergibt sich der Soll-Arbeitsbereich. An jeder Stelle des Bereichs muß die gemessene Zenitdistanz mit der in der Horizontallage der Neigungsplatte (Stehachsneigung = 0) beobachteten übereinstimmen. Die Grenzen des Arbeitsbereichs sind dann erreicht, wenn die Messung signifikant von den übrigen abweicht.

Der Kompensationsfehler wird als Anstieg einer ausgeglichenen Gerade bestimmt. Im Ausgleichsmodell wird für die Hin- und Rückmessung einer Meßreihe eine gemeinsame Steigung verwendet. Die Additionskonstanten für die Hin- und Rückmessung werden jedoch verschieden angesetzt. Jeder der beiden Beobachter führte für jeden Theodolit drei unabhängige Meßreihen durch.

In der Tabelle 13 sind für alle untersuchten Theodolite der Arbeitsbereich des Kompensators, der Kompensationsfehler und sein Einfluß auf die Zenitdistanzmessung zusammengestellt.

Theodolit	Arbeitsbereich der Kompensatoren		Kompensationsfehler	Änderung der Zenitdistanz [0,1 mgon]
	Firmenangabe	Ist		
Zeiss Th2	$\pm 2' \cong \pm 37$ mgon	± 30 mgon	1 : 385	0,78 \pm 0,12
Jenoptik 010A	$\pm 4' \cong \pm 74$ mgon	± 35 mgon	nicht nachweisbar	nicht nachweisbar
Wild T2	$\pm 5' \cong \pm 93$ mgon	± 60 mgon	nicht nachweisbar	nicht nachweisbar
Kern DKM 2-A	$\pm 2' \cong \pm 37$ mgon	± 40 mgon	1 : 588	0,60 \pm 0,15

Tab. 13: Zusammenstellung der Arbeitsbereiche und der Kompensationsfehler

Die Bestimmungen der Kompensatorarbeitsbereiche zeigen, daß die Bereiche bei dem Jenoptik Theo 010A und dem Wild T2 wesentlich kleiner sind als vom Hersteller angegeben.

Bei der Bestimmung der Kompensationsfehler ist nur einer sehr geringe Abhängigkeit von der Stehachsneigung feststellbar. Bei dem Theo 010A und dem Wild T2 hat sich kein signifikanter Wert für den Kompensationsfehler ergeben, bei den zwei anderen Instrumen-

ten ist der Fehler sehr gering.

Von einem Hersteller ist bekannt, daß bei der Endkontrolle ein Kompensationsfehler von 1 : 60 noch zugelassen wird.

In der letzten Spalte der Tabelle 13 ist der Einfluß des Kompensationsfehlers auf die Zenitdistanz - bezogen auf den gesamten Kompensationsbereich - und die dazugehörige Standardabweichung angegeben.

Die Maximalwerte liegen in derselben Größenordnung wie die zufälligen Zieleinstell- und Koinzidenzfehler (Tabellen 11 und 12). Da es in der Beobachtungspraxis zumeist keinerlei Mühe bereitet, die Stehachse mit einer Genauigkeit von etwa $\pm 1 \text{ pars} \approx \pm 20'' \approx \pm 6 \text{ mgon}$ lotrecht zu stellen, können die systematischen Kompensationsfehler bei den untersuchten Instrumenten vernachlässigt werden.

9.6.5 Bestimmung der Umkehrspanne

Läßt man den Kompensator aus zwei entgegengesetzten Richtungen bei gleicher Stehachsneigung einspielen, so erhält man die Umkehrspanne. Zur Bestimmung der Umkehrspanne wurden bei verschiedenen Stehachsneigungen im Arbeitsbereich des Kompensators (bei -30, -20, -10, 0, +10, +20, +30 mgon) von zwei Beobachtern Zenitdistanzmessungen durchgeführt. Der Meßvorgang entspricht der im ersten Absatz von 9.6.4 beschriebenen Meßanordnung. Der Kompensator wurde jeweils um circa 30 mgon ausgelenkt. Für jede Stehachsneigung wurden 10 Wiederholungsmessungen durchgeführt, so daß jeweils 10 Wertepaare erhalten wurden. Die Umkehrspanne ergibt sich aus dem Unterschied der Mittel der Zenitdistanz der beiden Einspielrichtungen.

