



Band 30

Dortmund 2002

FÖRDERKREIS VERMESSUNGSTECHNISCHES MUSEUM E.V.

Meßgeräte des Altertums

Nachbau • Experimente • Genauigkeit



Konrad Peters

**SCHRIFTENREIHE DES FÖRDERKREISES
VERMESSUNGSTECHNISCHES MUSEUM E.V.**

Band 30

Konrad Peters

Meßgeräte des Altertums

Nachbau ■ Experimente ■ Genauigkeit

Dortmund 2002

Herausgegeben vom
Förderkreis Vermessungstechnisches Museum e.V.
Postfach 10 12 33, D-44012 Dortmund

© 2002

ISBN 3-00-009889-5

Anschrift des Verfassers:
Dipl.-Ing. Konrad Peters, Wiegandweg 63, D-48167 Münster

0257-614823

I n h a l t	Seite
Zum Geleit	5
Einführung	6
1. Die Meßgeräte	8
1.0. Einfache Geräte	9
1.1. Geräte für die Absteckung von Rechtwinkeln	13
1.2. Herons Universalgerät Dioptra	26
1.3. Nivelliergeräte	29
1.4. Stabmeßgeräte	38
1.5. Das Geometrische Quadrat	41
1.6. Zielvorrichtungen an Meßgeräten	44
2. Meß- und Absteckverfahren	45
2.0. Fluchten von Linien	46
2.1. Rechtwinklabsteckung	47
2.2. Einsatz der Groma bei der Limitation	50
2.3. Direkte und indirekte Längenmessung	52
2.4. Meßverfahren mit Stabmeßgeräten	55
2.5. Absteckungen mit großen Lehren (Schablonen) und schweren Loten	59
2.6. Nivellements	65
2.7. Höhenmessung mit stehendem Wasser	67
2.8. Staffelmessung am Steilhang	68
3. Genauigkeit	69
3.0. Zur Meßgenauigkeit	70
3.1. Untersuchungen zur Winkelmessung	72
3.2. Untersuchungen zu den Stabmeßgeräten	76
3.3. Zur Genauigkeit des Geometrischen Quadrats	79
3.4. Zur Genauigkeit von Chorobat, Setzwaagen-Nivellier und Staffelmessgerät	81
4. Zusammenfassung	84
5. Literatur und Anmerkungen	86

Zum Geleit

Meßgeräte des Altertums – gibt es nicht schon genug interessante Veröffentlichungen über die Geschichte der Vermessungsgeräte in den alten Kulturen?

Kein Bauwerk ohne Vermessung, das weiß man. Aber mit welchen Verfahren wurde damals gemessen, und welche Genauigkeiten waren mit den alten Geräten möglich? In der einschlägigen Fachliteratur gibt es dazu nur wenige Hinweise.

Konrad Peters hat mit handwerklichem Geschick und in Kenntnis der überlieferten Quellen die alten Meßgeräte nachgebaut und damit experimentiert. Mit dieser Studie legt er nun die Ergebnisse seiner langjährigen, praxisorientierten Forschungen vor. Dafür danken ihm Vorstand und Kuratorium des Förderkreises.

Mit der reich illustrierten Veröffentlichung, die die experimentelle Forschung von Dipl.-Ing. Peters zusammenfaßt, wird eine Lücke in der Fachliteratur geschlossen; damit verbindet sich auch die Empfehlung, bei künftigen Forschungen das Experiment stärker einzusetzen.

FÖRDERKREIS VERMESSUNGSTECHNISCHES MUSEUM E.V.

Bremen, Dortmund, Hannover, im März 2002

Prof. Dr.-Ing. Harald Lucht
Präsident

Dipl.-Ing. Norbert Kalischewski
Erster Vorsitzender

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Torge
Vorsitzender des Kuratoriums

Einführung

Um die Erde darzustellen und zu erforschen, waren immer schon Maße, Geräte und Meßverfahren erforderlich. Ihre Geschichte läßt sich etwa 6000 Jahre zurückverfolgen. In den alten Kulturen war die Meßkunst hoch entwickelt. Nachmessungen an antiken Großbauten und deren Auswertung bezeugen, daß Baumeister und Landmesser in der Lage waren, mit großer Genauigkeit zu messen und abzustecken.

Mit welchen Geräten wurde das erreicht? Eine Antwort ist nicht einfach, da von den vielen im Altertum eingesetzten Geräten nur wenige archäologische Fundstücke vorliegen. Der Hauptgrund hierfür ist das beim Bau der Geräte meist benutzte Holz, das den „Zahn der Zeit“ nicht überstand.

Die Geräte müssen nachgebaut werden, will man sie untersuchen und mit ihnen messen. Dies ist zeitaufwendig und schwierig, jedoch unter Berücksichtigung der Gesamtüberlieferung möglich.

Das sind die Quellen:

- Kurze Angaben und Hinweise von Historikern, Schriftstellern und Technikern in der antiken Literatur.
- Die Bücher Herons [1] und Vitruvs [2].
Dies sind die einzigen Schriften, die Meß- und Baukunst des Altertums umfassend überliefern. Entsprechend ist ihre Bedeutung für die Forschung. Das gilt besonders für die Bücher „Dioptra“ und „Metrica“ des Mechanikers Heron aus Alexandria.
- Die Schriften der römischen Feldmesser.
Sie bilden eine wertvolle Quelle für die Geschichte der Limitation und Bodenordnung. Das „Corpus Agrimensorum“ ist eine Sammlung der Schriften aus der Zeit um 450 n. Chr. [7].
- Gerätedarstellungen auf Bildern, Steinen und Grabstelen.
Von Malern und Steinmetzen ausgeführt, sind sie keine genauen, sondern mehr künstlerische Wiedergaben.
- Teilfunde aus Metall, wie Lote, Meßblattenschuhe, Fluchtstabspitzen, das Eisenkreuz aus Pfinz, Bauteile der Pompeji-Groma und der Stativkopf aus Aquincum sowie die Funde aus Koblenz und Ennemain.
- Antike Bauwerke.
Durch Neuvermessung werden sie zur überlieferten Geometrie in Stein. Meßdaten ermöglichen ihre Rekonstruktion und Genauigkeitsuntersuchungen. Die Genauigkeit ist der Maßstab für das Können der Baumeister und die Qualität der eingesetzten Geräte.
- Die „Araber“ sind die Bewahrer der alten Meßkunst.
Ihre Schriften, in der Frührenaissance bereits vielfach übersetzt, enthalten bedeutende Angaben über Geräte und Meßverfahren.

- In der Renaissancezeit wird sichtbar, was 2000 Jahre vorher im griechischen Ionien sowie in Alexandria erforscht und erkannt wurde. Ein vergleichendes Studium für die Meßkunst zeigt, daß zwischen vielen Geräten der Antike und denen der Renaissance Übereinstimmungen bestehen. Dadurch ist es möglich, aus dem Altertum nicht überlieferte Gerätedaten und -merkmale zu erkennen und für die Forschung und den Gerätenachbau zu nutzen.

Zur Meßkunst des Altertums gibt es noch keine praxisbezogene Gesamtdarstellung der Geräte und Meßverfahren. Veröffentlichungen hierzu sind im wesentlichen nur Beschreibungen und Darstellungen von Einzelgeräten unter dem Aspekt eines bestimmten Fachgebiets. Sie enthalten keine Angaben über Genauigkeit und Einsatz der Geräte. Das gilt auch für das besonders durch die Quellenangaben bedeutende Standardwerk von Schmidt [4]. Es fehlt das Experiment.

Um die Forschungslücke zu schließen, wurden die Geräte unter Berücksichtigung der Gesamtüberlieferungen und Anwendung der aus dem Altertum bekannten mathematischen Lehrsätze nachgebaut, und zwar mit einfachen Hilfsmitteln und Werkzeugen in Handarbeit. Als Baumaterial diente hauptsächlich Fichtenholz. Schon beim Nachbau fanden erste Prüf- und Testversuche mit den Geräten statt. So konnten Probleme festgestellt, Besonderheiten erkannt und beim weiteren Nachbau berücksichtigt werden. Dadurch war es möglich, sich in die Gedankengänge der alten Gerätebauer zu versetzen und dabei auf Konstruktionsprobleme zu stoßen, mit denen auch sie sich auseinanderzusetzen hatten [3].

Für die Messungen mit den Geräten war die Berufserfahrung als Vermessungsingenieur eine wichtige Voraussetzung. Die nachgebauten Geräte ließen ihre Funktionsfähigkeit und die mit ihnen zu erreichende Genauigkeit erkennen. Die Auswertung der überlieferten Schriften, in denen Herons „Dioptra“ die bedeutendste Quelle ist [1], war für die Darstellung der Meßverfahren und ihr Einsatz zur Lösung vermessungstechnischer Aufgaben wichtig.

Die im Literaturverzeichnis aufgeführten Schriften enthalten für den interessierten Leser wichtige Hinweise und weitere Literaturquellen. Sie bieten eine Vertiefung des Stoffes und geben Anregungen für künftige Forschungen.

1. Die Meßgeräte

„Da die Lehre von der Dioptra viele und unentbehrliche praktische Anwendungen bietet und viele über sie gehandelt haben, so halte ich es für nötig, das von meinen Vorgängern übergangene, das, wie gesagt, eine praktische Anwendung gestattet, der Darstellung zu würdigen, das schwierig Dargestellte in eine leicht faßliche Form zu bringen und das falsch Dargestellte zu verbessern. ... Ferner haben auch diejenigen, welche über den Gegenstand geschrieben haben, sich zur Ausführung der Operationen nicht eines und desselben Instruments, sondern vieler und immer wieder verschiedener bedient, und doch haben sie vermittelst derselben nur wenige Aufgaben gelöst. Wir nun haben gerade auf diesen Punkt besonderen Wert gelegt, so daß durch ein und dasselbe Instrument die uns vorliegenden Aufgaben gelöst werden.“

(Heron: 1. Abschn. der „Dioptra“)

„Da ich festgestellt habe, daß einzelne Baumeister über das Bauwesen Anweisungen und zusammenhanglose Abhandlungen nur in Anfängen oder losen Bruchstücken hinterlassen haben, hielt ich es für eine würdige und zweckdienliche Aufgabe, das gesamte Wissen eines so weit gespannten Tätigkeitsgebiets zusammenhängend zu ordnen und die kunstgerechten Regeln der Teilgebiete in einzelnen Büchern niederzulegen.“

(Vitruv: Vorrede 4. Buch)

Heron und Vitruv stand das praktische und theoretische Wissen ihrer Zeit zur Verfügung. Heute ist die Forschung neben ihren Schriften nur noch auf einige kurze Angaben im überlieferten Schriftgut und wenige Teilfunde von Geräten angewiesen. Darin liegt die Schwierigkeit für die Untersuchungen zu den Schriften von Heron und Vitruv sowie zur gesamten Meßkunst im Altertum.

1.0. Einfache Geräte

Das Lot

Die Geschichte der Meßgeräte beginnt mit dem Lot. Schon in der Frühzeit, noch vor dem Bau der Pyramiden, erkannten die Menschen, daß eine Schnur, an der ein schwerer Stein hängt, eine Senkrechte mit einer Ebene bildet. Mit fortschreitender Technik traten an Stelle des Steines Lote aus Blei, Bronze und Eisen. Sie zeigen unterschiedliche Formen, laufen jedoch allesamt nach unten spitz aus. Dadurch konnte das an der Schnur hängende Lot mit der Spitze auf einen Punkt einspielen. Es diente den Baumeistern dazu, die Senkrechte von Mauern, Säulen und Schächten zu bestimmen. Bei großen Höhen oder Tiefen kamen schwere Lote zum Einsatz. Die Landmesser nutzten das Schnurlot zum Fluchten einer Geraden, zum Abloten bei der Staffelmessung, als Bauteil von Geräten und bei der Groma (vier Lote) sogar als Visiervorrichtung (vgl. Bild 7). Zahlreiche Funde und Darstellungen von Loten sind aus fast allen alten Kulturkreisen überliefert (Bild 1).

Lotwaage und Setzwaage

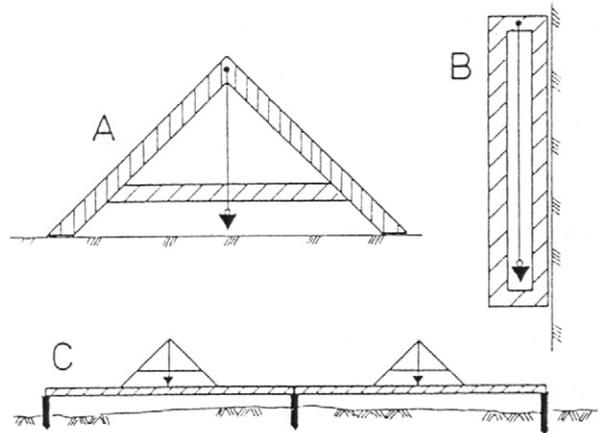
Mit der Lotwaage und der Setzwaage fertigten die Baumeister des Altertums die ersten Meßgeräte. Dabei diente die Lotwaage, bei der ein Lot in oder an einem Brett hängend (parallel zu dessen Außenkante justiert) angebracht ist, zur Herstellung oder Prüfung einer kurzen Senkrechten (Bild 2 B). Die Waagrechte wurde wohl zunächst durch eine mit Wasser gefüllte Rinne angegeben. Da diese „offene Wasserwaage“ sehr umständlich zu handhaben war, entwickelten die Baumeister die Setzwaage. Vielleicht erkannten sie im Experiment, daß ein an der Wasserrinne hängendes Lot mit dem stehenden Wasser einen Rechtwinkel bildet. Indem sie den Winkel auf ein Holzdreieck übertrugen, stellten sie die Setzwaage her. Später lehrte die einfache Geometrie, daß im gleichschenkligen Dreieck die Höhe die Grundlinie halbiert. Wird das Dreieck aus Holz gebaut und die Höhe durch ein Schnurlot ersetzt, das auf einer Kerbmarke in der Mitte der Grundseite einpendelt, steht das Holzdreieck in der Waage. Die Bauleute nannten das Dreieck Setzwaage, weil sie es zur Festlegung der Waagrechten auf den Baukörper setzten (Bild 2 A).

Über 5000 Jahre erfüllten beide Geräte die Funktion der heutigen Wasserwaage. Durch Aufsetzen der Setzwaage auf ein Richtscheit konnte eine Höhe auf eine längere Strecke übertragen werden (Bild 2 C).



Bild 1
Lot aus Aquincum (3. Jh.n.Chr.)
Museum Budapest (Foto Vagács)

Bild 2
A = Setzwaage, B = Lotwaage.
C = Richtscheit mit Setzwaage



Die Setzwaage als Werkzeug des Bauhandwerkers ist mehrfach auf Bildern, Grabsteinen und als Grabbeigaben (Amulette) überliefert. Als Bauteil von Nivelliergeräten werden Setzwaage und Wasserwaage jedoch nur in der Literatur erwähnt, z.B. bei Theodoros, Cato, Plinius, Heron und Vitruv [3], [32].

Längenmeßgeräte und Fluchtstäbe

Eine Strecke messen bedeutet feststellen, wie oft ein bekanntes Maß darin enthalten ist. Hierzu setzten Baumeister und Landmesser im Altertum Seil, Latte und Kette ein [4]. Das belegen archäologische Funde (Teilstücke), Bilder und schriftliche Überlieferungen. Die Quellenlage ist dürftig und enthält nur Detailangaben, die jedoch ausreichen, um die Geräte zu beschreiben und teilweise darzustellen.

Alle alten Kulturvölker - von den Ägyptern bis zu den Römern - hatten bereits ein Normalmaß (z.B. ägyptische Königselle und römischer Fuß) als Grundlage für die Längenübertragung auf Seil, Latte und Kette. Funde einiger Eichmaßstäbe sowie schriftliche Überlieferungen über die Prüfung der Geräte zeigen das Bemühen der Baumeister und Landmesser, die Meßqualität zu steigern. Heron schreibt im XX. Abschnitt der „Dioptra“ von einem Meßband, das vorher ausprobiert wurde, und im Abschnitt XXII von einer Meßkette oder einem geprüften Band [1].

Für die Längenmessung sind Meßseil und Meßlatte in allen alten Kulturkreisen nachgewiesen. Wann die nur von Heron benannte Meßkette erstmals in Gebrauch kam, ist nicht bekannt.



Bild 3
Harpedonapten (Seilspanner) mit dem Meßseil
bei der Feldmessung (um 1420 v. Chr.)
Aus: Wreszinski: Ägypt. Kulturgeschichte. Bd I.

Das Meßseil war bereits in Ägypten zur Zeit der Pyramidenbauer und im Zweistromland das Gerät für die Messung langer Strecken. Mehrere altägyptische Wandbilder zeigen Landmesser bei der Feldmessung mit dem Seil (Bild 3). Auf einigen Seilen ist die Längenteilung als Punkte dargestellt, die in der Forschung vielfach als „Knoten“ angesehen werden. Da ein geknotetes Seil kaum herzustellen und zu ungenau ist, konnte die Längenteilung nur aus feinen Strichen oder Marken bestehen [5]. Von den Ägyptern ist die Seillänge bis zu 100 Ellen und im Zweistromland bis zu 120 Ellen überliefert. In beiden Kulturkreisen kamen auch Meßplatten unterschiedlicher Längen aus Holz oder Rohr zum Einsatz [4].

Die eigentliche Meßlatte, der heutigen sehr ähnlich, ist erst bei den Griechen und Römern mehrfach nachgewiesen. Das aus Holz gefertigte römische Zehnfußmaß (decempeda) hatte an den Enden, wie einige Funde und Darstellungen belegen, Metallbeschläge (Bild 4). Neben der Zehnfußlatte sind weitere mit Längen von 12, 15 und 17 Fuß bekannt [4], [6], [7].

Für das Ausstecken, Durchfluchten und Verlängern von Linien sowie für Absteckvorgänge setzten Landmesser und Bauhandwerker mit Eisenspitzen versehene Rundhölzer (metae) ein. Sie sind in den Schriften der römischen Feldmesser erwähnt und entsprechen in etwa den heutigen Fluchtstäben [4], [7].

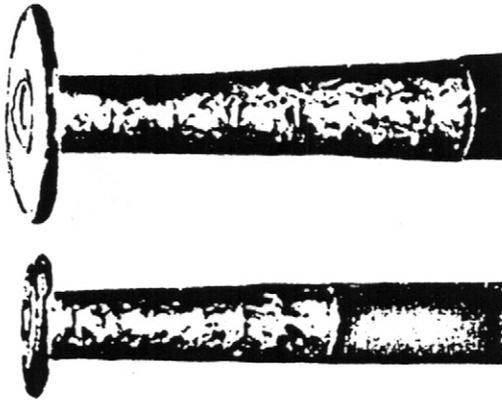
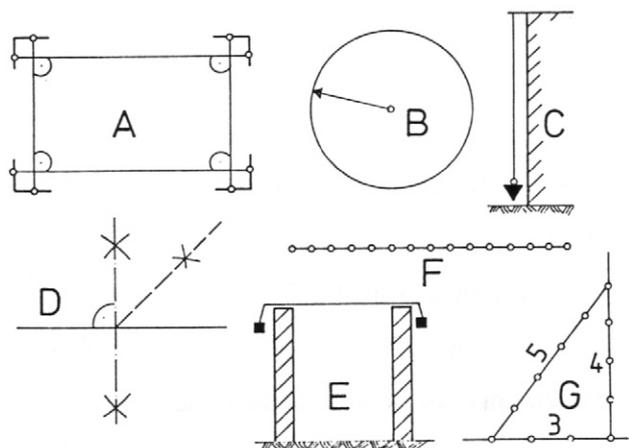


Bild 4
Römische Meßlattenschuhe,
aus [6]

Bild 5
Die Schnur, das Universal-
gerät der Baumeister



Die Schnur - das Universalgerät der Baumeister

Das Wort Lineal (= Gerät für das Zeichnen einer Geraden) leitet sich von dem lateinischen Begriff „linea“ (Schnur) ab. Die Schnur wurde als Längenmeßgerät sowie als Hilfsmittel für die Absteckung von Kreisbögen und Winkelkonstruktionen ferner für die Festlegung von Geraden und Senkrechten von Baumeistern und Landmessern eingesetzt. Die Schnur dient auch heute noch den Handwerkern für die Herstellung eines Schnurgerüsts; sie gibt ihnen als Waagerechte Höhe und Richtung für den Ziegeleinbau beim Hochziehen einer Mauer an.

Bild 5 zeigt den Einsatz der Schnur: A = Richten und Festlegen von Geraden auf einem Schnurgerüst beim Tempel- und Hausbau. B = Absteckung eines Kreises (z.B. beim Pantheon in Rom). C = Herstellung einer Senkrechten. D = Konstruktion eines Winkels von 90 und 45 Grad durch Bogenschlag. E = Festlegung einer Waagerechten zwischen zwei gleich hohen Bauteilen. F = Längenmeßgerät mit Teilung (Striche oder Meßmarken). G = Absteckung eines Rechtwinkels mit den Seitenverhältnissen 3, 4 und 5, dem sogenannten ägyptischen Dreieck [5], [22].

1.1. Geräte für die Absteckung von Rechtwinkeln

Die Absteckung und Aufnahme von Rechtwinkeln ist eine Grundaufgabe der Meßtechnik, für deren Durchführung noch bis ins zwanzigste Jahrhundert Kegelkreuzscheibe, Winkelkreuz und Winkeltrommel zum Einsatz kamen (Bild 6). Ihre Geschichte läßt sich über die Renaissancezeit bis zu den alten Hochkulturen zurückverfolgen. Die Kegelkreuzscheibe ist ein Gerät, das erst in der Mitte des 19. Jahrhunderts für die Durchführung besonders steiler Visuren (z.B. an Bahndämmen) entwickelt wurde, die mit dem Winkelkreuz wegen des Stockstativs nicht möglich waren. Mit der Groma entwickelten die römischen Landmesser bereits ein Gerät, das die Funktion von Winkelkreuz und Kegelkreuzscheibe erfüllte.

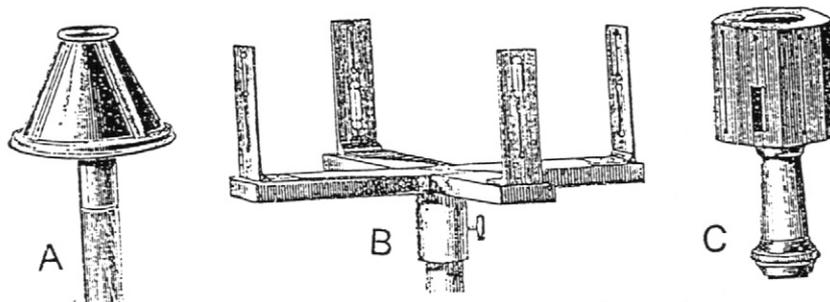


Bild 6
Geräte zur Rechtwinkelabsteckung: A = Kegelkreuzscheibe,
B = Winkelkreuz, C = Winkeltrommel (nach Jordan 1897)

Die Groma

Bei der Groma besteht die Visiervorrichtung im Unterschied zu den in Bild 6 dargestellten Geräten nicht aus feststehenden Dioptern, sondern aus Schnurloten, die allerdings keinen Visiervorgang bei mittiger Anbringung des Kreuzes auf einem Stockstativ zulassen. Die römischen Landmesser lösten das sich daraus ergebende Problem, indem sie das Kreuz auf einen seitlichen Träger setzten, der drehbar auf dem oberen Ende des Stativs angebracht war (Bild 7).

Die Groma war das Spezialgerät der römischen Landmesser für die Absteckung von Lagern und Städten sowie für die umfangreichen Limitationen (= Aufteilung des Nutzlandes durch Vermessung). Durch das exzentrisch angebrachte Winkelkreuz ließ sich das Gerät gut über einen Vermarkungsstein oder Meßpunkt aufstellen. Die Schnurlote ermöglichten die Absteckung von Rechtwinkeln in extrem steilem Gelände (Bild 11). Das Gerät war daher auch für die Absteckung von Brücken-, Aquädukt- und Tunneltrassen gut geeignet.

Die Entdeckungsgeschichte der Groma beginnt etwa um 1850 mit der Edition der Schriften der römischen Feldmesser, die allerdings keine Konstruktionsbeschreibung enthalten. Hier findet man im Zusammenhang mit den Geräten für die Rechtwinkelabsteckung neben der Groma noch die Bezeichnungen *stella* (Stern), *tetrans* (Kreuz), *norma* (Winkelmaß), *machina* (Maschine) und *ferramentum* (eisernes Werkzeug) [7]. Die unterschiedlichen Begriffe weisen darauf hin, daß es die Groma und das einfache Winkelkreuz in verschiedenen Ausführungen gab. Erst die bildliche Darstellung auf einem Grabstein (Museum Ivrea, Bild 8) und Fragmentfunde einer Groma bei Ausgrabungen in Pompeji (1912) ermöglichten die einwandfreie Rekonstruktion dieses Geräts (Bild 7) durch Della Corte [8].

Die Groma besteht aus einem Stockstativ mit eisernem Schuh, einem seitlichen Träger und dem eigentlichen Winkelkreuz mit Loten. Das hölzerne Stockstativ mit dem oberen Durchmesser von 4,2 cm endet in einer 25,3 cm hohen Bronzehülse, die aus mehreren horizontalen Ringen besteht. Aus der Bronzehülse ragt ein Drehzapfen von 6,8 cm Länge und 2,3 cm Dicke heraus. Das unten etwas stärker ausgebildete Stockstativ ist in einem aus Bronze und Eisen hergestellten Schuh befestigt, der in einer 26 cm langen Eisenspitze endet. Vier bis zu 5,75 cm breite Flügel geben der Eisenspitze einen festen Halt beim Eintreten in den Erdboden.

Auf den Drehzapfen des Stativs wird der seitliche Träger von 24,1 cm Länge aufgesetzt. Er ist aus Holz gefertigt und oben wie unten mit einer Blechleiste verstärkt. An einem Ende des Trägers befindet sich eine Bronzehülse und am anderen, etwas höheren Ende ein zylindrischer Bronzekörper. Die Bronzehülse greift über den Drehzapfen des Stativs. Dadurch kann der Träger seitlich geschwenkt werden. Der Bronzekörper trägt oben einen starken Zapfen, der das Winkelkreuz aufnimmt. Die Länge des seitlichen Trägers ist so groß, daß das Gerät neben allen vorkommenden Grenzsteinen aufgestellt werden konnte.

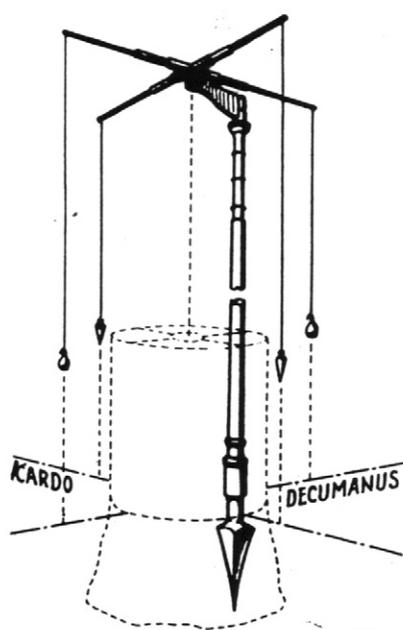


Bild 7
Die Groma aus Pompeji
(1. Jh. n. Chr.)



Bild 8
Grabstein (1. Jh. n. Chr.)
Museum Ivrea

Das hölzerne Winkelkreuz wird beim Einsatz des Geräts auf den Drehzapfen des seitlichen Trägers aufgesetzt. Die vier Arme des Kreuzes sind je 46 cm lang und mit verlötetem Eisenblech verkleidet. Im Drehpunkt des Kreuzes ist eine Bronzehülse zur Führung des Kreuzes um den Zapfen des seitlichen Trägers eingelassen. Von den vier Kreuzarmen hängen zwei spitze und zwei als Enten ausgebildete Lote herab. Die unterschiedlichen Lotformen belegen, daß den Landmessern die Absteckung in zwei Lagen zur Ausschaltung des Gerätefehlers bekannt war.

Einige bedeutende Angaben für die Gromaforschung finden sich bei Heron (Abschn. XXXIII der „Dioptra“). Nach seiner Meinung kann mit der Groma, die er mit Stern bezeichnet, nicht genau gemessen werden.

„Da nun manche den sogenannten „Stern“ (Groma) zu einer freilich ganz geringen Zahl dioptrischer Anwendungen gebrauchen, so halten wir für angemessen für diejenigen, welche dieses Instrument zu gebrauchen versuchen wollen, die Folgen seiner Verwendung darzulegen, damit sie nicht, ohne es selbst zu merken, infolge ihrer Unkenntnis Fehler begehen. Diejenigen nun, welche das Instrument schon angewendet haben, denke ich, haben die schlechte Verwendbarkeit erprobt, insofern die Fäden, an denen die Gewichte (Lote) hängen, nicht schnell zur Ruhe kommen, sondern eine gewisse Zeit in Bewegung bleiben, und zwar hauptsächlich, wenn starker Wind weht. Daher versuchen manche in dem Wunsche, diesem Übelstande abzuhelfen, hölzerne Hohlzylinder herzustellen und die Gewichte in diese hineinhängen zu lassen, so daß sie nicht vom Winde getroffen werden. Wenn nun dabei eine Reibung zwischen den Gewichten und den Zylindern entsteht, so bleiben die Fäden nicht in einer zum Horizonte genau senkrechten Stellung. Aber selbst wenn es ihnen gelingt, so daß die Fäden zur Ruhe kommen und in einer zum Horizonte senkrechten Stellung bleiben, stehen doch nicht in jedem Fall die durch die Fäden gelegten Ebenen aufeinander senkrecht“.

Bei der Aufstellung der Groma wurde festgestellt, daß für die Ruhestellung Lote mit größerem Gewicht von Vorteil waren. Schon bei wenig Wind gab es leichte Lotschwankungen, und dies erschwerte einen genauen Zielvorgang. Durch den Einsatz von Wasserbehältern wurde die Ruhestellung der Lote besser erreicht.

Wegen der Kritik Herons an der Groma wird in der Forschung mehrfach die Auffassung vertreten, daß die Groma von der Dioptra abgelöst wurde. Cantor schreibt z.B. in der Geschichte der Mathematik: „Es war der Stern (Groma), welcher zu Herons Zeit bereits durch die Dioptra überholt noch immer bei Einzelnen in Gebrauch war“ [34]. Cantor hat recht, wenn er feststellt, daß die Groma von der Dioptra technisch übertroffen wurde. Aber er irrt, wenn er folgert, daß die Groma nur noch bei „Einzelnen“ in Gebrauch war. Im Gegensatz zur Dioptra war die Groma nachweisbar über Jahrhunderte das Gerät der römischen Landmesser.

Die komplizierte Bauweise der Groma und der Untergang des römischen Weltreichs (Wegfall der Limitationen) sind wahrscheinlich die Ursache dafür, daß sie weder in der Renaissance- noch in deren Folgezeit nachzuweisen ist [8], [9], [10].

