

Winkelmessung am EAM

Teil 2: Einrichtung und Messmöglichkeiten

Rudolf Thalmann

Nachdem in einem ersten Artikel die Grundlagen der Winkelmessung sowie die Winkelnormale, Winkelmeßinstrumente und -verfahren im Allgemeinen erörtert wurden [1], sollen im vorliegenden, zweiten Beitrag die Einrichtungen und die Kalibriermöglichkeiten des EAM im Speziellen beschrieben werden. Für das bessere Verständnis einzelner Verfahren und der Funktionsweise der Meßinstrumente wird die Kenntnis des vorgängigen Artikels vorausgesetzt.

Winkellabor

In einem bisher ungenutzten Kellerraum wurde ein neues Winkellabor eingerichtet (Figur 1). Der Raum beherbergt den Sockel des Hauptkomparators, der für die Kalibrierung grosser Massverkörperungen verwendet wird, und diente bis anhin lediglich als Abstellraum und als Puffer für das Klima des darüberliegenden Komparatorraumes. Auf einer freien Fläche von 20 m² wurde im hinteren Teil dieses Raumes durch Einbau einer Wand und einer hängenden Decke ein klimatisch unabhängiges Labor geschaffen. Die eigene Klimatisierung ist wichtig, um das Klima des darüberliegenden Labors nicht zu stören. Die Temperaturkonstanz des neuen Labors liegt bei $(20 \pm 0.2)^\circ\text{C}$, wobei auf möglichst kleine Luftgeschwindigkeiten geachtet wurde. Die Klimaanlage bietet ferner die Möglichkeit zur direkten Abführung der Wärme grösserer Wärmequellen. Punkto Vibrationen befindet sich das neue Labor durch seine Lage im zweiten Untergeschoss am bestmöglichen Standort.

Rundtische

Winkelmeßstisch

Das Hauptnormal für die Winkelmessung bildet ein luftgelagerter Rundtisch (Figur 1), hergestellt von der Firma Heidenhain, Traunreut, Deutschland. Der Rundtisch, eine bisher erst in drei Exemplaren hergestell-



Figur 1: Winkellabor des EAM mit dem neuen, numerisch gesteuerten Winkelmeßstisch (rechts im Bild).

te Spezialanfertigung, ist mit dem Inkremental-Winkelmeßsystem RON 905 versehen. Das Meßsystem hat 36'000 Teilstriche, die durch eine Elektronikeinheit 1024-fach interpoliert werden, womit eine Auflösung von $1/36'864'000$ eines Vollkreises, also 0.035" erreicht wird. Der Antrieb des Rundtisches erfolgt ähnlich wie bei Plattenspielern über ein Reibrad, das über ein Riemengetriebe von einem tacho-geregelten DC-Motor angetrieben wird. Der Motor kann entweder von Hand über ein Potentiometer oder ab PC über eine D/A-Wandlerkarte angesteuert werden. Die Positioniergenauigkeit mit Direktantrieb ab PC beträgt ca. 1", dies bei einer Verzögerung innerhalb 3 sec von der Maximalgeschwindigkeit von 3 Umdrehungen/min zum Stillstand. Motor und Reibrad sind auf einer elastisch gelagerten Wippe befestigt. Die Wippe

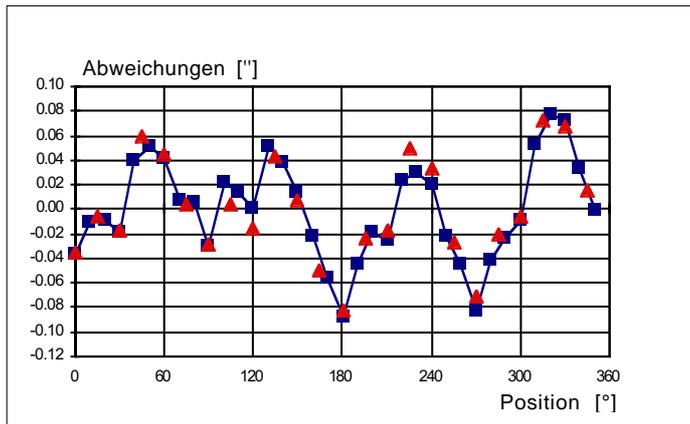
lässt sich über ein Piezostellglied leicht drehen, was eine Feinpositionierung des Rundtisches in einem Bereich von $\pm 5''$ ermöglicht. In der Regel ist diese Feinpositionierung nicht notwendig, da die Positioniergenauigkeit direkt mit dem Motor genügt. Infolge Kriechens und Hysterese des Piezos ist die Feinpositionierung auch entsprechend langsamer.