Wie wichtig diese Untersuchungen sein können, zeigte sich bei einem der untersuchten Theodolite. Dort wurde eine Umkehrspanne von durchschnittlich 1,0 mgon aufgedeckt. Es stellte sich heraus, daß der Kompensator defekt war und ersetzt werden mußte.

In Tabelle 14 sind die Ergebnisse der Messungen eines Beobachters mit dem Theodoliten Th2 zusammengestellt.

Auf dem gewählten Signifikanzniveau von 5 % ist keine Umkehrspanne feststellbar.

Diese Ergebnisse treffen auch für die übrigen drei Theodolite zu, so daß bei keinem der untersuchten Theodolite unter Laborbedingungen eine signifikante Umkehrspanne nachgewiesen werden konnte.

Stehachs- neigung [mgon]	Einspiel- richtung	Mittelwert \bar{x} Zenitdistanz [gon]	s_0 [0,1 mgon]	s_x [0,1 mgon]	Umkehrspanne $\bar{\Delta} = 1-2$ [0,1 mgon]	$s_{\bar{\Delta}}$ [0,1 mgon]	$t = \left \frac{\bar{\Delta}}{s_{\bar{\Delta}}} \right $
- 30	1	100,040745	± 0,83	± 0,26	+ 0,15	± 0,37	0,41
	2	100,040730	± 0,82	± 0,26			
- 20	1	100,040765	± 1,25	± 0,39	- 0,05	± 0,48	0,10
	2	100,040770	± 0,89	± 0,28			
- 10	1	100,040765	± 0,82	± 0,26	+ 0,10	± 0,40	0,25
	2	100,040755	± 0,96	± 0,30			
0	1	100,040755	± 0,83	± 0,26	+ 0,35	± 0,39	0,90
	2	100,040720	± 0,92	± 0,29			
+ 10	1	100,040760	± 0,94	± 0,29	+ 0,20	± 0,39	0,51
	2	100,040740	± 0,81	± 0,26			
+ 20	1	100,040740	± 0,84	± 0,27	- 0,15	± 0,36	0,42
	2	100,040755	± 0,76	± 0,24			
+ 30	1	100,040720	± 0,98	± 0,31	- 0,20	± 0,39	0,51
	2	100,040740	± 0,77	± 0,24			

Tab. 14: Bestimmung der Umkehrspanne für den Zeiss Th2, Nr. 122894

9.6.6 Bestimmung der mittleren Einspielfehler

Die halbe Umkehrspanne kann auch als systematischer Anteil der Einspielfehler bezeichnet werden. Der mittlere zufällige Einspielfehler ergibt sich durch Messen von Zenitdistanzen bei verschiedenen Stehachsneigungen im Arbeitsbereich der Kompensatoren. Zur Ausschaltung der Umkehrspanne wird der Kompensator immer in die gleiche Richtung ausgelenkt. Die gemessenen Zenitdistanzen werden durch den Koinzidenzfehler s_A und den Einspielfehler s_E des Kompensators verfälscht. Der gesuchte mittlere Einspielfehler s_E kann also aus der Standardabweichung s_Z einer

gemessenen Zenitdistanz und der Standardabweichung s_A einer Ko-
 inzidenz (Tabelle 12) bestimmt werden. Es wurden für jeden Theo-
 doliten bei sieben verschiedenen Stehachsneigungen jeweils zehn
 Zenitdistanzen für beide Einspielrichtungen gemessen. Da zusätz-
 lich zwei Beobachter die MeBreihen durchführten - beim T2 war
 es nur ein Beobachter - sind die Standardabweichungen s_Z der Ze-
 nitdistanzen das Mittel aus 280 Messungen. In Tabelle 15 sind
 die Ergebnisse zur Bestimmung der mittleren Einspielfehler zu-
 sammengefaßt.