Darstellung der Groma auf einem Grabstein in Ivrea (1853 entdeckt)

Der aus dem 1. Jh.n.Chr. stammende Grabstein des Landmessers L. Aebutius Faustus ist im Museo Civico der Stadt Ivrea (Norditalien) ausgestellt (Bild 8). Er zeigt das in Stein eingemeißelte Bild einer Groma. Die Inschrift weist ihn als Grabdenkmal eines Landmessers aus. Den größten Teil des Steines nimmt die Darstellung der Groma ein: ein Winkelkreuz mit zwei spitzen Loten und ein Stockstativ. Das Winkelkreuz ist in der Aufsicht ohne den seitlichen Träger dargestellt [9]. Auffällig ist, daß nur zwei Lote zu sehen sind. Die beiden Arme des Kreuzes schneiden sich nicht im rechten Winkel. Für die technisch falsche Ausführung können, ebenso wie für die Nichtdarstellung des Trägers, ein Fehler oder die „künstlerische Freiheit“ des Steinmetzes die Ursache sein. Das Stativ besteht aus einem Stab, der an der Spitze einen Wulst mit Zapfen aufweist. Unten endet der Stab in einem Fuß, der etwa die dreifache Breite des Stativs hat und in Spitzen ausläuft. Die Abmessungen der Groma geben keinen sicheren Hinweis auf die Größe des Geräts. Das Winkelkreuz zeigt mit dem später in Pompeji entdeckten Gerät wesentliche Übereinstimmungen. Sie stützen damit die Zuordnung der beiden Geräte als Groma.

Das einfache Winkelkreuz

In den alten Hochkulturen und noch im 19. Jahrhundert war das einfache Winkelkreuz das am häufigsten benutzte Gerät für die Rechtwinkelabsteckung. Es besteht aus einem Stockstativ, auf dem drehbar ein Winkelkreuz mit stehenden Dioptern ruht (Bilder 6, 9 und 10). Meist aus Holz gefertigt, war es leicht herzustellen und besonders gut für Rechtwinkelabsteckungen im flachen Gelände geeignet. Weil als Material Holz verwendet wurde, ist kein komplettes Gerät bei Ausgrabungen entdeckt worden. Daher ist das einfache Winkelkreuz in der Altertumforschung „nicht existent“.

Erst im Experiment wurde erkannt, daß es sich bei der Gerätedarstellung auf einer in Pompeji gefundenen Grabstele (Bild 10) sowie bei den eisernen Teilstücken aus Pfünz und Budapest nicht wie bisher angenommen um die Groma, sondern um einfache Winkelkreuze handelt. Die Funde gestatten keine einwandfreie Rekonstruktion eines bestimmten Geräts. Sie beweisen jedoch, daß es das einfache Winkelkreuz in unterschiedlichen Ausführungen und auch als Sonderkonstruktionen (z.B. für militärische Zwecke) gab.

Auch die Entwicklung eines Spezialgeräts wie die Groma setzt in der Regel einfache, ähnliche und bereits erprobte Geräte voraus. Für die Groma ist dies das einfache Winkelkreuz. Ein Indiz dafür, daß es schon vor der Groma bekannt war und in älteren Kulturkreisen (Griechen und Etrusker) als ein Gerät für die Rechtwinklabsteckung in ebenem Gelände zum Einsatz kam.

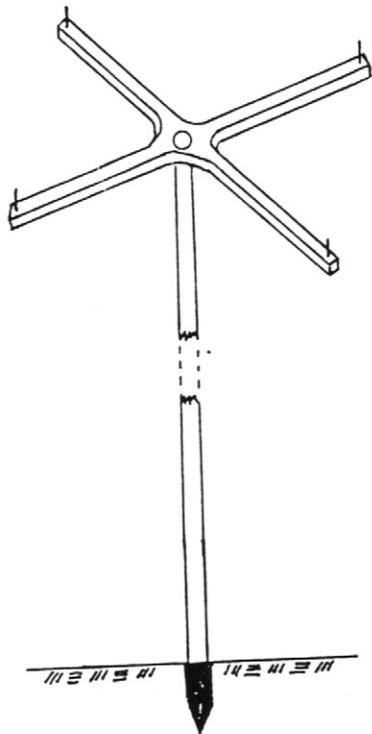


Bild 9
Rekonstruktion eines
Winkelkreuzes

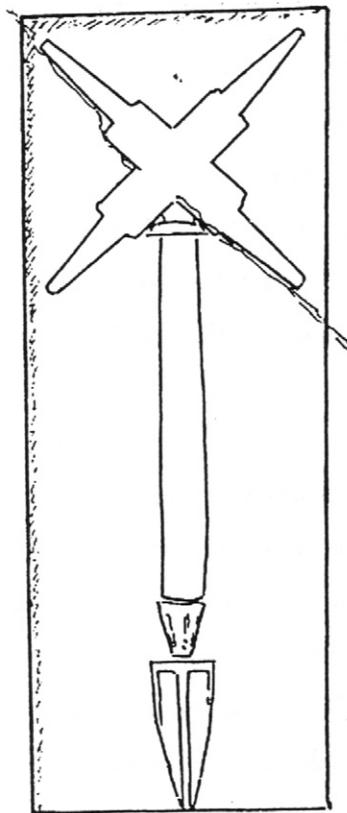


Bild 10
Grabstele in Pompeji
(Zeichnung Thiel)

Das Winkelkreuz auf einem Grabstein in Pompeji

Bei Grabungen in der Nekropole vor der Porta Nocera entdeckten Archäologen 1955 das Grabrelief des Landmessers Nicostratos [38]. Datiert zwischen 0 und 20 n.Chr. ist es im Granei del Foro (Inv. 11737, Pompeji) gelagert. Auf der Vorderseite des zeitlich späten und daher wenig bekannten Fundes ist ein Gerät eingemeißelt, das die Ausgräber als Groma auswiesen (Bild 10). Das Relief zeigt mit Schuh, Stabstativ und Kreuz ein einfaches Winkelkreuz. Die für eine Groma typischen Bauteile – seitlicher Träger und Lote – fehlen. Das Winkelkreuz stimmt mit den Darstellungen auf den Bildern 7 und 8 im wesentlichen überein. Dies könnte die Ursache sein, daß die Ausgräber das Gerät als Groma identifizierten. Warum der Steinmetz die beiden Bauteile nicht darstellte, falls er den Auftrag hatte, auf dem Grabstein eine Groma einzumeißeln, läßt sich nicht begründen. Vielleicht stellte er in „künstlerischer Freiheit“ unbewußt ein einfaches Winkelkreuz dar.

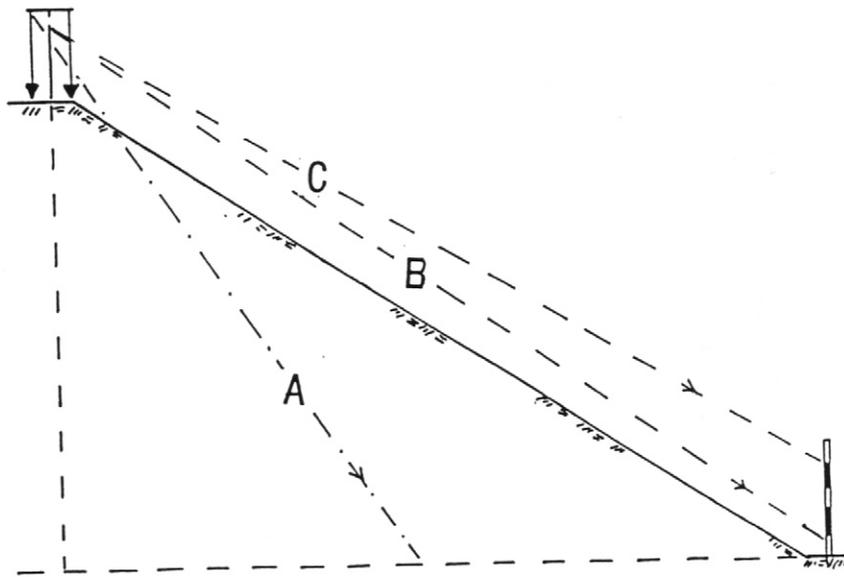


Bild 11
Rechtwinkelabsteckung am Steilhang: A = Groma,
B = Kegelkreuzscheibe, C = Winkelkopf

Das Eisenkreuz aus Pfünz

Bei Grabungen im römischen Kastell „Vetonia“, unweit des Ortes Pfünz im Altmühltal, entdeckten Archäologen 1885 ein rechtwinkliges Eisenkreuz mit einem kurzen Stockstativ [10]. Das Gerät steht unter der Bezeichnung „Groma“ im Museum auf der Willibaldsburg in Eichstätt (Bilder 12 und 13). Experimente belegen, daß es von der Konstruktion und Funktionsfähigkeit her keine Groma darstellt [11]. Es könnte ein einfaches Winkelkreuz sein, das mit der Stativspitze - die Form läßt nur diesen Schluß zu - in einen Holzpfehl geschlagen wurde, der den Mittelpunkt sich rechtwinklig kreuzender Hauptachsen eines Kastells bildete. Bei der Ausgrabung wurden keine Lote entdeckt und auch für die Nägel in den Kreuzarmenden gibt es keinen sicheren Nachweis, daß sie sich im Gerät befanden. Auch diese Indizien sprechen gegen eine Zuordnung des Geräts als Groma.

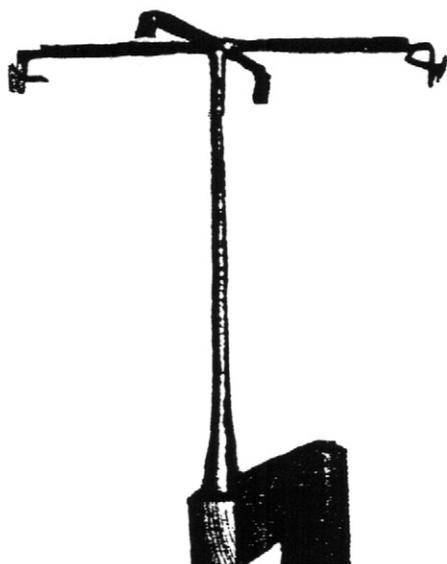
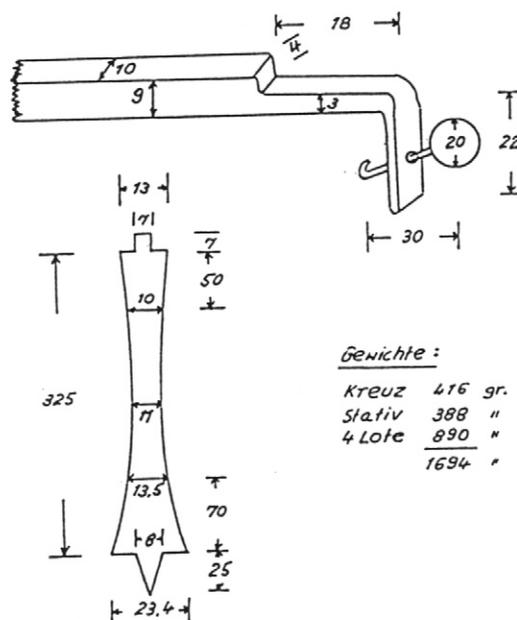


Bild 13
Gerät aus Pfünz. Maße in mm

Bild 12
Das Eisenkreuz aus Pfünz
(1.Jh.n.Chr.), aus [10]



Es ist nicht sicher nachzuweisen, ob das Winkelkreuz mit nach unten oder nach oben gebogenen Armenden auf dem Eisenstativ ruhte [11]. Im ersten Fall müßte es mit einer Visiervorrichtung aus Holz versehen sein, die mit Nägeln an den Kreuzarmenden befestigt war. Im zweiten Fall könnte ein zusätzliches Holzkreuz, das mit Nägeln im Eisenkreuz gehalten wurde, Träger der Visiervorrichtung sein. Als dritte Variante bilden die Löcher in den nach oben gebogenen Kreuzarmenden die Visiervorrichtung. Für die drei Konstruktionen wurde die Funktionsfähigkeit im Experiment nachgewiesen. Dabei wurde erkannt, daß die dritte Variante die technisch sinnvollste und praktikabelste Lösung darstellt (vgl. Bild 74 D).

In den Schriften der römischen Feldmesser gibt es zwei Hinweise, die die Zuordnung des Geräts als einfaches Winkelkreuz stützen [7]. Erster Hinweis: Für die Geräte zur Rechtwinkelabsteckung ist auch das Wort „ferramentum“ (eisernes Gerät) aufgeführt. Es bezeichnet treffend das Eisenkreuz aus Pfünz. Zweiter Hinweis: Der Landmesser Hygin ersetzt den üblichen Vermarkungsstein durch einen Holzpfeiler, der den Mittelpunkt eines Lagers bildet. Im Gegensatz zur komplizierten Pompeji-Groma ist das kleine und einfache Eisengerät aus Pfünz leicht zu fertigen und zu transportieren. Diese Fakten und der Fundort Pfünz lassen vermuten, daß es zur Ausrüstung einer Legion gehörte, die im bewaldeten Germanien eingesetzt war.

Die Untersuchungen wurden unter dem Aspekt durchgeführt, daß es sich bei dem Eisenkreuz um ein Gerät für die Rechtwinkelabsteckung handelt. Die Zuordnung ist allerdings nicht zweifelsfrei. Von Della Corte erstmals als Getreidemeßgerät (Modius) angesprochen, wird es in der neueren Forschung mehrfach als solches ausgewiesen [8], [42]. Die Diskussion zu dem Gerät ist noch nicht abgeschlossen. Unabhängig davon bleibt es Bestandteil der Gromaforschung, wie die zeitlich frühen Rekonstruktionsversuche durch Fabricius, Schöne, Kretschmer, Winkelmann und Szylágy belegen (Bild 21). Die Gerätedarstellungen zeigen als Träger des Winkelkreuzes ein Eisenstativ wie das aus Pfünz; das ist die Ursache für die nicht praktikable Rekonstruktion der Geräte sowie für die Zuordnung der Funde aus Pfünz und Aquincum als Bauteile einer Groma [10], [11], [12], [13].

Fabricius und seinen Zeitgenossen standen für die Forschung – die Pompeji-Groma wurde erst ab 1922 publiziert – nur die Schriften der römischen Feldmesser, das Winkelkreuz auf dem Grabstein von Ivrea und das Gerät aus Pfünz zur Verfügung [43]. Daraus erklären sich die falschen und eigenwilligen Rekonstruktionen, wie sie auch noch in der neueren Literatur (z.B. bei Kretschmer und Szylágy) zu finden sind (Bild 21).

Der Stativkopf aus Aquincum

Im Museum zu Budapest, dem römischen Aquincum, ist neben Lot, Winkelmaß und Zirkel auch ein Stativkopf aus dem 3. Jh. n.Chr. ausgestellt [12], [13]. Ungarische Archäologen weisen ihn als Bauteil eines sonst aus Holz bestehenden Meßgeräts aus, von dem infolge Verwitterung oder Brandeinwirkung nur der eiserne Bestandteil erhalten blieb (Bilder 14 und 15). Die drei Füße des Stativkopfs enthalten einen Bolzen und sind so konstruiert, daß sie ein in dem Bolzen drehbares Stativbein halten können. Die Schaftröhre diente zur Aufnahme eines Holzstabs, der mit einem Nagel (Loch in der Röhre) festgehalten wurde. Rekonstruktionsversuche ergaben, daß sich die Füße für die Anbringung von Stativbeinen (Holz) gut eignen. Die Spitze des in der Röhre befestigten Holzstabs, für dessen Länge es keine Angaben gibt, diente als Träger eines drehbar aufgesetzten Winkelkreuzes aus Holz (Bilder 16 und 17). Damit ist das Winkelkreuz aus Aquincum das erste Gerät in der Geschichte der Meßkunst, für das sich ein Dreibeinstativ nachweisen läßt.

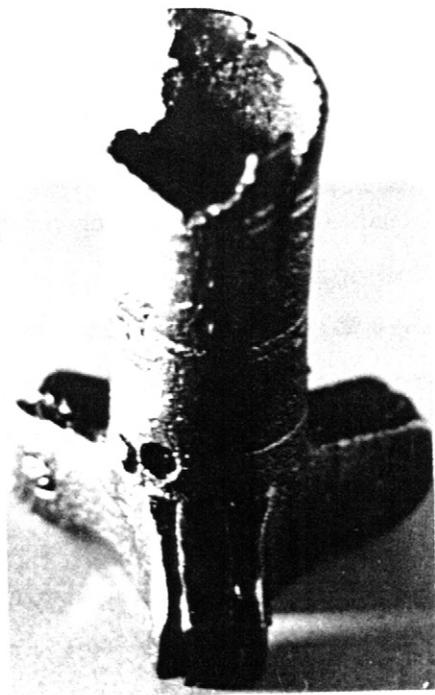
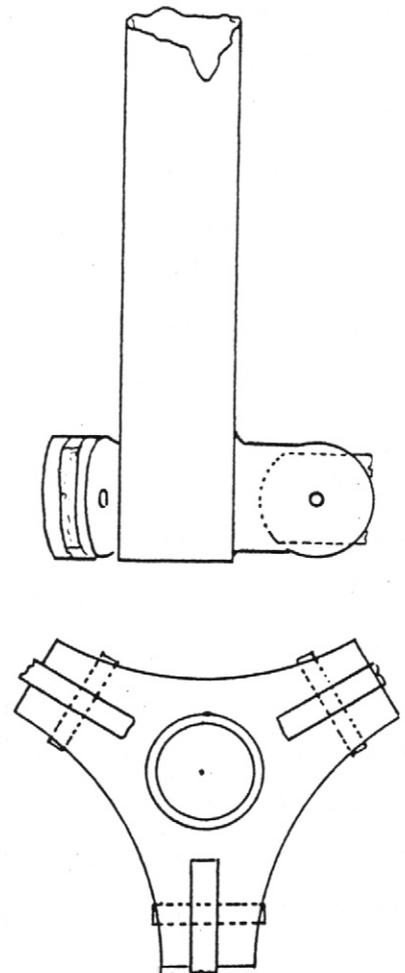


Bild 14
Der Stativkopf aus Aquincum
(Foto Vagács)

Bild 15
Grundriß und Schnitt
des Stativkopfes
(Zeichnung Vagács)



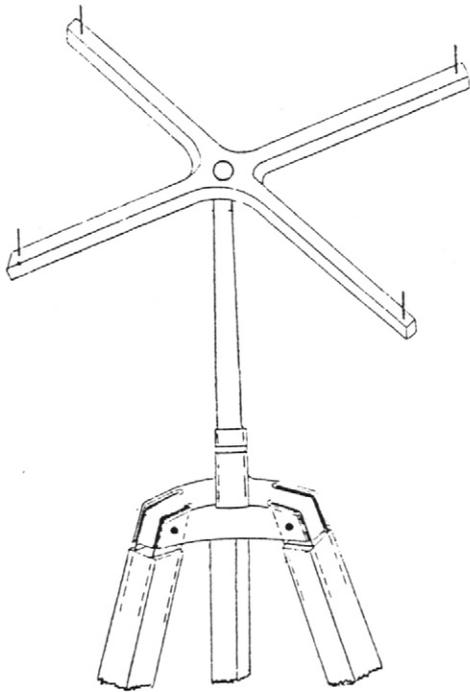


Bild 16
Rekonstruktion als komplettes
Gerät mit langem Stützstab

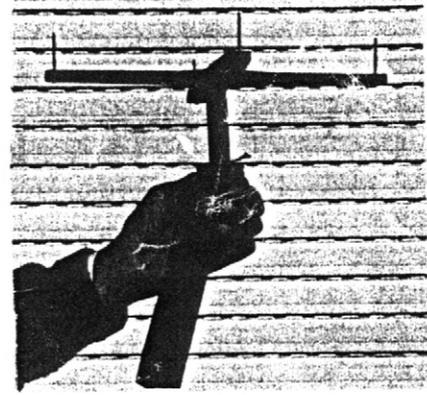


Bild 17
Rekonstruktion mit
kurzem Stützstab

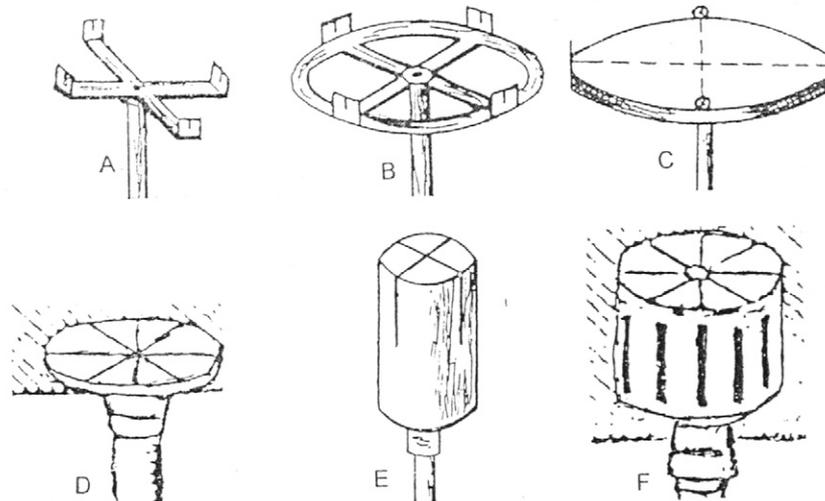


Bild 20
Geräte aus der Renaissancezeit für die Rechtwinkelabsteckung:
A und B = Winkelkreuz, C und D = Kreuzscheibe,
E und F = Winkelkopf, A,B,C und E aus [40], D und F aus [41]

Die Kreuzscheibe

Aus der Renaissancezeit ist neben dem einfachen Winkelkreuz noch die Kreuzscheibe für die Rechtwinkelabsteckung in ebenem Gelände bekannt. Bei ihr stehen die Diopter nicht auf einem Kreuz, sondern auf einer Kreisscheibe. Das Gerät ist für das Altertum nicht nachzuweisen. Ein vergleichendes Studium zeigt, daß zwischen den aus dem Altertum überlieferten und den aus der Renaissancezeit bekannten Vermessungsgeräten wesentliche Übereinstimmungen bestehen. Daraus läßt sich folgern, daß die Kreuzscheibe auch im Altertum zum Einsatz kam (Bild 20).

Der Winkelkopf

Im Gegensatz zu Winkelkreuz und Kreuzscheibe ist der Winkelkopf auch für Rechtwinkelabsteckungen in steilem Gelände geeignet. Er erfüllt damit die Funktion der Groma. Aus Metall oder Holz gefertigt, ist das Gerät in der Literatur der Renaissance- und der Folgezeit vielfach nachgewiesen. Man kann davon ausgehen, daß Holzgeräte wegen der einfachen Fertigung häufiger zum Einsatz kamen. Die Vergänglichkeit des Holzes ist die Ursache, daß aus dem Altertum nur zwei Winkelkopffunde (Koblenz und Ennemain) bekannt sind. Der Fund aus Koblenz ist ein achteckiges Kleingerät aus Bronze, das sich für die Absteckung rechter und halber rechter Winkel eignet (Bild 18). Der Winkelkopf wurde 1894 bei Baggararbeiten in der Mosel entdeckt.

„Die Gesamthöhe beträgt 8 cm, der Durchmesser 2 cm; die Prismenseiten haben 8 bis 9 mm Breite und 5 cm Höhe. Die kurzen Schlitz sind in der Höhe sehr verschieden und schwanken zwischen 16 und 25 mm Länge, während die längeren Schlitz ziemlich gleich bis 36 mm hoch und oben mit einer zinnenartigen Abdeckung geschlossen sind. Durch letztere Anordnung war eine genauere Absenkung des Winkels (Steilvisur) möglich, zu welchem Zweck bei neuen Winkelköpfen (noch nach 1900) der Länge nach im Schlitz angebrachte Roßhaare oder feine Drahtfedern deuten. Die Breite der Schlitz beträgt gleichmäßig 4 mm, die Wandstärke ca. 1,5 mm.“ [37]

Leider ist das Gerät nicht mehr vorhanden, wie eine Anfrage in Koblenz ergab. „Die als Winkelkopf bezeichnete Inv.Nr. 3842 ist bei der Auslagerung und Zerstörung des Koblenzer Schlosses verloren gegangen“.

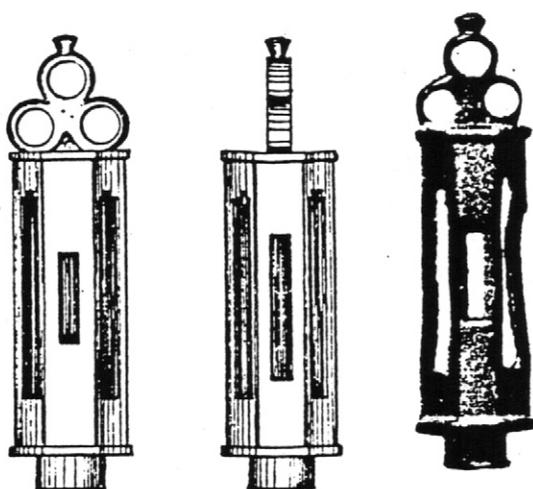


Bild 18
Der Winkelkopf aus Koblenz
(Seitenansichten), aus [37]

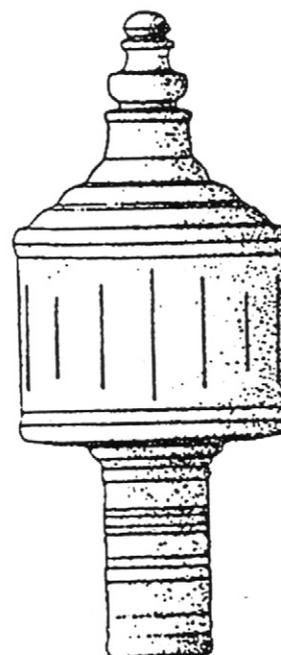


Bild 19
Der Winkelkopf aus Ennemain,
aus [39]

Bei Vorarbeiten für den Bau der Autobahn zwischen Amiens und St. Quentin in Nordfrankreich entdeckten Archäologen beim Ort Ennemain einen Winkelkopf aus römischer Zeit [39]. Das runde Kleingerät besteht aus Bronze und ist vollständig erhalten (Bild 19).

„Der äußere Durchmesser des Hohlzylinders beträgt 76 mm, die Gesamthöhe 185 mm. Die sauber gearbeiteten nur 0,6 mm breiten 16 Sehschlitze sind verschieden lang, 23 bis 37 mm.“ [39]

Mit diesem Winkelkopf lassen sich Winkel von 90° , 45° und $22^{\circ}30'$ (Achteck) abstecken. Von der Funktion her könnte es ein Gerät sein, das besonders in der Bauvermessung eingesetzt wurde.

Für die Rechtwinkelabsteckung sind die Geräte aus Koblenz und Ennemain bisher die einzigen kompletten Funde. Daneben ist nur noch die Pompeji-Groma einwandfrei zu rekonstruieren. Vollständig erhaltene Winkelkreuze und Kreuzscheiben sind erst aus der Renaissancezeit in unterschiedlichen Formen überliefert (Bild 20).

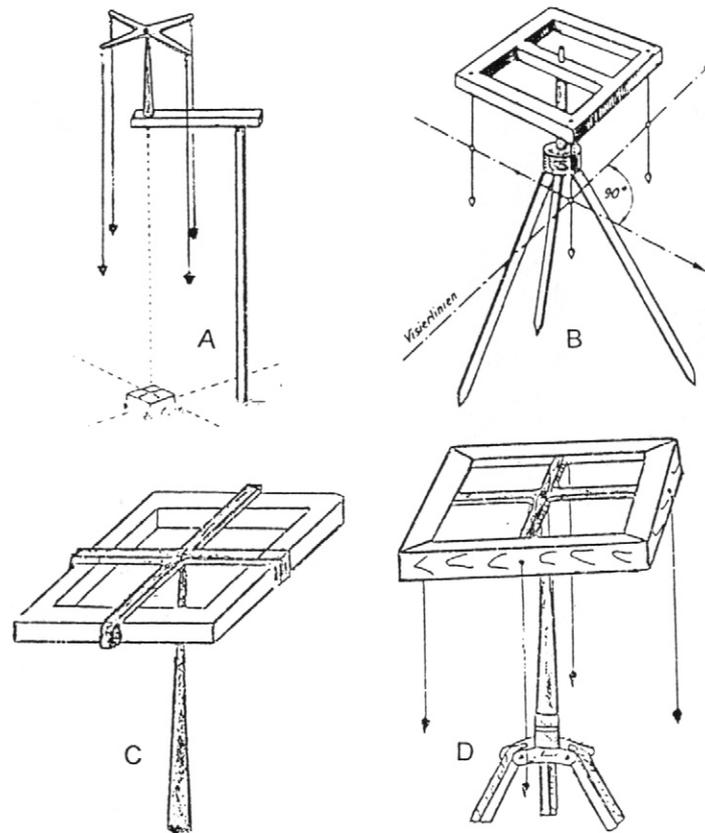


Bild 21
 Gromakonstruktionen durch: A = Fabricius,
 B = Schöne und Kretschmer, C = Winkelmann,
 D = Szylágyi, aus [10],[11],[13],[43]

1.2. Herons Universalgerät Dioptra

Die Bücher „Dioptra“ und „Metrica“ des Mechanikers Heron aus Alexandria (1. Jh.n.Chr.) beinhalten fast vollständig die Vermessungskunde seiner Zeit [1], [14]. Es sind die einzigen aus dem Altertum überlieferten Schriften dieses Fachgebiets. Daraus ergibt sich ihre große Bedeutung für die Forschung. In der vorliegenden Arbeit wird das Buch „Dioptra“ als Quelle benutzt. Heron beschreibt darin neben dem Universalgerät, das dem Buch seinen Namen gibt, ausführlich den Einsatz des Geräts für die Lösung fast aller in seiner Zeit bekannten Aufgaben der Land- und Ingenieurvermessung.

Die Dioptra ist von der Konstruktion und vom Material her so kompliziert, daß sie, im Gegensatz zu den anderen Meßgeräten dieser Zeit, nur von einem besonders erfahrenen Mechaniker gefertigt werden konnte. Heron beschreibt das Gerät in den Abschnitten III bis V der „Dioptra“ bis ins kleinste Detail. Schöne hatte daher, obwohl keine Zeichnungen überliefert sind, keine Schwierigkeit, die Dioptra mit Nivellieraufsatz (Kanalwaage) und Nivellierlatte darzustellen (Bild 22) [1]. Ein Nachbau des Geräts befindet sich im Vermessungstechnischen Museum in Dortmund.

