

Winkelmessung am EAM

Teil 1: Einführung in die Winkelmesstechnik

Rudolf Thalmann

In den vergangenen drei Jahren wurde am EAM ein Winkelmesslabor aufgebaut mit dem Ziel, über ein breites Angebot an Messmöglichkeiten zu verfügen, das auch den höchsten geforderten Ansprüchen an Genauigkeit genügt und dem internationalen Stand der Technik entspricht. Dazu wurden nicht nur bedeutende Investitionen getätigt, sondern auch eigene Aufbauten entwickelt. Um rationelle Kalibrierungen zu ermöglichen, wurden die Messabläufe sowie die Datenerfassung und -auswertung weitgehend automatisiert. Die Aufbauarbeiten sind grösstenteils abgeschlossen. Erste Kalibrieraufträge und internationale Vergleiche sind erfolgreich durchgeführt worden. Aus diesem Anlass soll hier über die Winkelmessung im allgemeinen und über die Winkelmessmöglichkeiten des EAM im speziellen berichtet werden.

Nach einer Einführung in die Definition der Winkeleinheit werden die Grundlagen der verschiedenen Winkelmessverfahren sowie die Rückführbarkeit von Winkelmesseinrichtungen und Verkörperungen auf die Definition der Einheit diskutiert. Dabei werden verschiedene Selbstkalibrierverfahren erörtert. An vier gebräuchlichen Instrumentenarten wird schliesslich gezeigt, wie kleine Winkel erzeugt oder gemessen werden können.

In einem zweiten Artikel im nächsten OFMET *Info* werden die Einrichtungen und Normale des EAM vorgestellt und mit Messresultaten illustriert. Abschliessend wird ein Überblick über die Messmöglichkeiten des EAM auf diesem Gebiet gegeben.

Einheit des Winkels

Der Winkel ist fest in unserem geometrischen Verständnis des Raumes verankert. Mit ihm lässt sich die relative Lage zweier geometrischer Elemente (Geraden, Ebenen etc.), die durch Drehung ineinander übergehen, beschreiben; er verknüpft die verschiedenen Raumrichtungen. Seine Definition ist insofern nicht zwingend, als

sich Drehungen auch mit Koordinatentransformationen beschreiben lassen, die durch Längenmessungen im Raum erfasst werden können. Das Konzept des Winkels vereinfacht jedoch die mathematische Beschreibung von Richtungen und Drehungen wesentlich.

Die SI-Einheit des ebenen Winkels ist der Radiant (rad). 1 rad ist definiert als der Winkel zwischen zwei Radien eines Kreises, die aus dem Kreisumfang einen Bogen der Länge des Radius ausschneiden [1]. Der Vollwinkel beträgt also 2π rad. Für die dezimale Teilung des Radiant werden die SI-Vorsätze verwendet, üblich sind das Milli, Mikro und - in neusten Anwendungen - das Nano (mrad, μ rad, nrad).

Auf die Einheit des räumlichen Winkels Steradian (sr) soll in diesem Zusammenhang nicht weiter eingegangen werden. Er wird messtechnisch meist auf den ebenen Winkel zurückgeführt. Im SI-Einheitensystem trifft man den Steradian nur bei der Definition der radiometrischen und photometrischen Einheiten an, beispielsweise um den Zusammenhang zwischen Lichtstärke (Candela, cd) und Lichtstrom (Lumen, lm) auszudrücken: $1 \text{ cd} = 1 \text{ lm/sr}$.

Der Winkel hat in der Schweizerischen Gesetzgebung [2] noch eine Sonderstellung: Er gehört weder zu den sieben Basiseinheiten (m, kg, s, A, K, mol, cd), noch zu den abgeleiteten Einheiten wie Kraft, Energie, elektrischer Widerstand etc., sondern er wird zusammen mit der Einheit des Raumwinkels Steradian als „ergänzende SI-Einheit“ bezeichnet. Hierbei ist allerdings zu bemerken, dass

gemäss einer Resolution der 20. Generalkonferenz für Mass und Gewicht [3] die Klasse der ergänzenden Einheiten aufgehoben wurde und die Winkeleinheiten im SI-System neu den abgeleiteten Einheiten zugeordnet werden. Dieser Sachverhalt dürfte wohl in der nächsten Revision der Schweizerischen Einheitenverordnung entsprechend berücksichtigt werden.