Standard- abweichungen	Th2		Theo 010A		T2		DKM 2-A	
	Beob.A	Beob.B	Beob.A	Beob.B	Beob.A	Beob.B	Beob.A	Beob.B
Mittel \bar{s}_Z	±0,89	±1,02	±0,78	±1,18	±1,02	±1,06	±0,74	±0,91
Gesamtmitt. s_Z	±0,96		±0,98		±1,04		±0,82	
s_A	±0,70		±0,95		±0,92		±0,94	
$s_E = \pm \sqrt{s_Z^2 - s_A^2}$	±0,66		±0,24		±0,48		nicht nachweisbar	

Tab. 15: Zusammenstellung der mittleren Einspielfehler s_E
 (Dimension: 0,1 mgon; Freiheitsgrad $f = 250$)

Die Ergebnisse zeigen, daß die mittleren, zufälligen Einspielfeh-
 ler s_E der Kompensatoren kleiner sind als die Koinzidenz- und
 Einstellfehler.

9.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die untersuchten Höhenkreiskompensatoren arbeiten linear und un-
 unterschreiten die von den Herstellern angegebenen Einspielgenau-
 igkeiten. Eine systematische Verfälschung der Zenitdistanzen
 durch die Kompensatorfehler ist nicht zu befürchten. Für eine
 allgemeine Aussage sind jedoch zu wenige Instrumente untersucht
 worden.

Es ist empfehlenswert, die Kompensatoren in regelmäßigen zeitli-
 chen Abständen zu überprüfen.

10. Zusammenfassung

Im ersten Teil der Arbeit werden die Gründe und Überlegungen, die zum Bau des Neigungstisches führten, ausführlich beschrieben. Der Neigungstisch ist hauptsächlich für die Kalibrierung von Libellen jeglicher Art (Flüssigkeitslibellen, elektronische Neigungsmesser) und von Kompensatoren in Nivellieren und Theodoliten gedacht. Für die Kompensatoruntersuchungen ist der Neigungstisch speziell mit einer Instrumentenaufnahme und einem Kollimator ausgestattet. Der Neigungstisch ist so konzipiert, daß alle Arten von Neigungsmessungen, sowohl relativ als auch absolut, durchgeführt werden können. Der Neigungsbereich ist besonders groß gewählt worden ($\sim \pm 2$ gon - wahlweise auch $\sim \pm 4$ gon), um auch Instrumente, die große Neigungen zulassen, in ihrem gesamten Arbeitsbereich kalibrieren zu können.

Die Bestimmung der Neigungen wird auf die interferometrische Messung von Wegunterschieden zurückgeführt. Dazu wird ein Laserinterferometer von Hewlett Packard, Typ "Laser Transducer System 5501" verwendet. Durch dieses Lösungsprinzip, das einen sehr einfachen mechanischen Aufbau ermöglicht, können die Schwierigkeiten vermieden werden, die bei den herkömmlichen Libellenprüfern die Genauigkeit und besonders den zulässigen Neigungsbereich beschränken.

Um die angestrebte Genauigkeit einer Neigungsmessung von $\pm 0,01$ mgon für den gesamten Meßbereich zu realisieren, muß der Neigungstisch sorgfältig justiert werden. Die dazu nötigen Verfahren werden ausführlich beschrieben. Von besonderer Wichtigkeit ist der Abstand zwischen den zwei Reflektoren, der den Maßstab der Neigungsmessung festlegt. Für die Bestimmung dieses Abstandes wurden zwei unabhängige Meßverfahren entwickelt.

Alle zufälligen und systematischen Fehlereinflüsse werden eingehend analysiert, um zu einer realistischen Schätzung der Genauigkeit der Neigungsmessungen zu gelangen. Es ergab sich die Standardabweichung einer Neigungsmessung von $\pm 0,01$ mgon für einen Neigungswinkel α von $\leq \pm 1$ gon.

In einem gesonderten Kapitel werden einige Verbesserungsvorschlä-

ge zum Umbau des Neigungstisches unterbreitet, die jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr verwirklicht werden konnten. Insbesondere soll ein Schrittmotor eingebaut werden, so daß die Neigungsmessung vollkommen automatisch ablaufen kann. Bei Durchführung einer weiteren Umbaumaßnahme wird sich eine Genauigkeitssteigerung ergeben, so daß im gesamten Neigungsbereich von ± 2 gon mit einer Standardabweichung von $\pm 0,01$ mgon gemessen werden kann.

Im zweiten Teil der Arbeit wird über Anwendungen des Neigungstisches berichtet.