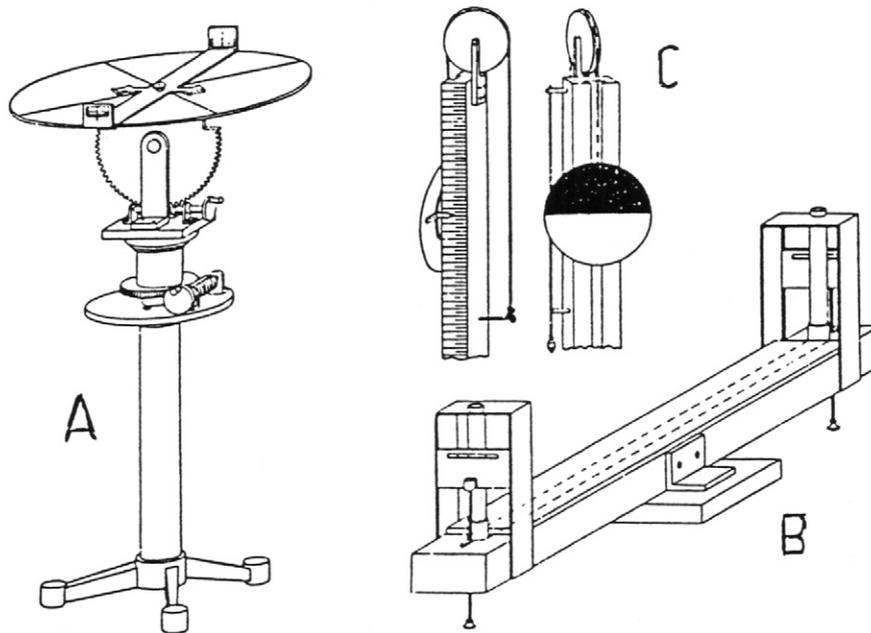


Bild 22
Vermessungsgeräte nach Heron: A = Dioptra,
B = Nivellieraufsatz, C = Nivellierlatte,
nach [1]

Das Kriterium für ein Meßgerät ist seine Praktikabilität und die mit ihm zu erreichende Genauigkeit. Für die Dioptra liegt hierzu weder von Heron selbst noch aus der Forschung zu Heron eine Aussage vor. Das gilt auch für den Nachweis, ob der Mechaniker, der ja kein praktizierender Landmesser war, das Gerät baute oder nur eine Konstruktionsbeschreibung überliefert. Betrachtet man das umfangreiche Gesamtwerk Herons, seine Arbeitsmethode (vgl. 1. Abschnitt der „Dioptra“) und die Dioptrabeschreibung zu diesem Sachverhalt, kann man annehmen, daß der Mechaniker - wenn überhaupt - nur einen Prototyp baute und sich damit ein „Denkmal“ setzte.

- Es gibt weder aus der Antike noch aus der Renaissancezeit Hinweise auf ein gleichartiges Gerät. Die Kanalwaage z.B. erscheint erst ab 1700 in der Fachliteratur [3], [4].
- Das Gerät war wegen der komplizierten Konstruktion nur von einem qualifizierten Mechaniker zu bauen und daher nicht für die Massenproduktion geeignet.
- Die Auswertung der Überlieferung zeigt, daß Baumeister und Landmesser Geräte einsetzten, die - vielfach im Eigenbau hergestellt- nur der jeweils gestellten Aufgabe entsprachen.
- Der Einsatz eines Universalgeräts ist auch aus vermessungstechnischer Sicht für einfache und häufige Messungen rationell nicht vertretbar.
- Für die zahlreichen Bau- und Landvermessungen kamen viele Geräte, die meist aus Holz bestanden, zum Einsatz. Das bedeutet: Wäre die Dioptra in Serienproduktion hergestellt worden, könnten als archäologische Funde zumindest Teilstücke des Geräts vorliegen.

Mit Automaten, Maschinen und technischen Vorrichtungen zeigt das Werk Herons fast komplett die Mechanik seiner Zeit [35]. Wir wissen nicht, welche Gerätebeschreibungen er von seinen Vorgängern und Zeitgenossen übernahm oder verbesserte.

Die Untersuchungen zur Dioptra zeigen den Ehrgeiz Herons, ein „Universalgerät“ für die Ausführung aller vermessungstechnischen Aufgaben zu entwickeln. Hierzu standen ihm die Literatur (z.B. aus der Bibliothek in Alexandria) und die in seiner Zeit bekannten Meßgeräte zur Verfügung. Daß er die Geräte nicht beschreibt, ist für die Forschung ein großes Defizit. Herons negative Feststellung, daß seine Vorgänger und Zeitgenossen für eine Aufgabe jeweils das ihr entsprechende Einzelgerät benutzten, ist aus vermessungstechnischer Sicht nicht vertretbar. Es ist die Feststellung eines Mechanikers, der wahrscheinlich nie eine Vermessung durchführte.

Fazit: Herons Dioptra ist von der Konstruktion und dem Material her mit keinem Meßgerät der Antike zu vergleichen. Da in der Herstellung für die Serienproduktion zu kompliziert und in der Anwendung zu schwierig, war sie, wie vielfach in der Forschung angenommen, nicht das „Universalgerät“ der Landmesser und Baumeister.

1.3. Nivelliergeräte

Überlieferungen aus dem Altertum weisen für diese Epoche vier Gerätetypen nach: die offene Wasserwaage, Herons Kanalwaage, Vitruvs Chorobat und das Setzwaagen-Nivellier. Nach den Beschreibungen von Heron und Vitruv sind Kanalwaage und Chorobat gut nachzubauen. Entsprechend ist ihre Bedeutung in der Forschung. Sie bilden die Grundlage für die Geschichte der Nivelliergeräte von der Renaissance bis in heutiger Zeit. Forschungsergebnisse vermitteln den Eindruck, daß Kanalwaage und Chorobat die „Nivelliere“ des Altertums waren. Es wurde nicht erkannt, daß beide Geräte Sonderkonstruktionen sind, die deswegen so ausführlich beschrieben wurden. Ihr praktischer Einsatz in der Antike und in der Renaissancezeit ist nicht nachzuweisen.

Heron, Vitruv und einige andere Autoren erwähnen in ihren Schriften mehrmals Setzwaagen- und Wasserwaagen-Nivelliere. Wegen ihrer einfachen Bauweise waren sie von jedem Baumeister leicht herzustellen. Aus diesem Grunde wurden sie wohl nie ausführlich beschrieben.

Die Auswertung der Überlieferungen sowie der Aspekt eines technisch praktikablen Geräts führt zu der Erkenntnis, daß die Setzwaagen-Nivelliere vom Altertum bis noch ins 18. Jahrhundert die am häufigsten eingesetzten Nivelliergeräte waren [3].

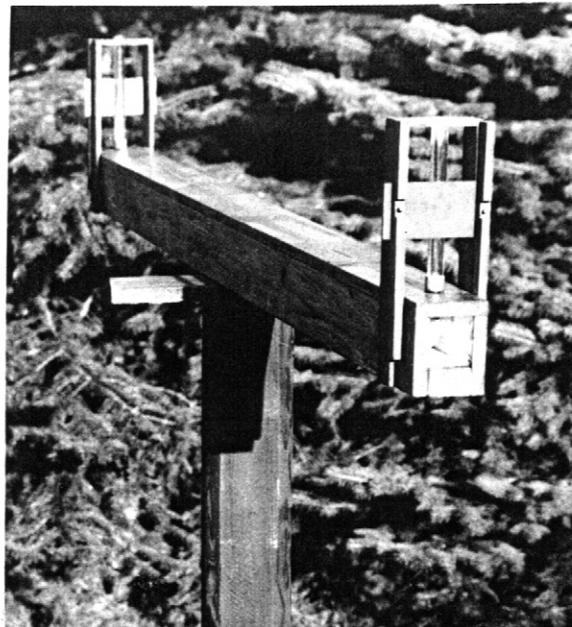


Bild 23
Rekonstruktion der Kanalwaage
in Anlehnung an Heron. [1]

Konstruktionsbeschreibung der Kanalwaage

„In die obere Fläche des Visierlineals ist eine Vertiefung von halbrundem oder quadratischem Querschnitt eingeschnitten, die so lang ist, daß sie eine Bronzeröhre, die um etwa 12 Daktylen kürzer ist als das Visierlineal, aufzunehmen vermag. An die Bronzeröhre schließen sich an ihren Enden zwei andere, senkrecht stehende Röhren an, so daß es aussieht, als sei die große Röhre nach oben aufgebogen. Die Höhe dieser aufgebogenen Stücke bemißt man auf nicht mehr als 2 Daktylen. Hierauf wird die Bronzeröhre mit einem langen Lineal, das auf die Vertiefung paßt, oben dergestalt zugedeckt, daß dieses sowohl die Bronzeröhre festhält als auch das Aussehen des Apparats wohlgefälliger macht. In die genannten Aufbiegungen der Röhre wird je ein kleiner Glaszylinder eingepaßt, der eine zu der Röhre passende Dicke und eine Höhe von etwa 12 Daktylen hat. Sodann werden die Glaszylinder in die Aufbiegungen mit Wachs oder einem anderen Bindemittel hineingekittet, damit, wenn durch einen der Zylinder Wasser eingegossen wird, es nirgends durchlaufen kann.

Das querliegende Lineal wird an den Stellen, wo sich die Glaszylinder befinden, von zwei kleinen Gehäusen umgeben, so daß die Glasgefäße durch diese hindurchgehen und darin festgehalten werden. In diese Gehäuse werden Metallplättchen hineinverpaßt, welche in Führungen an den Wänden der Gehäuse auf und nieder laufen können; sie berühren dabei die Glaszylinder und haben in der Mitte Ausschnitte zum Visieren. An diesen Metallplättchen sind an ihren unteren Enden kleine Zylinder, die die Höhe von etwa $\frac{1}{2}$ Daktylos haben, befestigt und in diese paßt man drehbare Stifte aus Bronze ein, die so lang sind als das Gehäuse bei einem der Glaszylinder; sie gehen durch ein Loch in dem mit der Vertiefung versehenen Lineal. In die Stifte werden Schraubenwindungen eingeschnitten, in welche kleine Zapfen, die mit dem Lineal festverbunden sind, eingreifen. Dreht man nun an den nach unten überstehenden Teilen der Stifte, so wird man dadurch die mit Ausschnitten versehenen Metallplättchen nach oben und unten bewegen. Denn das dem Metallplättchen benachbarte Ende des Stiftes wird mit einem kleinen Wulst versehen sein, der in eine an der Innenfläche des kleinen Zylinders angebrachte Vertiefung eingreift“.

(Heron: „Dioptra“, IV. Abschn.)

Konstruktionsbeschreibung des Chorobats

„Es muß jetzt die Rede sein von den Zuleitungen des Wassers zu den Siedlungsgebieten und Städten. Hierbei ist zunächst eine genaue Vermessung vorzunehmen. Die Vermessung in der Senkrechten (Nivellierung) erfolgt durch Visieren oder mit Hilfe der Wasserwaage, am zweckmäßigsten aber mit der Grundwaage, weil beim Visieren oder beim Nivellieren mit der Waage Fehler unterlaufen können. Die Grundwaage besteht aus einem etwa 20 Fuß langen Richtscheit, an dessen Enden gleichartige Schenkel eingezapft und mit Streben festgemacht sind. Auf diesen Streben sind senkrechte Linien aufgerissen, und ihnen entsprechenden Bleilote, die vom Richtscheit herabhängen. Wenn diese sich nach Aufstellung des Richtscheites auf die lotrechten Linien einstellen, so wird hierdurch eine waagerechte Lage bezeichnet.

Stört aber der Wind, so daß eine zuverlässige Vermessung nicht mehr möglich ist, so versieht man das Instrument mit einer Rinne von 6 Fuß Länge, 1 Zoll Breite und $1\frac{1}{2}$ Zoll Tiefe und gießt diese mit Wasser aus. Wenn nun das Wasser überall in gleicher Höhe steht und den Rand der Rinne berührt, so ist ebenfalls eine waagerechte Lage erreicht. Wenn auf diese Weise die Waagerechte festgestellt wird, so kann hiernach ohne Schwierigkeit das Gefälle bestimmt werden.“

(Vitruv: „De Architectura“, 8. Buch)

Herons Kanalwaage und Nivellierlatte

Herons Kanalwaage, die auf das Stativ der Dioptra aufgesetzt wird, ist von der Ausführung und Konstruktion her den Nivelliergeräten seiner Zeit weit voraus (Bilder 22 und 23). Sie arbeitet nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren. Weder aus der Antike, noch aus der Renaissancezeit ist ein Nivelliergerät überliefert, das nach diesem Prinzip arbeitet. Erst in der Neuzeit, ab 1700, scheint sich Herons Konstruktion durchgesetzt zu haben. Die Kanalwaage ist seit dieser Zeit fester Bestandteil der Fachliteratur [3]. Herons Beschreibung ermöglicht den exakten Nachbau des Geräts, der allerdings wegen der komplizierten Konstruktion sehr schwierig ist. Nach Grobhorizontierung des Stativs spielt das Wasser in der Röhre automatisch ein; das Gerät steht in der Waage. Die beiden Schiebediopter werden auf den Wasserspiegel eingestellt.

Für den Nivelliervorgang setzt Heron zwei Schiebelatten mit Zieltafel ein. Bild 22 C zeigt in Vorder- und Seitenansicht die Konstruktion der Latte. Die Zielscheibe läuft an einem in der Latte eingelassenen Schlitten, der mit einem über eine Rolle laufenden Seil auf und ab bewegt wird. Der Beobachter visiert durch die beiden Schlitze der Schiebediopter die Zielscheibe an der Latte ein. Die Ablesung erfolgt an der seitlichen Höhenskala der Latte.

Vitruvs Chorobat

Kein Nivelliergerät des Altertums ist seit der Renaissance in der Literatur so häufig beschrieben worden wie der Chorobat [4]. Die Schriften Vitruvs enthalten keine Darstellung des Geräts. Der Text läßt, in Abweichung zu der genauen Dioptrabeschreibung Herons, einen gewissen Konstruktionsspielraum zu. Daher zeigen die in den Übersetzungen skizzenhaft dargestellten Chorobatkonstruktionen nicht nur erhebliche Unterschiede, sondern auch nicht funktionsfähige Geräte (Bild 26).

Nach Vitruv (1. Jh.v.Chr.) ist der Chorobat ein Nivelliergerät, das beim Bau der römischen Wasserleitungen zum Einsatz kam. Die Konstruktion ist eine Verbindung von Setzwaage und Wasserwaage, an und auf einem langen Richtscheit auf zwei Stützen. Die offene Wasserwaage tritt nach Vitruv nur in Funktion, wenn starker Wind das Einpendeln der Lote verhindert. Mit dem langen Richtscheit und den Setzwaagen an den Enden des Geräts wollte der Baumeister wahrscheinlich die Genauigkeit steigern.

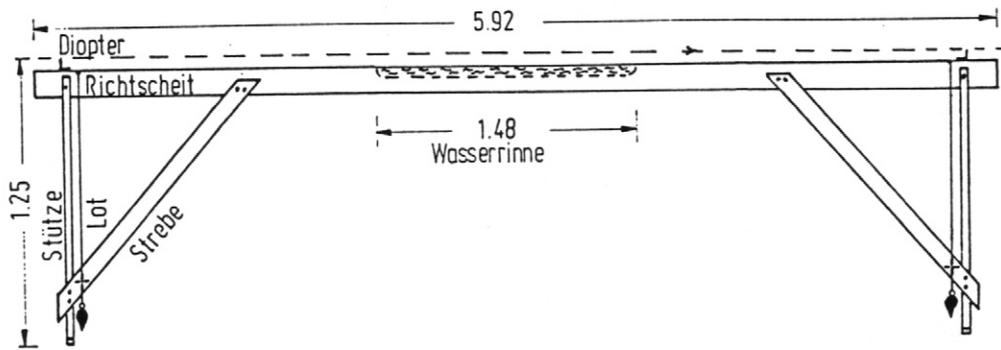


Bild 24
Vitruvs Chorobat mit Konstruktionsdaten

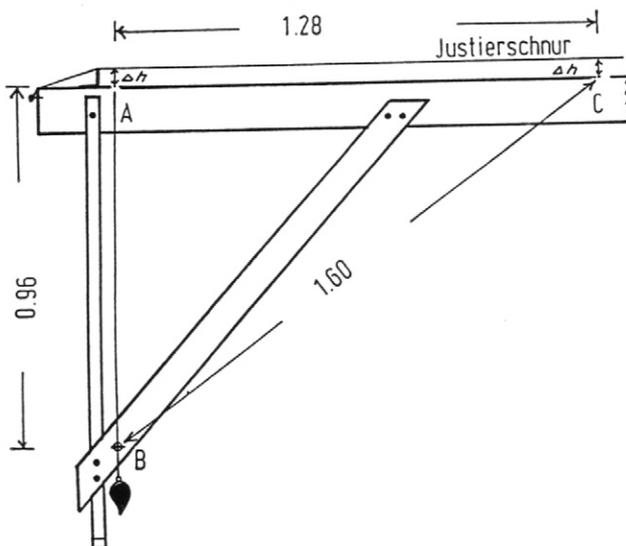


Bild 25
Konstruktion des Rechtwinkels
im Seitenverhältnis 3, 4 und 5
am Chorobat

In Bild 24 ist der Chorobat nach der Beschreibung und mit den Daten Vitruvs dargestellt. Stütze, Strebe und Richtscheit müssen fest miteinander verbunden sein, damit die Lote der Setzwaagen bei der Aufstellung des Geräts einpendeln. Die Konstruktion der Rechtwinkel (Setzwaagen) an den Enden des Richtscheits zeigt Bild 25. Sie ist auch mit einem rechtwinkligen Dreieck auszuführen, das an der Justierschnur angelegt wird.

Jakob Burckhardt zur Bedeutung Vitruvs [36]:

„Fortan glaubte man vor allem das Altertum nach seinen eigenen Aussagen richten zu können. Vitruv nahm in der Baukunst bald eine ähnliche Rolle ein, wie vorher Cicero in der Latinität, und es bildete sich eine höchst eifrige Partei in seinem Namen.“

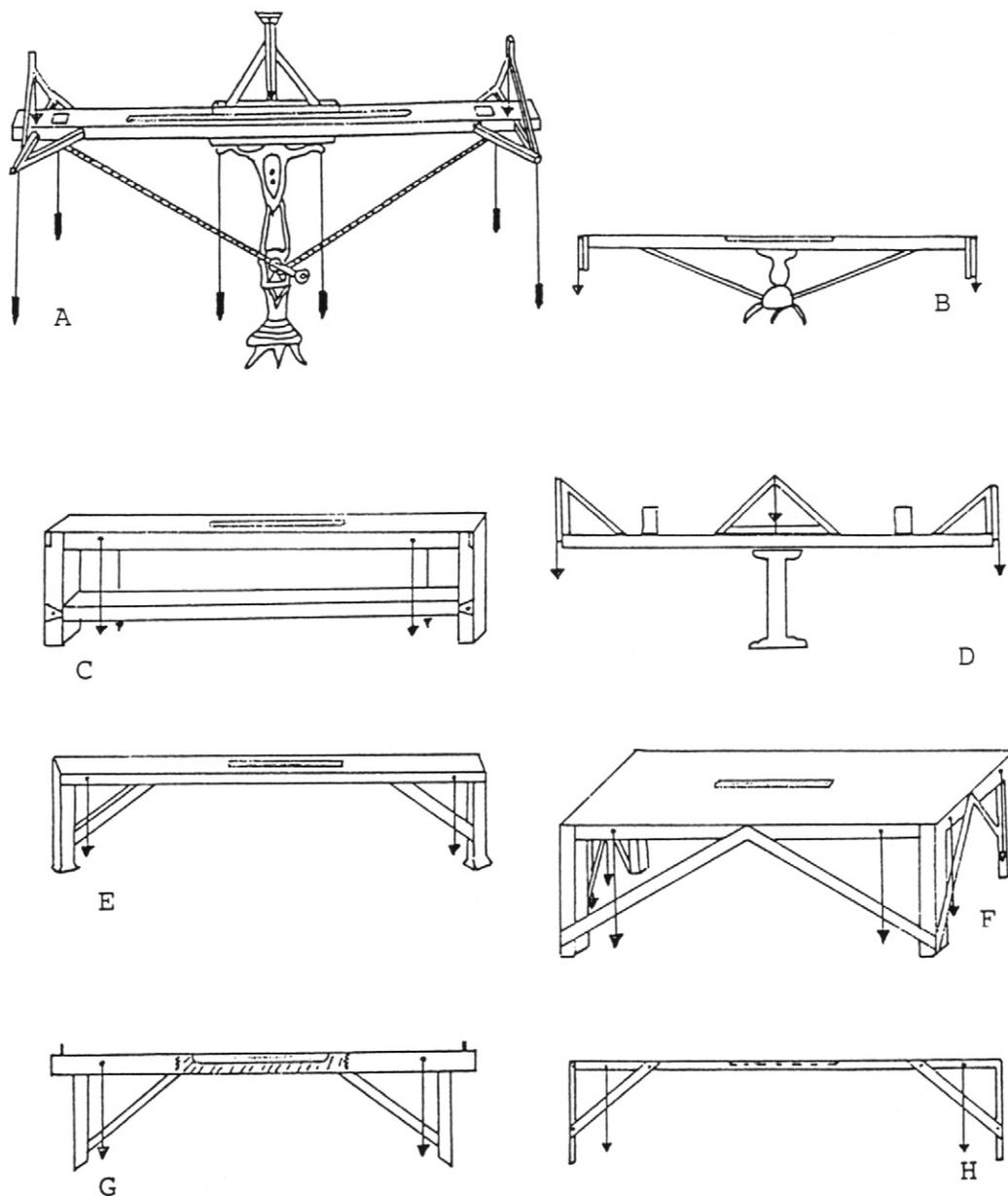


Bild 26
Rekonstruktionen des Chorobats seit der Renaissancezeit

A = Cesariano 1521 und Rivius 1548, B = Rusconi 1590,
C = Barbarus 1567 und Perrault 1673, D = Cardano 1570,
E = Poleni und Stratico um 1825, F = Neuburger 1921,
G = Kretschmer 1978, H = Veenhuis 1984

Für den Meßvorgang muß das Gerät in der Waage stehen. Die Horizontierung wird mit Hilfe von an beiden Stützen untergelegten Holzkeilen so oft durchgeführt, bis beide Lote auf der Marke B (Bild 25) einpendeln [3]. Der Chorobat ist nur bei Vitruv nachgewiesen. Weder aus der Renaissance- noch aus der Folgezeit gibt es einen Hinweis, daß ein solches Gerät eingesetzt wurde.

Die offene Wasserwaage als Nivelliergerät

Sie ist das älteste und einfachste Nivelliergerät des Altertums (Bild 27). Aus dieser Zeit liegen keine Funde, Daten oder Beschreibungen vor. Von Heron und einigen anderen Autoren wird das Gerät kurz benannt. Nur Vitruv geht in der Chorobatbeschreibung (Wasserrinne) auf das Gerät ein. Erst die Literatur der Renaissancezeit zeigt einige einfache Geräteskizzen (Bild 28). Die Ruhestellung des Wassers wird durch eine halboffene Schutzröhre hergestellt. Die offene Wasserwaage ist einfach nachzubauen. Nur die handwerkliche Herstellung der glatten Oberfläche des Richtscheits gestaltet sich schwierig. Als Oberkante der Wasserrinne muß sie auf der ganzen Länge parallel zur Zielachse laufen, damit das Gerät in der Waage steht.

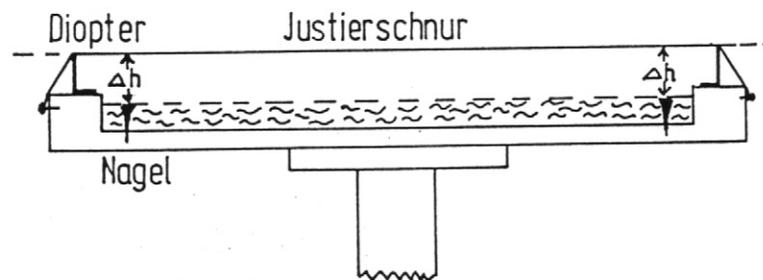


Bild 27
Offene Wasserwaage als Nivelliergerät.
Justiermöglichkeit mit Hilfe von zwei
Nägeln

Eine glatte Oberfläche des Richtscheits (Parallelität) ist mit einfachen Werkzeugen nur schwer zu erreichen. Dies führt zu der Überlegung, daß eigentlich nur zwei Punkte notwendig sind, um den Wasserspiegel in die Horizontale zu bringen. Bild 27 zeigt diesen Vorgang, bei dem zwei Nägel im gleichen Abstand zur Ziellinie etwa 15 mm unter der Oberfläche des Richtscheits justiert werden. Das Verfahren hat den Vorteil, daß der Wind die Ruhestellung des Wassers nicht beeinflusst.

Es gibt keinen Beweis, daß diese Konstruktionsidee im Altertum bekannt war. Wir können nur davon ausgehen, daß die alten Baumeister diese Erfahrung machten [3].

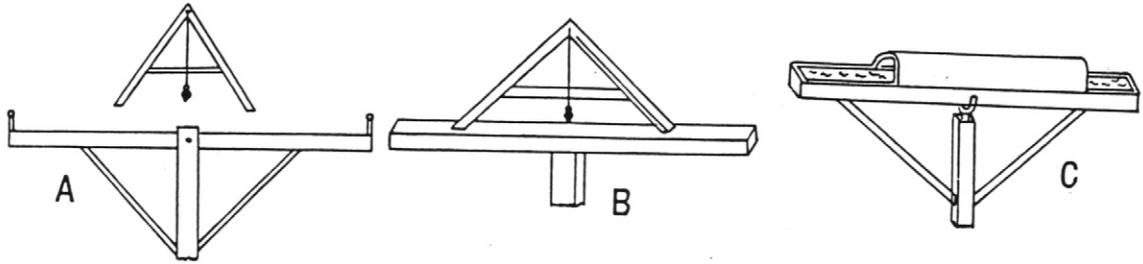
Experimente zeigten die komplizierte Handhabung und Aufstellung der offenen Wasserwaage. Dies dürfte der Hauptgrund sein, daß sie weitgehend von den Setzwaagen-Nivellieren verdrängt wurde.

Das Setzwaagen-Nivellier

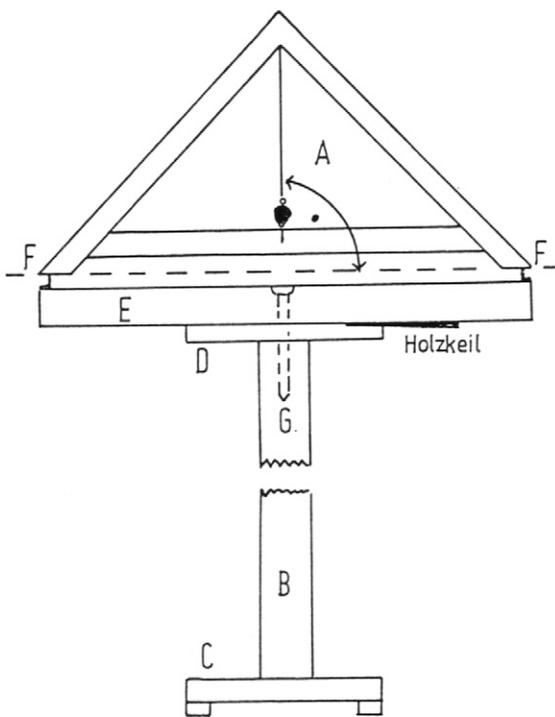
Das erste Setzwaagen-Nivellier war möglicherweise ein Richtscheit mit Setzwaage, das auf zwei Stützen ruhte und schon beim Bau der ägyptischen Pyramiden zum Einsatz kam [5]. Obwohl es das Gebrauchsgerät dieser Zeit war, ist weder ein Fund noch die Abbildung eines kompletten Geräts nachgewiesen. Nur der Bauteil Setzwaage ist vielfach im Original sowie auf Bildern und Grabsteinen der Ägypter und der Römer überliefert. Heron und Vitruv erwähnen in ihren Schriften mehrmals Nivelliergeräte, bei denen die Waagrechte durch die Setzwaage hergestellt wird. Wegen der einfachen Bauweise waren die Geräte von jedem Baumeister leicht zu fertigen.

In der Renaissancezeit ist das Setzwaagen-Nivellier fester Bestandteil der Fachliteratur (Bild 28). Hauptkonstruktionselement des Geräts ist die stehend (Bild 29) oder hängend (Bild 30) angebrachte Setzwaage. Ihre exakte Konstruktion ist entscheidend für den Bau der Geräte; denn Grundseite und Lot müssen einen Rechtwinkel bilden, der durch Bogenschlag oder nach dem Lehrsatz des Pythagoras hergestellt werden kann. Das Gerät (Bild 29) besteht aus der Setzwaage (A), dem Stativbalken (B) mit Fuß (C) und Auflager (D) sowie einem Richtscheit (E) mit zwei Dioptern (F). Ein schweres Stativ verleiht dem Gerät Standfestigkeit.

Versuche ergaben, daß der in Form eines Dreiecks (40 cm Seitenlänge) gebaute Fuß die Standfestigkeit des Geräts erhöht und damit die Aufstellung und Horizontierung erleichtert. Das am Stativbalken befestigte Auflager (40 cm Länge) trägt das Richtscheit. Dieses ist durch den Bolzen (G) mit dem Stativ verbunden. Der lose angebrachte Bolzen ermöglicht eine geringe seitliche Bewegung und eine leichte Anhebung des Richtscheits [3].

**Bild 28**

A = Setzwaagen-Nivellier nach Leonardo da Vinci (um 1500),
 B nach Giovanni da Verona (1522), C = Wasserwaagen-Nivellier
 nach Cesariano (1521), da Verona und Rivius (1547)

**Bild 29**

Rekonstruktion eines Nivelliers
 mit stehender Setzwaage

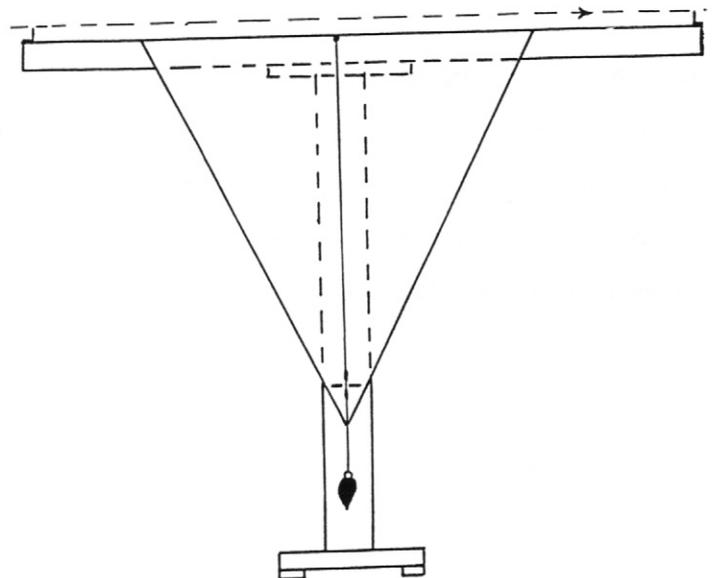
**Bild 30**
Nivellier-Nachbau mit
hängender Setzwaage

Bild 30 zeigt das Nivellier mit hängender Setzwaage, die fest am Richtscheit befestigt ist. Der Bauteil wird auf das Auflager des Stativs gelegt und durch einen Bolzen gehalten. Die Grob- und Feinhorizontalisierung geschieht wie zu Bild 29 beschrieben. Pendeln die Lote bei den Geräten auf der Kerbmarke ein, dann stehen sie in der Waage und sind meßbereit. Gerätefehler werden durch Messung in zwei Lagen (Drehung des Geräts um 180°) ausgeschaltet.