Der Rundtisch ist in einen Hartgesteinstisch versenkt, was eine niedrige Bauhöhe bei Messaufbauten ermöglicht und in einer ausgezeichneten thermischen Stabilität resultiert.

Die Kalibrierung des Winkelmeßstisches erfolgte nach der Dreirosettenmethode [2], einem Selbstkalibrierverfahren. Figur 2 zeigt den Messaufbau mit dem Indexrundtisch als zweite, mittlere Teilung und einem 24-flächigen optischen Polygon als dritte Teilung. Solche Kalibrierungen wur-



Figur 2: Messaufbau für Kalibrierung nach dem Dreirosettenverfahren.



Figur 3: Kalibrierung des Winkelmessstisches in 10°- und in 15°-Intervallen.

den mehrfach mit je einem 12-, 24- und 36-flächigen Polygon durchgeführt. Basierend auf der Messung mit einem 36-flächigen Polygon wurde eine Korrekturtabelle für den Winkelmessstisch mit Stützpunkten alle 10° angelegt. Die Werte dazwischen werden linear interpoliert. Figur 3 zeigt die Kalibrierwerte in den 10°-Intervallen sowie die Messresultate in den 15°-Intervallen des 24-flächigen Polygons. Die Übereinstimmung sowohl in den gemeinsamen Messpunkten (30°-Intervalle) als auch in den durch Interpolation gewonnenen ungeraden Winkelwerten ist stets besser als 0.02", die Standardabweichung der Differenzen beträgt 0.009". Dass die Wiederholbarkeit und die Übereinstimmung der Kalibrierwerte wesentlich besser ist als die digitale Auflösung des Winkelmesssystems rührt daher, dass beim Rosettenverfahren jede Position mehrfach angefahren wird und somit eine Mittelung über eine Vielzahl von Messungen stattfindet. Es darf folglich damit gerechnet werden, dass die Messunsicherheit des Winkelmessstisches in den Intervallen, die ein ganzzahliges Vielfaches von 1/36'000 des Vollkreises bilden, zumindest innerhalb der digitalen Auflösung von 0.035" liegt.

Die Genauigkeit für beliebige Intervalle, in denen die Elektronik zwischen den Teilstrichen des Inkrementalteilkreises interpoliert, muss separat ermittelt werden. Die elektronische Auswerteeinheit bietet die Möglichkeit zu einem sogenannten Korrekturlauf, bei dem die Signale der beiden Lesköpfe während eines gleichförmigen Umlaufs automatisch abgeglichen bzw. rechnerisch korrigiert werden.

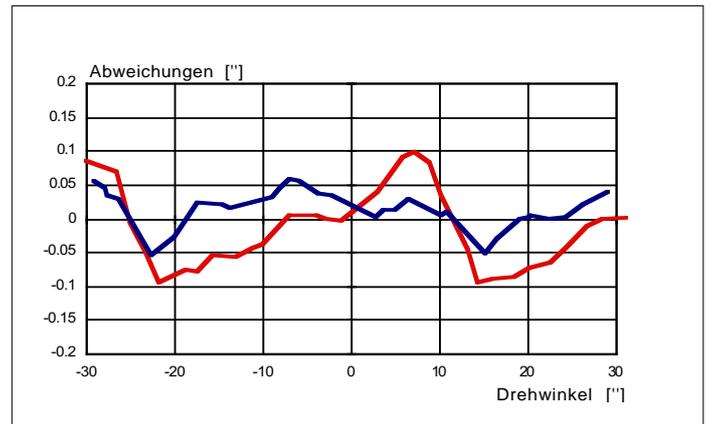
Dadurch werden Interpolationsfehler, die mit der Inkrementalteilung periodisch sind, reduziert. Figur 4 zeigt einen Vergleich des Winkelmesssystems des Rundtisches mit einem elektronischen Autokollimator über knapp zwei Perioden des Inkrementalteilkreises. Der in dieser Messung verwendete Autokollimator hat eine digitale Auflösung von 0.005", die Genauigkeit liegt in diesem Messbereich bei 0.01". Die Unregelmäßigkeit der Messpunkte rührt von der digitalen Auflösung des Rundtisches her. Die Abweichungsspanne und die Standardabweichung betragen respektive $\pm 0.08"$ und 0.03" für den unkorrigierten Rundtisch sowie $\pm 0.05"$ und 0.02" nach dem Korrekturlauf.