Für messtechnische Anwendungen ist die Einheit rad eher ungeeignet, da π keine rationale Zahl ist und damit auch sämtliche ganzzahligen Teiler des Vollkreises nicht rational sind. Gebräuchlich und ebenfalls gesetzlich festgelegt ist die 360er Teilung mit der Einheit Grad ($^\circ$), die sexagesimal in (Winkel-)Minuten ($'$) und (Winkel-)Sekunden ($''$) geteilt wird (siehe Tabelle 1). Die 360er Teilung geht auf die ägyptische Zeitrechnung und Unterteilung des Jahres in 12 Monate zu je 30 Tagen zurück [4]. Der Tag wurde in je 12 (ungleiche) Tages- und Nachtstunden unterteilt. Genauso wie der Winkel wird ja auch die Zeit sexagesimal in Minuten und Sekunden geteilt. Der Winkel und die Zeiteinheiten sind über die Erdrotation miteinander verknüpft. So verliefen die technische und wissenschaftliche Entwicklung der Zeit- und der Winkelmessung weitgehend parallel: Bis zur Neudefinition der Sekunde (1967) mit der Cäsium-Atomuhr war die Zeitmessung stets eine Winkelmessung der Position der Gestirne. Bis 1956 war die Sekunde definiert als der 86400ste Teil eines mittleren Sonnentages, zwischen 1956 und 1967 als Bruchteil des tropischen Jahres. Der techni-

Einheit	Symbol	Vollkreis	Teilung
Radian	rad	2π rad	
Grad	$^\circ$	360°	$1^\circ = (\pi/180) \text{ rad}$
(Bogen-) Minute	$'$		$1' = (1/60)^\circ$
(Bogen-) Sekunde	$''$		$1'' = (1/60)' = (1/3600)^\circ$
Neugrad, Gon	gon	400 gon	$1 \text{ gon} = (\pi/200) \text{ rad}$
	c		$1^c = (1/100) \text{ gon}$
	cc		$1^{cc} = (1/100)^c = (1/10000) \text{ gon}$

Tabelle 1: Die Einheiten der ebenen Winkel.

sche Fortschritt in der Winkelmess-technik wurde wesentlich vom Bedarf nach genauer Zeitmessung geprägt. Triebfeder dazu war bereits im Mittelalter die Navigation.

Ebenfalls in der Einheitenverordnung aufgeführt und damit gesetzlich zulässig ist die 400er Teilung des Vollkreises mit der Einheit Neugrad oder Gon. Interessanterweise ist die für diese Einheit gebräuchliche centesimale (100er) Teilung in c und cc in der Einheitenverordnung nicht vorgesehen, wahrscheinlich um neben der bereits erwähnten sexagesimalen eine weitere nicht-dezimale und damit nicht SI-konforme Teilung zu vermeiden. Es ist zu bemerken, dass das Gon in der Einheitenverordnung von 1977 bis 1994 in der Schweiz gesetzlich nicht festgelegt war, obwohl es in der Landesvermessung stets verwendet wurde.

Die sexagesimale Teilung hat sich für die meisten Anwendungen gegenüber der centesimalen Teilung nicht nur aus Gewohnheitsgründen und wegen der Parallelen zur Zeitrechnung halten können. Ein für die Praxis wichtiger Vorteil ist die Eigenschaft, dass sich bei sexagesimaler Teilung wesentlich mehr ganzzahlige Teiler ergeben als bei centesimaler Teilung: die Zahl 360 hat 23 Teiler, die Zahl 400 nur deren 14.

Grundprinzipien der Winkelmessung

Die Winkelmessung kann nach drei grundsätzlich verschiedenen Verfahren erfolgen:

- Die Unterteilung des Vollkreises in regelmässige Intervalle mit Hilfe von Verkörperungen wie Kreisteilungen, Polygone, Verzahnungen etc. Der Unterteilung liegt das Symmetrieprinzip zugrunde (A).
- Die Rückführung des Winkels auf eine Längenmessung mit Hilfe eines Sinusbalkens oder einer ähnlichen Vorrichtung. Wird in der Regel für kleine Winkel verwendet und beschränkt sich auf einen Bereich $< 90^\circ$ (B).
- Die direkte Messung einer Drehgeschwindigkeit, beispielsweise mit Hilfe eines mechanischen Kreisels oder eines Laserkreisels [4]. Der

physikalische Grund, dass sich eine Drehgeschwindigkeit *direkt* messen lässt, also nicht durch Messung eines Winkels pro Zeiteinheit, liegt darin, dass eine sich drehende Plattenform kein Inertialsystem ist. Der Winkel ergibt sich aus dem zeitlichen Integral über die gemessene Drehgeschwindigkeit (C).