Experimente mit stehender Setzwaage ergaben, daß die Ruhestellung des Lots bei Wind schwer zu erreichen ist. Beim Gerät mit hängender Setzwaage wird das Lot durch das Stativ gegen Wind abgedeckt und geschützt [3]; ein Konstruktionsschema, das auch Vitruvs Chorobat aufweist. Da aus dem Altertum kein archäologischer Fund eines Setzwaagen-Nivelliers vorliegt, wurde es unter Berücksichtigung der aus der Renaissancezeit überlieferten Geräte nachgebaut.

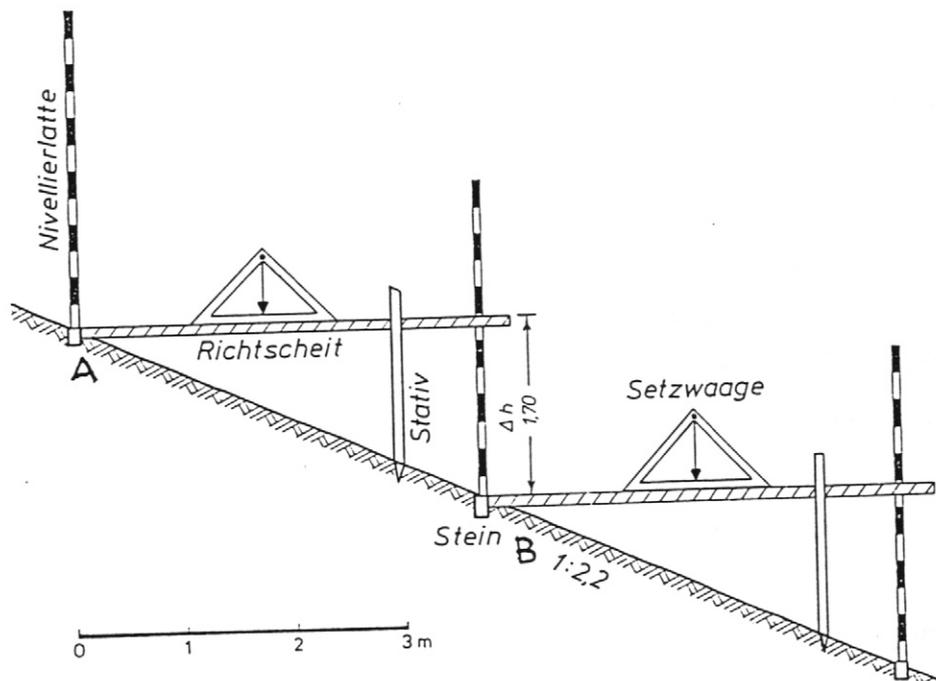


Bild 31
Staffelmessung am Steilhang - Geräte und Verfahren

Das Staffelmessgerät

Für Brücken-, Aquädukt- und Tunnelbauten muß bereits für die Planung ein Profil (Geländeschnitt) vorliegen. Mit den Setzwaagen-Nivellieren ist eine Höhenmessung in steilem Gelände nur schwer möglich. Für die Höhen- und Längenmessung setzten daher die Baumeister schon im Altertum und teilweise noch bis zum 19. Jahrhundert das Staffelfverfahren ein. Das Gerät für den Meßvorgang besteht aus Setzwaage, Richtscheit mit Längenskala, Stabstativ und Maßstab. Bild 31 zeigt die Geräte bei der Messung am Steilhang. Die Setzwaage steht mittig auf dem Richtscheit. Nach Einpendeln des Lots auf der Kerbmarke befindet sich das mit der Hand am Stabstativ festgehaltene Richtscheit in der Waage. Die Ablesung am Maßstab über dem Punkt B gibt den Höhenunterschied (Δh) zwischen den Punkten A und B an. Die Längenablesung erfolgt an der Skala des Richtscheits mit Hilfe eines Lots über den Punkt B. Drehung von Richtscheit und Setzwaage um 180° . Wiederholung des Meßvorgangs: Das Mittel aus beiden Messungen ergibt die Höhe für das Auftragen des Profils. Das Verfahren wird in der dargestellten Form bis zur Bergspitze oder Talsohle durchgeführt [3].

1.4. Stabmeßgeräte

Stabmeßgeräte mit einseitigem und beidseitig angebrachtem Querstab (Jakobsstab) sowie als Geometrisches Quadrat, das auch die Funktion eines Stabmeßgeräts erfüllt, nehmen im Schrifttum der Renaissancezeit einen breiten Raum ein [20]. Vorläufer der Geräte finden sich bereits in der Antike (einige schriftliche Hinweise aus griechischer und römischer Zeit). Archäologische Funde, Konstruktionsdaten und bildliche Darstellungen liegen aus dieser Epoche nicht vor [4].

Geometrische Grundlagen der Stabmessung

Für die Messung unzugänglicher Entfernungen – Bestimmung von Berg- und Turmhöhen sowie von Flußbreiten und der Länge von Tunnelachsen – setzten die Landmesser geometrische Verfahren ein, die auf der Lehre von den Proportionen und der Ähnlichkeit rechtwinkliger Dreiecke beruhen (Bild 32). Da bei Höhenbestimmungen keine Absteckung in der Horizontalen möglich ist, wurden die ähnlichen Dreiecke in der Vertikalen durch lange Stäbe hergestellt und gemessen.

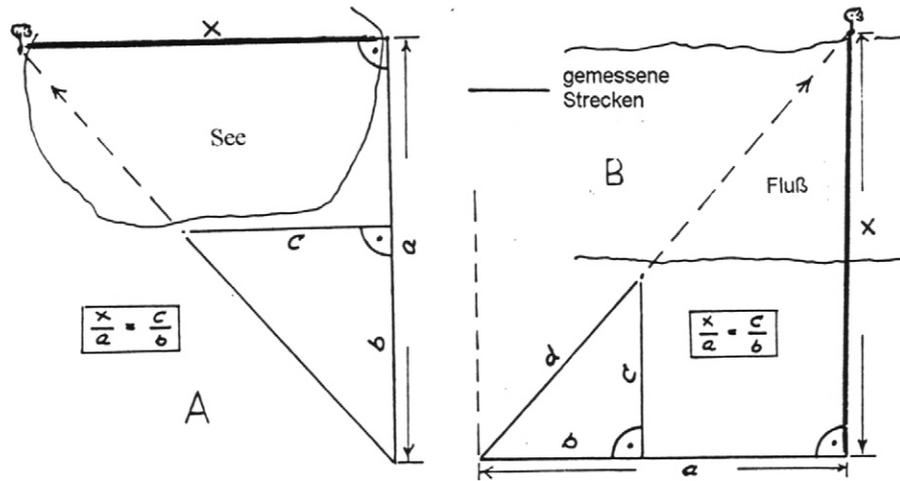


Bild 32
Grundaufgaben für die Bestimmung unzugänglicher Entfernungen durch Absteckung rechtwinkliger Hilfsdreiecke

Als erster „Stabmesser“ gilt Thales. Seine Aufgabe, die Höhe der Cheopspyramide mit der Körperlänge (oder Stab) und dem sich daraus ergebenden Schatten zu bestimmen, ist in der Literatur häufig beschrieben worden [4]. In der Folgezeit gibt es hierzu im überlieferten Schrifttum nur noch einige Angaben griechischer und römischer Militärschriftsteller.

Heron vervollkommnete die Pyramidenaufgabe bei Thales. Er ist zudem der einzige Autor, der sie genau beschreibt („Dioptra“, Abschn. XII und XIII). Für die Lösung setzt er zwei durch Lote senkrecht gestellte lange Stäbe ein und visiert mit der Dioptra die Staboberkante (K und H) auf die Bergspitze A ein (Bild 33).

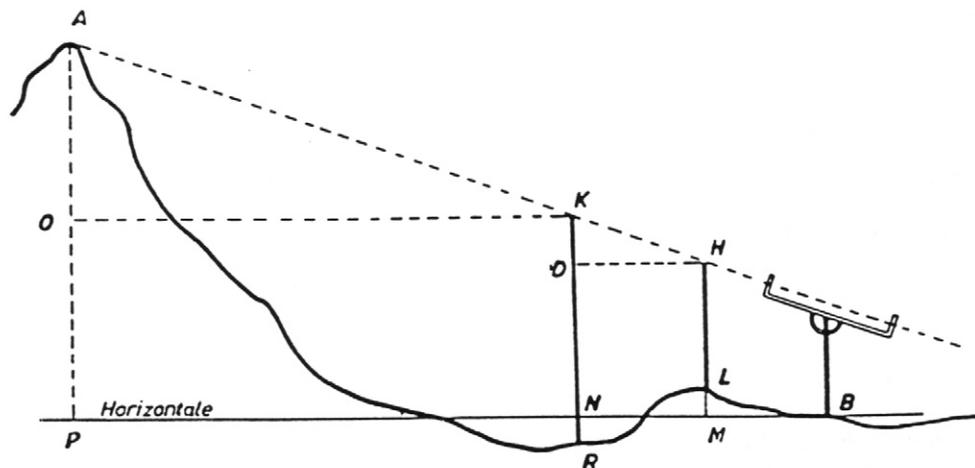


Bild 33
Höhenbestimmung eines Berges nach Heron

Die Höhe der Stabunterkanten R und L bestimmt er mit dem Nivellieraufsatz (Kanalwaage) im Bezug zum Punkt B (= Horizontale). Mit Hilfe der bereits ermittelten Horizontalentfernung vom Gerätestandpunkt zur Bergspitze rechnet sich die gesuchte Berghöhe nach Proportionen [14].

Im Schrifttum der Renaissancezeit ist die Bestimmung von Turm- und Berghöhen unter Einsatz der Stabmessung mehrfach beschrieben und dargestellt: Im Unterschied zu Heron ohne Gerät und zudem im ebenen Gelände [21]. Die Aufgaben sind insgesamt vermessungstechnisch nicht besonders praktikabel.

Grundformen der Stabmeßgeräte

Zur Arbeitserleichterung und schnelleren Durchführung bauten die Griechen zur Bestimmung unzugänglicher Strecken den Meßvorgang bereits in die Geräte ein und nahmen damit einen Genauigkeitsverlust in Kauf. Wann das erste Gerät gebaut wurde, ist nicht bekannt. Die Auswertung des aus der Antike überlieferten Schriftguts läßt in Verbindung mit den aus der Renaissancezeit bekannten Geräten vier Grundformen der Stabmeßgeräte erkennen (Bild 34). Allen Geräten ist gemeinsam, daß die Querstäbe (Q) mit den Längsstäben (L) einen Rechtwinkel bilden. Die Visier-
vorrichtungen (V) bestehen in der Regel aus Diopterlinealen. Sie sind auch als Schnur oder Nadeln nachgewiesen [4]. Die Senkrechtstellung erfolgt mit dem Lot. Als Baumaterial diente vornehmlich Holz.

Bei der einfachsten Ausführung, die der Pyramidenaufgabe bei Thales entspricht, ist der einseitige Querstab fest mit dem Längsstab verbunden. Beide Stäbe zeigen gleiche Längen. Ist der Querstab mit einer Längenskala versehen, kann man auch unter einem spitzen Winkel messen (Bild 34 A). Zur besseren Stabilisierung und Anbringung des Geräts auf oder an einem Stativ ergänzten einige Gerätebauer die beiden Stäbe zu einem quadratischen Rahmen oder bauten es als Platte (Bild 34 B) [4]. Es gilt als Vorläufer des Geometrischen Quadrats (Bild 35). Bild 34 C zeigt das Gerät mit einseitigem und beweglichem Querstab (Konstante) und der Längenskala auf dem Längsstab (vgl. Bild 36).

Im Unterschied zu diesem Gerät hat der Jakobsstab einen beidseitig und symmetrisch zum Längsstab (Gradstock) angebrachten Querstab (Bild 34 D). Der Jakobsstab hatte in der Renaissance eine Doppelfunktion als Winkel- und Längenmeßgerät. Hierzu enthält der Längsstab die entsprechenden Winkel- und Längenskalen (Bild 37). Ob das Gerät in der Antike für beide Funktionen gebaut wurde, ist nicht bekannt.

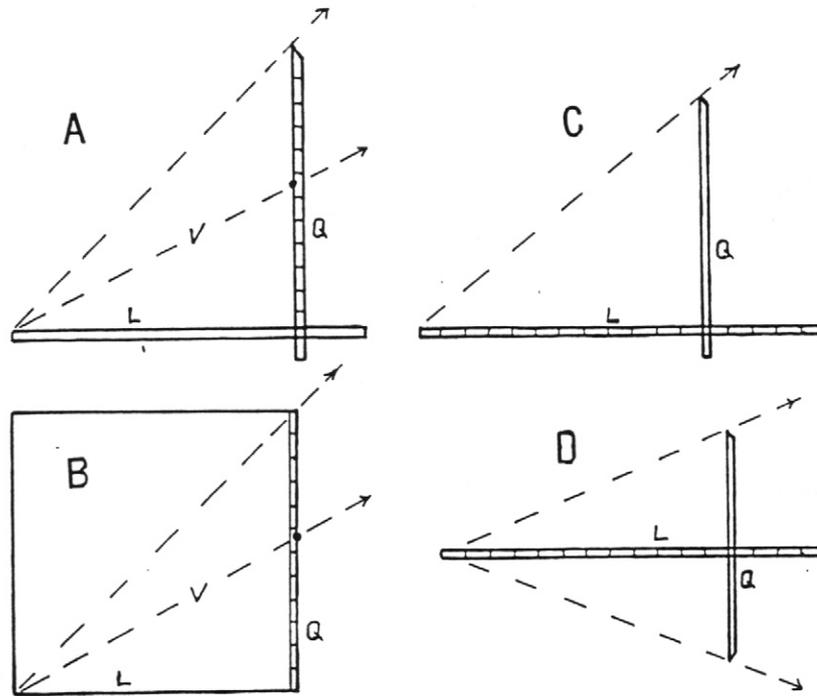


Bild 34
Grundformen der Stabmeßgeräte

1.5. Das Geometrische Quadrat

Höhen- und Entfernungsbestimmungen mit den Stabmeßgeräten setzen eine bereits gemessene Strecke voraus. Das gilt auch für das Geometrische Quadrat, wenn es als Stabmeßgerät zum Einsatz kommt. Seine eigentliche Funktion ist die Messung einer Streckenlänge nur mit Hilfe der Gerätedaten. Bild 35 zeigt den Meßvorgang. Die gesuchte Strecke CF errechnet sich aus

$$CF:CE = AD:DE.$$

Ob das Geometrische Quadrat bereits im Altertum bekannt war, läßt sich nicht mit Sicherheit feststellen. Ptolemaios und die „Araber“ überliefern mit dem sich auf dem Astrolab befindenden Schattenquadrat einen Geräteteil, der in Kleinausführung in etwa dem Geometrischen Quadrat entspricht [21], [30]. Als selbständiges Gerät ist es erstmals bei Gerbert von Aurillac (um 1000) nachgewiesen [4].

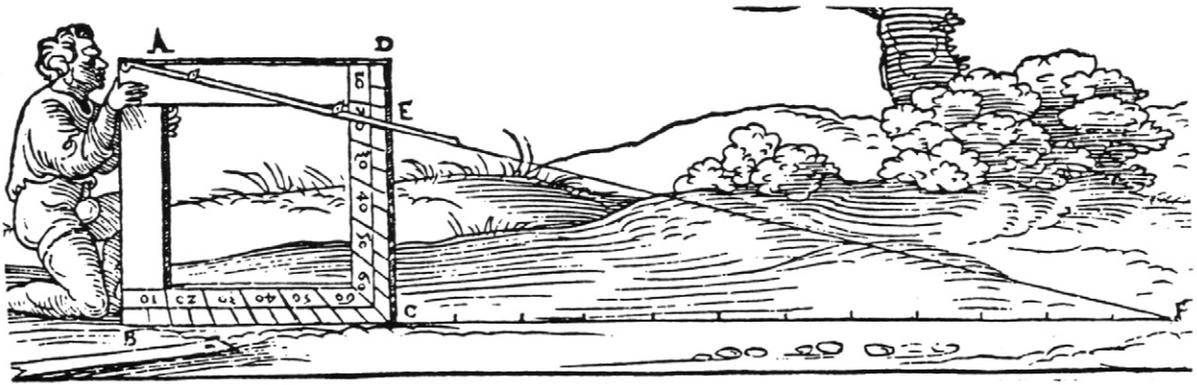
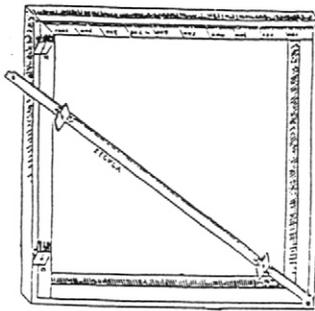
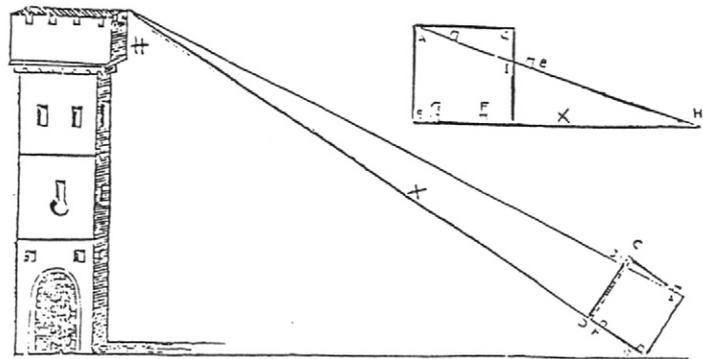


Bild 35
Meßvorgang mit dem Geometrischen Quadrat, nach Rivius (1547), aus [41]

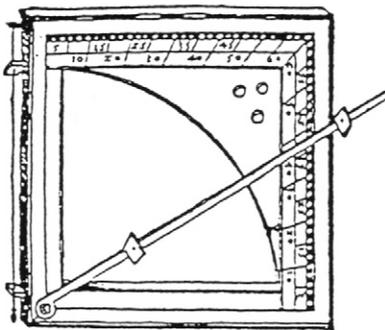
Im Schrifttum der Renaissancezeit ist das Gerät fester Bestandteil [20]. In der Folgezeit, mit Beginn der ersten Triangulationen, erscheint es kaum noch in der Literatur. Fehleruntersuchungen ergaben, daß hierfür die mangelhafte Genauigkeit des Geräts die Ursache sein kann.



Apian (1533)



Zwei Aufgaben bei Apian (1533)



Rivius (1547)



Rivius (1547)
Gerät mit Stativ

Bild 35A
Geometrische Quadrate, aus Apian [15] und Rivius [41]

Obwohl meist aus Holz (Rahmen oder Platte mit Größen bis zu 1 m) gefertigt, sind auch kleinere Geräte aus Metall bekannt, die oft als Prestigeobjekte für Fürsten gebaut wurden. Heute stehen sie als wertvolle Unikate in einigen Museen. Im Schrifttum der Renaissancezeit gleichen sich die Gerätedarstellungen vielfach (Bild 35 A). Das gilt auch für die Aufgabenbeispiele. Sie zeigen die Geräte fast immer ohne Stativ und den Meßvorgang in ebenem Gelände [15], [31]. Die vermessungstechnisch nicht fachgerechte Ausführung führt zu der Annahme, daß die Autoren nur Beispiele für den Geometrie-Unterricht darstellen und beschreiben wollten (vgl. Bild 35).

Bild 36
Einsatz eines Stabmeßgeräts
mit einseitigem Querstab,
nach Köbel (1616)

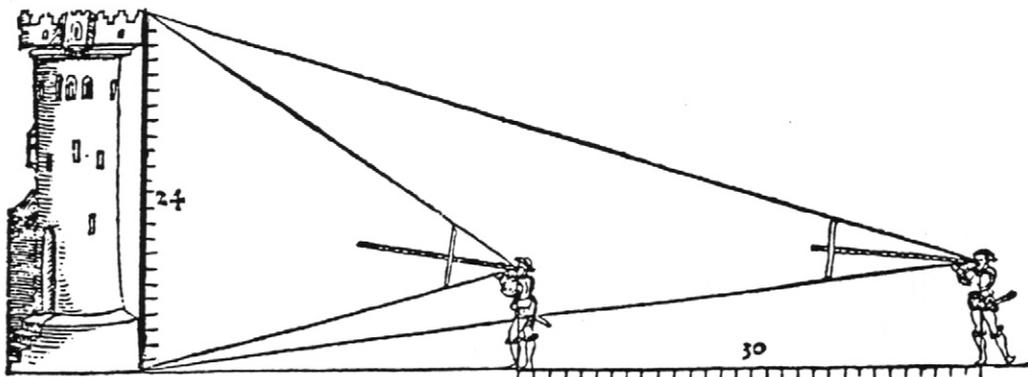


Bild 37
Meßvorgang mit dem Jakobsstab von zwei
Standpunkten, nach Apian (1533), [15]

1.6. Zielvorrichtungen an Meßgeräten

Der von den Griechen geprägte Begriff „Diopter“ gilt allgemein für Zielvorrichtungen an Meßgeräten, die je nach Aufgabenstellung aus Einzeldioptern (Bild 38) oder Diopterlinealen bestehen [5]. Die vorhergehend aufgeführten Geräte zeigen daher unterschiedliche Zielvorrichtungen. Sie sind für Herons Dioptra und Kanalwaage (Bild 22) sowie für die Groma (Bild 9) nachgewiesen. Die Darstellung aller anderen Zielvorrichtungen ist praxisorientiert und auf die Zweckbestimmung der Geräte bezogen. Unter Beachtung der Überlieferungen wurde mit verschiedenen Zielvorrichtungen experimentiert (Bild 39).

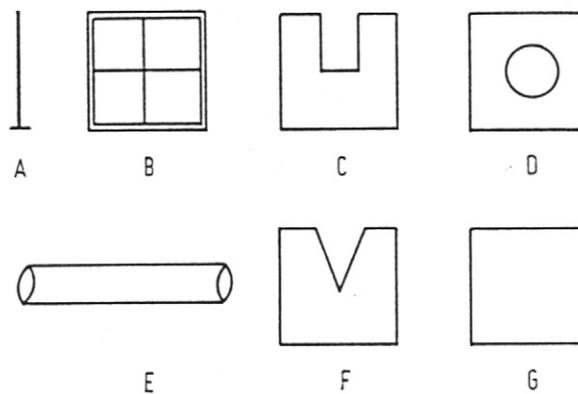


Bild 38
Zielvorrichtungen: A = Stab-, B = Kreuz-, C = Nut-,
D = Loch-, E = Röhren-, F = Kimme- und G = Volldiopter

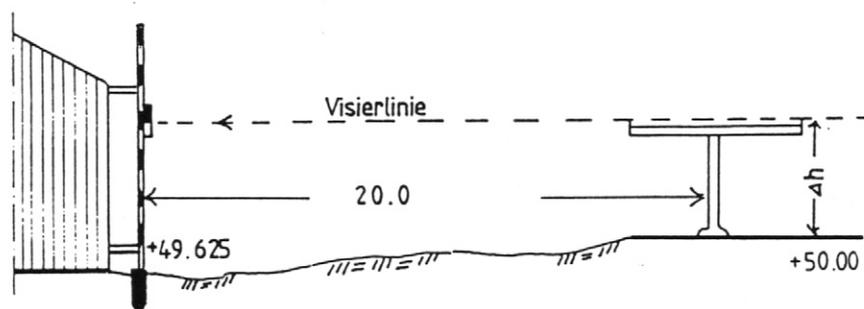


Bild 39
Prüfstand für Genauigkeitsuntersuchungen

2. Meß- und Absteckverfahren

Alles was meßbar ist, messen,
und was nicht meßbar ist, meßbar machen.

(Galilei)

„... Es ist der alte Wagen, aber die Pferde und die Postillione wechseln von Zeit zu Zeit; und die Passagiere wechseln auch, einer nach dem anderen. Aber der Wagen kommt niemals zurück. Er fährt weiter und weiter. Er wurde gefahren durch Griechen, durch Römer, durch Völker aller Art, zuletzt durch Muslims, nun durch Juden und Christen.“

(George Sarton)

Von der Antike zur Renaissance

Es ist ein Sprung über 1500 Jahre:
von Aristarchos zu Kopernikus,
von Archimedes zu Galilei,
von Hippokrates zu Paracelsus,
von Ptolemaios zu Regiomontanus,
von Vitruv zu Palladio.

(Peters)

2.0. Fluchten von Linien

Eine gerade Linie wird durch Fluchtstäbe im Anfangs- und Endpunkt markiert, bei langen Linien durch zusätzliche Zwischenpunkte bestimmt. Diese bieten den Vorteil, daß sich der Messende für die Aufnahme und Absteckung von Rechtwinkeln auf den Fußpunkt einrichten kann. Zum Verlängern einer Linie wird ein Fluchtstab mit den Stäben in ihrem Anfangs- und Endpunkt zur Deckung gebracht. Bei Absteckungen, die eine große Genauigkeit verlangen, ist der Einsatz von Schnurloten anstelle von Fluchtstäben von Vorteil.

Schwieriger und fehleranfälliger ist die Herstellung einer langen Linie, wenn ihre Ausfluchtung nicht direkt vom Anfangs- und Endpunkt möglich ist. Für die indirekte Durchführung sind drei Verfahren bekannt: Gegenseitiges Einrichten, Fluchten auf aufsteigenden Rauch und Vortreiben der Richtung.

Bild 40 zeigt das heute noch eingesetzte Verfahren durch gegenseitiges Einrichten aus der Mitte, das für die Grundstücks- und Bauvermessung geeignet ist. Für die praktikable Durchführung des Vorgangs muß in der Linie ein längerer ebener Abschnitt gegeben sein. Im Extremfall, z.B. bei einer steilen Bergspitze, kann die Linie mit der Groma gefluchtet werden, und zwar über die sich gegenüber befindlichen Schnurlote des Geräts. Dieses wird so oft umgesetzt, bis die Schnurlote mit der Linie eine Gerade bilden.

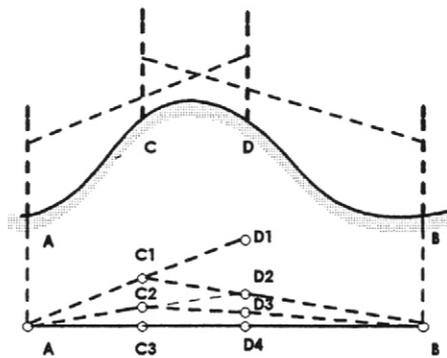


Bild 40
Einfluchten einer Messungslinie aus der Mitte

Ein weiteres Verfahren stellt das Fluchten einer Linie von ihrem Anfangspunkt auf aufsteigenden Rauch dar, das allerdings nur an windstillen Tagen möglich ist. Die römischen Landmesser setzten es bei besonders langen Trassen ein, z.B. beim Straßen- und Limesbau in unübersichtlichem Gelände [16].

Ein Verfahren, das sich besonders für die Angabe der Richtung einer Tunnelachse eignet, ist das Vortreiben einer Richtung über den Berg (Bild 41). Dabei wird die Richtung vom Punkt A über den Berg gefluchtet und verlängert und der Vorgang so oft ausgeführt, bis die Richtung den Punkt B trifft [16].

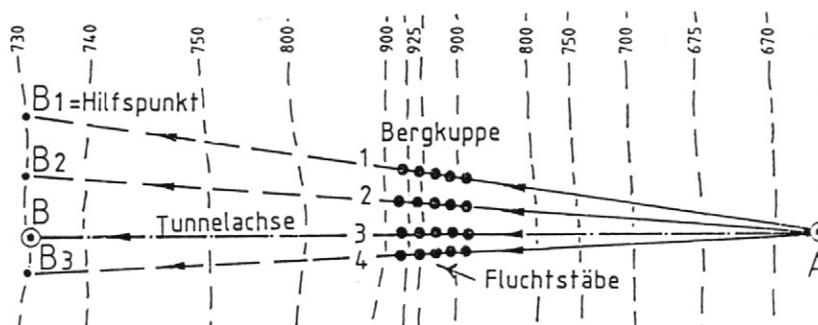
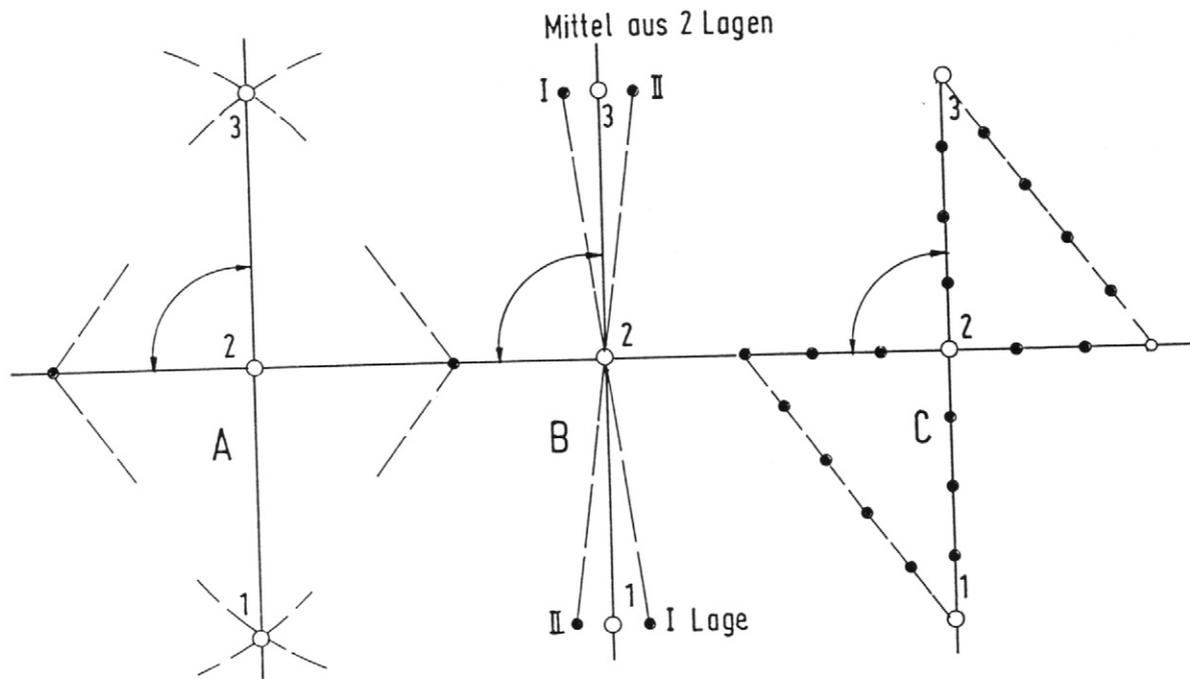


Bild 41
Vortreiben der Richtung über einen Berg

2.1. Rechtwinkelabsteckung

Nachmessungen an Großbauten des Altertums beweisen, daß ihre Erbauer in der Lage waren, Rechtwinkel mit einer großen Genauigkeit abzustecken. Das gilt auch für die Durchführung großflächiger Limitationen und der Absteckung von Stadtanlagen, die vielfach als Planungsschema ein rechtwinkliges Raster zeigen. Welches Gerät oder Verfahren dabei zum Einsatz kam, richtete sich nach der Topographie und der Genauigkeitsanforderung.