Indexrundtisch

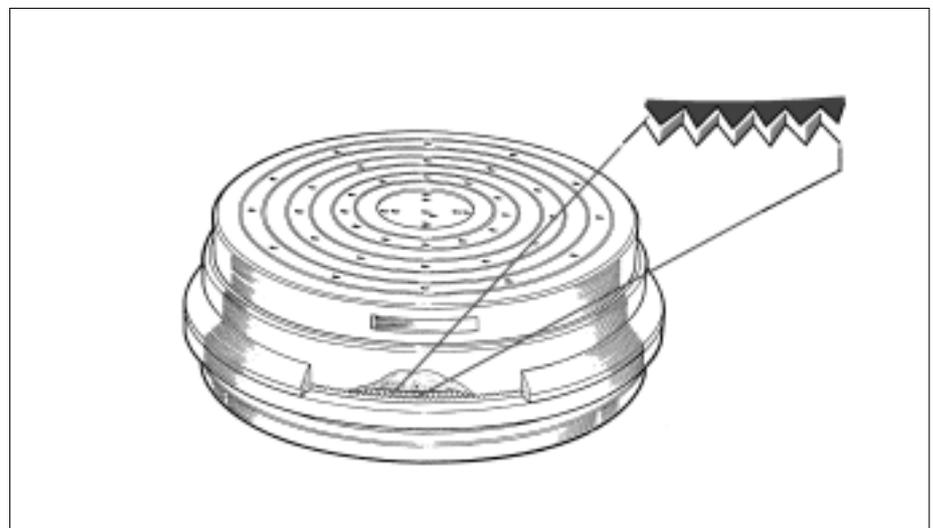
Als zweiten Rundtisch hoher Genauigkeit besitzt das EAM einen Indexrundtisch (Moore Special Tool Co.,

Bridgeport, USA). Er besteht aus zwei ineinander greifenden Verzahnungen, sogenannte Hirtverzahnungen, mit je 1440 Zähnen (Figur 5). Damit lassen sich Drehpositionen in 1/4° Intervallen realisieren. Der Vorteil dieser Art ineinandergreifender Verzahnung liegt darin, dass sich lokale Verzahnungsfehler ausmitteln. Die Wiederholbarkeit einzelner Positionen bei manueller Positionierung beträgt 0.025" (Standardabweichung). Die Genauigkeit des Indexrundtisches wurde in den oben beschriebenen Rosettenmessungen ermittelt. Die Abweichungen in 36 Positionen (10°-Intervalle) liegen innerhalb einer Bandbreite von $\pm 0.22"$ bei einer Standardabweichung von 0.14".

Neben der bereits erwähnten Anwendung im Rosettenverfahren wird der Indexrundtisch vor allem zur Kalibrierung von anderen Rundtischen eingesetzt. Er ist mobil und damit auf



Figur 4: Messung der Interpolationsfehler des Winkelmessstisches mit (blau) und ohne (rot) Korrekturlauf.



Figur 5: Aufbau eines Moore Indexrundtisches.

andere Drehtische montierbar. Zudem kann er auch mit horizontaler Drehachse verwendet werden.

