

Theodolite werden erst zu Messinstrumenten, wenn an ihren mechanischen Drehachsen Teilkreise angebracht sind. Die Teilkreise tragen Skalen aus Strichen, die in einer Ebene radial auf einem Kreis angeordnet sind, wobei der Umfang des Kreises in eine Anzahl gleicher Teile unterteilt ist. Anstelle der Striche können auch andere, dem Verwendungszweck der Skala entsprechende Marken verwendet werden. Damit entwirrt sich auch die Terminologie: Teilkreise sind Bauteile von Theodoliten, Kreisteilungen liefern die Messwerte. Im Gebrauch stehen die Unterteilungen des Kreisumfangs in 360, in 400 und in 6400 Teile, mit den Einheiten $^{\circ}$, gon und 0/00.

Heinz Aeschlimann

Besonderheiten von Kreisteilungen

Die Kreisteilung nimmt unter allen Einheiten in Physik und Technik eine Sonderstellung ein, da ihre Einheit nicht physikalisch, wie z.B. Meter, Sekunde oder Ampère, sondern mathematisch als Bruchteil des Umfangs eines Kreises, d.h. eines endlichen Messbereichs definiert ist. Kreisteilungen müssen somit nicht anhand eines physikalisch definierten Einheits-Normals geeicht werden.

Die Summe aller Teilungsintervalle schliesst den Kreisumfang lückenlos und – als wesentlichste Konsequenz – die Summe der Fehler aller Teilungsintervalle ist null, da andernfalls die aneinandergereihten fehlerhaften Intervalle den Kreis nicht lückenlos schliessen würden. Von den Intervallfehlern kann auf die Fehler der Teilstriche geschlossen werden. Dazu stelle man sich eine fehlerlose Teilung vor, die der vorliegenden fehlerhaften Teilung in einer Weise überlagert wird, dass die Summe der Fehler aller Striche ebenfalls null wird. Damit wird deutlich, dass grundsätzlich die Möglichkeit besteht, die Einflüsse von Fehlern einer Kreisteilung auf Messungen in aller Strenge zu beseitigen. Der Aufwand ist bei manueller Messung zwar unverhältnismässig gross, aber die grundsätzliche Möglichkeit ist bemerkenswert. Die Messungen müssen nur mit allen Teilstrichen wiederholt und gemittelt werden. Da die Messstellen am Teilkreis im allgemeinen nicht auf die einzelnen Teilstriche fallen, wird ein messtechnisches Hilfsmittel vorausgesetzt, das Bruchteile einer Teilungseinheit fehlerlos zu messen gestattet. Damit kann eine nicht genau auf einen Strich der Teilung fallende Messstelle auf den in Zählrichtung der Teilstriche vorangehenden Strich bezogen werden. Derartige Hilfsmittel sind bekanntermassen elektronische oder optische Mikrometer.

Wird beispielsweise ein Winkel wiederholt mit jeweils verdrehtem Teilkreis gemessen, so dass jeder Schenkel einmal in jedes

Teilungsintervall fällt, so werden an jedem Schenkel mit dem Mikrometer einmal die Abweichungen des Messwertes von einem ganzen Intervall, aber auch die Fehler des in Zählrichtung der Intervalle vorangehenden Teilstriches gemessen. Da die Summe der Fehler aller Teilstriche null ist, so ist die Summe der Ablesungen an jedem Schenkel, und damit auch das Mittel, frei von Teilungsfehlern. Auf dieser Überlegung beruhen die von Sercel, Nantes, entwickelten und von Leica, Heerbrugg, in den Theodoliten der Reihen T2000 und T3000 eingebauten elektronischen Systeme zur Generierung der Messwerte.

Methoden und Maschinen für Kreisteilungen

1565 Drehbank-Teilscheibe. Mathematisch-Physikalischer Salon, Dresden.

1667 Richard Townley. Erste bekannte Teilmaschine.

1724 J. Leupold. Zahnrad-Fräsmaschine für Uhräder.

1758 Georg Friedrich Brander (1713-1783). Kreisteilmaschine.

1767 John Bird (1709-1776). Herstellung der Teilung eines Mauerquadranten, Radius einige Fuss. Teilungsmethode: Stangenzirkel zur Konstruktion von Winkeln kombiniert mit trigonometrischer Berechnung von Sehnen.