Die Auswertung der Überlieferung läßt für die Rechtwinkelabsteckung drei Verfahren erkennen: durch Bogenschlag mit dem Meßseil, mit einem Gerät (Winkelkreuz, Groma usw.) oder durch Konstruktion eines rechtwinkligen Dreiecks mit den Seitenverhältnissen 3, 4 und 5. In Bild 42 sind die Verfahren im Hinblick auf die Bauwerksabsteckung dargestellt, die im Unterschied zur Feldmessung eine größere Genauigkeit verlangt. In den Beispielen erfolgt die Absteckung der Rechtwinkel jeweils beidseitig zur Grundlinie. Dadurch kontrolliert sich die Absteckung, denn bei exakter Ausführung bilden die Punkte 1, 2 und 3 eine Gerade.

**Bild 42**

Rechtwinkelabsteckung: A = durch Bogenschlag,
 B = mit dem Winkelkreuz und C = Dreieck im
 Verhältnis 3, 4 und 5

Bild 42 A zeigt den Meßvorgang durch Bogenschlag (= Konstruktion einer Mittelsenkrechten) mit einem geeichten Meßseil, das bei der Absteckung an den Enden mit Gewichten unter gleicher Spannung gehalten wird. Auf dem Seil ist keine Längenteilung erforderlich. Es genügt jeweils eine Meßmarke (Strich) auf dem Seil für die Absteckung der Hilfspunkte auf der Grundseite und für die beidseitige Durchführung des Bogenschlags. Versuche ergaben für dieses Verfahren eine große Genauigkeit; es könnte daher primär für die Bauwerksabsteckung eingesetzt worden sein [5].

Auch die in Bild 42 B dargestellte Absteckung mit einem Winkelkreuz ergibt, wenn sie zur Ausschaltung des Gerätefehlers in zwei Lagen erfolgt, genaue Ergebnisse. Die Quellenlage erlaubt keinen gesicherten Beweis, daß das Winkelkreuz schon in altägyptischer Zeit bekannt war. Es ist in unterschiedlichen Bauformen erst bei den Griechen, Etruskern und Römern nachgewiesen, die es vornehmlich in der Landmessung einsetzten [7], [23].

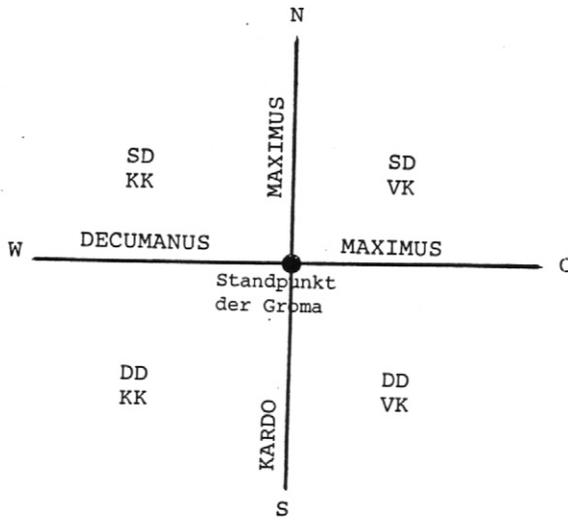


Bild 43
Das mit der Groma abgesteckte Achsenkreuz

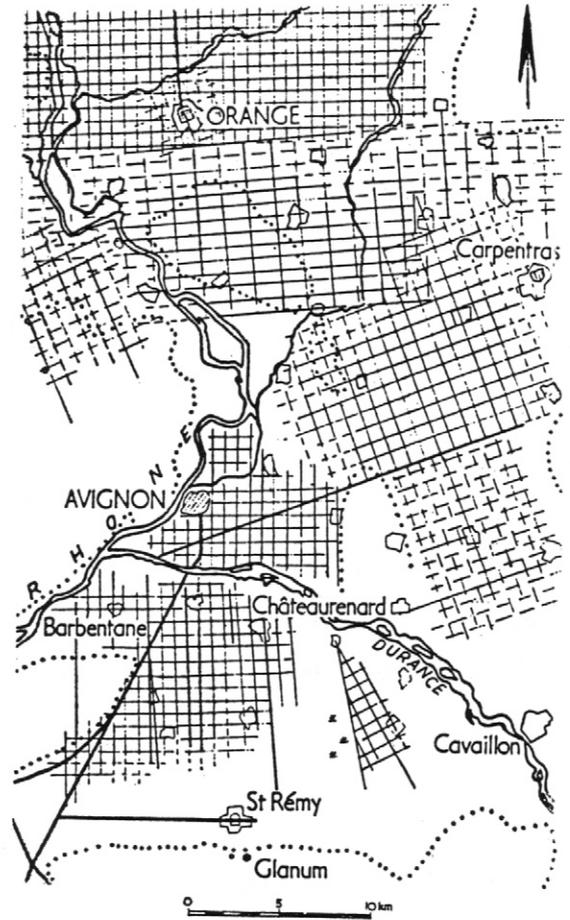


Bild 44
Limitationsnetze im Gebiet von Avignon-Orange

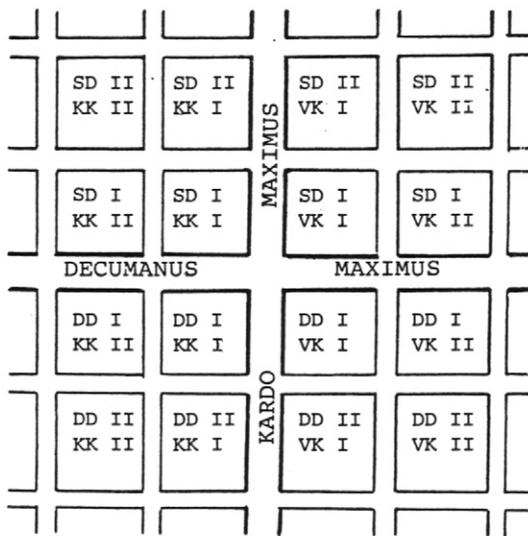


Bild 45
Die Numerierung innerhalb der vier Quadranten

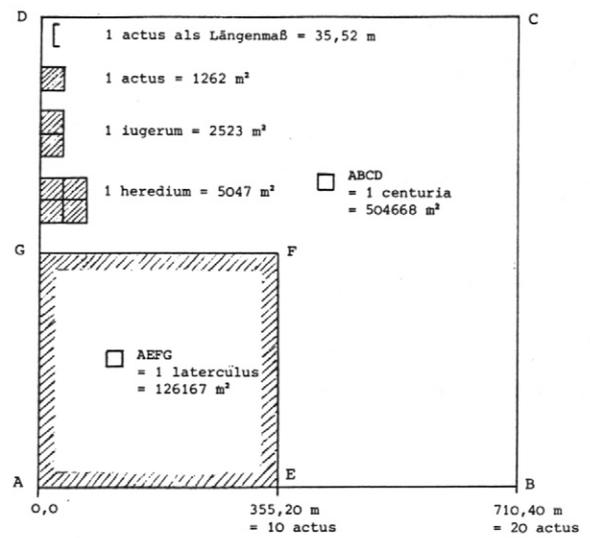


Bild 46
Altrömische Flächenmaße

Bild 42 C vermittelt den Absteckvorgang mit der Zwölfknotenschnur. Sie wurde schon in der Frühzeit in Ägypten und im Zweistromland in der Feldmessung und für einfache Bauabsteckung eingesetzt [22]. Beim Meßvorgang wird ein rechtwinkliges Dreieck mit den Seitenverhältnissen 3, 4 und 5 (=12 Einheiten) durch Spannen der Schnur von einem Meßpunkt aus hergestellt. Für die Absteckung von Großbauten ist das Verfahren zu ungenau, denn die Übertragung und Markierung (Striche) der Längenteilung auf der Schnur bedingen kleine Fehler, die sich bei einer längeren Strecke erheblich summieren.

2.2. Einsatz der Groma bei der Limitation

Die Groma war nach den Schriften der römischen Feldmesser das Spezialgerät für die Absteckung großflächiger Limitationen, Stadt- und Lagergründungen [17]. Luftbilder von vielen Gebieten des ehemaligen Weltreichs bilden die Grundlage für die Limitationsforschung [6]. Sie zeigen wie ein Röntgenbild die im Erdreich verborgenen Limitationsspuren und ermöglichen die kartenmäßige Rekonstruktion der alten Vermessung (Bild 44).

Mit der rasterförmigen Aufteilung des Nutzlandes in Centurien entwickelten die römischen Landmesser bereits vor über 2000 Jahren ein Katastermodell nach rechtwinkligen Koordinaten [6]. Grundlage der Vermessung war das mit der Groma abgesteckte Achsenkreuz (Bild 43). Bei der weiteren Vermessung wurden vom Achsenkreuz aus gleich große Quadrate abgesteckt, die man Centurien nannte, weil sie einhundert kleinere Flächen (Ackerlose) umfaßten (Bilder 45 und 46). Mit einer einheitlich festgelegten Systematik und Numerierung sowie der sich daraus ergebenden Auf- und Einteilung des Nutzlandes entwickelten die Römer ein Katastermodell, das nicht nur in ihrer Zeit einmalig ist [23]. Neben der üblichen Aufteilung in Quadrate, weisen einige Limitationen eine Aufteilung nach Rechtecken auf (Bild 44).

Die Absteckung des Achsenkreuzes - kardo und decumanus - mit der Groma (Bild 43) war eine religiöse und feierliche Handlung unter Mitwirkung von Priestern (Auguren) und Politikern im Beisein des Volkes. Der Einsatz des Geräts bei der Gründungszeremonie gilt als sicher [7].

Beim Meßvorgang wurde zunächst der eiserne Schuh der Groma im Abstand des seitlichen Trägers neben den Vermarkungspunkt in den Boden geschlagen. Nach Einsetzen des Geräts in den Schuh erfolgte die Zentrierung des Winkelkreuzes mit Hilfe der sich gegenüberhängenden Lote auf den Vermarkungspunkt. Bei richtiger Aufstellung der Groma befindet sich der Mittelpunkt des Kreuzes genau über dem Vermarkungspunkt. Die Visierlinien (Lotschnüre) bilden in der Senkrechten eine Parallele mit dem Stativ. Die Aufstellung der Groma wurde mit einem Nachbau durchgeführt. Dabei zeigte sich, daß es schwierig und zeitaufwendig ist, das komplizierte Gerät für den Meßvorgang richtig und absolut standsicher aufzustellen (Bild 7).

In den Schriften der römischen Feldmesser finden sich zwei Varianten für die Orientierung und Absteckung des Achsenkreuzes [7]. Mit der Groma wurde in der Regel entweder der decumanus, indem man nach Sonnenaufgang, oder der kardo; indem man in der Richtung der Mittagslinie visierte, abgesteckt. Die Festlegung der zweiten Richtung erfolgte jeweils durch Fluchten über die beiden anderen Kreuzarme. Zur Prüfung der Absteckung stellte der Landmesser das Gerät an den Enden des Achsenkreuzes auf und visierte zurück. Im Idealfall bilden beide Richtungen mit dem Mittelpunkt des Kreuzes eine Gerade. Die Orientierung erfolgte nicht immer nach den Schriften der römischen Feldmesser, sondern oft in Anlehnung an die Topographie (vgl. Bild 44).

Nach Absteckung des Achsenkreuzes waren umfangreiche vermessungstechnische Folgearbeiten für die Aufteilung des Nutzlandes und die Anlage des Straßen- und Wegenetzes durchzuführen (Bild 45). Arbeiten, die neben zahlreichen Meßgeräten ein großes Team von Landmessern erforderten. Wie und mit welchen Geräten die Messungen durchgeführt wurden - das gilt besonders für die Rechtwinkelabsteckung - ist wegen der dürftigen Quellenlage nicht mit Sicherheit zu belegen.

Es wurde nachgewiesen, daß die Groma für die einfache Rechtwinkelabsteckung zu kompliziert gebaut und in der Anwendung zu schwierig war. Daher muß man davon ausgehen, daß für die umfangreichen Absteckungen in der Regel einfache Winkelkreuze, Kreuzscheiben und Winkeltrömmeln zum Einsatz kamen. Geräte, die in der Renaissance und der Folgezeit zur Grundausrüstung eines jeden Landmessers gehörten. Vielfach aus Holz gefertigt, waren sie - im Gegensatz zur Pompeji-Groma - einfach und kostengünstig zu fertigen und leicht zu handhaben (vgl. Bild 20).

Viele archäologische Funde, das gilt besonders für Teilstücke von Vermessungsgeräten, sind oft nur schwer zu identifizieren und als vollständiges Gerät zu rekonstruieren. Noch schwieriger ist es, wenn zu den Geräten keine genauen schriftlichen Überlieferungen vorliegen. Fehlendes vermessungstechnisches Fachwissen der Forscher und nicht eingesetzte Experimente sind dafür verantwortlich, daß Geräte falsch, oder wie bei der Groma erst durch spätere Funde richtig identifiziert und rekonstruiert wurden. Dies trifft für die Teilfunde der Geräte aus Pompeji, Pfünz und Aquincum zu. Die früheren Rekonstruktionsversuche zeigen „Gromagebilde“, mit denen, wie Aufstellungs- und Meßversuche belegen, nicht einwandfrei zu messen ist (vgl. Bild 21).

Der Einsatz der Groma als das Spezialgerät für die Gründungszeremonie bei der Limitation wurde aufgezeigt. Für die Folgearbeiten kamen einfachere Geräte zum Einsatz. Kein Landmesser - auch nicht vor 2000 Jahren - würde bei der Aufmessung eines Grundstücks oder bei der Absteckung eines einfachen Bauwerks so komplizierte und unhandliche Geräte wie die Pompeji-Groma oder Herons Dioptra einsetzen.

2.3. Direkte und indirekte Längenmessung

Die Längenmessung erfolgte im Altertum mit Seil, Latte und Kette, wobei die nur von Heron benannte Kette wahrscheinlich weniger benutzt wurde [18]. Nachmessungen an Großbauten des Altertums beweisen, daß die Baumeister mit geeichten Geräten eine Genauigkeit erreichten, die auf kontrolliertes Messen hinweist. Es wurde stets in der Waagrechten gemessen. Bei langen Strecken kamen Zählradeln, die bei Ausgrabungen in Pompeji gefunden wurden, für den Meßvorgang zum Einsatz [8]. Bei Messungen in unebenem Gelände wurde das Gerät horizontal gehalten und der nachfolgende Anlegepunkt durch Abloten bestimmt. In steilem Gelände kam das in Bild 31 dargestellte Staffelfverfahren zum Einsatz.

Bei in der Fluchtlinie vorhandenen Hindernissen (See, Fluß, Berg) ist die Längenmessung nur indirekt möglich: je nach örtlicher Gegebenheit durch Parallel-Absetzen oder mit Hilfe rechtwinkliger Hilfsdreiecke.

Bild 47 zeigt das einfachste Beispiel für das Parallel-Absetzen. Die Entfernung zwischen den Punkten A und B, die gegenseitig sichtbar, aber durch den See getrennt sind, ist zu bestimmen. Hierzu wird kurz vor und hinter dem See ein gleich langes Maß rechtwinklig in den Punkten A und B abgesteckt. Die Strecke E F ist gleichlang der nicht meßbaren Strecke C D.

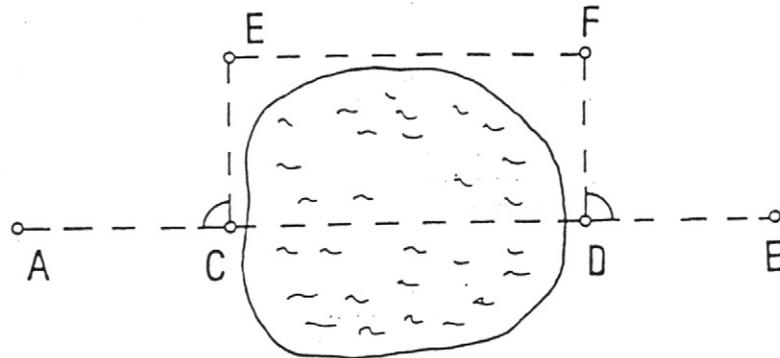
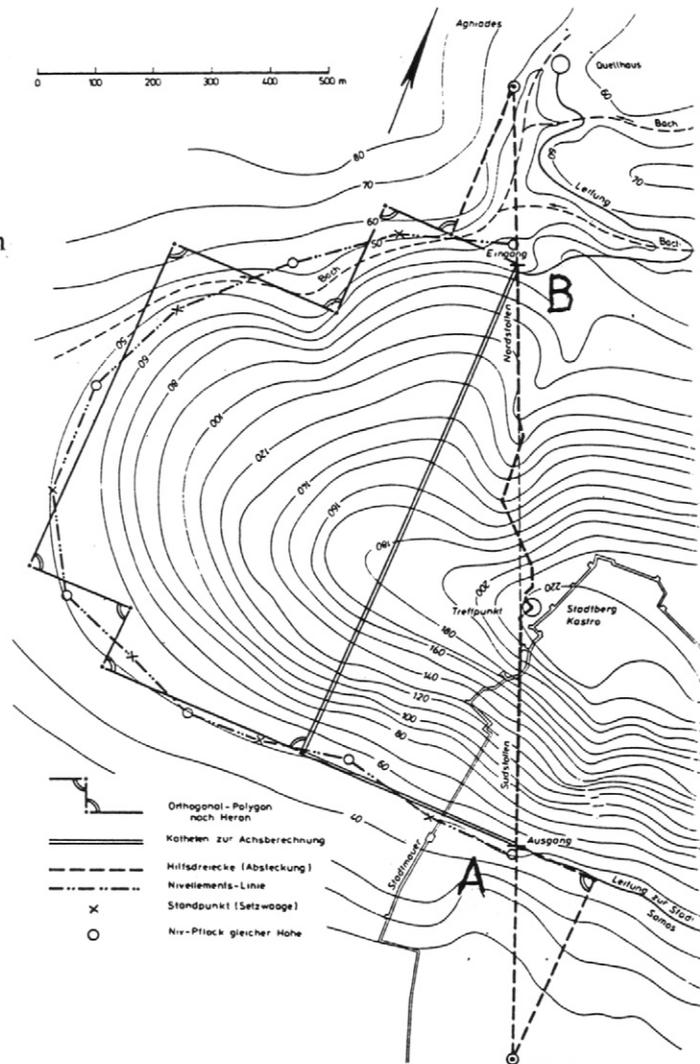


Bild 47
Indirekte Längenmessung durch Parallel-Absetzen

Die komplizierteste Aufgabe einer indirekten Längenmessung überliefert Heron im Abschnitt XV der „Dioptra“. Er löst sie mit Hilfe eines Rechtwinkel-Polygonzugs, den er von A nach B um den Berg legt (Bild 48). Dazu werden die Rechtwinkel mit der Dioptra abgesteckt und die Polygonseiten mit einer Kette gemessen. Durch Addition und Subtraktion der Seitenlängen ergeben sich die Katheten eines rechtwinkligen Dreiecks, in dem die nicht meßbare Tunnelachse die Hypotenuse bildet. Ihre Länge rechnet sich nach dem Lehrsatz des Pythagoras. Zusätzlich wird in der Aufgabe durch Absteckung von zwei dem großen Dreieck ähnlichen rechtwinkligen Hilfsdreiecken die Richtung für den zweiseitigen Vortrieb der Tunnelachse bestimmt [1], [19]. Ein einfacheres Verfahren zur Ermittlung der Achslänge ist durch die Absteckung des großen Dreiecks (Katheten) in ebenem Gelände gegeben. Ihre Länge (Hypotenuse) ergibt sich durch Messung. Auch für die Hilfsdreiecke ist keine Berechnung erforderlich, wenn ihre Absteckung z.B. mit dem zehnten Teil der beiden Kathetenlängen erfolgt.

Bild 48
Rechtwinkel-Polygonzug nach Heron
(Beispiel Samostunnel)



Ein weiteres Verfahren ist die Triangulation über einen Berg mit Hilfe von rechtwinkligen Dreiecken (Bild 49). Hierbei wird zuerst die Achse über den Berg gefluchtet und in der Achse ein Zielpunkt auf der Bergkuppe vermarktet. Auf der rechtwinklig zur Fluchtlinie (Achse) in den Punkten A und B gelegten Basis werden die beiden gut meßbaren Hilfsdreiecke abgesteckt, mit der Hypotenusenrichtung auf den Zielpunkt. Mit den gemessenen Seitenlängen errechnen sich aus Proportionen die Teilstrecken x und x_1 (= Achslänge).

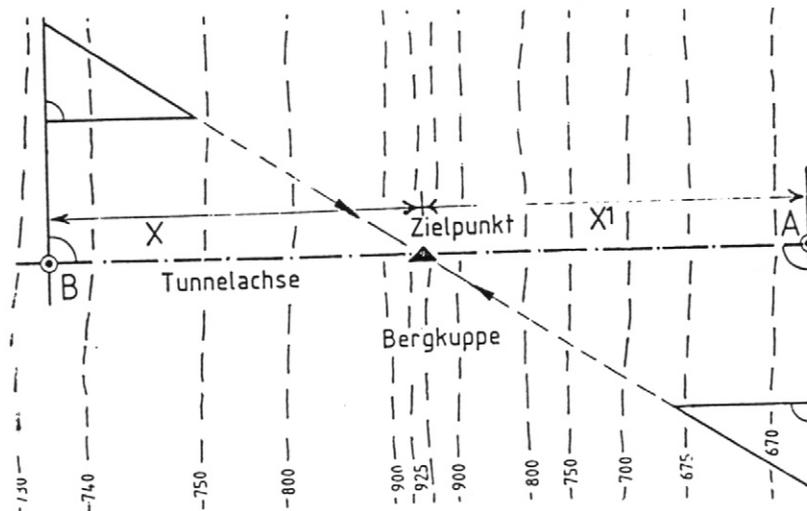


Bild 49
Bestimmung der Länge einer Tunnelachse
durch Absteckung von Hilfsdreiecken

Für die Bestimmung einer Berghöhe mißt man analog zur vorhergehenden Aufgabe durch Absteckung eines rechtwinkligen Hilfsdreiecks als Stabmessung von den Punkten A und B aus (vgl. Bild 49). Die Teilstrecken x und x_1 bilden jeweils die Basis, auf der die Hilfsdreiecke mit Hilfe von lotrecht gestellten Stäben in der Vertikalen konstruiert werden (vgl. Bild 33). Mit den Maßen der Hilfsdreiecke und den Längen der Teilstrecken errechnet sich die Höhe aus Proportionen. Das Mittel aus beiden Messungen ergibt die Berghöhe. Das Verfahren kann, wie Versuche ergaben, einen Höhenfehler von mehreren Metern aufweisen. Es ist daher für die Höhenfestlegung einer Tunnelachse nicht geeignet.

Die klassischen Verfahren für die Bestimmung einer unzugänglichen Entfernung mit Hilfe von rechtwinkligen Hilfsdreiecken wurden bereits im Zusammenhang mit den Stabmeßgeräten erwähnt (vgl. Bild 32).

2.4. Meßverfahren mit Stabmeßgeräten

Praktische Beispiele:

Zwei Aufgaben zeigen den Einsatz des Geräts mit fest am Längsstab angebrachtem Querstab (vgl. Bild 34, A und B). An vier Aufgaben wird der Meßvorgang mit auf dem Längsstab beweglichem Querstab (vgl. Bild 34, C) und mit dem Jakobsstab (vgl. Bild 34, D) dargestellt. Bei beiden Geräten

ist der Längsstab Träger der Längenskala. Für die Lösung der Aufgaben ist jeweils eine Strecke (Grundlinie) zu messen. Beim Meßvorgang werden mit den Geräten ähnliche, rechtwinklige Dreiecke hergestellt. Die gesuchte Strecke wird nach Proportionen unter Ansatz der gemessenen Strecke, der Querstablänge und den am Quer- oder Längsstab abgelesenen Maßen berechnet. Die Aufgaben zeigen den Idealfall. Der Querstab steht parallel zum Meßobjekt.

Messung einer Flußbreite durch Umsetzen des Geräts

Das zum Quadrat ergänzte Stabmeßgerät zeigt für Quer- und Längsstab gleiche Längen. Der Baum **Z** am gegenüberliegenden Ufer ist der Zielpunkt (Bild 50). In Punkt **P** wird zur gesuchten Strecke ein Rechtwinkel abgesteckt und die Grundlinie mit Fluchtstäben markiert. Das Gerät ist so aufzustellen, daß seine Grundseite mit der Grundlinie eine Flucht bildet. Dieser Vorgang ist so oft durchzuführen (Umsetzen), bis die Gerätediagonale mit dem Baum eine Gerade bildet. Die Länge auf der Grundlinie vom Gerätepunkt **A** bis zum Punkt **P** wird gemessen (z.B. 20,00 m). Sie entspricht der gesuchten Breite 20,00 m; denn

$$x : 20,00 = 0,50 : 0,50.$$

Soll mit dem Gerät eine Turmhöhe bestimmt werden, dann wird die Messung analog in der Vertikalen ausgeführt.

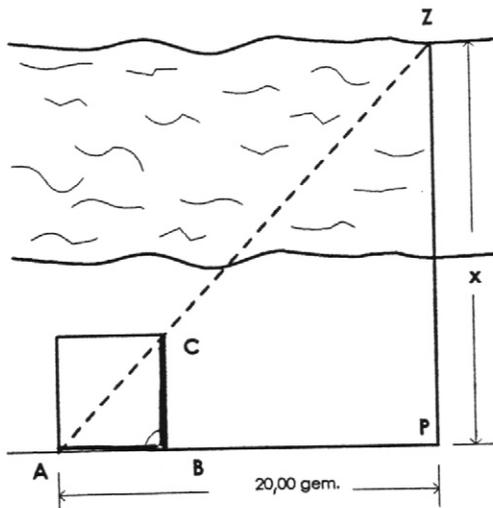


Bild 50

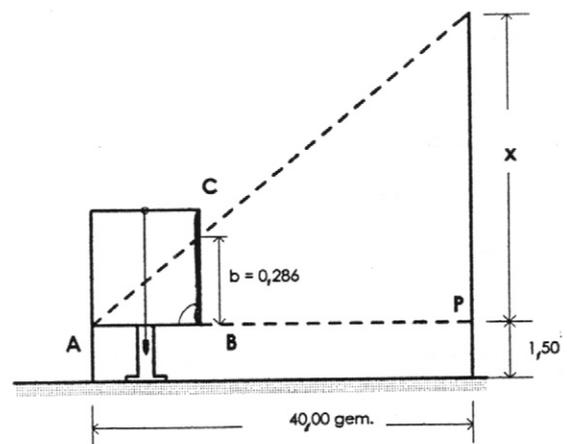


Bild 51

Messung einer Turmhöhe von einem Standpunkt

Das Gerät zeigt für Quer- und Längsstab gleiche Längen und auf dem Querstab eine Längenskala. Beim Meßvorgang wird vom Gerätepunkt **A** aus in Richtung Turmspitze eine Zielnadel auf der Skala einvisiert und die Länge b ($= 0,286$ m) abgelesen (Bild 51). Mit der gemessenen Strecke ($x = 40,00$ m) errechnet sich die Teilhöhe aus

$$x : 40,00 = 0,286 : 0,50; \quad x = 22,88 \text{ m.}$$

Durch Fluchten über die Grundseite des Geräts wird der Punkt **P** am Turm bestimmt. Die Turmhöhe ergibt sich mit $22,88 + 1,50 = 24,38$ m.

Messung einer Turmhöhe von einem Standpunkt mit beweglichem Querstab

Im Unterschied zur vorhergehenden Aufgabe ist nicht der Quer-, sondern der Längsstab Träger der Längenskala. Vom Gerätepunkt **A** aus wird der bewegliche Querstab auf die Turmspitze eingeregnet (Bild 52). Die Ablesung auf der Skala zeigt $0,80$ m. Mit der gemessenen Strecke ($= 40,00$ m) errechnet sich die Teilhöhe.

$$x : 40,00 = 0,50 : 0,80; \quad x = 25,00 \text{ m.}$$

Durch Fluchten über den Längsstab wird der Punkt **P** am Turm bestimmt. Die Turmhöhe ergibt sich mit $25,00 + 1,50 = 26,50$ m.

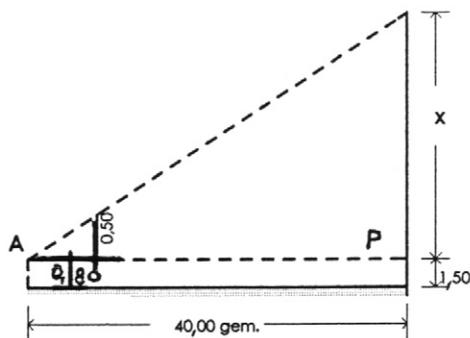


Bild 52

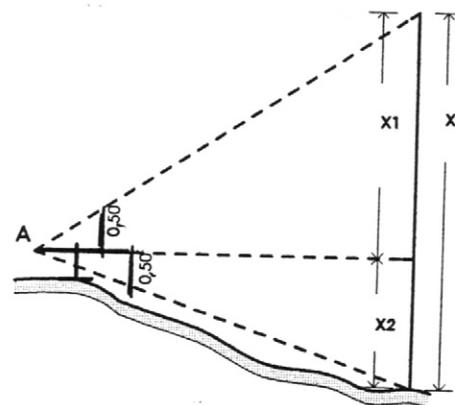


Bild 53

Bild 53 zeigt die Durchführung der Aufgabe von einem erhöhten Standpunkt. Es sind zwei Meßvorgänge erforderlich. Zunächst wird die Teilhöhe (x_1) nach oben und dann (Drehung des Geräts am Stativ um 180°) die Teilhöhe (x_2) nach unten bestimmt. Die Turmhöhe x ergibt sich aus $x_1 + x_2$. Die Messung ist, wenn es die Geländebeschaffenheit bedingt, auch mit längeren oder kürzeren Querstäben möglich.