Über die ersten beiden Messverfahren wird in diesem Artikel noch ausführlich berichtet. Das dritte Verfahren findet vor allem in der Navigation seine Anwendung, wo moderne Laserkreiselssysteme den höchsten Anforderungen der Luft- und Raumfahrt genügen. Laserkreisel werden heute sogar in hochgenauen Winkelmess-tischen der Metrologie eingesetzt.

Neben diesen drei Möglichkeiten sind noch weitere Messverfahren zu erwähnen, bei denen die Abweichung von einer Vorzugsrichtung bestimmt wird, insbesondere die Abweichung vom Lot (Neigungsmessgeräte mit Pendel, Libellen) oder die Abweichung von einer Strahlrichtung (Autokollimationsfernrohre).

Primärnormal der Winkel-einheit

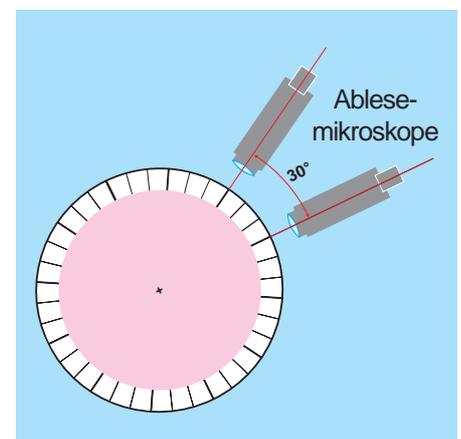
Primärnormal des Winkels ist eigentlich der Vollkreis. Es stellt sich lediglich die Frage, wie sich dieser in exakt gleiche Intervalle aufteilen lässt. Es sei auf die Analogie zum Kilogramm hingewiesen, wo ein 100 g Gewicht das Resultat einer komplizierten Operation ist, die es auf das 1 kg Primärnormal zurückführt.

Viele Winkel sind rein geometrisch exakt konstruierbar: mit Zirkel und Lineal, denken wir nur an die Unterteilung des Vollkreises in 60° -Winkel mit der bekannten Zirkelkonstruktion, oder an die Erzeugung eines 90° -Winkels mit Hilfe des Thaleskreises. Zudem sind gemäss oben erwähntem Messverfahren B sämtliche Winkel kleiner als 90° mit Hilfe eines 90° -Winkels und zweier Längenmessungen über den Tangens bzw. den Sinus konstruierbar. Im nächsten Abschnitt soll erklärt werden, wie sich mit Selbstkalibrierverfahren regelmässige Kreisteilungen erzeugen lassen.

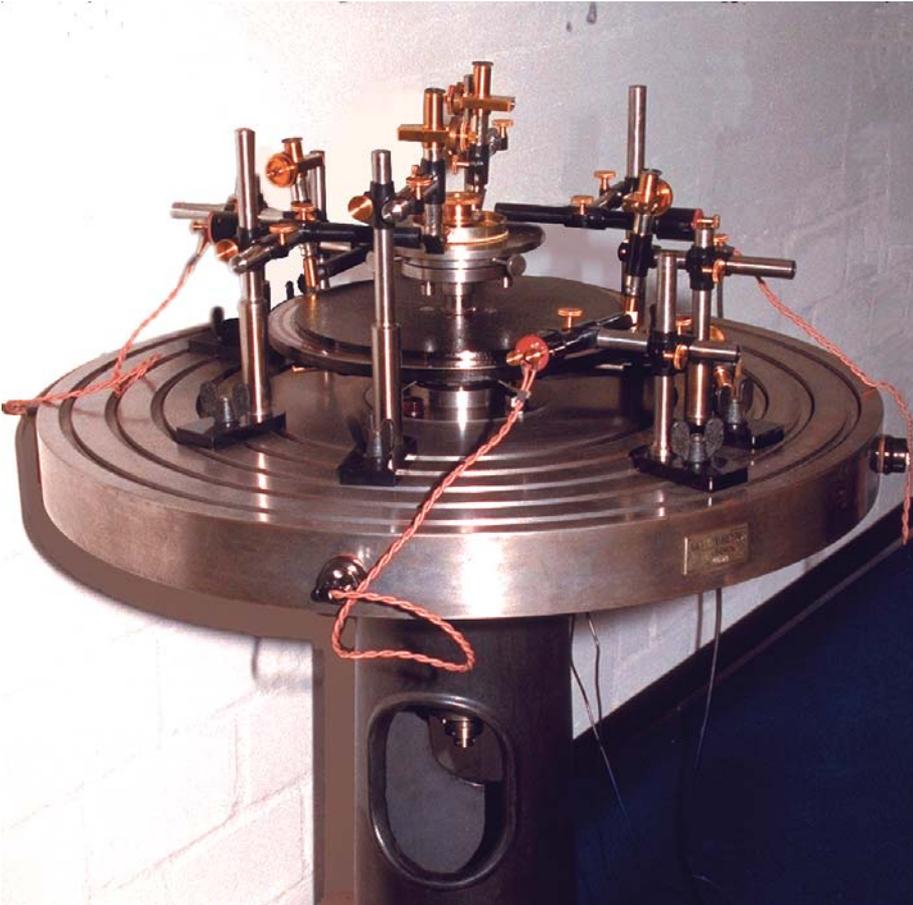
Erzeugung oder Kalibrierung einer Kreisteilung