Als erste Anwendung wurde ein photoelektrischer Autokollimator von Rank, Taylor, Hobson, Typ TA 53, kalibriert. Die Ergebnisse der Kalibrierungsmessungen zeigen, daß die Abweichungen von der Linearität der Kennlinie geringer sind als vom Hersteller angegeben. Bei Verwendung eines Maßstabsfaktors kann die Genauigkeit noch gesteigert werden.

Des weiteren wurden drei elektronische Neigungsmesser (zwei SCHAEVITZ, Typ LSRP, und eine TESA, Typ Minilevel) kalibriert. Sie wurden ausgewählt, da sie über relativ große Meßbereiche und hohe Auflösungen verfügen. Die Messungen hatten zum Ziel, die Kennlinie und die Meßgenauigkeit zu bestimmen. Die Ergebnisse zeigten, daß die untersuchten Neigungsmesser nur in einem Teil ihrer Meßbereiche linear arbeiten. Wenn größere Neigungen gemessen werden, muß die Nichtlinearität der Kennlinie berücksichtigt werden.

Von je einem der vier gebräuchlichsten Sekundentheodoliten Zeiss Th2, Jenoptik Theo 010A, Wild T2 und Kern DKM 2-A wurden mit Hilfe des Neigungstisches die Kompensatorfehler bestimmt. Entsprechend der wichtigsten Fehlerursachen wurde diese in Kompensationsfehler, Umkehrspanne und Einspielfehler eingeteilt. Die Messungen ergaben keinerlei signifikante Kompensatorfehler.

Mit dem vorgestellten Präzisionsneigungstisch steht ein geodätisches Prüfinstrument zur Verfügung, das sich in jeder Hinsicht bestens bewährt hat. Wegen seiner hohen Genauigkeit und seines großen Meßbereiches lassen sich mit dem Neigungstisch alle der-

zeit bekannten Instrumente, die Winkel oder Neigungen ≤ 2 gon messen, einfach, schnell, zuverlässig und präzise kalibrieren.

Nachwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 1976 bis 1982 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Geodäsie der Hochschule der Bundeswehr München.

Herrn Professor Dr.-Ing. Caspary, der diese Arbeit anregte und förderte, danke ich herzlich für die wertvollen Ratschläge und die persönliche Betreuung.

Herrn Professor Dr.-Ing. Schnädelbach, TU München, danke ich für die Übernahme des Koreferates.

Mein Dank gilt auch dem Leiter des Labors des Instituts für Geodäsie, Herrn Dr.-Ing. Heister, für die Unterstützung bei den umfangreichen Messungen und für die klärenden Gespräche.

Besonderer Dank gebührt der Firma Feinmechanik Ullrich, Karlsfeld bei München, die den Präzisionsneigungstisch mit großer Sorgfalt baute.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei den Mitarbeitern des Instituts, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

München, im Oktober 1982

Lebenslauf

Persönliches

G e i g e r, Axel
geb. 10.04.1941 in München als Sohn von
Kurt Geiger und Ehefrau Eleonore, geb. Baur

Schulbildung

1947 - 1951 Volksschule in München
1951 - 1960 Oberrealschule in München
13.07.1960 Reifeprüfung

Studium

1960 - 1965 Studium des Vermessungswesens,
Technische Hochschule München
09.03.1965 Ablegung der Diplom-Hauptprüfung

Berufliche Tätigkeit

während des Studiums Praktikum bei Hochtief, München; Polensky und
Zöllner, München; Ingenieurbüro Kocks, München, und
Ingenieurbüro Dorsch Germann, München

1965 - 1970 Geodät im "Geodetic Survey of Canada", Department
of Energy, Mines and Resources, Ottawa, Kanada

1971 Vermessungsingenieur im Ingenieurbüro Haumann und
Zülsdorf, München

1972 - 1973 Vermessungsingenieur im Ingenieurbüro Dorsch Con-
sult, München

1974 - 1975 Wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für
Geodäsie, Technische Universität München

seit 01.01.1976 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für
Ingenieurgeodäsie, Hochschule der Bundeswehr
München