Winkelverkörperungen

Optische Polygone

Optische Polygone sind verkörperte regelmässige Vielecke mit bis zu 72 optisch polierten, ebenen Messflächen. Sie werden vor allem zur Kalibrierung von Rundtischen in diskreten Positionen verwendet. Das EAM besitzt drei Polygone: ein 4-seitiges aus Stahl, ungefasst, ein 12-seitiges aus Glas, gefasst, und ein 24-seitiges aus Zerodur Glaskeramik, ungefasst (Figur 6). Die Abweichungen der Winkel zwischen den Messflächen vom Nominalwinkel sind in der Regel kleiner als 2", jedoch im Prinzip unerheblich, da optische Polygone stets im kalibrierten Zustand verwendet werden und deshalb die Abweichungen ohnehin berücksichtigt werden. Weit wichtiger sind die Pyramidalfehler, d.h. die Parallelitätsabweichungen der Messflächen zur Symmetrieachse. Diese können in der Anwendung zu Messfehlern führen (Übersprechen des Autokollimators von der vertikalen in die horizontale Messachse). Die Pyramidalfehler eines guten optischen Polygons sind meist kleiner als $\pm 5''$. Entscheidend für die Qualität eines optischen Polygons ist die Ebenheit der Messflächen: Nur ebene Messflächen definieren eine eindeutige Richtung. Ist die Messfläche gekrümmt, so hängt die Richtung und damit der lokale Winkel vom Ort ab. Autokollimatoren verschiedener optischer Qualität werden dann verschiedene mittlere Richtungen bestimmen. Die Unterschiede können selbst bei Ebenheitsabweichungen von $< 0.5 \mu\text{m}$ mehrere Zehntel Bogensekunden betragen.

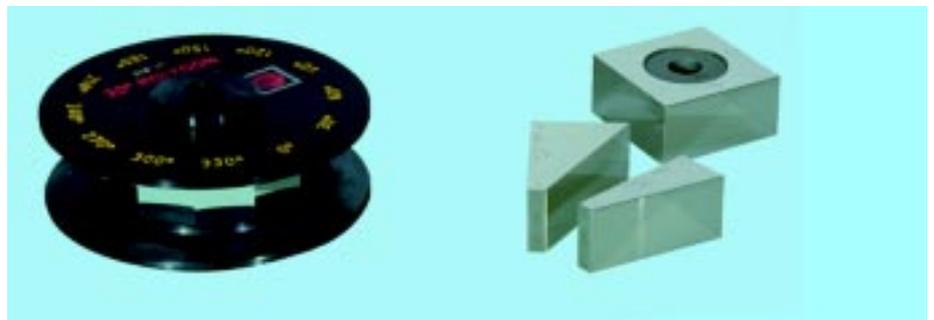
Die Kalibrierung von optischen Polygonen erfolgt in der Regel ebenfalls mit dem Dreirosettenverfahren. Kalibriert wird primär nicht der Winkel zwischen den Ebenen benachbarter Messflächen, sondern der Winkel zwischen den auf eine zur Drehachse senkrecht stehende Ebene projizierten Richtungsvektoren, was bei grossen Pyramidalfehlern nicht dasselbe Resultat ergibt. Die Messunsicherheit

bei der Kalibrierung von optischen Polygonen hängt wesentlich von der Ebenheit der Messflächen ab. Eine Abschätzung dieses Beitrages zur Unsicherheit ist schwierig, einen Hinweis dafür kann man jedoch aus einer Umschlagsmessung in Normal- und Kopfstellung des Polygons erhalten. Die vom EAM angegebene Messunsicherheit beträgt bestenfalls $\pm 0.1''$, auch wenn die durch Wiederholungsmessungen ermittelten zufälligen Fehler um einen Faktor 3 kleiner sind. Ein erst kürzlich durchgeführter Vergleich mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig an einem 36-flächigen Polygon ergab eine Übereinstimmung innerhalb $\pm 0.04''$ bei einer Standardabweichung der Differenzen von $0.018''$.

Winkelendmasse

Winkelendmasse (Figur 6) verkörpern den Winkel zwischen zwei optisch polierten Messflächen. Sie sind normalerweise aus Stahl gefertigt und in