Unter Anwendung von Verfahren, welche der bereits erwähnten 60° -Zirkelteilung entsprechen, lässt sich mit Hilfe eines Drehtisches und zweier Ablesemikroskope eine Kreisteilung in beliebigen rationalen Teilungen des Vollkreises kalibrieren, d.h. in Intervallen, deren ganzzahliges Vielfaches einen oder mehrere Vollkreise ergibt. Die beiden Mikroskope bilden zueinander einen festen Winkel, der möglichst nahe beim zu kalibrierenden Intervall liegt (z.B. $30^\circ = 2\pi/12$, wie in Figur 1). In einer ersten Messung wird die Abweichung des Intervalls von 0 bis 30° gemessen, danach wird der Teilkreis um 30° gedreht und die Abweichung des Intervalls 30° bis 60° gemessen usw. Aus der Forderung, dass die Summe der gemessenen Abweichungen null sein muss - damit sich der Vollkreis schliesst - ergibt sich der exakte Winkel zwischen den beiden Mikroskopen und damit auch die Kalibrierung sämtlicher 30° -Intervalle der Kreisteilung. Die Messung der kleinen Winkelabweichungen durch die Ablesemikroskope kann über eine Längenmessung (Messverfahren B) rückführbar kalibriert werden.

Ein praktisches Problem bei dieser Art Winkelmessung ist die genaue Zentrierung der Kreisteilung. Zentrierfehler bewirken eine sinusförmige Abweichung der Winkelablesung. Das Problem lässt sich durch die Anordnung je zweier diametral gegenüberliegender Messmikroskope beheben. Ähn-



Figur 1: Kalibrierung einer Kreisteilung mit zwei Ablesemikroskopen.



Figur 2: Teilungsmessapparat von Gustav Heyde, Dresden (Historische Sammlung des EAM).

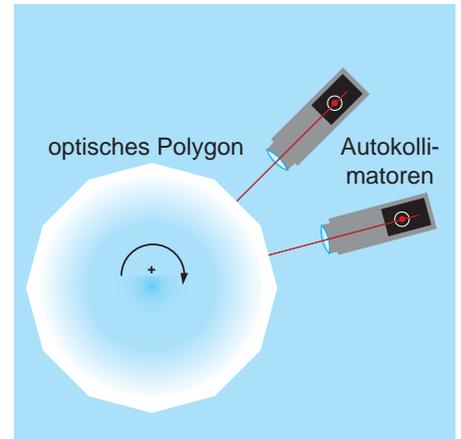
lich wird ja bei Theodoliten jede genaue Winkelmessung auf Umschlag durchgeführt, indem das Fernrohr zuerst um seine horizontale Achse nach hinten gekippt wird und anschliessend der Teilkreis in seine diametrale Stellung gebracht wird (Drehung um 180°). Moderne hochgenaue Winkelmesssysteme mit in der Regel inkrementalen Teilkreisen besitzen häufig zwei oder gar mehrere Leseköpfe, um Zentrierfehler und gegebenenfalls auch harmonische Fehler höherer Ordnung zu eliminieren. Figur 2 zeigt ein Museumsstück des Eidg. Amtes für Messwesen, einen

Teilungsmessapparat von Gustav Heyde, Dresden. Er weist eine 360° und eine 400 gon Teilung auf und ist mit vier Messmikroskopen bestückt.