Literaturverzeichnis

- APPELT, R., R. SCHMITT (1980) Untersuchung eines Laser-Neigungstisches und Bestimmung der Kompensatorfehler verschiedener Sekundentheodolite. Unveröffentlichte Diplomarbeit im Wiss. Studiengang Vermessungswesen der HSBw München, 1980.
- BALDWIN, R.R., G.B. GORDON, A.F. RUDÉ (1971) Remote Laser Interferometry. Hewlett Packard Journal 23 (1971), S. 14-19.
- BAUCH, A. (1974) Beiträge zu einigen Verfahren der geodätischen Astronomie unter besonderer Berücksichtigung des Universals Theos 002. DGK, Reihe C, Heft Nr. 204, 1974.
- BEYER, W., W. PAHL (1974) Winkelmeßeinrichtung zum Prüfen fotoelektrischer Autokollimationsfernrohre. Feinwerktechnik und Meßtechnik 82, Heft 6, 1974, S. 267-269.
- BIENNAS, M., J. HANNEMANN (1971) Untersuchung von Autokollimationsfernrohren. Feingerätetechnik 20 (1971) 3, S. 117-122.
- BIRCHEL, R., G. ZIEPA (1979) Laser-Interferometer - ein Einbausystem zur genauen Positionierung. Feinwerktechnik und Meßtechnik 87 (1979), S. 195-201.
- BIRD, H.M.B. (1971) A Computer Controlled Interferometer for Precision Relative Angle Measurements. The Review of Scientific Instruments, Vol. 42, No. 10, 1971, S. 1513-1520.
- BRÜCKNER, R. (1979) Zur Szintillation bei terrestrisch geodätischen Messungen. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Dissertation, Nr. 89, Hannover, 1979.
- BURGWALD, G.M., W.P. KRÜGER (1970) An Instant-On Laser for Length Measurement. Hewlett Packard Journal 21 (1970) 12, S. 12-16.
- CASPARY, W., A. GEIGER (1978) Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit elektronischer Neigungsmesser. Schriftenreihe des Wiss. Studiengangs Vermessungswesen der Hochschule der Bundeswehr München, Heft 3, 1978.
- CASPARY, W., A. GEIGER (1979) Laboruntersuchungen von elektronischen Neigungsmessern. ZfV 104 (1979) 9, S. 410-420.
- CHRZANOWSKI, A., M.Y. FISEKCI (1982) Application of Tiltmeters with a Remote Data Acquisition in Monitoring Mining Subsidence. Fourth Canadian Symposium on Mining Surveying and Deformation Measurements. 7.-9. Juni 1982, Banff, Canada.
- DEBLER, E. (1975) Winkelmessung mit Laser-Interferometern, Mehrfachreflexionen und Dreirosetten-Meßverfahren. PTB Bericht Me-8, Braunschweig, Dissertation 1975.

- DEBLER, E. (1977) Winkelinterferometer mit einem Meßbereich von 95°. Feinwerktechnik und Meßtechnik 85 (1977) 4, S. 166-171.
- DORENWENDT, K., H.J. GRUNERT (1976) Ein zählendes Interferometer zur Bestimmung von Winkeln. Feinwerktechnik und Meßtechnik 84 (1976) 7, S. 344-346.
- DUKES, J.N., G.B. GORDON (1970) A Two-Hundred-Foot Yardstick with Graduations Every Microinch. Hewlett Packard Journal 21 (1970) 12, S. 2-8.
- EICHHOLZ, K., R. SCHÄFLER (1982) Zur Dynamik elektronischer Neigungsmesser (Teil I). AVN 1/1982, S. 29-45. Teil II, AVN 2/1982, S. 147-148.
- FEIST, W. (1972) Untersuchung der Fehler von Neigungskompensatoren in Universalinstrumenten und ihres Einflusses auf die Meßergebnisse am Beispiel des Theo 002. Jenoptik Jena, Sonderdruck Nr. 10-S1/150-1.
- FELSKE, A. (1976) Anwendungen von Lasern in der Meßtechnik - eine Übersicht. Technisches Messen 43 (1976) 9, S. 257-262 und 10, S. 295-302.
- FITZEN, H.P. (1978) Untersuchung zur Invarianz der Ziellinie bei Kompensatornivellieren hoher und höchster Genauigkeit. Veröffentlichung des Geodätischen Instituts der RWTH Aachen, Nr. 25, Dissertation 1978.
- FLÜGGE, J. (1954) Einführung in die Messung der optischen Grundgrößen. Verlag G. Braun, Karlsruhe, 1954.
- FLÜGGE, J. (1976) Studienbuch zur technischen Optik. Vandenhoeck und Ruprecht, Göttingen, 1976.
- GEIGER, A. (1980) Entwicklung und Erprobung eines Präzisionsneigungsmessers zur Untersuchung und Kalibrierung geodätischer Instrumente. VIII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Zürich 1980, Paper A 13, Dümmlers Verlag, Bonn.
- GERSTENECKER, C. (1978) Untersuchungen von Neigungsmessern mit einem Kippisch. DGK, Reihe B, Nr. 233, 1978, S. 110-117.
- GIGAS, E. (1952) Interferenzmethode zur genauen Libellenuntersuchung. DGK, Reihe A, Heft 3, 1952.
- GIGAS, E. (1966) Physikalisch-Geodätische Meßverfahren. Dümmlers Verlag, Bonn, 1966, S. 106-111.
- GLISSMANN, T. (1976) Zur Bestimmung des Refraktionswinkels über die Dispersion des Lichtes mittels positionsempfindlicher Dioden. Wissenschaftliche Arbeiten der Lehrstühle für Geodäsie, Photogrammetrie und Kartographie der Technischen Universität Hannover, Dissertation, Nr. 62, Hannover 1976.