1775 Jesse Ramsden (1735-1800). Teilmaschine zum direkten Teilen in Intervalle von 1". Nach eigenen Angaben von Ramsden war die Maschine instabil (in: Description of an engine for dividing mathematical instruments, London 1777).

1800 Georg Reichenbach (1771-1825). Zahnrad mit Schneckengetriebe. Deutsches Museum München.

1823 Ulrich Schenk, Worblaufen, bietet seine Teilmaschine der Sternwarte Bern zum Kauf an. Schenk absolvierte, wie später auch Jakob Kern, bei Reichenbach in München eine Lehre, wo er sich offenbar auch das Prinzip der Reichenbachschen Teilmaschine merkte. Wegen Aufgabe der Herstellung von Theodoliten zu Gunsten von Feuerspritzen verkaufte er damals sein Werkstattinventar.

1889 Gustav Heyde, Dresden, später VEB Feinmess Dresden (DDR). Globoid-Schnecke mit simultanem Eingriff an verschiedenen Zähnen. Gegenwärtige Aktivität nicht bekannt.

Eine alte Methode zur Herstellung von Kreisteilungen beruht auf der Konstruktion von Winkeln mit Zirkel und Lineal kombiniert mit trigonometrischen Berechnungen. Mit Hilfe eines Zirkels wird der Radius auf einem Massstab abgemessen und auf dem Teilungsträger der Winkel von 60° konstruiert. Durch Halbieren entstehen Winkel von 30° und 15° . Die weitere Unterteilung erfolgt durch Abtragen von trigonometrisch berechneten Sehnen, die auf demselben Massstab abgemessen werden, wie der Teilungsradius zu Beginn des Verfahrens.

Schneckengetriebe sind seit etwa 200 Jahren bekannt als genaue Hilfsmittel für die Erzeugung eines Teilungsintervalls. Eine Umdrehung der Schnecke bewegt einen eingreifenden Zahn um eine Ganghöhe weiter. Durch Verändern der Eingriffstiefe der Zähne eines Zahnrades in der Schnecke kann in gewissen Grenzen der Vorschub so abgestimmt werden, dass eine ganze Anzahl Umdrehungen der Schnecke genau eine Umdrehung des Zahnrades ergibt. Ergeben 360 Umdrehungen der Schnecke genau eine Umdrehung des Zahnrades, so ergibt eine Umdrehung der Schnecke 1° . Dazu muss das Zahnrad 360 Zähne aufweisen. Ein Zahnrad von 1080 Zähnen ergibt bei jeder Drehung der Schnecke ein Intervall von $20'$. Die Teilstriche sind unabhängig von der Spindel, da sie für jeden Strich die gleiche Lage einnimmt. Für 400gon-Maschinen geht man von 1000 Zähnen aus, damit erfordern 20° -Intervalle halbe Drehungen der Schnecke. Durch geeigneten Antrieb der Schnecke lassen sich jedoch auf jeder Maschine alle Teilungsintervalle erzeugen.

Fehler in der Verzahnung des Zahnrades werden in der Kreisteilung getreulich wiedergegeben. Obwohl eine anhand von Probemessungen dimensionierte Korrekturvorrichtung die Verzahnungsfehler grösstenteils eliminiert, sind doch möglichst kleine Verzahnungsfehler sehr erstrebenswert. Bei Kern wurde die Verzahnung der selbst konstruierten und gebauten Teilmaschinen anhand eines vorhandenen Teilkreises mit einer eigens dafür hergestellten Vorrichtung gefräst. Nachdem die Korrekturvorrichtung der ersten Maschine in Betrieb genommen werden konnte, lieferte die Maschine genauere Kreisteilungen als jene des zum Fräsen benutzten Originals. Zum Fräsen des Zahnkranzes der nächsten Maschine wurde ein Teilkreis der vorangehenden Maschine verwendet, so dass in der Reihe der Maschinen die

Genauigkeit der Verzahnung fortlaufend zunahm. Die zuletzt gebauten Maschinen K und L lieferten ohne Korrekturvorrichtung ausgezeichnete Genauigkeiten.