Messung einer Turmhöhe von zwei Standpunkten

Das Gerät steht auf beiden Standpunkten in gleicher Höhe. Vom Gerätepunkt **B** aus wird im ersten Meßvorgang der Querstab auf die Turmspitze einvisiert (Bild 54). Das Ablesemaß auf dem Längsstab zeigt 0,70 m. Dann analog vom Gerätepunkt **A**: Das Ablesemaß beträgt 1,10 m. Mit der gemessenen Strecke = 20,00 m, der Querstabkonstanten und der Differenz zwischen den beiden Längsstabablesungen (1,10 – 0,70 = 0,40 m) errechnet sich die Teilhöhe

$$x = 20,00 \cdot 0,50 : (1,10 - 0,70); x = 25,00 \text{ m.}$$

Durch Visieren über die Längsstäbe wird der Punkt **P** am Turm bestimmt. Die Turmhöhe ist $25,00 + 1,70 = 26,70$ m. Die Rechenformel resultiert aus der Auflösung einer Gleichung mit zwei Unbekannten.

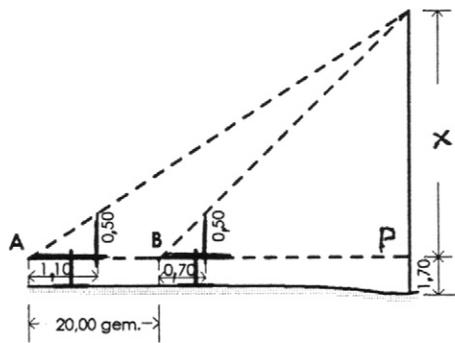


Bild 54

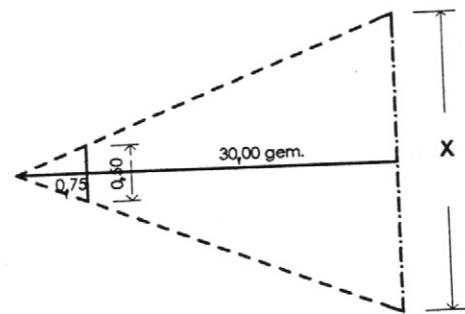


Bild 55

Messung einer waagrechten Breite mit dem Jakobsstab von einem Standpunkt

Die exakte Messung ist nur gewährleistet, wenn das auf einem Stativ befestigte Gerät mittig zum Objekt steht. Beim Meßvorgang wird der bewegliche Querstab, der eine Parallele mit der waagrechten Breite bildet, auf deren Endpunkte einvisiert und das sich daraus ergebene Maß auf der Skala des Längsstabs (Gradstock) abgelesen (Bild 55). Die waagrechte Breite rechnet sich nach Proportionen unter Ansatz der gemessenen Strecke vom Gerätestandpunkt zur Breite, der Querstablänge (Konstante) und dem Ablesemaß.

$$x : 30,00 = 0,50 : 0,75; x = 20,00 \text{ m.}$$

Bild 80 zeigt den Meßvorgang von zwei Standpunkten aus. Die Aufgabe ist vielfach in der Literatur der Renaissance dargestellt. Die Durchführung und Berechnung wie zu Bild 54 beschrieben [15].

In den vorhergehenden Aufgaben steht der Querstab immer parallel zum Meßobjekt (Idealfall). Im Schrifttum der Renaissance zeigen sie in den meisten Fällen keine Parallelstellung von Querstab und Meßobjekt. Das bedeutet: Die Meßergebnisse ergeben Näherungswerte, die je nach Situation oder Topographie mehr oder weniger genau sind. Die Fehleruntersuchung in 3.2. enthält entsprechende Angaben.

2.5. Absteckung mit großen Lehren (Schablonen) und schweren Loten

Untersucht man die Absteckung der ägyptischen Pyramiden, die der gewaltigen Kuppel des Pantheons in Rom und die der von tiefen Senkrechtschächten aus vorgetriebenen Tunnelstollen, dann ist erkennbar, daß hierfür neben den vorhergehend aufgeführten noch spezielle auf das jeweilige Bauwerk bezogene Absteckverfahren zum Einsatz kamen.

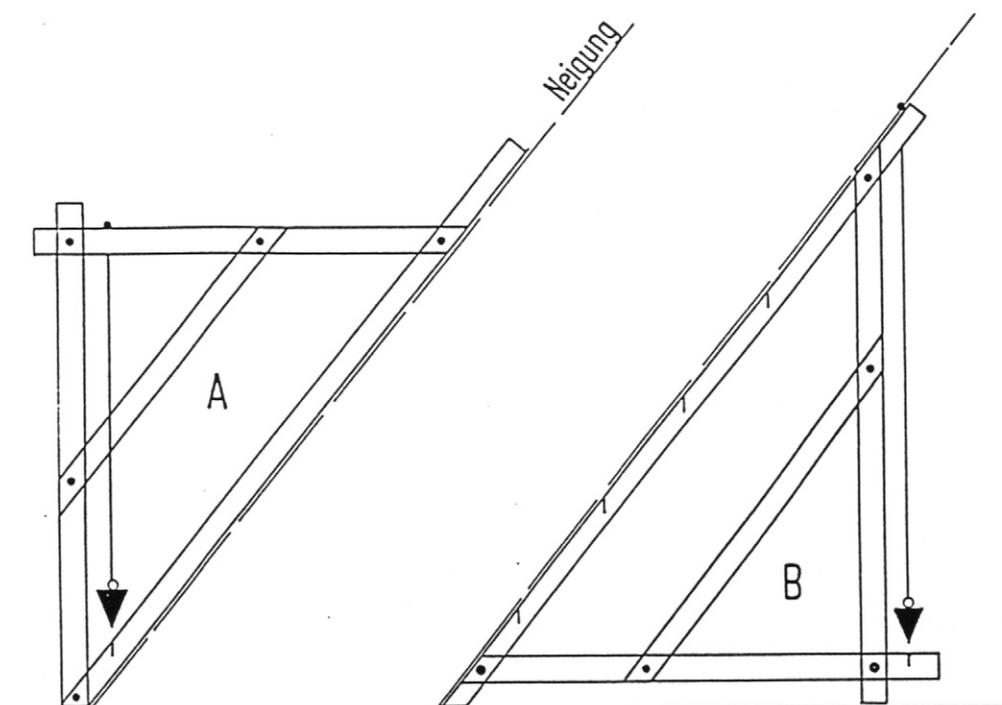


Bild 56

Konstruktion der Außen- und Innenlehre am Querschnitt 1:1. A = Außen- und B = Innenlehre. Die Außenlehre entspricht der Rücksprungberechnung der im Papyrus Rhind überlieferten Pyramidenaufgabe.

Bei den Pyramiden gilt das für den Einbau der Seitenneigung, wenn sie, wie vielfach angenommen, mit Hilfe von Holzlehren erfolgte [5], [25]. Für den Bau der Innen- und Außenlehren wurde der Querschnitt der Pyramide im Maßstab 1 : 1 in der Waagrechten abgesteckt und angerissen. Damit war die Grundlage für die Konstruktion der Lehren am Querschnitt gegeben (Bild 56). Mit der Lotschnur waagrecht gestellt, bilden ihre Hypothenusen die Seitenneigung der Pyramide. Der Quader einbau konnte problemlos erfolgen (Bild 57). Mit übergroßen Lehren (30 bis 40 m Höhe) war es möglich, die Neigung durch Fluchten bis zur Spitze einzubauen. Für sporadische Prüfungen der Neigung war das Staffelfverfahren geeignet (vgl. Bild 31). Die erforderlichen Maße - Höhe und Länge des zu prüfenden Punkts - lagen durch Absteckung und Messung im Querschnitt vor.

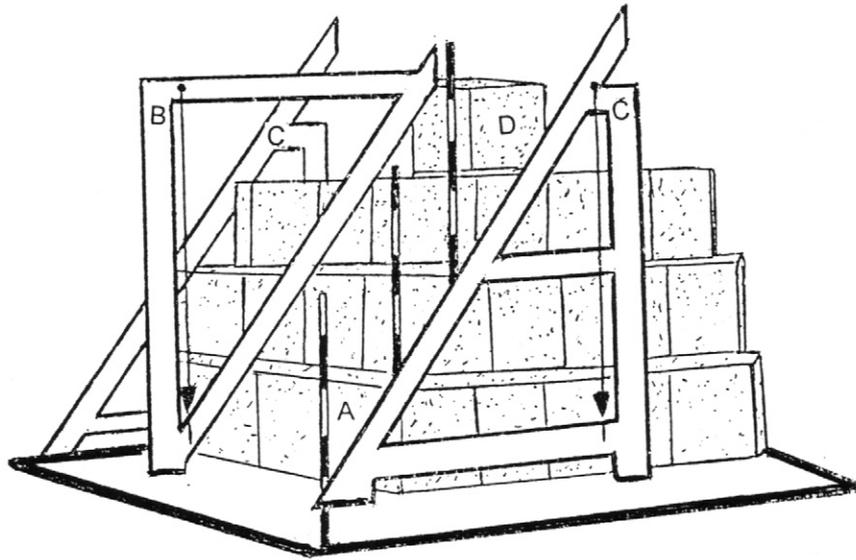


Bild 57

Absteckvorgänge an einer Pyramidenecke: A = Richtung der Seitenkanten (Fluchtstäbe), B = Außen- und C = Innenlehre, D = Eckquader der vierten Stufenschicht

Das Pantheon, von 115 bis 125 n. Chr. unter Kaiser Hadrian gebaut, ist nicht nur das einzige noch vollständig erhaltene Bauwerk des alten Roms, sondern auch der größte Rund- und Kuppelbau der Antike. Die geometrische Grundlage bilden ein Horizontal- und Vertikalkreis mit jeweils einem Durchmesser von 43,30 m für den Innenraum des Bauwerks (Bilder 58 und 59). Für Absteckung und Bauausführung ist das Pantheon sicherlich eines der kompliziertesten Bauwerke der Antike. Das gilt besonders für die gewaltige Kuppel. Für die Absteckung des Grundrisses und für das Hochziehen der Ringmauern war die Schnur das Meßgerät. Fast alle in Bild 5 dargestellten Meßverfahren kamen dabei zum Einsatz.

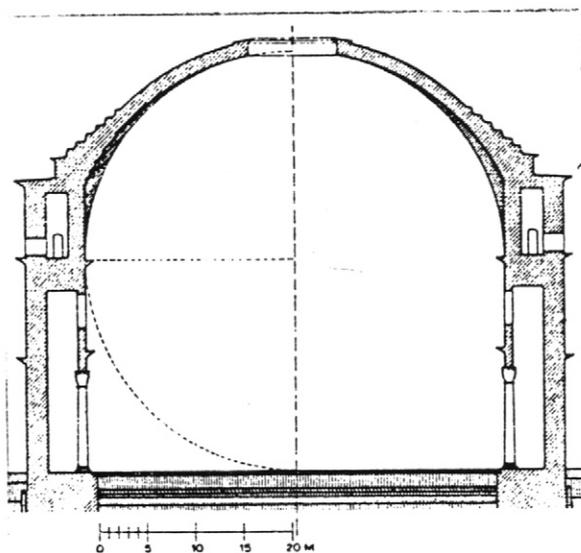


Bild 58
Querschnitt des Pantheons
mit Vertikalkreis

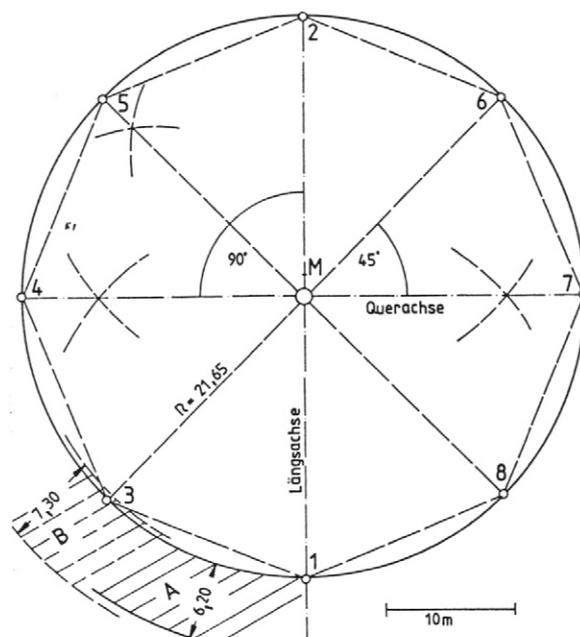


Bild 59
Absteckung des Grundrisses: A = Kreisring aufgehendes Mauerwerk, B = Kreisring Fundament, 1 = Eingang, 2 = Haupt- und 3 bis 8 = Seitennischen

Der Bau der Kuppel stellte große Anforderungen an das Können der Baumeister. Das Konstruktionschema der Kuppel zeigt 14 halbkreisförmige Längsrippen, die in der Vertikalen als tragende Schalung abzustecken und zu bauen waren. Wie lösten die Baumeister dieses Problem? Die Untersuchung läßt nur eine Möglichkeit erkennen - die Absteckung in der Vertikalen. Sie war nur mit Hilfe von Bogenlehren möglich, die auch die tragende Schalung für die Bauausführung waren [26]. Die Konstruktion und der Bau der Lehren erfolgte an einem in der Waagrechten abgesteckten Viertelkreis (Bild 60). In der Kuppelmitte befindet sich ein offener Druckring (Kalotte). Er bedingt für den Kuppelbau ein Traggerüst (Längsrippen) von 28 Viertelkreisen mit jeweils zwei Bogenlehren. Die Absteckung der Längsrippen war nur indirekt möglich. Die Handwerker bauten zunächst ein Stützgerüst aus senkrechten Baumstämmen und waagrechten Arbeitsplattformen bis zur Kuppelspitze hoch (Bild 61). Damit war die Basis geschaffen, die Absteckpunkte für den Einbau der Bogenlehren von der Grundfläche aus auf das Stützgerüst zu übertragen. Die dazu notwendigen Längen- und Höhenmaße ergaben sich aus der Konstruktion der Lehren am Viertelkreis (Bild 60). Nach Prüfung der Absteckung und der Tragfähigkeit der Schalung wurden die Bogenlehren eingebaut (Bild 61). Die Übertragung der Absteckpunkte für die Bogenlehren in der Vertikalen und das Hochziehen der Ringmauer war nur mit schweren Loten durchzuführen.

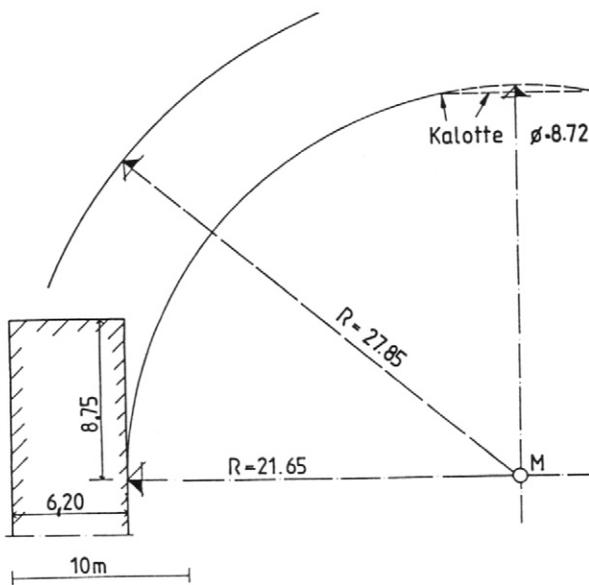


Bild 60
Der in der Waagrechten abgesteckte Viertelkreis als Grundlage für die Konstruktion der Kuppellehren

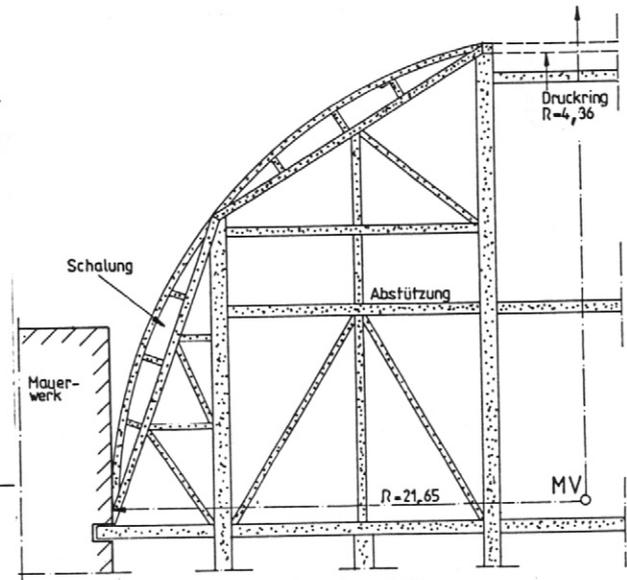


Bild 61
Querschnitt der Kuppel mit Verschalung und Abstützung für eine Längsrippe

Ein Beispiel für den Einsatz des Lots ist auch der Tunnelbau, wenn der Stollen von tiefen Senkrechtschächten aus vorgetrieben wird. Sowohl die Einhaltung der Senkrechten beim Schachtbau als auch die Übertragung der Vortriebsrichtung vom Gelände auf die Schachtsohle war nur mit schweren Loten möglich [16], [27].

Bild 62 zeigt ein Teilstück des unter Kaiser Claudius von 41 bis 54 n.Chr. gebauten Tunnels, der seinen Namen trägt. Mit fast 6 km Länge und mehr als 30 Senkrecht- und Schrägschächten stellte er große Anforderungen an das Können der Baumeister. Das gilt besonders für den Abschnitt unter dem Monte Salviano. Von zwei Senkrechtschächten aus vorgetrieben, enthält er auch mehrere Schrägschächte, die der Luftzufuhr und dem Abtransport des ausgebrochenen Gesteins dienten. Für den Stollenvortrieb wurde die im Gelände abgesteckte Trasse durch Abloten auf den Boden der Senkrechtschächte (Größe = 4 m x 4 m) übertragen. Damit lag auf einer Länge von knapp 4 m die Vortriebsrichtung fest (Bild 63).

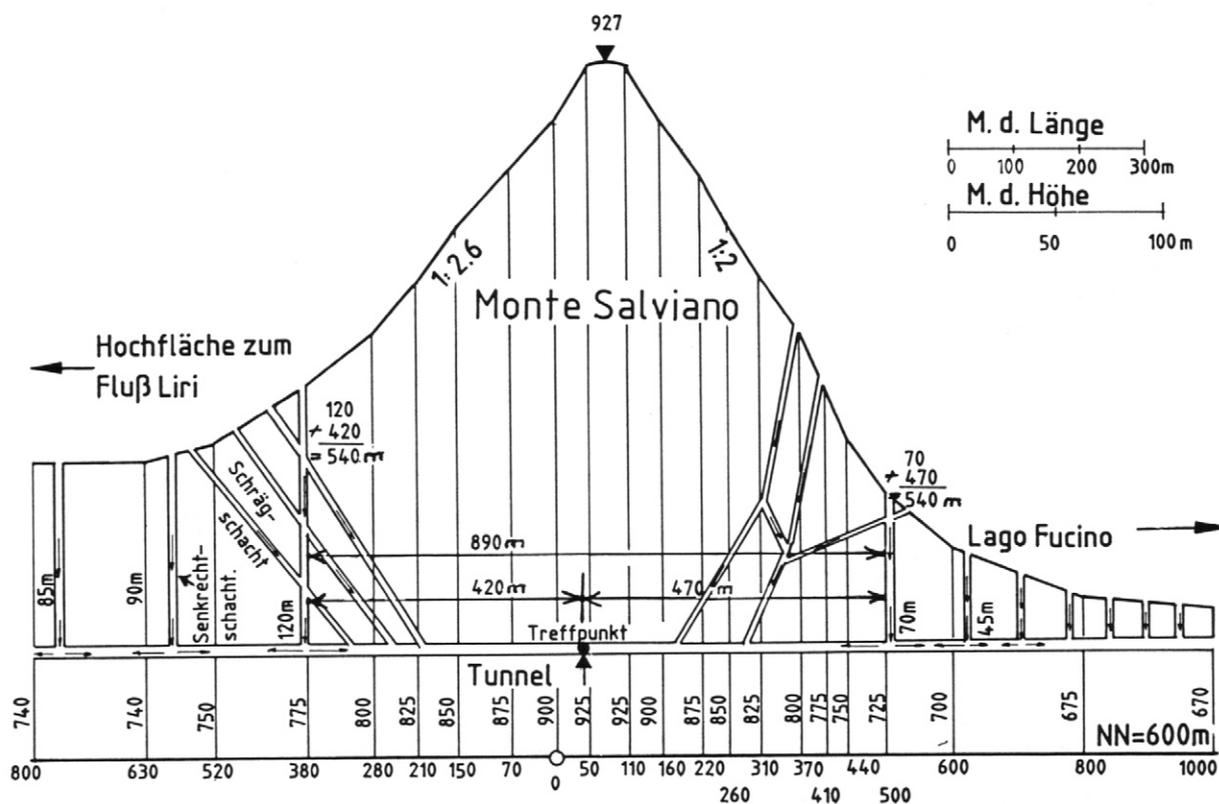


Bild 62
Planungsschema des Tunnels unter dem Monte Salviano

Zeitzeugen berichten über den Claudiustunnel

„Um den Lago Fucino zu entwässern, wurde der Berg (Monte Salviano) mit einem unbeschreiblichen Aufwand an Kosten und Arbeit zum Fluß (Liri) hin - Zusammenleitung der Wassermassen - durchschlagen. Das Vorhaben beanspruchte viele Jahre, da der Felsen in der Dunkelheit des Berges ausgehauen und das zerhauene Gestein an die Oberfläche geschafft werden mußte. Eine Arbeit, die nur von denen richtig erfaßt werden kann, die das Werk mit eigenen Augen gesehen haben. Es ist so gewaltig, daß die menschliche Sprache nicht ausreicht, es zu beschreiben.“

(Plinius, Nat.Hist. XXXVI, 124).

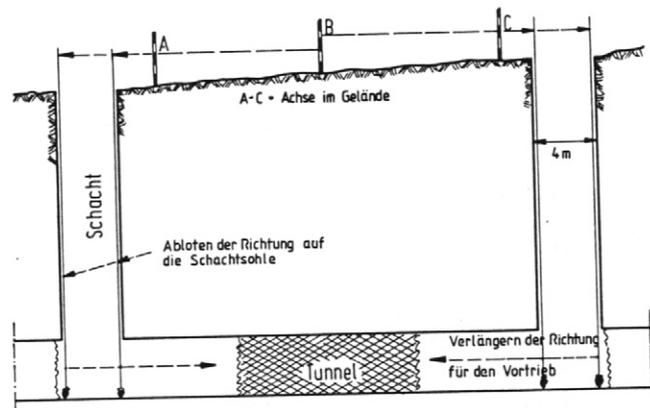
„Der Berg wurde auf einer Länge von dreitausend Doppelschritten teils durchgraben, teils durchgehauen, und so brachte er (Claudius) mit Mühe und erst nach Verlauf von elf Jahren den Tunnel zustande, obwohl fortwährend volle dreißigtausend Menschen ohne Unterbrechung bei der Arbeit beschäftigt waren.“

(Sueton: De vita Caesarum. Claudius 20)

„Um die Großartigkeit dieses Werkes recht vielen vor Augen zu führen, wurde auf dem See ein Schiffskampf ausgeführt. Dazu rüstete Claudius Drei- und Vierruderer mit 19.000 Mann Besatzung aus.“

(Tacitus: Annales 56)

Bild 63
Richtungsübertragung für den
Stollenvortrieb von einem
Senkrechtschacht aus



Schwieriger war die Angabe der Richtung und Höhe für den Bau der Schrägschächte. Die Richtung ergab sich durch Fluchten der im Gelände abgesteckten Trasse in den Schacht. Die Höhe konnte mit einem Staffelmessgerät, das die geplante Schachtneigung enthält, in den Schacht übertragen werden. Bild 64 verdeutlicht das Planungsschema und den Absteckvorgang für beide Verfahren.

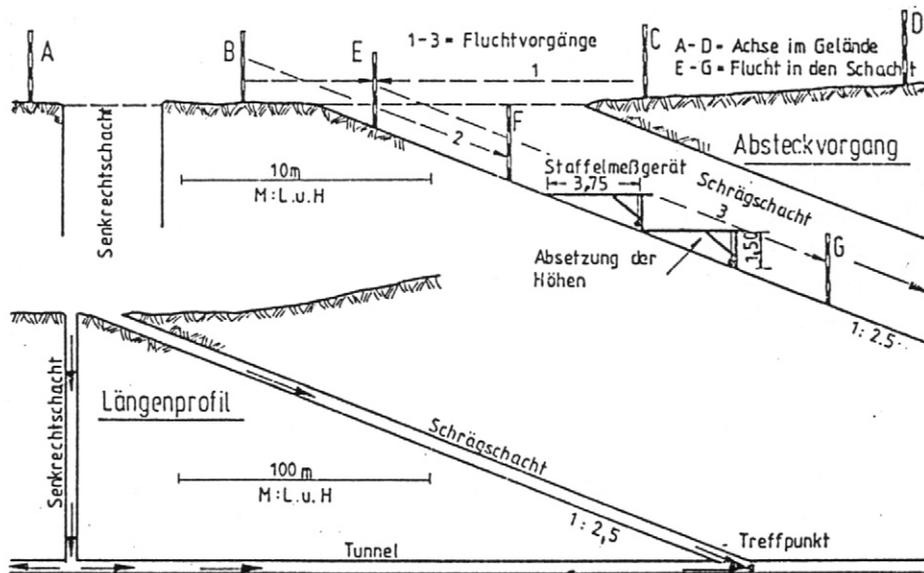


Bild 64
Planung eines Schrägschachts und die Verfahren,
den Schacht nach Richtung und Höhe vorzutreiben

2.6. Nivellements

Die klassischen Nivellements umfaßten im Altertum die Aufnahme von Längs- und Querprofilen, Flächennivellements sowie die Absteckung und Prüfung von Bauhöhen. Diese Grundaufgaben waren mit Längsprofilen zu lösen, da die damaligen Nivelliergeräte beim Visiervorgang nur einen geringen seitlichen Spielraum zuließen. Es ist jedoch vorstellbar, daß Sonderkonstruktionen bedeutender Mechaniker (z.B. Heron und Theodoros) eine Drehung des Geräts um seine Achse ermöglichten.

Neben diesen Verfahren ist für die Höhenmessung langer Strecken (Kanalbauten) und großflächiger Anlagen (Pyramiden) der Einsatz von mit Wasser gefüllten trogförmigen Holz- und Tonrohrleitungen bekannt. Bei Messungen an extrem steilen Hängen kam das Staffelverfahren zum Einsatz.

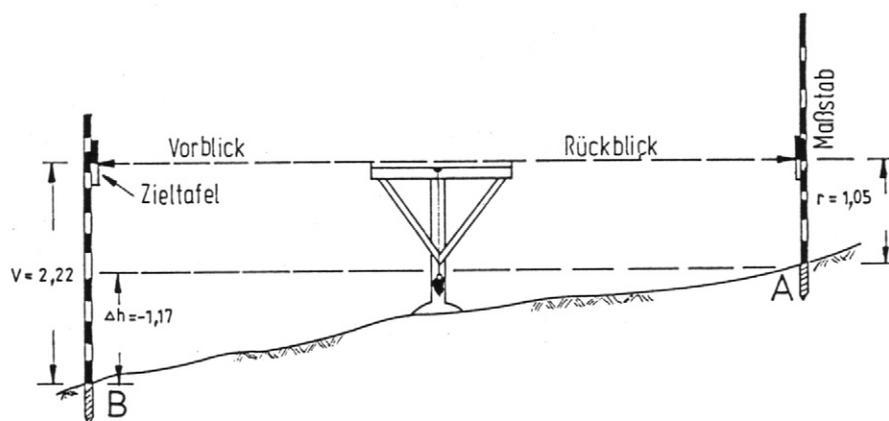


Bild 65
Der Nivelliervorgang

Der Nivelliervorgang

Beim Nivellieren (Feststellung von Höhenunterschieden) wird am Gerät eine genau horizontale Ziellinie hergestellt, an der man durch Ablesung an Höhenmaßstäben (Nivellierlatten), die senkrecht auf den Meßpunkten stehen, den Höhenunterschied zwischen zwei Punkten bestimmt [3].

Das senkrecht am Stativ befestigte Gerät wird aufgestellt und justiert, bis das Lot auf der Kerbmarke einspielt (Bild 65). Es steht in der Waage. Über die Gerätediopter Einvisieren der Zieltafel an der Nivellierlatte im Punkt A (R= Rückblick). Ablesung der Höhe an der Latte. Umsetzen der Latte auf den Punkt B, den Meßvorgang durchführen. Die Ablesung ist der Vorblick (V).

Der Höhenunterschied (Δh) zwischen beiden Punkten rechnet sich aus $R - V$ (= Rückblick - Vorblick) = 1,17 m. Die „NN-Höhe“ des Punkts B ist $100,00 - 1,17 = 98,83$ m. Zur Ausschaltung des Geräte- und Meßfehlers wird das Gerät um 180° gedreht und der Meßvorgang wiederholt. Das Mittel aus beiden Messungen ergibt den Höhenunterschied zwischen den Punkten A und B..

Heron ist der einzige Autor aus der Antike, der die Ausführung eines Längennivellements überliefert (VI. Abschn. der „Dioptra“). Neben der Kanalwaage kommen dabei zwei Nivellierlatten zum Einsatz. Nach Aufstellung der Kanalwaage visiert der Beobachter durch zwei Schlitzdiopter die Zielscheibe der ersten Nivellierlatte ein. Die Rückwärtsablesung (Abstieg) geschieht am seitlich angebrachten Maßstab der Latte. Der Beobachter geht um das Gerät und visiert die Zielscheibe der zweiten Nivellierlatte ein (Bild 66). Er erhält die Vorwärtsablesung (Aufstieg). Die Ablesungen für Ab- und Aufstieg werden auf einer Schreiftafel notiert. Die zweite Latte wird gedreht, die Kanalwaage umgesetzt und der Rückwärtsblick ausgeführt. In dieser Form wird das Nivellement bis zum Endpunkt durchgeführt. Die Differenz der beiden Summen von Ab- und Aufstieg ergibt den Höhenunterschied zwischen dem Anfangs- und Endpunkt des Nivellements. Für den Bau einer Straße oder einer Wasserleitung sind mehrere Zwischenpunkte erforderlich, die aus in der Achse gesetzten Vermarkungssteinen bestehen. Sie werden in das Nivellement - ggf. als Wechsellpunkte - einbezogen [1].

Nach Auftragen des Längenprofils und Festlegung der neuen Trasse ermittelt Heron die Sollhöhen der Zwischenpunkte. Sie werden an den Vermarkungssteinen festgelegt, „... damit die Arbeiter in keinem Punkt irren können“. Ausgrabungen an Wasserleitungen der Antike bestätigen Herons Angaben.