- GLIWINSKI, J. (1978) Ein Laser-Interferometer für Winkelmessung. Feingerätetechnik 27 (1978) 3, S. 118-119.
- GRÄBER, R. (1980) Systematische Darstellung aller Verfahren zur Ziellinien- und Indexstabilisierung. Unveröffentlichte Diplomarbeit im Wiss. Studiengang Vermessungswesen der HSBw München, 1980.
- GROSSMANN, W. (1960) Bestimmung des mittleren Einstellfehlers bei Feinmeßtheodoliten. ZfV 85 (1960) 1, S. 20-22.
- GROSSMANN, W. (1975) 25 Jahre Kompensatornivelliere. Schweizerische Zeitschrift für Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik III/IV, 1975, S. 219-225.
- GROTEN, E. (1978) Anwendung von interferometrischen Messungen in der Geodäsie. Beiträge der Astronomischen Geodäsie und Geodynamik, Institut für Physikalische Geodäsie der TH Darmstadt, 1978, S. 162-185.
- HALLERMANN, L. (1970) Einige Ergebnisse der Untersuchungen an Sekundentheodoliten. Internationale Konferenz über Methoden und Instrumente der geodätischen Netzverdichtung, Budapest, August 1970.
- HALLERMANN, L., H. INGENSAND (1980) Leistungsfähigkeit elektronischer Neigungsmesser. Veröffentlichung des Geodätischen Instituts der RWTH Aachen. Kontinuierliche Messungen in der Ingenieurgeodäsie, Nr. 28, 1980, S. 113-129.
- HEWLETT PACKARD Application Note 197-2, Laser and Optics, Laser Transducer 5501 A.
- HILZ, R., M. HOFMEISTER (1979) Bestimmung der Zieleinstell- und Koinzidenzfehler von Sekundentheodoliten durch Messungen am Vertikalkreis. Unveröffentlichte Diplomarbeit im Wiss. Studiengang Vermessungswesen an der HSBw München, 1979.
- HOFFER, T.M., W. FISCHER (1977) Abnahme von Werkzeugmaschinen mit einem Laser-Meßsystem, Teil I und II. Feinwerktechnik und Meßtechnik 85 (1977) 6, S. 229-238, und 7, S. 343-353.
- HÖPCKE, W. (1953) Die Hannoverschen Libellenprüfer. Schriftenreihe des Niedersächsischen Landesvermessungsamts, Hannover, 1953.
- HOFMANN, O. (1958) Ein neues astasiertes Pendel für genaue Neigungsmessung und automatische Stabilisierung von Ziellinien. Jenaer Jahrbuch, 1958/1.
- HOLTZ, E. (1968) Entwicklung eines Laser-Nivelliersystems. Dissertation an der RWTH Aachen, Fachbereich Elektrotechnik, 1968.
- INCZÉDY, B.J., K. KRAUSZ (1981) Interferometric Angle Measuring System Operating in Small Angular Range. Acta Geodetica, Geophysica et Montanistica Acad. Sci. Hung., Tomus 16 (2-4), 1981, S. 307-317.