standardisierten Abstufungen erhältlich, z.B. 1", 3", 5", 20", 30", 1', 3', 5', 20', 30', 1°, 3°, 5°, 15°, 30°, 45°. Damit lassen sich durch geeignete Kombination (Addition oder Subtraktion) von Winkelendmassen sämtliche Winkel bis 99° in Abstufungen von 1" realisieren. Für die Kombination werden die Messflächen aneinander gesprengt, was Messflächen in Endmassqualität erfordert. Genauso wie Parallelendmasse sind auch Winkelendmasse bezüglich Ebenheit der Messflächen und Abweichung vom Nominalwert in verschiedenen Genauigkeitsklassen erhältlich, je nach Norm beispielsweise mit Toleranzen von 1", $\frac{1}{2}''$ und $\frac{1}{4}''$. Die Kalibrierung von Winkelendmassen erfolgt mittels des Winkelmesstisches und eines Autokollimators. Ein Neigetisch erlaubt die Ausrichtung der unter Umständen mit einem Pyramidalfehler behafteten Messflächen symmetrisch zur Drehachse des Messtisches. Die vom EAM angegebene Kalibrierunsicherheit für Winkelendmasse beträgt bestenfalls 0.1".



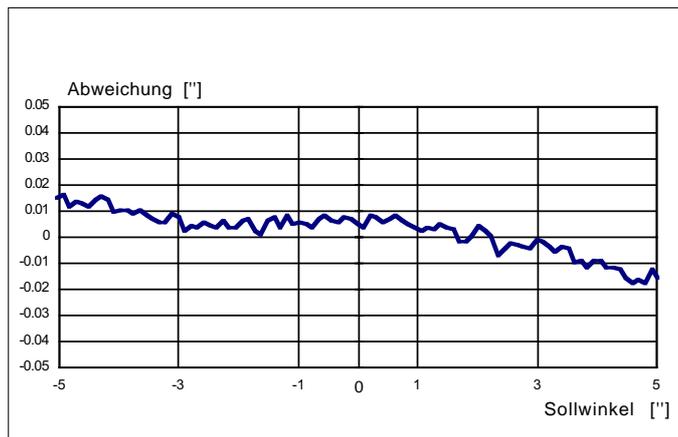
Figur 6: Optische Polygone und Winkelendmasse.



Figur 7: Aufbau zur Kalibrierung eines Hartgesteinswinkels auf dem Winkelmesstisch durch Geradheitsmessung der Messflächen.



Figur 8: Aufbau zur Kalibrierung eines Autokollimators mit Hilfe eines Zerodur-Sinuslineals.



Figur 9: Kalibrierkurve des Autokollimators Elcomat HR für den zentralen Messbereich von 10°.

Hartgesteinswinkel

Winkelnormale grösserer Abmessungen sind in der Regel aus Hartgestein gefertigt. Sie verkörpern meist rechte Winkel mit Seitenlängen bis zu 1 m und werden zur Prüfung der Winkeligkeit von Messgeräten sowie Mess- und Bearbeitungsmaschinen eingesetzt. Hartgestein hat bei relativ kleinem spezifischen Gewicht eine ausgezeichnete Formstabilität und lässt sich gut bearbeiten.

Bei der Kalibrierung grosser Winkelverkörperungen wird die Winkelmessung stets mit einer Formmessung kombiniert. Das EAM hat deshalb in Ergänzung zum Winkelmesstisch eine Luftlager-Linearführung (Kunz Präzision, CH-Zofingen) bauen lassen (Figur 7). Damit lässt sich mit Hilfe eines elektronischen Tasters die Geradheit der Messflächen erfassen, wobei zwischen den beiden Messungen das Winkelnormal um den Sollwinkel gedreht wird. Da der Aufbau der Einrichtung noch nicht abgeschlossen ist, sind noch keine definitiven Angaben über die erreichbare Messgenauigkeit möglich, die gemessenen Führungsabweichungen liegen jedoch ohne Korrekturen bereits deutlich unter 1 μm .

Kalibrierung von Winkelmessinstrumenten

Autokollimatoren

Die Funktionsweise von Autokollimations-Fernrohren (AKF) wurde im letzten Artikel erläutert. Das Winkellabor des EAM verfügt über mehrere AKFs. Das genaueste Gerät Elcomat