Teilmaschinen mit Schneckengetriebe erzeugen jede Kreisteilung neu, was zu beträchtlichen Durchlaufzeiten führen kann. Kreisteilungen werden heute fotomechanisch und in Kombination mit Dünnschicht-Technik von einem Original kopiert. Diese Verfahren liefern eine Qualität des Striches bezüglich Randschärfe und Strichbreite ($< 0,001\text{mm}$), die mit dem Ziehen in eine Wachsschicht mittels Stichel, gefolgt von ätzen und Einfärben nicht erreicht werden kann. Die Herstellung der immer noch benötigten Originale bleibt wie eh und je ein gut gehütetes Geheimnis.

Die Teilmaschinen der Firma Kern und die Doppelkreise

Wann Jakob Kern die ersten Kreisteilungen selbst herstellte und ob er vorher fertige Teilkreise anderswo beschaffte ist zur Zeit nicht bekannt. Wenn nicht alles täuscht, ist jedoch seine erste Teilmaschine in der Sammlung Kern des Stadtmuseums Aarau vorhanden. Damit wurden Kreisteilungen durch manuelles Einstellen Strich für Strich von einer Originalteilung kopiert. Diese Teilmaschine wurde offenbar während Jahrzehnten verwendet. Jakob Kern hielt die Ergebnisse verschiedener Versuchsteilungen in einem noch erhaltenen und mit "Unsere Teilmaschine" betitelten Heft fest. Später wurden offenbar Teilmaschinen beschafft, die mit einem Schneckengetriebe arbeiteten. In frühen Zeiten wurden die Teilungsintervalle wohl manuell an der Schnecke eingestellt und die Striche ebenfalls manuell gezogen. Seit der Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert bis in die 30er Jahre waren automatisch arbeitende Heyde-Maschinen im Gebrauch.

Etwa 1935 begann die Zusammenarbeit von Heinrich Wild (1877-1951) mit Kern für die Entwicklung seiner neuen Theodolitreihe mit Doppelkreisen. Für Kern war diese Zusammenarbeit ein Glücksfall, da Theodolite mit den bis anhin hergestellten Teilkreisen aus Metall völlig überholt waren. Die vorhandenen Heyde-Maschinen konnten offenbar für die Teilung von Glaskreisen umgebaut werden. Doch wer Wild damals gekannt hatte, musste gewärtigen – zum Wohle des Ganzen – dass er früher oder später die Mängel der damaligen Heyde-Maschinen durch eine eigene Konstruktion beheben wollte. Er bemängelte hauptsächlich die vertikale Lagerung der Achse des Zahnrades. Nach dem Stand der Mechanik in den 40er Jahren lag hier eine Verbesserung der Führungsgenauigkeit kaum in Reichweite. Wegen Durchmesserdifferenzen und Unrundheiten des geführten und des führenden Teils torkelt der auf dem Achszapfen aufgespannte Teilkreis gegenüber dem feststehenden Stichel in einem gewissen Bereich, allerdings nicht ganz zufällig, herum.