- JORDAN, EGGERT, KNEISSL (1963) Handbuch der Vermessungskunde, Band II. Metzlersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1963, S. 156-166.
- KAHMEN, H. (1978) Elektronische Meßverfahren in der Geodäsie. H. Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1978.
- KIVIOJA, L.A. (1978) The EDM Corner Reflector Constant Is Not Constant. Surveying and Mapping, Juni 1978, S. 143-155.
- KNUFINKE, P. (1976) Systematische Fehler beim Feinnivellement mit Kompensatornivellieren mit besonderer Berücksichtigung einer neuen Instrumentenentwicklung. ZfV 101 (1976) 8, S. 350-358.
- KNUFINKE, P. (1977) Untersuchungen zur Entwicklung und zum Bau eines Spiegelkollimators großer Brennweite für die Überprüfung selbsthorizontierender Bauelemente im geodätischen Instrumentenbau. Dissertation RWTH Aachen, 1977.
- KUNZMANN, H. (1979) Anwendung des Laserinterferometers in der Fertigungsmeßtechnik. Annals of the CIRP, Vol. 28/1/1979.
- LEDERLE, W. (1968) Der instrumentelle Temperatureinfluß auf die Präzisionsmessung von Zenitdistanzen. DGK, Reihe C, Heft Nr. 121, 1968.
- MALACARA, D., O. HARRIS (1970) Interferometric Measurement of Angles. Applied Optics 9 (1970), S. 1630-1633.
- MARZOLF, J.G. (1964) Angle Measuring Interferometer. The Review of Scientific Instruments, Vol. 35 (1964) 9, S. 1212-1215.
- MAURER, W., K. SCHNÄDELBACH (1980) Kalibrierung geodätischer Präzisionsinstrumente mit Laser-Interferometer HP 5526 A. VIII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Zürich 1980, Paper A 12, Dümlers Verlag, Bonn.
- MAURER, W. (1981) Ein neues Verfahren zur Untersuchung von Theodolitteilkreisen. FIG XVI. Internationaler Kongreß, Montreux, Schweiz, 1981.
- MINTROP, H., E. DEBLER (1977) Interferometrische Winkelmessungen in großen Meßbereichen. Feinwerktechnik und Meßtechnik 85 (1977), S. 82-85.
- MÖHLENBRINK, W. (1980) Messung von Biegeliniendeformationen mit elektronischen Libellen. VIII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Zürich 1980, Paper C 11, Dümlers Verlag, Bonn.
- NEMHAUSER, R.J. (1974) Die Nutzung der Positionsempfindlichkeit von Si-Photodetektoren für Steuerungsaufgaben. Elektronik-praxis, Nr. 7/8, 1974, S. 7-11.