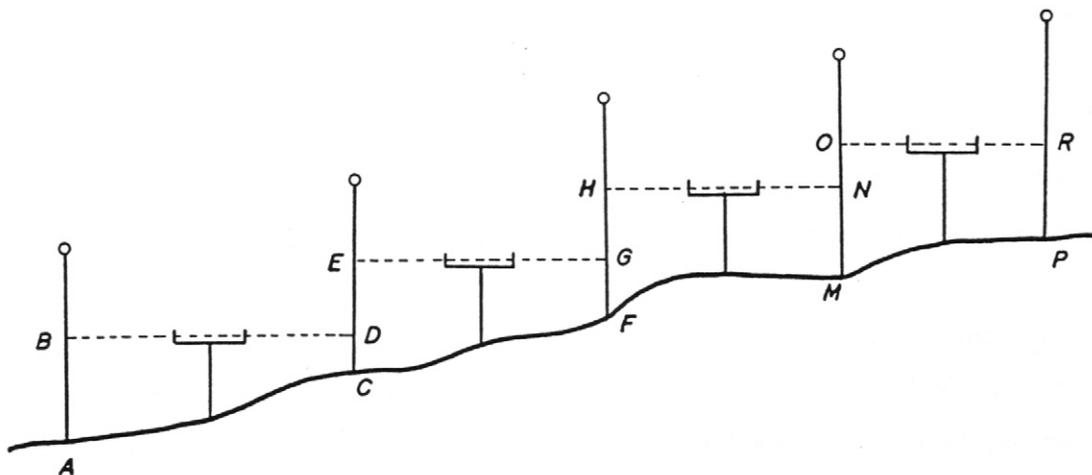


Bild 66
Nivellement nach Heron

2.7. Höhenmessung mit stehendem Wasser

Stehendes Wasser liegt in der Waage, ein an einem Seil hängender Stein gibt die Senkrechte an, eine unter Spannung gehaltene Schnur bildet eine exakte Gerade: das sind Erkenntnisse, die am Beginn der Technikgeschichte stehen. Schon die Pyramidenbauer könnten die Höhenmessung für das Verlegen des Grundsteinpflasters mit Hilfe von in trogförmigen Leitungen stehendem Wasser ausgeführt haben [5]. Besonders geeignet ist das Verfahren für die Höhenbestimmung längerer Strecken, wie sie z.B. beim Kanalbau gegeben sind. In den aus dem Altertum überlieferten Schriften finden sich hierzu keine konkreten Angaben, aber einige Hinweise deuten auf dieses Verfahren hin.

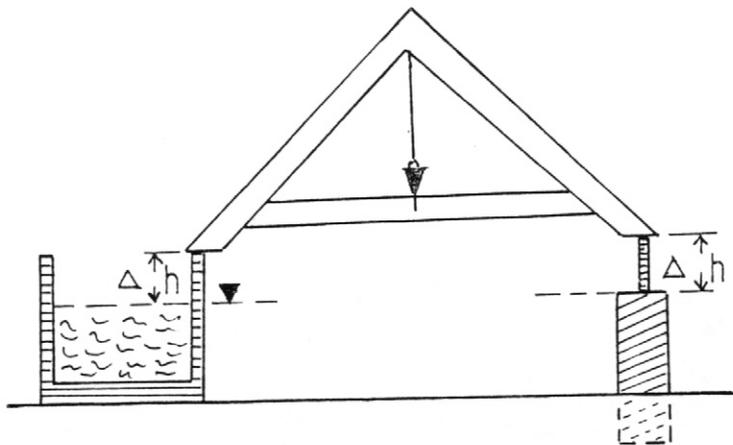


Bild 67
Höhenübertragung
mit der Setzwaage

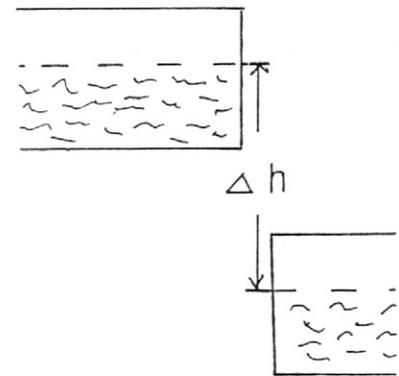


Bild 68
Höhenmessung mit einer
offenen Wasserleitung

Beim Meßvorgang wird die Leitung in ebenem Gelände verlegt. Die Feinhorizontalisierung erfolgt mit Steinen und Holzkeilen. Läuft das Wasser in der an den Enden geschlossenen Leitung nicht über, ist die Waagrechte hergestellt. Mit der Setzwaage wird die Wasserhöhe in der Leitung auf Höhensteine oder Pflöcke übertragen (Bild 67). Ist die Leitung wegen der Geländebeschaffenheit höher oder tiefer zu verlegen, muß der sich daraus ergebende Höhenunterschied (Δh) notiert werden (Bild 68). Mit diesem Verfahren läßt sich ein längeres Nivellement gut durchführen.

2.8. Staffelmessung am Steilhang

Eine Beschreibung des Verfahrens findet sich in den Schriften der römischen Agrimensoren [7]. Die Staffelmessung wurde eingesetzt, um die Größe eines Grundstücks in Hanglage zu bestimmen. Die Planung und der Bau von Brücken, Tunnel und Aquädukten ist ohne eine Staffelmessung (Länge und Höhe der Trasse), die eine große Genauigkeit verlangt, nicht möglich (Bild 69).

Bild 70 zeigt die Staffelmessung für die Planung und den Bau einer Aquäduktbrücke. Dazu ist die genaue Aufnahme des Talprofils erforderlich. Wegen der steilen Talhänge kann es nicht als Nivellement mit den bisher untersuchten Geräten aufgenommen werden. Die Längen- und Höhenmessung ist nur als Staffelmessung möglich. Zur Ausschaltung des Gerätefehlers wird die Messung in zwei Lagen ausgeführt. Längen- und Höhenmessung könnten in einem Arbeitsgang erfolgen, wenn das Richtsicht mit einem Längenmaßstab versehen ist (vgl. Bild 31). Bei einem Talprofil kann die Staffelmessung (Höhe) geprüft und ausgeglichen werden, wenn mit einem Nivelliergerät der Höhenunterschied zwischen den Punkten A und B bestimmt wird (Bild 70).

Bild 69
Römischer Aquädukt
(Pont du Gard)

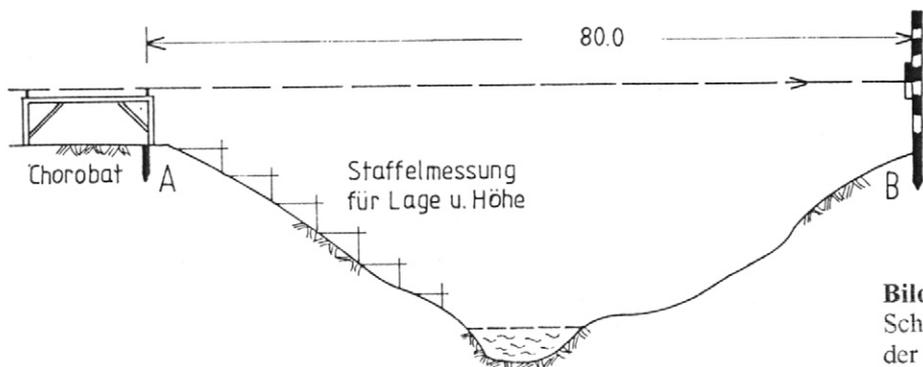
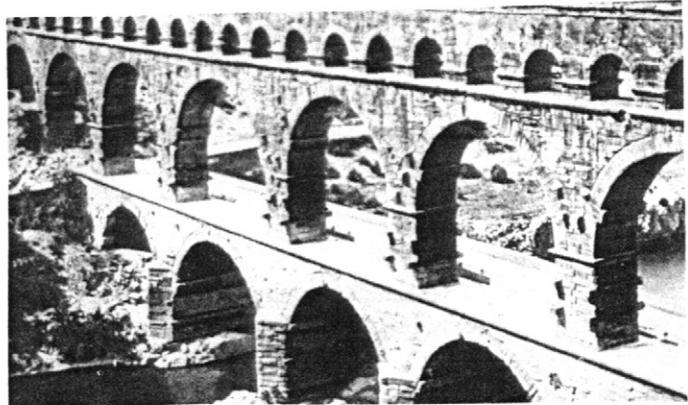


Bild 70
Schematische Darstellung
der Staffelmessung

3. Genauigkeit

„Das Experiment irrt nie, sondern es irren nur eure Urteile ...“

„... Und dieses ist die wahre Regel, wie die Erforscher der Wirkungen der Natur vorgehen müssen, und wenngleich die Natur mit der Ursache beginnt und mit dem Experiment endet, wir müssen den entgegengesetzten Weg verfolgen, d.h. beginnen, wie ich oben gesagt, mit dem Experiment und mit diesem die Ursache untersuchen.“

(Leonardo da Vinci)

„Bedenkt man eingehend die Menge an Wasser für den öffentlichen Bedarf, für Bäder, künstliche Teiche und Wassergräben, für Wohnhäuser, Gärten und Villen, bedenkt man die Entfernung von den Quellen, die Aquädukte, die durchtunnelten Berge und die Brücken über Täler, so wird man zugestehen, daß es auf dem ganzen Erdkreis nichts Bewundernswürdigeres gegeben hat.“

(Plinius d. Ältere)

3.0. Zur Meßgenauigkeit

Jede Messung enthält eine Ungenauigkeit, deren Größe von der Topographie, dem Bau der Geräte, dem eingesetzten Meßverfahren und dem Können des Messenden abhängt. Dies gilt auch für die Meßkunst des Altertums und führt zu der Frage: Wie genau wurde in dieser Epoche gemessen?

Aussagen hierzu sind besonders durch Nachmessungen an Großbauten möglich. Diese sind nicht nur ästhetische Zeugnisse alter Baukunst, sondern auch überlieferte Geometrie in Stein. Als stumme Zeitzeugen geben sie vielfach Auskunft über die Meßkunst der Erbauer, wenn sie neu vermessen werden. Meßdaten zeigen, wie genau abgesteckt wurde und geben - allerdings nur bedingt - auch Hinweise auf eingesetzte Geräte und Meßverfahren. Genauigkeitsuntersuchungen an vielen Bauwerken des Altertums ergeben drei allgemeine und grundlegende Erkenntnisse:

- Die Baumeister aller alten Hochkulturen - das gilt schon für die Erbauer der Pyramiden - waren in der Lage, mit einer erstaunlich großen Genauigkeit abzustecken und zu bauen.
- Genauigkeit ist der Maßstab für das Können der Baumeister und für die Qualität der eingesetzten Geräte und Meßverfahren.
- Genauigkeit war nur durch kontrolliertes Messen und mit geeichten Geräten zu erreichen.

Ein gutes Beispiel für die erreichte Absteckgenauigkeit ist die große Pyramide bei Giseh (Bilder 71 und 72). Bild 73 zeigt den Grundriß des Bauwerks mit den Daten der Neuvermessung, die der Archäologe Ludwig Borchardt mit englischen Landmessern durchführte [28]. Sie belegt, daß die ägyptischen Baumeister den Grundriß mit einer großen Genauigkeit absteckten. Das gilt auch für die Höhenlage des Grundsteinpflasters. Die größte Höhendifferenz zwischen den kontrollierten Punkten beträgt nur 20 mm. Die Rechtwinkel an der Westseite, von der aus wahrscheinlich die Absteckung des Pyramidenquadrats erfolgte, zeigen nur Fehler im Sekundenbereich. Die Ostseite wurde von den Endpunkten der Westseite durch Längenmessung der Süd- und der Nordseite bestimmt. Daraus resultiert zwangsläufig der größere Fehler ihrer Rechtwinkel.

Die Untersuchung der Seitenlängen belegt, daß die Baumeister in der Lage waren, Längenmessungen von über 200 m mit einer Fehlertoleranz von ± 10 cm durchzuführen [5].



Bild 71
Die große Pyramide bei Giseh

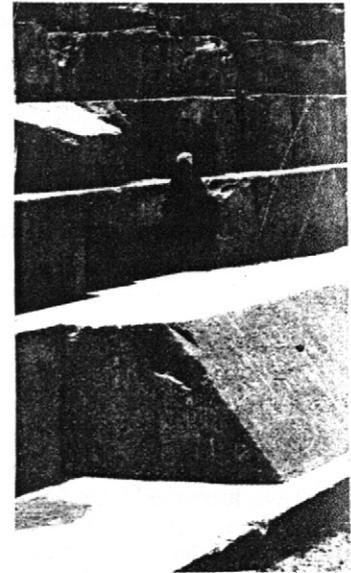


Bild 72
Das Grundsteinpflaster

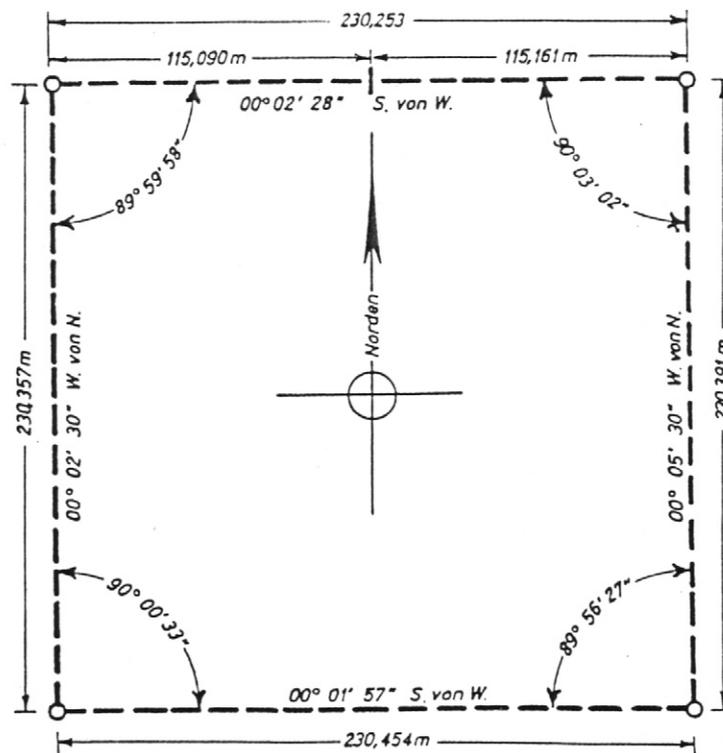


Bild 73
Grundriß der Pyramide mit
Daten nach Borchardt [28]

Es bleibt festzustellen, daß die Baumeister im Altertum Pyramiden und viele Großbauten mit großer Genauigkeit absteckten. Die Überlieferung enthält jedoch keine Angaben, welche Geräte und Meßverfahren bei der Absteckung eines bestimmten Bauwerks zum Einsatz kamen. Aussagen zu einzelnen Geräten und Meßverfahren sind daher nur durch Nachvollzug von Messungen mit Geräte-Nachbauten und durch rechnerische Untersuchungen unter Ansatz fiktiver Fehler möglich.

3.1. Untersuchungen zur Winkelmessung

Die Absteckung von Rechtwinkeln war schon im Altertum die Grundaufgabe in der Feldmessung und Bauwerksabsteckung. Die hierbei eingesetzten Geräte und Verfahren sowie Angaben über die Genauigkeit einiger Absteckungen sind in **1.** und **2.** unter dem Aspekt des kontrollierten Messens dargestellt und beschrieben (vgl. Bild 42). Nachzuweisen ist, ob diese Genauigkeit beim Nachvollzug von Absteckungen erreicht wird. Zielvorgabe war die Genauigkeit der Rechtwinkelabsteckung an der Westseite der großen Pyramide (Bild 73).

Die Absteckungen erfolgten in zwei Verfahren mit unterschiedlichen Geräten bei Zielweiten von 30,00 m (Bild 74). Der Genauigkeitssteigerung diente ein Zielgerüst, das mit seiner Oberkante der Gerätehöhe entsprach. Im ersten Verfahren erfolgte die Absteckung mit einem Winkelkreuz (Diopterabstand = 0,50 m) einseitig zur Grundlinie durch Doppelabsteckung in jeweils zwei Lagen zur Ausschaltung des Ziel- und Gerätefehlers (Bild 74 A). Das Zielgerüst zeigt die Meßpunkte mit den entsprechenden Daten aus den einzelnen Absteckvorgängen. Die Punkte a und b sind das Mittel (0,8 cm) aus beiden Absteckungen, Punkt 3 ist das Mittel aus a und b. Damit ist der Rechtwinkel abgesteckt.

Für das zweite Verfahren wurde ein Winkelkreuz mit einem Diopterabstand von nur 0,30 m benutzt. Die Absteckung erfolgte beidseitig zur Grundlinie (Bild 74 B). Im Unterschied zum ersten Verfahren wurde der Meßvorgang nur einmal in zwei Lagen ausgeführt. Den relativ großen Gerätefehler bedingt der geringe Diopterabstand. Durch Mittelbildung aus den Lagen I und II ergeben sich die Punkte 1 und 3, die im Idealfall mit dem Punkt 2 eine Gerade bilden. Die Prüfung der Absteckung – vom Punkt 1 aus den Punkt 2 (Gerätemitte) auf den Punkt 3 einfluchten – ergab eine Abweichung von 3 mm.

Eine fehlerfreie Messung ist nicht möglich. Beide Verfahren waren so angelegt, daß der Gerätefehler auf ein Minimum reduziert und ein größerer Anzielfehler erkennbar war. Der Messende konnte vor Ort entscheiden, ob die Absteckung den von ihm erwarteten Genauigkeitsanforderungen genügte. Im Zweifelsfall war die Messung erneut auszuführen. Die in den Verfahren erreichte Genauigkeit liegt etwa in dem Fehlerbereich, den auch die Winkelabsteckung an der Westseite der großen Pyramide aufweist.

In der Landmessung und bei kleineren Bauwerken waren für die Absteckung von Rechtwinkeln nicht die vorhergehend aufgezeigten Genauigkeitskriterien einzuhalten. Neben den speziellen Verfahren und Geräten (Bilder 7 bis 19) kam hierfür vielfach das schon im alten Ägypten eingesetzte Verfahren mit der Zwölfknotenschnur zum Einsatz (Bild 42 C).

Ob für die Prüfung der einfachen Absteckungen die „Pythagoras“-Kontrolle angewandt wurde, ist nicht zu belegen.

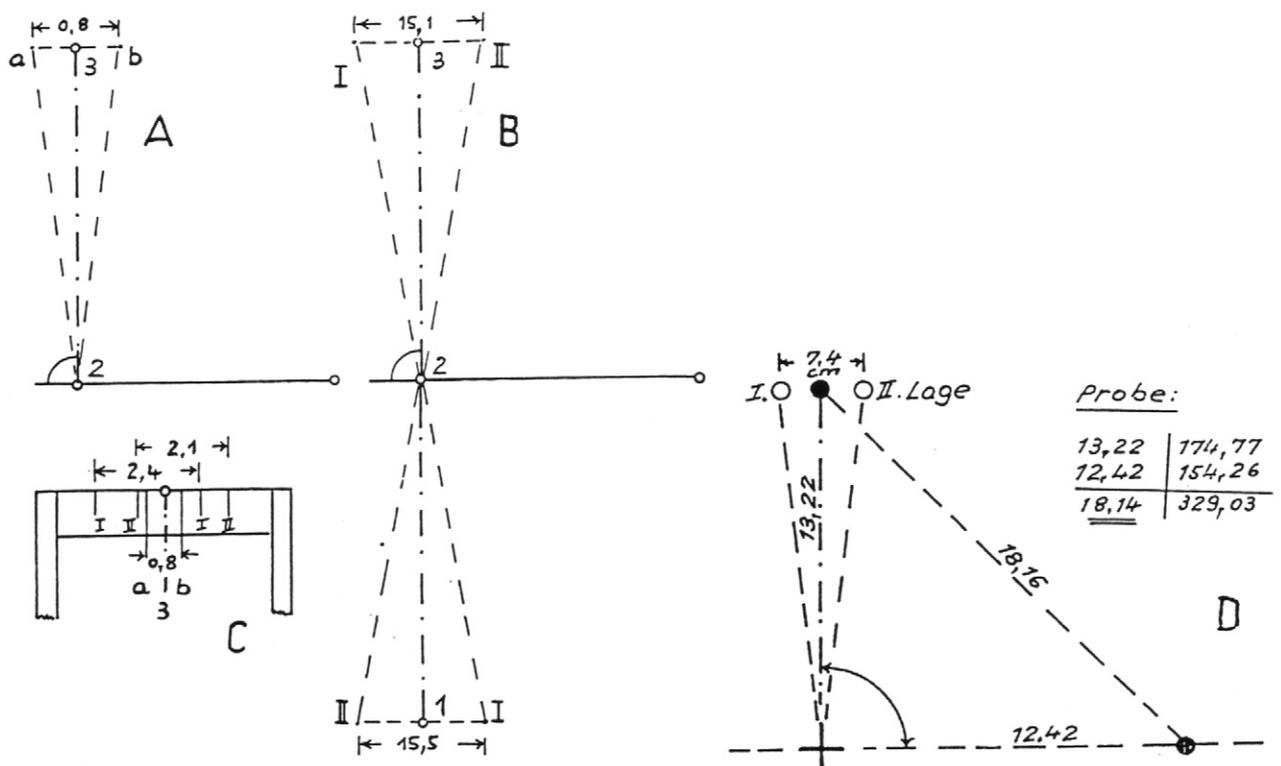


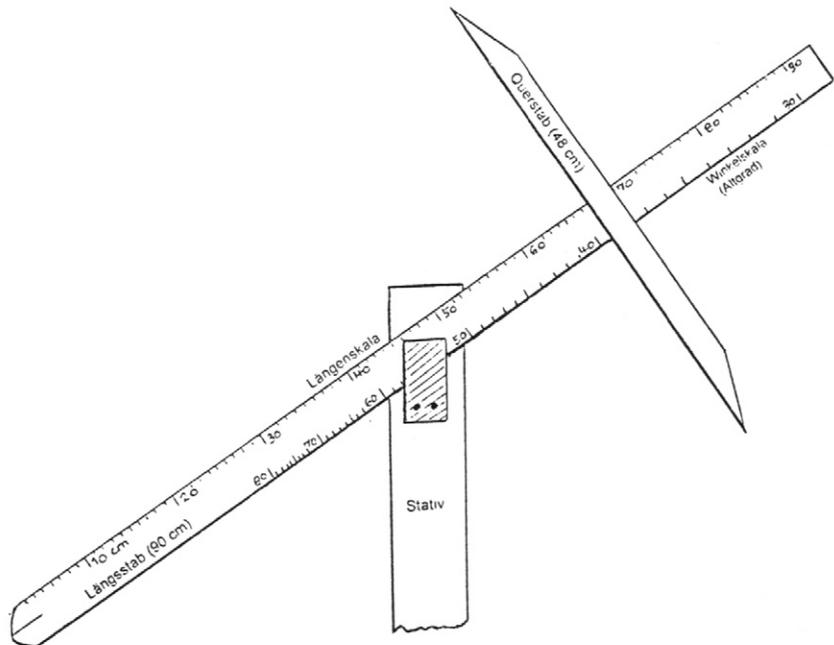
Bild 74

Rechtwinkelabsteckung: A = einseitige Absteckung,
 B = zweiseitige Absteckung, C = Zielgerüst,
 D = Absteckung mit dem Gerät aus Pfünz

In Bild 74 D ist das Ergebnis einer Rechtwinkelabsteckung mit dem Gerät aus Pfinz (Bild 12) dargestellt. Es wurde mit Lochdioptern visiert. Durch Absteckung in zwei Lagen konnte der relativ große Gerätefehler, wie die „Pythagoras“-Probe belegt, ausgeschaltet werden. Der Meßvorgang zeigt, daß auch bei einer einfachen Absteckung eine gute Genauigkeit erzielt wird.

Im Unterschied zur Rechtwinkelabsteckung sind über die bei der Messung spitzer Winkel erreichte Genauigkeit keine direkten Angaben möglich; denn es gibt hierzu aus dem Altertum weder nachmeßbare Großbauten noch schriftliche Hinweise, weil solche Messungen in den Bereich der Astronomie fallen [29]. Genauigkeitsaussagen sind daher nur durch Nachvollzug von Winkelmessungen möglich.

Bild 75
Jakobsstab-Nachbau



Die Auswertung der aus dem Altertum und der Renaissancezeit bekannten Schriften läßt für die Winkelmessung drei Geräte erkennen: Vollkreis, Viertelkreis (Geometrischer Quadrant) und Jakobsstab. Die Prüfmessungen wurden von einem festen Standpunkt aus durchgeführt; die nachgebauten Geräte waren dazu auf einem Stativ angebracht. Mit dem Jakobsstab, der besonders in der Renaissancezeit das Gerät für Winkelmessungen auf See war, wurde zusätzlich auch freistehend gemessen.

Der Ist-Winkel hat eine Größe von $36^{\circ} 52' 10''$.

Die Winkel wurden zur Genauigkeitssteigerung jeweils viermal gemessen. Die Ergebnisse ergeben im Mittel für den Vollkreis ($R = 0,25 \text{ m}$) $36^{\circ} 28'$, für den Viertelkreis ($R = 0,50 \text{ m}$) $36^{\circ} 41'$, für den Jakobsstab (Querstab = $0,48 \text{ m}$) bei der Messung mit Stativ $36^{\circ} 50'$ und bei der freihändigen Messung $37^{\circ} 07'$. Der Vergleich mit dem Istwert zeigt für den Jakobsstab bei der Messung mit Stativ das genaueste Ergebnis, für das wahrscheinlich seine größere Länge gegenüber den beiden Kreisgeräten der Grund ist. Über Gerätegrößen gibt es aus dem Altertum keine Hinweise. Erst von den „Arabern“ ist bekannt, daß sie zur Genauigkeitssteigerung bei astronomischen Messungen Geräte mit Radien bis zu 8 m einsetzten [30]. Bild 55 zeigt den Meßvorgang mit einem Jakobsstab, Bild 75 das nachgebaute Gerät.

Ein vom Verfasser entwickeltes „Universalgerät“ mit Voll- und Viertelkreis kann für die Absteckung von Winkeln mit 90° und 45° als Stabmeßgerät, als Geometrisches Quadrat und sogar als Nivelliergerät eingesetzt werden. Das einfach zu bauende Gerät ist - im Unterschied zu Herons Dioptra - besonders gut als Lehrmittel für den Geometrieunterricht geeignet. (Bild 76).

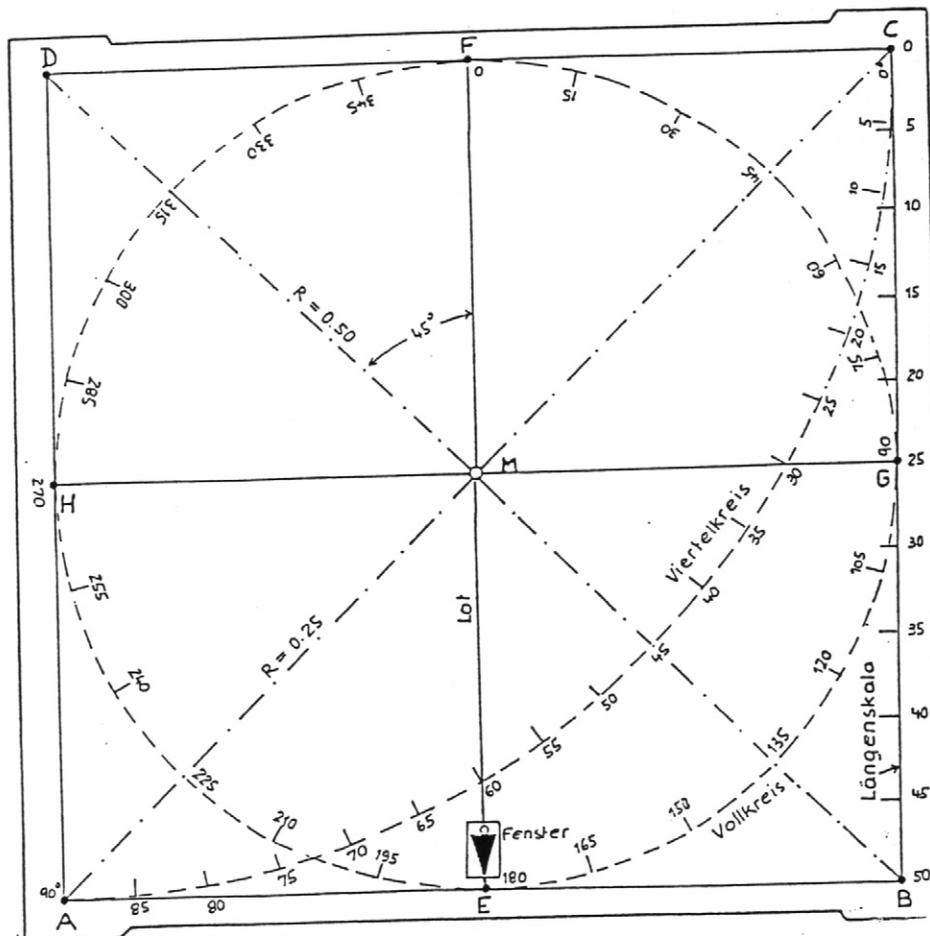


Bild 76
Zum „Universalgerät“ entwickeltes Geometrisches
Quadrat mit Voll- und Viertelkreis

3.2. Untersuchungen zu den Stabmeßgeräten

Die von den Griechen entwickelten Stabmeßgeräte nehmen in den Schriften der Renaissancezeit, besonders für die Bestimmung von Turmhöhen, einen breiten Raum ein. Die aufgeführten Aufgaben zeigen nur selten die technisch richtige Durchführung der Meßvorgänge mit paralleler Stellung des Querstabs zum Meßobjekt. Das bedeutet: Fehleruntersuchungen müssen für beide Stellungen erfolgen. Sie sind unter Ansatz fiktiver Fehler, mit rechnerischen Untersuchungen und durch Messungen möglich. In den durchgeführten Untersuchungen wird die Horizontalentfernung vom Gerät zum Turm mit 60,00 m, die Turmhöhe mit 31,60 m und die Länge des Querstabs mit 0,50 m angesetzt:

Bild 77 A zeigt den Meßvorgang für ein Stabmeßgerät mit einseitig und beweglich angebrachtem Querstab, der parallel zum Meßobjekt steht. Die Gerätehöhe (Gradstock) von 1,60 m wird durch Visieren an den Turm übertragen. Mit der verbleibenden Teilhöhe (Turm) von 30,00 m ergibt die Gradstockablesung 1,00 m. Für die Aussage, wie sich Geräte- und Visierfehler auf die Messung auswirken, erhält die Gradstockablesung jeweils einen fiktiven Fehler von -2mm und -5mm . Mit den sich daraus ergebenden Ablesemaßen von 0,998 m und 0,995 m errechnen sich die Teilhöhen des Turms mit 30,06 m und 30,15 m. Die Untersuchung ergibt, daß mit dem Gerät bei meßtechnisch richtigem Einsatz annehmbare Ergebnisse möglich sind.