Optische Polygone gehören zu den wichtigsten Winkel-Verkörperungen. Ihre ebenen, optisch polierten Messflächen erzeugen eine regelmässige Winkelteilung. Sie können analog zur oben beschriebenen Methode kalibriert werden. Das Polygon wird mittels eines Drehtisches in sämtliche Drehlagen gebracht, die Winkelabweichungen zweier benachbarter Messflächen werden mit zwei ortsfesten Autokollimationsfernrohren (AKF)

gemessen (Figur 3). Der Winkel zwischen den Autokollimatoren wird wiederum aus der Bedingung, dass die Summe der Abweichungen null sein muss, bestimmt. Die Funktionsweise von AKF's wird später erklärt.

Die eben dargelegte Methode zur Kalibrierung von Winkelteilungen lässt sich weiterentwickeln. So können die Ablesemikroskope oder Autokollimatoren auf das doppelte, dreifache etc. des Grundintervalles eingestellt und so das Verfahren wiederholt werden. Dadurch erhält man Redundanz in



Figur 3: Kalibrierung eines optischen Polygons mit zwei Autokollimatoren.

den Messwerten und kann damit die statistische Unsicherheit reduzieren.

Kreisteilungen und optische Polygone haben beide ihre Vor- und Nachteile. Diese sind in der Tabelle 2 gegenübergestellt. Dementsprechend unterschiedlich sind auch ihre Einsatzgebiete. Die in ihrer Anwendung relativ einfachen optischen Polygone werden meist zur mobilen Kalibrierung von Rundtischen in diskreten Intervallen verwendet, während Kreisteilungen in der Regel fest in Rundtische oder Winkelmesssysteme eingebaut werden und dort eine quasi-kontinuierliche Ablesung des Drehwinkels ermöglichen.

optische Polygone	Kreisteilungen
unempfindlich auf Zentrierfehler	empfindlich auf Zentrierfehler
Messung der Winkelabweichungen mit hoher Auflösung und Genauigkeit	für hohe Auflösung ist hohe Strichdichte erforderlich
Kalibriergenauigkeit begrenzt durch Ebenheit der Messflächen	
nur endliche Teilung (max. 72-flächig) möglich	kontinuierliche Kreisteilung möglich
bei hoher Genauigkeit relativ voluminös	kompakte Bauart möglich

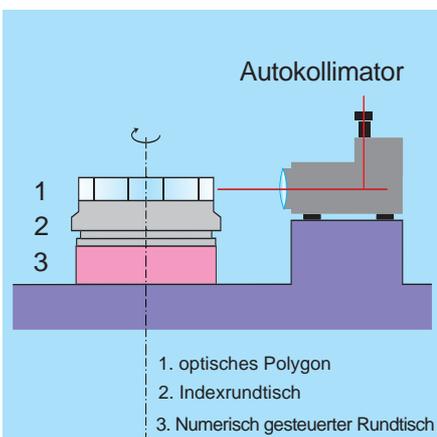
Tabelle 2: Gegenüberstellung einiger Vor- und Nachteile von optischen Polygonen und Kreisteilungen.

Dreirosettenverfahren

Dem sogenannten Rosettenverfahren [5,6] liegen dieselben Prinzipien wie den oben beschriebenen Verfahren zu Grunde, es bietet jedoch mehr Redundanz und damit erhöhte Genauigkeit. Dabei werden gleichzeitig drei übereinanderliegende Teilungen in n gleichen, sich zum Vollkreis er-

gänzenden Intervallen gegeneinander kalibriert. In sämtlichen $n \times n$ möglichen Drehlagen der unteren zur mittleren und der mittleren zur oberen Kreisteilung wird die Summe der Winkelabweichungen gemessen. Mathematisch beschreiben die Messungen ein Gleichungssystem mit n^2 Gleichungen und $3n$ Unbekannten, nämlich den Teilungsfehlern jeder der drei Winkelteilungen in den n Intervallen. Bei einer 12er Rosette ($n = 12$) werden die 36 unbekannt Teilungsfehler aus total 144 Messungen bestimmt. Dies entspricht einer 4-fachen Überbestimmung und damit einer Reduktion des statistischen Anteils in der Unsicherheit um einen Faktor $\sqrt{2}$. Bei einer 24er oder gar 36er Rosette betragen diese Reduktionsfaktoren 2.83 respektive 3.46. Voraussetzung für eine genaue Messung ist allerdings, dass die vom Drehtisch mit der untersten Teilung angefahrenen Positionen wiederholbar sind.