- OCHSENHIRT, H. (1962) Prüfen und Justieren moderner geodätischer Instrumente und Geräte mit Hilfe von Kollimatoren im Laboratorium. Dissertation Hannover, 1962.
- PAULI, W. (1969) Vorteile eines kippbaren Reflektors bei der elektrooptischen Streckenmessung. VT 17 (1969), Heft 11, S. 412-415.
- PECK, E.R. (1948) Theory of the Corner-Cube Interferometer. Journal of the Optical Society of America, Vol. 38, No. 12, 1948, S. 1015-1024.
- PEGLOW, M. Meßmethoden zum Autokollimationsfernrohr. Institut für Technische Optik der TH Stuttgart. Sonderdruck 85-9R der Ernst Leitz GmbH, Wetzlar.
- PFEIFFER, T., E. TRAPET (1980) Einsatz von Lasertechnologien zur Prüfung der Geradheit von Maschinenachsen. Veröffentlichung des Geodätischen Instituts der RWTH Aachen, Kontinuierliche Messungen in der Ingenieurgeodäsie, Nr. 28, 1980, S. 7-34.
- PLATZ, U. (1977) Untersuchung positionsempfindlicher analog anzeigender Fotodioden im Hinblick auf den Anwendungsfall räumlicher Koordinatenmessungen. Dissertation an der TU Hannover, Fakultät für Maschinenwesen, 1977.
- RIEMANN, W. (1976) Zur Frage der Meßgenauigkeit mit dem Autokollimationsfernrohr von Leitz. Leitz Mitteilungen Wissenschaft und Technik, Bd. IV, Nr. 3, 1967, S. 94-96.
- ROHLIN, J. (1963) An Interferometer for Precise Angle Measurements. Applied Optics, Vol. 2, No. 7, 1963, S. 762-763.
- ROSENTHAL, G. (1949) Die geometrisch-optischen Probleme des Tripelspiegels. Optik 4 (1949) 6, S. 391-409.
- RUEGER, J.M. (1980) Introduction to Electronic Distance Measurement. Monograph No. 7, S. 72-79, The School of Surveying, University of New South Wales, Kensington, Australia, N.S.W. 2033.
- SCHLEMMER, H. (1975) Laser-Interferometerkomparator zur Prüfung von Präzisionsnivellierlatten. DGK, Reihe C, Heft Nr. 210, München, 1975.
- SCHNÄDELBACH, K. (1980) Neue Verfahren zur präzisen Längen- und Höhenmessung. AVN 1 (1980), S. 2-21.
- SCHÜSSLER, K.H. (1971) Die Eignung von Laser-Strahl und photoelektrischen Detektoren zur Messung der Abweichung von Geradlinigkeit im Maschinenbau. Dissertation an der RWTH Aachen, Fakultät für Maschinenwesen, 1971.
- SCHWEBEL, R. (1968) Untersuchung instrumentaler Fehler von Universal- und Passageinstrument mit Hilfe von Autokollimation. DGK, Reihe C, Heft Nr. 117, 1968.

- SOLTAU, G. (1966) Ein Beitrag zur Untersuchung von geodätischen Instrumenten mit automatisch-einspielenden Höhenablesseinrichtungen. Wiss. Arbeiten der Lehrstühle für Geodäsie, Photogrammetrie und Kartographie an der TH Hannover, Dissertation 1966, Nr. 28.
- ULLRICH, D. (1978) Längenmessung mit Laserinterferometern. Physikalisch Technische Bundesanstalt, ME - 19(1978), S. 19-31, Braunschweig.
- WENZEL, H.G. (1969) Pendelkompensatoren als Indexstabilisierung für die Vertikalwinkelmessung. ZfV 94 (1969) 11, S. 437-441.

Prospekte und Bedienungsanleitungen der beschriebenen Instrumente von Hewlett Packard, Jenoptik, Rank-Taylor-Hobson, Schaevitz, Wild und Zeiss.

Schriftenreihe

Wissenschaftlicher Studiengang Vermessungswesen
Hochschule der Bundeswehr München

Bisher erschienene Hefte:

(Die Hefte erscheinen in zwangloser Folge)

- Nr. 1/78 A. Schödlbauer :
Curriculum für den wissenschaftlichen Studiengang Vermessungswesen der Hochschule der Bundeswehr München
- Nr. 2/78 A. Chrzanowski and E. Dorrer :
Proceedings "Standards and Specifications for Integrated Surveying and Mapping Systems", Workshop held in Munich, 1-2 June 1977
- Nr. 3/78 W. Caspary und A. Geiger :
Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit elektronischer Neigungsmesser
- Nr. 4/79 E. Baumann, W. Caspary, H. Dupraz / W. Niemeier /
H. Pelzer, E. Kuntz / G. Schmitt, W. Welsch :
Seminar über Deformationsmessungen
- Nr. 5/81 K. Torlegård :
Accuracy Improvement in Close Range Photogrammetry
- Nr. 6/82 W. Caspary und W. Welsch :
Beiträge zur großräumigen Neutrassierung
- Nr. 7/82 K. Borre and W.M. Welsch :
Proceedings "Survey Control Networks",
Meeting of FIG-Study Group 5B, Aalborg, 7 - 9 July 1982
- Nr. 8/82 A. Geiger :
Entwicklung und Erprobung eines Präzisionsneigungstisches zur Kalibrierung geodätischer Instrumente
-

Bezugsnachweis: Studiengang Vermessungswesen
 im Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen
 Hochschule der Bundeswehr München
 Werner-Heisenberg-Weg 39
 8014 Neubiberg