HR hat einen zweiachsigen Messbereich von 300" bei einer Auflösung von 0.005". Die spezifizierete Genauigkeit beträgt 0.01" über jeden 10"-Bereich, 0.02" über jeden 40"-Bereich und 0.03" über den Gesamtbereich. Die Kalibrierung der horizontalen Achse geschieht mittels eines Sinuslineals aus Zerodur (Glaskeramik mit verschwindend kleinem thermischen Ausdehnungskoeffizienten, Figur 8). Das Sinuslineal besteht aus einem verspiegelten Balken, der mit einem Kreuzfedergelenk gelagert ist und dessen Auslenkung mit einem digital gesteuerten Piezoelement bewerkstelligt wird. Die wirksame Länge des Sinusbalkens beträgt 206.26 mm, so dass 1 μm Auslenkung eine Drehung um 1" erzeugt. Das durch einen kapazitiven Sensor geregelte Piezostellglied wurde mit einem Laserinterferometer kalibriert. Die Messunsicherheit ist durch das Rauschen,

allfällige Temperaturdriften, die Wiederholbarkeit und eine der Linearbewegung des Stellgliedes überlagerte Kippbewegung beschränkt. Die Linearitätsabweichung beträgt etwa $\pm 3 \text{ nm}$ (bzw. $\pm 0.003''$ für den Sinusbalken), die Absolutgenauigkeit liegt bei $\pm 0.2\%$. Figur 9 zeigt das Resultat einer Kalibrierung der horizontalen Achse des in Figur 8 gezeigten Autokollimationsfernrohres für einen eingeschränkten Messbereich von 10". Die Abweichungen des AKFs liegen innerhalb $\pm 0.016''$, was nach Abzug der Messunsicherheit den spezifizierten Werten entspricht.

Für die gleichzeitige Kalibrierung beider Messachsen von 2-achsigen AKFs wurde eine Vorrichtung mit optischen Keilplatten gebaut. Mit einem Glaskeil lässt sich der Strahl des Kollimators um einen festen Betrag ablenken, die Richtung hängt von der Drehlage des Keils ab. Durch zwei hinter-



Figur 10: Aufbau zur Kalibrierung von elektronischen Neigungsmessern auf einem Neigungsbalken.

einanderliegenden unabhängig voneinander drehbare Keile kann eine Strahlableitung in eine beliebige Richtung und -innerhalb eines Maximalbereiches- um einen beliebigen Betrag erzeugt werden. Mit einem derartigen Aufbau lassen sich nicht nur die beiden Messachsen, sondern auch deren Rechtwinkligkeit zueinander kalibrieren.

Elektronische Neigungsmesser

Zur Kalibrierung von Libellen (Wasserwaagen), elektronischen Neigungsmessern, aber auch Autokollimatoren wurde ein Neigungsmesstisch gebaut. Er besteht aus einem verrippten Gussbalken, der auf einer Seite auf zwei Wellen gelagert ist. Durch eine Höhenfeinverstellung wird eine definierte Neigung des Balkens erzeugt. Die Balkenneigung wird mit Hilfe eines Winkelinterferometers direkt gemessen, und zwar mit einer Auflösung von 0.1". Figur 10 zeigt den Messaufbau, wie er zur Kalibrierung von elektronischen Neigungsmessern verwendet wird. Die eine Sonde des Neigungsmessers steht auf der geschliffenen Auflagefläche des Balkens, an dem der Reflektor des Winkelinterferometers befestigt ist, während die Referenzsonde kraftschlüssig mit dem Winkelinterferometer auf dem Prüftisch steht.

Messmöglichkeiten des Winkellabors des EAM

Abschliessend sollen die Kalibriermöglichkeiten des EAM auf dem Gebiet der Winkelmesstechnik tabellarisch dargestellt werden. Die Tabelle 1 ist nicht zwingend vollständig; auf Anfrage hin können unter Umständen auch andere Messungen, erweiterte Messbereiche oder erhöhte Genauigkeit angeboten werden. Die angegebenen Messunsicherheiten verstehen sich als Richtwerte und hän-

gen in der Regel vom zu kalibrierenden Messmittel ab. Sie werden im Einzelfall abgeschätzt, und zwar nach den internationalen Empfehlungen der ISO (unter Verwendung eines Faktors $k=2$, was bei normalverteilten Messwerten einem Vertrauensintervall von 95% entspricht). ■

Literatur

[1] R. Thalmann, *Winkelmessung am EAM, Teil 1: Einführung in die Winkelmesstechnik*, OFMET Info 3, 2/1996.

[2] *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, International Organization for Standardization ISO, 1993, ISBN 92-67-10188-9.