In der Praxis sieht eine Kalibrierung mit dem Dreirosettenverfahren meist folgendermassen aus (Figur 4): Die beiden unteren Winkelteilungen werden durch Rundtische realisiert, zuoberst liegt ein *optisches Polygon*. Die Winkelabweichungen werden mit einem Autokollimator gemessen. In der Mitte wird häufig ein *Indextrundtisch* (ein mechanisches Polygon mit einer Verzahnung, das nur diskrete Drehlagen, meist in $1/4^\circ$ oder 1° -Schritten, zulässt) eingesetzt. Bei Verwendung eines elektronischen AKF's und eines *numerisch gesteuerten Rundtisches* lässt sich die langwierige Messung weitgehend automatisieren.



Figur 4: Häufig verwendeter Aufbau zur Kalibrierung von drei Kreisteilungen mit Hilfe des Dreirosettenverfahrens.

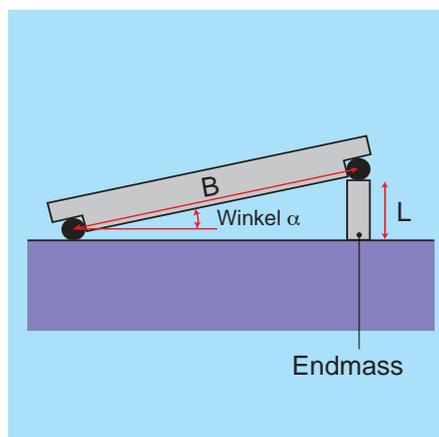
Auf die mittlere Teilung kann beim Rosettenverfahren im Prinzip verzichtet werden. Es muss lediglich die Möglichkeit bestehen, das Polygon gegenüber dem untersten Rundtisch in die n verschiedenen Drehlagen bringen zu können, was durchaus auch von Hand geschehen kann. An der Auswertung ändert sich nichts: als dritte Teilung werden die - allerdings nicht relevanten - Drehlagen zwischen der unteren und der oberen Teilung bestimmt.

Kleine Winkel

Nach den Betrachtungen, wie der Vollwinkel in gleiche Intervalle geteilt werden kann, werden nun einige Verfahren zur Erzeugung kleiner Winkel nach dem Messverfahren B erläutert.

Sinuslineal

Ein Sinuslineal besteht aus zwei parallel angeordneten Wellen gleichen Durchmessers, die ein ebenes Lineal tragen (Figur 5). Auf einer Prüfplatte lassen sich durch Unterlegen verschiedener Endmasse unter eine der Wellen beliebige Winkel erzeugen. Der Winkel α zur Ausgangsstellung ergibt sich aus $\sin \alpha = L / B$, dem Verhältnis der Länge L des Endmasses zur Basislänge B . Mit genau gefertigten und gut kalibrierten Normalen lassen sich Genauigkeiten von besser als $1''$ erreichen. Der beschriebene Aufbau eines Sinuslineals lässt sich natürlich beliebig abwandeln, durch Verwendung von Drehlagern, Längensystemen etc. Sinuslineale werden in Messlabors meist zur Messung



Figur 5: Aufbau eines Sinuslineals.

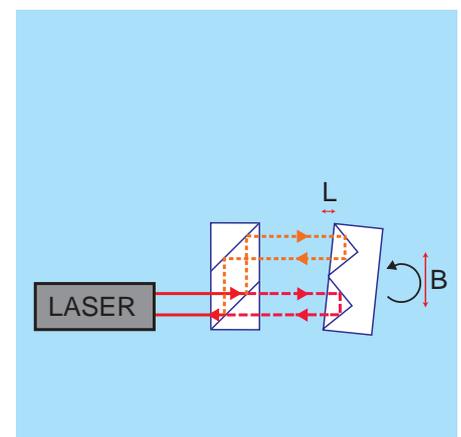
von konischen Werkstücken und Lehren verwendet. Die breiteren, stabiler gebauten und mit Aufspannvorrichtungen versehenen Sinustische werden auf Werkzeugmaschinen zur Fertigung winkliger Werkstücke eingesetzt.