Um den Einfluss wegen Durchmesserdifferenzen zu eliminieren, legte Wild die Achse des Zahnrades waagrecht und führte die beidseitig angebrachten Zylinderzapfen in je einem Y-förmigen Lager. Damit war eine spielfreie Auflage garantiert. Zu beseitigen blieb indessen noch der Einfluss einer Abweichung der Zylinderzapfen von einem exakt kreisförmigen Querschnitt. Dazu vergegenwärtige man sich, dass die Abweichungen von einem kreisförmigen Querschnitt damals wohl gegen 10^{-3}mm betragen konnte. Bei einem Kreisradius von 50mm (DKM3) verursacht eine Unrundheit von 10^{-3}mm durch Herumtorkeln des Teilkreises im ungünstigsten Fall einen Winkelfehler von 13° . Der Einfluss des Torkelfehlers kann während des Teilvorganges nicht direkt unterdrückt, jedoch für die spätere Elimination in Theodolit berücksichtigt werden. Dazu ziehen zwei diametral angeordnete Stichel gleichzeitig je einen Strich. Zur Begründung folgende Überlegung: Der den Rohling des Teilkreises tragende Achszapfen sei nicht ideal kreiszylindrisch, er liege im Y-Lager beispielsweise auf einem Buckel auf. Der Achszapfen, und damit auch der zu teilende Teilkreis, wird dadurch leicht auf eine Seite gedrückt. Beide Stichel ziehen somit gleichzeitig je einen um denselben Betrag auf die gleiche Seite verschobenen Strich. Im Sinne der Bezifferung der Teilstriche wird einer der Striche beispielsweise in Richtung grösserer, der diametral gegenüberliegende hingegen um denselben

Betrag in Richtung kleinerer Messwerte verschoben. Nach dem Einbau des Teilkreises im Theodolit werden durch die Abbildung diametraler Kreisstellen zwei Ausschnitte der Teilung aufeinander abgebildet, die je einen um den gleichen Betrag zu grossen oder zu kleinen Messwert ergeben. Das Mittel ist somit frei vom Einfluss des erwähnten Buckels. Die genauen Verhältnisse sind verwickelter, einerseits weil die Radien der Kreisteilungen nicht gleich sind, andererseits weil das grosse Zahnrad nicht parallel zur Ausgangslage über Buckel und Vertiefungen hinweggleitet.

Die diametralen Stichel sind in leicht verschiedenen Abständen vom Achszapfen angebracht. Die nach einem Durchgang entstandenen konzentrischen zwei Kreise wurden Doppelkreise genannt, was in der Bezeichnung der Theodolite durch das führende DK hervorgehoben wurde. Mit Doppelkreisen konnten ausserdem bestimmte Ablesekriterien verwirklicht werden, die im Zeitalter der optischen Theodolite nicht ohne Bedeutung waren, so etwa die Einstellung einer einfachen Teilung in die Mitte von Doppelstrichen der andern Teilung.

Epilog

1946 wurde die Teilmaschine B gebaut, die älteste in der Sammlung Kern vorhandene Teilmaschine dieses Typs. Insgesamt liefen sechs derartige, bis auf den Antrieb baugleiche Maschinen. Sie lieferten hervorragende Genauigkeiten. Mit diesen Maschinen wurden bis etwa 1980 die Kreisteilungen der gesamten Produktion mit Stichel in Wachs gezogen. Später brauchte man sie noch für die Produktion der Teilkreise der auslaufenden optisch-mechanischen Theodolite. Die zu diesem Zeitpunkt eingeführten elektronischen Theodolite E2 und E1 verfügten über kopierte Kreise eines auswärtigen Lieferanten.

Die Konstruktion der Maschinen lag zuerst in den Händen von Rudolf Haller, der seit 1935 die technische Seite der Zusammenarbeit mit Heinrich Wild wahrnahm. Wegen anderweitiger Auslastung übergab er die Weiterarbeit an Fritz Hinden. Beide wirkten später nacheinander als Chefkonstrukteure. In der frühen 70er Jahren betreute Hans Koch, der Konstrukteur des DKM2-A und des E2, den Bau der letzten Maschinen.

Als Verfasser des vorliegenden Berichtes bleibt mir noch Rudolf Haller und Bruno Erb für ihre Erklärungen und Erläuterungen zu danken. Ohne sie wäre ich verloren gewesen. Bruno Erb hat von 1965-1973 als Operateur mit den sechs vorhandenen Maschinen die Teilkreise für alle bei Kern produzierten Theodolite und Nivelliere hergestellt. Es waren im Jahr um die 8000 Kreise.

Dr. Heinz Aeschlimann
Adelbändli 11
CH-5000 Aarau

Vollständige Version siehe VPK 4/2001
Bestellung VPK: verlag@geomatik.ch