Winkelverkörperungen	Beschreibung / Bereich	Messunsicherheit
Rundtische	Kalibrierung in 1/4°-Intervallen	± 0.2"
Indexrundtische	Kalibrierung in 15°-Intervallen	± 0.1"
Optische Polygone	Kalibrierung in 15°-Intervallen	<± 0.1"
Winkelendmasse	bis 72-flächig	>± 0.1"
Hartgesteinswinkel	beliebige Winkel	>± 0.1"
	Kalibrierung Geradheit	(± 0.1 µm)
	Winkligkeit	(± 0.2")
Winkelmessgeräte	Bereich	Messunsicherheit
Drehgeber	in 1/100°-Intervallen	± 0.05"
	in beliebigen Intervallen	± 0.1"
Autokollimatoren	± 7", horizontale Achse	± 0.01"
	beliebiger Bereich, horiz. Achse	± 0.08"
	± 20", inkl. 2-achsige Winkligkeit	± 0.05"
	± 2000", vertikale Achse	>± 0.1"
Elektron. Neigungsmesser	± 2000"	>± 0.1"
Libellen	± 2000"	je nach Skalenteilung

Tabelle 1: Zusammenstellung der Kalibriermöglichkeiten des Winkellabors des EAM.

Kurzfassung

Nachdem in der letzten Ausgabe des OFMET *Info* die Grundlagen der Winkelmessung dargelegt wurden, stehen im zweiten Beitrag die Einrichtungen und Messmöglichkeiten des EAM im Vordergrund. Der Bau eines neuen klimatisierten Labors war Voraussetzung für die Anschaffung und den Betrieb von hochgenauen Normalen und Messmitteln. Im Zentrum steht ein numerisch gesteuerter, luftgelagerter Winkelmesstisch, dessen Kalibrierung und Messgenauigkeit im Detail erörtert werden. Anschliessend werden diverse weitere Winkelverkörperungen und Messinstrumente vorgestellt und die zugehörigen Kalibrierverfahren erklärt. Schliesslich werden die Messmöglichkeiten des EAM im Bereich der Winkelmessung tabellarisch zusammengefasst.

Résumé

Dans la dernière édition de l'OFMET *Info* ont été présentées les bases de la métrologie angulaire. Le sujet de cette deuxième contribution concerne l'instrumentation et les possibilités de mesure de l'OFMET. Un nouveau laboratoire climatisé a été construit qui nous offre les conditions optimales pour l'acquisition et la maintenance d'étalons et d'instruments de mesure de haute exactitude. Le centre d'intérêt est le plateau de référence circulaire, à palier à air, contrôlé numériquement. Son étalonnage et l'incertitude de mesure sont exposés en détail. Ensuite, divers autres étalons angulaires et instruments de mesures sont expliqués avec leurs méthodes de calibration. Finalement les possibilités de mesure de l'OFMET dans le domaine de la métrologie angulaire sont présentées.

Riassunto

Dopo aver presentato, nell'ultima edizione di OFMET *Info*, i principi della misurazione angolare, in questo secondo articolo è questione delle attrezzature e delle possibilità di misurazione esistenti all'OFMET. La costruzione di un nuovo laboratorio climatizzato era la condizione per l'acquisto e la gestione di campioni e strumenti di misurazione. Al centro è posto un tavolo di misurazione angolare azionato numericamente, adagiato su cuscinetti d'aria, di cui è dettagliatamente discussa la taratura e la precisione di misurazione. Al termine sono presentati campioni angolari e strumenti di misura e spiegato il relativo procedimento di taratura. Infine sono riassunte sotto forma di tabella le possibilità di misura dell'OFMET nel campo della misurazione angolare.

Summary

In the last issue of OFMET *Info* the basics of angular metrology were presented. Subject of this second contribution are the instrumentation and the measurement possibilities of OFMET. A new temperature controlled laboratory has been built which allow the installation and operation or maintenance of highly accurate standards or measurement instruments. Focus of interest is the numerically controlled air bearing rotary table, whose calibration and measurement accuracy are discussed in detail. Several further angular standards and measurement instruments and their appropriate calibration procedures are presented. Finally, the list of measurement possibilities of the OFMET in the field of angle measurements is given.