Winkelinterferometer

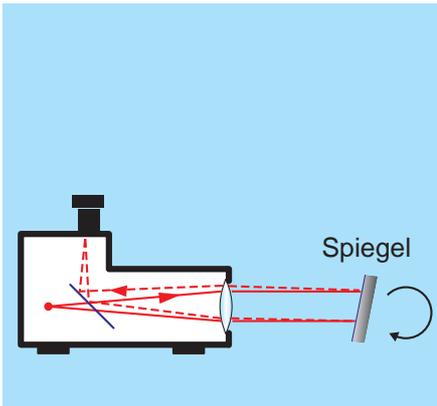
Ein Winkelinterferometer [6] ist in seiner einfachsten Ausführung im Prinzip ein Sinustisch, bei dem der Sinus mit einem Laserinterferometer gemessen wird. Zwei parallele Strahlen im Abstand B treffen auf je einen Reflektor, gemessen wird die optische Weglängenänderung $2L$ zwischen den beiden Strahlen (Figur 6). Der Drehwinkel ergibt sich mit Hilfe der selben Gleichung wie beim Sinuslineal. Die Vorteile eines Winkelinterferometers sind offensichtlich: Es misst im Gegensatz zum Sinuslineal berührungslos und benötigt keine genaue Drehachse, bei der jede Verschiebung beim Drehen einen Winkelfehler erzeugt. Bei kommerziellen Systemen liegt die Auflösung und die Genauigkeit bei $0.1''$, mit selbst gebauten Systemen lassen sich noch bessere Werte erzielen.

Autokollimationsfernrohr

Beim Autokollimationsfernrohr (AKF) wird eine punkt- oder spaltförmige Lichtquelle durch eine Kollimationsoptik in ein paralleles Strahlenbündel geführt (kollimiert). Das Abbild des von einem externen Spiegel in die Fernrohroptik zurückgeworfenen Strahls (Autokollimation) wird mittels eines Strahlteilers ausgekoppelt und beobachtet. Wird der Spiegel gekippt,

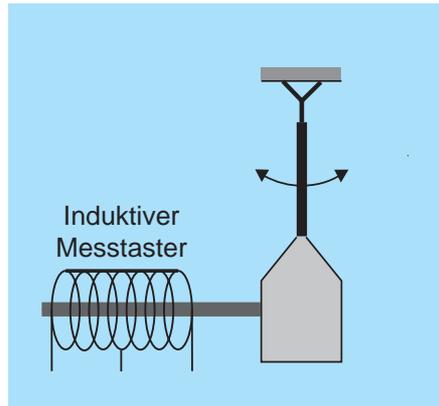


Figur 6: Funktionsschema eines Winkelinterferometers.



Figur 7: Funktionsschema eines Autokollimators.

bewirkt dies eine Verschiebung des Spaltbildes. Durch einen positionsempfindlichen photo-elektrischen Empfänger wird diese seitliche Verschiebung und damit der Kippwinkel des Spiegels gemessen (Figur 7). Bei Geräten mit visueller Beobachtung wird zusätzlich ein Fadenkreuz eingeblendet, dessen Abbild zum Ursprünglichen verschoben wird. Mit den meisten AKF's kann gleichzeitig zweiachsig gemessen werden. Der Messbereich von kommerziellen Geräten liegt zwischen $\pm 20''$ bis zu mehreren Bogenminuten. Die Auflösung kann $0.005''$ erreichen, was der Verkippung eines 40 mm grossen Spiegels um 1 nm entspricht. Während Sinuslineale und Winkelinterferometer direkt über eine Längenmessung auf die Einheit



Figur 8: Messprinzip eines elektronischen Neigungsmessgerätes.

rückführbar sind, müssen AKF's mit Hilfe eines Kleinwinkelerzeugers, z.B. eines Sinustisches, kalibriert werden.

Neigungsmessgeräte

Als Vertreter der Winkelmessgeräte, welche die Abweichung vom Lot messen, werden hier die elektronischen Neigungsmesser vorgestellt. Ihre Anwendungen sind sehr vielseitig. In der Längenmesstechnik werden sie vor allem bei der Bestimmung von Führungsfehlern von Werkzeug- oder Messmaschinen und zur Messung von Geradheits- und Ebenheitsabweichungen von Linealen und Prüfplatten verwendet. Das Messprinzip eines der gebräuchlichen Geräte ist in Figur 8 dargestellt [7]: Am Ende eines an einer Blattfeder aufgehängten Pendels

ist ein Ferritkern befestigt, der in eine an der Gerätekammer befestigte Doppelspule eintaucht. Die durch eine Auslenkung des Pendels erzeugte Lageänderung des Ferritkerns beeinflusst die Induktivität der Spule und erlaubt somit die elektronische Messung der Neigung mit sehr hoher Auflösung (bis zu $0.2''$).

Literatur

- [1] *Die gesetzlichen Masseinheiten der Schweiz*, Eidg. Amt für Messwesen, 1991
- [2] Einheitenverordnung vom 23. November 1994, SR 941.202.
- [3] 20^e Conférence Générale des Poids et Mesures, Resolutions, 1995.
- [4] W. Beyer et al., *Industrielle Winkelmess-technik*, Expert Verlag, 1990.
- [5] R. Noch und O. Steiner, *Die Bestimmung von Kreisteilungsfehlern nach einem Rosettenverfahren*, Zeitschrift für Instrumentenkunde 74, 307-316, 1966
- [6] E. Debler, *Winkelmessungen mit Laser-Interferometern, Mehrfachreflexionen und Dreirosettenverfahren*, PTB-Bericht Me-8, 1975.
- [7] *Neigungsmesssysteme und -Instrumente*, Firmenschrift der Firma Wyler AG, 8405 Winterthur, 1995.

Kurzfassung

In jüngster Zeit wurde am EAM ein neues Labor für Winkelmessung aufgebaut. Aus diesem Anlass erscheinen in dieser und der nächsten Ausgabe des OFMET *Info* zwei Beiträge über dieses Gebiet.

Im ersten Artikel wird die Definition der SI-Winkeleinheit und der anderen gebräuchlichen Einheiten mit ihren Teilungen erörtert. Es wird erklärt, wie regelmässige Kreisteilungen erzeugt und kalibriert werden können. Dabei stehen Selbstkalibrierverfahren wie das sogenannte Dreirosettenverfahren im Vordergrund. Diese nutzen die Tatsache, dass die Summe der Teilwinkel einer Kreisteilung stets den Vollwinkel 2π ergeben muss. Abschliessend werden verschiedene Geräte zur Messung vorwiegend kleiner Winkel, nämlich Sinuslineale, Autokollimator, Winkelinterferometer und elektronische Neigungsmesser, vorgestellt.

Résumé

Récemment un nouveau laboratoire pour la mesure des angles est entré en fonction à l'OFMET. A cette occasion, deux articles traiteront ce sujet dans la présente et la prochaine édition de l'OFMET *Info*.

Le premier article expose la définition de l'unité d'angle SI, ainsi que d'autres unités et leurs divisions qui sont couramment utilisées. Ensuite, la génération et l'étalonnage de divisions angulaires à l'aide de méthodes auto-calibrantes seront expliqués. Ces méthodes sont essentiellement basées sur le fait que la somme de tous les angles partiels d'une division circulaire doit être égale à l'angle du cercle entier 2π . Finalement, plusieurs instruments de mesure de petits angles sont présentés notamment, la barre sinus, l'autocollimateur, l'interféromètre angulaire et le niveau électronique.

Riassunto

Di recente è entrato in funzione all'UFMET un nuovo laboratorio per la misurazione angolare. Per questa occasione sono pubblicati, nella presente edizione di OFMET *Info* e nella prossima, due articoli su tale argomento.

Nel primo articolo è dibattuta la definizione di unità angolare SI e di altre unità, con le rispettive divisioni, di uso corrente. In seguito sono spiegate la generazione e la taratura delle divisioni angolari mediante metodi di autotaratura. Questi metodi si basano sul fatto che la somma degli angoli parziali di una divisione circolare deve sempre essere uguale all'angolo intero 2π . Infine sono presentati diversi apparecchi di misurazione, soprattutto per piccoli angoli, segnatamente barra seno, autocollimatore, interferometro angolare e sbandometro elettronico.

Summary

Recently, a new laboratory for angular measurements has been set up at OFMET. Therefore, two articles about this subject appear in the present and next issue of OFMET *Info*.

In the first article, the definition of the SI unit and the other commonly used units of angle including their division are discussed. The generation and calibration of angular divisions by the use of self calibration methods are explained. These methods are essentially based on the fact, that all partial angles in a circular division sum up to the full circle of 2π . Several instruments used for the measurement of mainly small angles, i.e. the sine bar, the auto-collimator, the angular interferometer and the electronic level, are presented.