Das gilt auch für Horizontalmessungen (Flußbreite), wenn das Gerät rechtwinklig zu der zu messenden Strecke aufgestellt ist (vgl. Bild 50). Für den Jakobsstab ist dies auch bei mittiger Aufstellung des Geräts zur Turmhöhe (15,80 m) oder zur waagrechten Breite gegeben (vgl. Bilder 55 und 77 B).

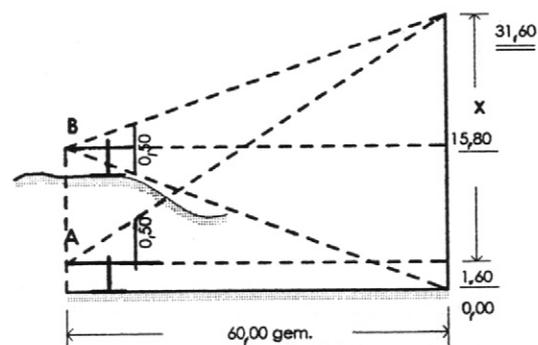
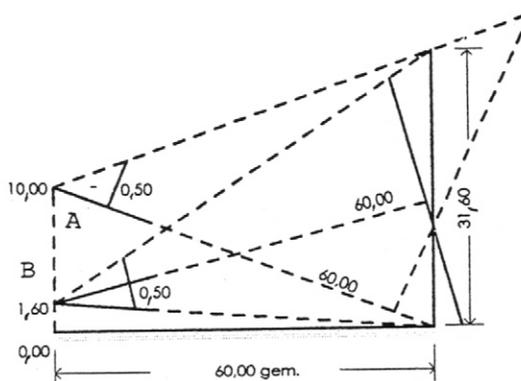


Bild 77
Skizze zur Fehleruntersuchung

Wie genau ist die Turmhöhenmessung, wenn keine Parallelität von Querstab und Meßobjekt gegeben ist? Die Frage lässt sich durch eine rechnerische Untersuchung beantworten. Von drei Standpunkten mit Gerätehöhen von 1,60 m, 10,00 m und 15,80 m, bezogen auf die Unterkante des Turms, werden jeweils für beide Geräte die Turmhöhen berechnet. Die Bilder 78 und 77 B zeigen den Vorgang mit den entsprechenden Daten; die Tabelle (Bild 79) demonstriert die Rechenergebnisse und Fehlerquoten.

Bild 78
Vorgang bei nicht paralleler Stellung
des Querstabs zum Turm



Höhe im Gelände	Querstab-Konstante	Ablesemaß am Längsstab (ger.)	Gerechnete Turmhöhe	Fehler zur Isthöhe
m	m	m	m	m
A = einseitiger Querstab			Isthöhe = 31,60	
1,60	0,50	0,937	32,02	+0,42
10,00	0,50	0,892	33,63	+2,03
15,80	0,50	0,884	33,94	+2,34
B = Jakobsstab				
1,60	0,50	0,999	30,03	-1,57
10,00	0,50	0,958	31,32	-0,28
15,80	0,50	0,949	31,60	+0,00

Bild 79
Tabellarische Aufstellung der Ergebnisse zu Bild 78

Die nur rechnerische Analyse läßt schon deutlich die Fehleranfälligkeit der Messung erkennen, wenn der Querstab nicht parallel zum Meßobjekt steht. Sie zeigt zudem, mit welchem Gerät genauere Ergebnisse von den einzelnen Standpunkten aus zu erzielen sind. Im Vergleich der beiden Geräte wird festgestellt, daß der Jakobsstab für Messungen in erhöhtem Gelände das geeignete Gerät ist. Das gilt besonders, wenn von zwei Standpunkten aus gemessen wird [15]. Für die Berechnung der Höhe oder waagrechten Breite kommt bei dieser Aufgabe nicht die Entfernung von Gerät zum Meßobjekt, sondern die zwischen den beiden Gerätestandpunkten gemessene Strecke zum Ansatz (Bild 80). Deshalb kam für die Lösung solcher Aufgaben vielfach der Jakobsstab zum Einsatz.

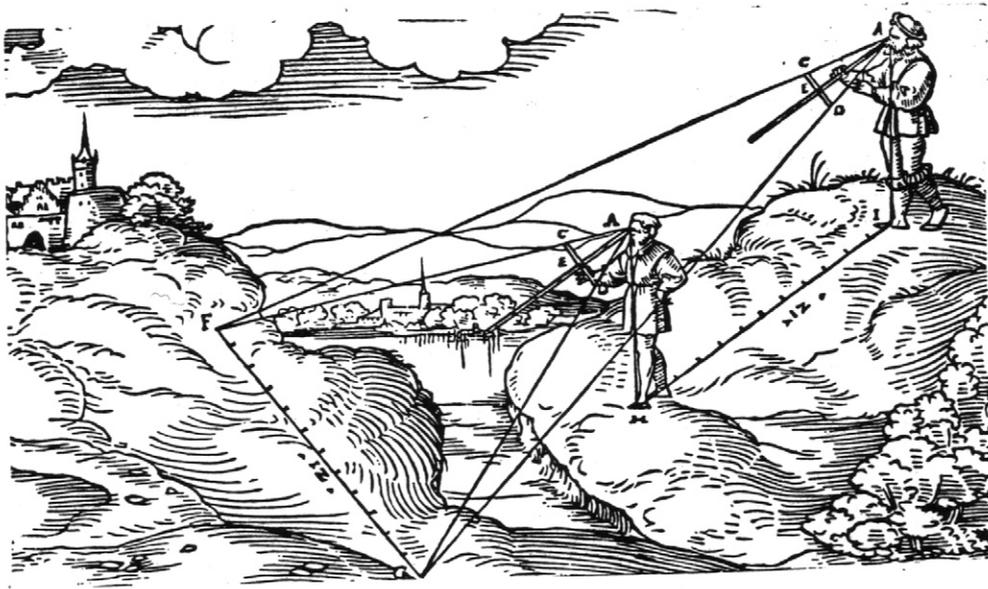


Bild 80
Richtige Messung zur Bestimmung einer waagrechten
Breite mit dem Jakobsstab von zwei Standpunkten.
Nach Rivius (1547), [41]

Zum Vergleich mit den rechnerischen Untersuchungen diente die Messung mit einem Jakobsstab-Nachbau (Querstablänge = 0,48 m), und zwar zur Bestimmung der waagrechten Breite. Das Gerät steht dabei rechtwinklig und mittig zum Meßobjekt (vgl. Bild 55). Die Breite wurde für den Meßvorgang mit 20,00 m und der Abstand vom Gerät zur Mitte der Breite mit 30,00 m abgesteckt. Aus den Maßen rechnet sich die Gradstockablesung mit 0,72 m (= Istwert). Damit liegen die Vergleichsmaße für die Untersuchung vor. Es wurde mit und ohne Stativ jeweils dreimal gemessen. Die Messungen mit Stativ ergaben die Gradstockablesungen 0,723 m, 0,721 m, 0,719 m. Das Mittel aus den drei Messungen ist 0,721 m. Damit errechnet sich die waagrechte Breite mit 19,97 m.

Die Darstellungen in der Literatur der Renaissancezeit zeigen in den meisten Fällen die Geräte ohne Stativ [4], [15]. Es wurde also freistehend gemessen. Im Experiment wurde zur Genauigkeitssteigerung der Gerätenullpunkt beim Visieren über einen Stab gehalten. Die Gradstockablesungen ergaben 0,711 m, 0,715 m, 0,713 m. Das Mittel ist 0,713 m. Damit errechnet sich die waagrechte Breite mit 20,20 m. Der Vergleich mit dem Istwert zeigt, daß bei der Messung mit Stativ eine gute Genauigkeit erreicht wird. Bei der freistehend ausgeführten Messung hingegen ist diese Präzision wegen der leichten Schwankungen des Geräts nicht zu erreichen.

3.3. Zur Genauigkeit des Geometrischen Quadrats

Das Geometrische Quadrat ist das einzige aus der Renaissancezeit bekannte Gerät, mit dem die Länge einer Strecke indirekt mit den Gerätemaßen und dem Ablesemaß bestimmt wird. Es wäre damit (nicht nur für die damalige Zeit) das Meßgerät, wenn es bestimmten Genauigkeitsanforderungen genügen würde. Durch den Ansatz fiktiver Gerätefehler und durch den Nachvollzug von Messungen läßt sich die Genauigkeit erkennen.

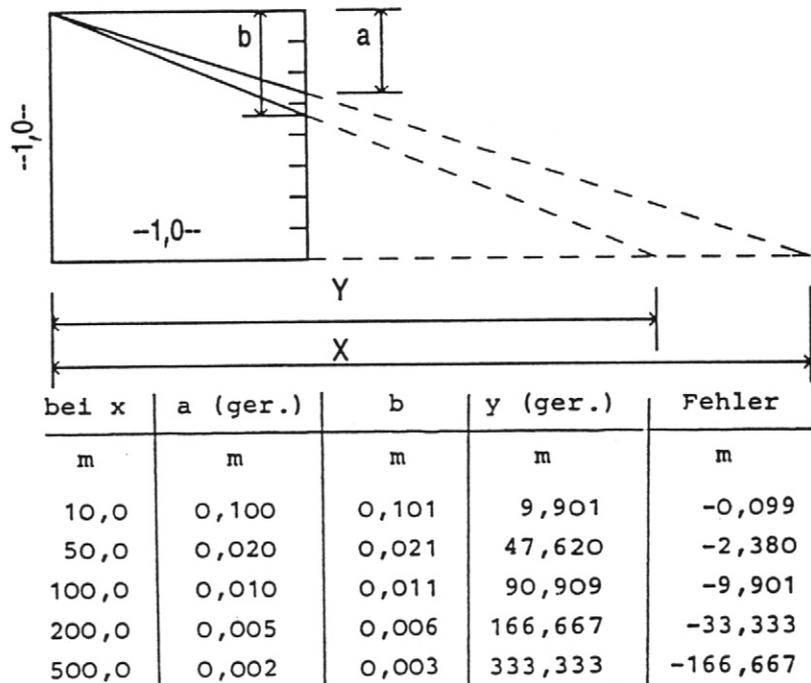


Bild 81
Genauigkeitsuntersuchung zum Geometrischen
Quadrat mit fiktivem Gerätefehler

Die Tabelle (Bild 81) zeigt die Untersuchungsergebnisse mit einem fiktiven Gerätefehler. Mit den Quadratseiten (Länge = 1,00 m) errechnen sich für die Streckenlängen x (von 10,00 m bis 500,00m) die Ablesemaße a , die für die Untersuchung mit einem fiktiven Gerätefehler von +1 mm versehen sind ($b = a + 1$ mm). Mit den Maßen b und den Quadratseitenlängen errechnen sich die Längen für y . Der Vergleich zwischen den Längen x und y zeigt deutlich die Fehleranfälligkeit des Geräts und läßt erkennen, daß mit dem Geometrischen Quadrat nur eine Streckenmessung bis zu 10,00 m vertretbar ist.

Im Gegensatz zu den Untersuchungen mit einem fiktiven Gerätefehler sind beim praktischen Messen Geräte-, Ablese- und Visierfehler gegeben, die sich aufheben oder auch summieren können. Für eine Genauigkeitsaussage wurde mit einem Gerätenachbau (Quadratseite = 0,50 m) gemessen (Bild 82). Das Geometrische Quadrat wird mit seiner Grundseite auf den Punkt B eingefluchtet; als Vergleichsmaß wird die Strecke $AB = 13,20$ m gemessen. Nach Visieren des Zeigers auf den Punkt B zeigt das Ablesemaß auf der Skala 0,018 m. Die Strecke AB errechnet sich mit 13,89 m. Die an sich kurze Strecke wurde um 0,69 m zu lang bestimmt. Bei der Streckenlänge 13,20 m ergäbe das Ablesemaß 0,0189 m. Der Vergleich zeigt deutlich, wie stark sich der minimale Fehler - besonders bei einem kleinen Gerät - auf das Meßergebnis auswirkt.

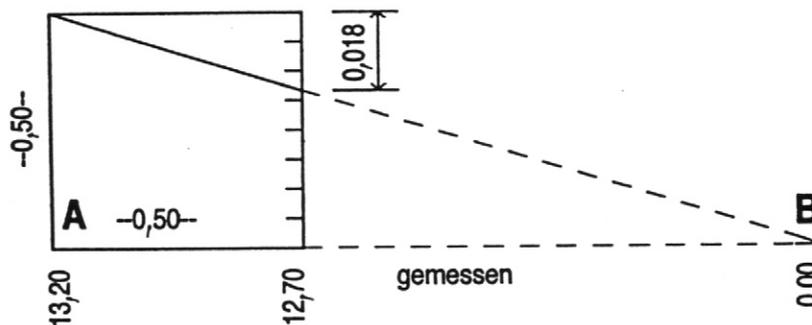


Bild 82
Messung mit dem Geometrischen Quadrat

Die Fehleranfälligkeit des Geräts bei der indirekten Bestimmung einer längeren Strecke wurde nachgewiesen. Das führt zu der Frage: Welche Genauigkeit ist mit dem Geometrischen Quadrat bei der Stabmessung zu erreichen? Die Analyse hierzu erfolgt unter Ansatz fiktiver Gerätefehler zu einer von Comenius (1592-1670) überlieferten Aufgabe [31]. Er führte die Messung von einer längeren Hilfsbasis aus (Bild 83). Zur Strecke x ($= 983,33$ m) steckte er rechtwinklig eine Hilfsbasis von 118 m ab und richtete von Punkt C aus das Gerät auf den Punkt A ein. Für den Visiervorgang von C nach B errechnet sich das Ablesemaß auf der Geräteskala mit 0,12 m. Bei Ansatz eines fiktiven Gerätefehlers von -1 mm und -3 mm ergeben die Ablesemaße 0,119 m und 0,117 m. Für x errechnet sich damit jeweils eine Länge von 991,60 m und 1008,55 m. Der Vergleich der beiden Maße mit der Istlänge ($= 983,33$ m) zeigt für das Verfahren eine Fehlerquote, die für die damalige Zeit noch akzeptabel wäre.

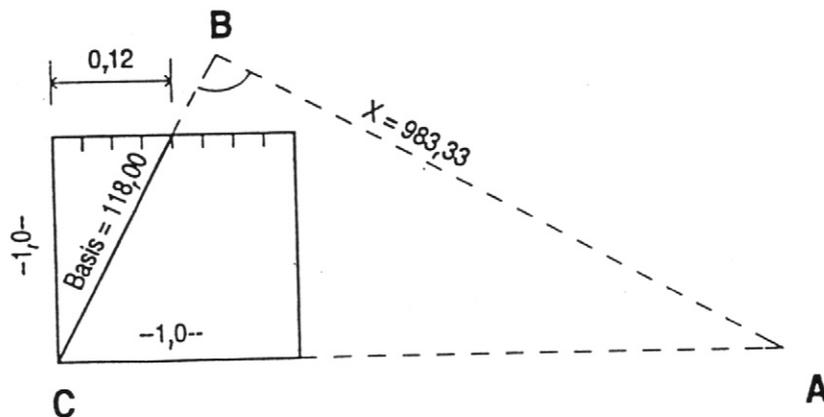


Bild 83
Meßvorgang nach Comenius [31]

3.4. Zur Genauigkeit von Chorobat, Setzwaagen-Nivellier und Staffelmessgerät

Ein Nivellement von 420 m Länge mit Chorobat und Setzwaagen-Nivellier sowie ein Nivellement von 400 m Länge (Hin- und Rückweg je 200 m) mit dem Setzwaagen-Nivellier ergaben Daten für die Fehlerbetrachtung.

Das Nivellement mit Hin- und Rückweg bot die Möglichkeit, das Ergebnis durch Fehlerverteilung (Zwischenpunkte) auszugleichen. Um die mit der Staffelmessung zu erreichende Genauigkeit festzustellen, wurde das Experiment an einem etwa $\frac{1}{2}$ geneigten Hang durchgeführt. Alle Messungen wurden für die Untersuchungen mit einem Ni 2 begleitet [3].

Bei den Nivellements wurden die Geräte zur Fehlerausschaltung bei jeder zweiten Aufstellung um 180° gedreht. An den Meßpunkten erfolgten drei Zielvorgänge mit Ablesungen an der Nivellierlatte. Das Mittel aus den Ablesungen ergab jeweils den Vor- und Rückblick für die Ausrechnung des Nivellements. Mit dem Chorobat wurde gegenüber dem Setzwaagen-Nivellier eine größere Genauigkeit erreicht, denn der Abschlußfehler zeigt für den Chorobat -14 mm und für das Setzwaagen-Nivellier -22 mm (Bild 84). Beim Nivellement (Hin- und Rückweg) mit dem Setzwaagen-Nivellier beträgt der Abschlußfehler -19 mm. Durch Verteilung des Abschlußfehlers auf die Zwischenpunkte wird die Genauigkeit des Nivellements gesteigert (Bild 85). Im Ergebnis bleibt festzustellen, daß mit den Geräten eine Genauigkeit zu erreichen ist, wie sie auch heute noch an ein einfaches Nivellement gestellt wird.

Station m	Mod. Niv. NN	Chorobat NN	Setzwaage NN	Bemerkungen
0,0	50,000	50,000	50,000	Zielweite = 30 m
+ 60	50,148	50,140	50,118	
+120	50,003	49,991	49,994	Mittel aus drei Zielungen
+180	50,112	50,096	50,097	
+240	49,963	49,955	49,948	Diopterabstand:
+300	50,094	50,079	50,067	Chorobat = 3,60 m
+360	49,975	49,965	49,963	Setzwaage = 1,50 m
+420	50,126	50,112	50,104	

Bild 84

Ergebnisse des Längennivellements mit
Chorobat und Setzwaagen-Nivellier

Station m	Mod. Niv. NN	Setzwaage NN	mit Fehlervert. NN	Bemerkungen
0,0	50,000	50,000	50,000	Pkt. 1 Zielweite = 25 m
+ 50	50,010	50,003	50,006	Pkt. 2
+100	49,780	49,758	49,764	Pkt. 3 Mittel aus drei Zielungen
+150	49,646	49,621	49,630	Pkt. 4
+200	49,609	49,602	49,614	Pkt. 5 Diopterabstand = 1,50 m
+250	49,646	49,616	49,631	Pkt. 4
+300	49,780	49,744	49,761	Pkt. 3
+350	50,010	49,993	50,010	Pkt. 2
+400	50,000	49,981	50,000	Pkt. 1

Bild 85
Ergebnisse des Längennivellements mit dem
Setzwaagen-Nivellier (Hin- und Rückweg)

Bild 86 zeigt eine Staffelmessung am Steilhang, der mit seiner Grünfläche einfache Bedingungen hat. Die mit Pflöcken vermarkte Teststrecke von 23,25 m Länge und einem Höhenunterschied von 11,212 m war die Basis für den Meßvorgang. Ein relativ großer Gerätefehler (Richtscheit) wurde durch Messung in zwei Lagen ausgeschaltet. Die Höhendaten bilden das Mittel aus den Meßvorgängen. Die Höhe des Endpunkts enthält einen Fehler von +5 mm. Ein Ergebnis, das durch seine Genauigkeit überrascht. Es belegt die Qualität und die Funktionsfähigkeit des Geräts bei fachgerechter Durchführung der Messung in einfachem Gelände [3]. Fehleruntersuchungen für lange Trassen in schwierigem Gelände, wie beim Tunnelbau, liegen noch nicht vor [27], [32].

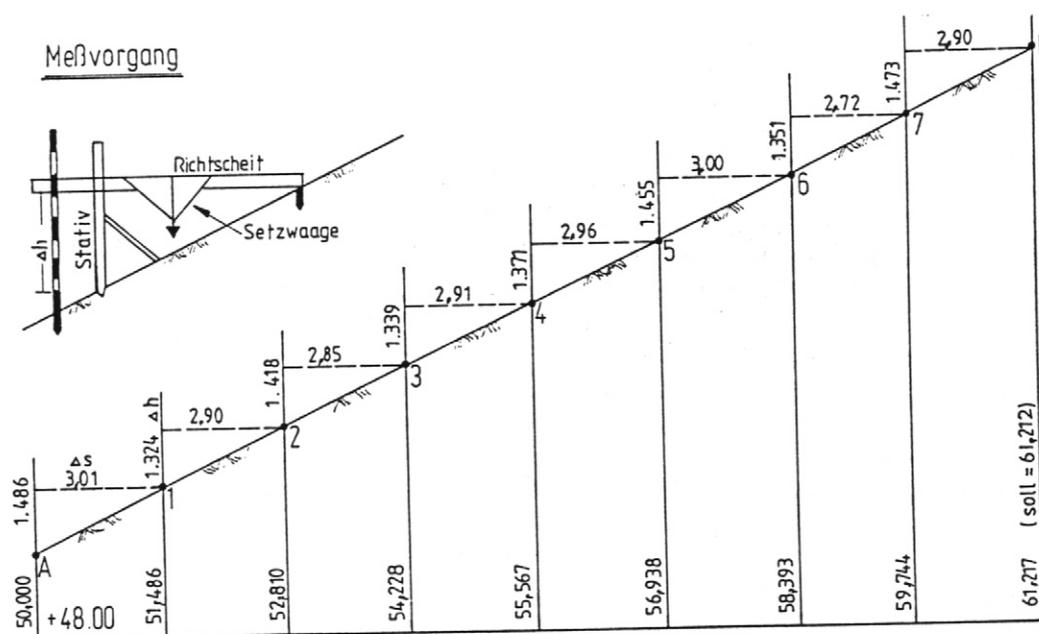


Bild 86
Längenprofil mit den Daten der Staffelmessung

4. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit ist der Versuch eines Vermessungsingenieurs – unter dem Gesichtspunkt der Gesamtüberlieferung aus dem Altertum – die Tätigkeit seiner Vorgänger darzustellen und zu analysieren. Eine notwendige Voraussetzung hierzu war die Erfahrung des in der Bauvermessung tätigen Ingenieurs. Die Untersuchungen wurden mit Hilfe des Experiments unter dem Aspekt des handwerklich Machbaren und technisch Möglichen jener Zeitepochen durchgeführt.

- Es werden fast vollständig dargestellt die Geräte und Meßverfahren des Altertums und ihre Wiederentdeckung in der Renaissancezeit.
- Die mit den Nachbauten durchgeführten Experimente bestätigen die Funktionsfähigkeit der Geräte. Sie geben Hinweise über die mit ihnen möglichen Meßverfahren. Sie zeigen zudem, welche Genauigkeit mit den Geräten zu erreichen ist. Damit steht der Forschung erstmals eine Grundlage für vergleichende Untersuchungen zur Verfügung.
- Zu berücksichtigen bleibt, daß Landmesser und Baumeister für den Bau und den Umgang mit den Geräten eine Erfahrung hatten, wie sie heute nicht mehr erreicht werden kann.
- Unter den von Heron überlieferten Geräten ist die Dioptra das einzige Vermessungsgerät [18], [35]. Für die Serienproduktion zu kompliziert, ist das „Universalgerät“ allerdings nicht praktikabel für die Durchführung aller in der Meßtechnik anfallenden Aufgaben. Ob der Mechaniker Heron das Gerät selbst baute oder nur eine Konstruktion beschrieb, ist nicht bekannt.
- Es wurde erkannt, daß die von jedem Baumeister leicht zu fertigenden Setzwaagen-Nivelliere die Hauptgeräte im Altertum - und noch im 18. Jahrhundert - waren. Neben Herons Kanalwaage ist der Chorobat Vitruvs das einzige Nivelliergerät, von dem eine genaue Beschreibung vorliegt. Darin liegt die Bedeutung für die Forschung.
- Über die Stabmeßgeräte und das Geometrische Quadrat enthält das aus dem Altertum überlieferte Schriftgut keine konkreten Angaben. Als Forschungsgrundlage diente die Literatur der Renaissance, in der den Geräten eine große Bedeutung zukommt. Die Untersuchungen führen zu der Erkenntnis, daß die Autoren - allesamt keine Landmesser - nicht praktikable Meßverfahren, sondern eher Lehrbeispiele für den Geometrieunterricht beschreiben und darstellen wollten.
- Es ist schwierig nachzuweisen, welche Geräte und Verfahren bei einem bestimmten Bauwerk zum Einsatz kamen. Auch die Überlieferung enthält hierzu keine Angaben. Gesichert ist die Anwendung von Lotten und Lehren (Schablonen) bei einzelnen Bauwerken sowie die Staffelmessung am Steilhang. Das gilt auch für die Groma als Spezialgerät für die Rechtwinkelabsteckung bei der Limitation. Ob der Chorobat bei der Trassierung römischer Wasserleitungen zum Einsatz kam oder nur eine Sonderkonstruktion Vitruvs ist, kann nicht mit Sicherheit gesagt werden.
- Schwerpunkt der Arbeit war die Land- und Bauvermessung. Bauwerke sind sichtbare und nachmeßbare Zeitzeugen. Daher kommt der Bauvermessung eine besondere Bedeutung zu.

Die Meßkunst des Altertums ist ein Forschungsgebiet, das der Archäologie zugeordnet wird. Doch auch Altertumskunde, Altphilologie, Mathematik, Kunst-, Bau- und Vermessungsgeschichte sind betroffen. Darin liegt die Schwierigkeit für die Forschung. Die alten Vermessungen wurden von den Autoren selten ganzheitlich, sondern fast nur unter dem Aspekt ihres Fachgebiets dargestellt. Da von ihnen in der Forschung keine Experimente durchgeführt wurden, enthalten ihre Veröffentlichungen häufig widersprüchliche und falsche Angaben, die, wie vergleichende Studien belegen, auch kritiklos übernommen wurden.

5. Literatur und Anmerkungen

- [1] Schöne, H.: Herons von Alexandria Vermessungslehre und Dioptra. 3. Band von Herons Werken (Leipzig 1903)
- [2] Stürzenacker, E.: Vitruv. De Architectura (Essen 1938)
- [3] Peters, K.: Nivelliergeräte des Altertums. In: Der Vermessungsingenieur 38. 1987. 97.
- [4] Schmidt, F.: Geschichte der geodätischen Instrumente und Verfahren im Altertum und Mittelalter (Neustadt a.d. Haardt 1935). Reprint: Veröffentlichung des Förderkreises Verm.-Techn. Museum, Bd 14 (Stuttgart 1988). Mit fast 1400 Quellen- und Literaturangaben eine umfassende Bestandsaufnahme der alten Meßkunst.
- [5] Peters, K.: Die große Pyramide bei Giseh. Maße - Planung - Absteckung. Veröffentlichung des Förderkreises Verm.-Techn. Museum. Bd 26 (Dortmund 1998)
- [6] Heimberg, U.: Römische Landvermessung (Stuttgart 1977)
- [7] Blume, F., Lachmann, K.; Rudorff, A.: Die Schriften der römischen Feldmesser (Hildesheim 1967)
- [8] Della Corte, M.: Groma. In: Monumenta Antichi XXVIII (Milano 1922)
- [9] Peters, K.: Das Winkelkreuz der römischen Landmesser. In: Der Fluchtstab 12. 1961, 129.
- [10] Röttel, K.: Römische Vermessungskunst - ihre Instrumente und Verfahren. In: Kultur und Technik 5. 1981. 179.
- [11] Peters, K.: Das römische Meßgerät aus Pfünz in der Analyse und im Experiment. In: Der Vermessungsingenieur 40. 1989. 57.
- [12] Szilágyi, J.: Aquincum (Budapest 1956)
- [13] Peters, K.: Römische Vermessungsgeräte im Museum zu Budapest. Ein Versuch ihrer Identifizierung und Zuordnung. In: Der Vermessungsingenieur 41. 1990. 103.
- [14] Peters, K.: Die Dioptra des Heron. In: Der Fluchtstab 11. 1960. 21.
- [15] Apian, P.: Instrument-Buch (Ingolstadt 1533)
- [16] Peters, K.: Meß- und Absteckverfahren beim Tunnelbau im Altertum. In: Der Vermessungsingenieur 6. 1991. 248.
- [17] Hotzel, P.: Die Centuration, eine Form der römischen Bodenordnung (Darmstadt 1972)
- [18] Der Wegemesser (Meßrad) ist wegen seiner Ungenauigkeit kein geeignetes Gerät für die Bauabsteckung und Feldmessung. Das Gerät ist bei Heron und Vitruv ausführlich beschrieben.
- [19] Peters, K.: Der Orthogonal-Polygonzug nach Heron. Eine Analyse der Heronschen Aufgabe im Zusammenhang mit der Absteckung des Eupalinostunnels auf Samos. In: Der Vermessungsingenieur 6. 1988. 189.

- [20] Im Schrifttum der Renaissance wird der Jakobsstab oft im Zusammenhang mit dem Geometrischen Quadrat und dem Geometrischen Quadranten aufgeführt. Die Aufgaben zeigen für die drei Geräte vielfach die Bestimmung von Turmhöhen und gleichen sich häufig, wie die Schriften von Mainardi (1488), Purbach (1516), Finaeus (1532), Apian (1533), Rivius (1547), Münster (1551), Hulsius (1604) und Köbel (1616) erkennen lassen.
- [21] Minow, H.: Über die praktische Geometrie im 15. Jahrhundert nach einer lateinischen Handschrift des Peter Lossai. In: *Der Vermessungsingenieur* 2. 1973. 62.
- [22] Minow, H.: Vermessungen mit der Zwölfknotenschnur und andere historische Konstruktionen mit dem Meßseil. Veröffentlichung des Förderkreises Verm.-Techn. Museum. Bd. 19 (Dortmund 1992)
- [23] Peters, K.: Limitatio - die Katastervermessung im Imperium Romanum. In: *Der Vermessungsingenieur* 1. 1988. 25.
- [24] Peters, K.: Von Heron bis Apian. Eine kurze Darstellung der Vermessungsinstrumente des Altertums und ihrer Bedeutung in der Renaissance. In: *Globulus* 3. 1995. 39.
- [25] Mendelssohn, K.: *Die Rätsel der Pyramiden* (Bergisch Gladbach 1974)
- [26] Peters, K., Peters, W.: Bogenabsteckung in der Antike am Beispiel des Pantheons in Rom. In: *Der Vermessungsingenieur* 2. 1993. 76.
- [27] Peters, K.: Der Claudiusstunnel - ein bedeutendes Bauwerk aus altrömischer Zeit. In: *Der Vermessungsingenieur* 6. 1994. 306.
- [28] Borchardt, L.: *Längen und Richtungen der vier Grundkanten der großen Pyramide bei Giseh* (Berlin 1926)
- [29] Balss, H.: *Antike Astronomie* (München 1948)
- [30] Minow, H.: Der Beitrag der Araber zur Entwicklung des Vermessungswesens im Mittelalter. In: *Der Vermessungsingenieur* 3. 1979. 50.
- [31] Minow, H.: Comenius und die praktische Geometrie. In: *Der Vermessungsingenieur* 2. 1985. 80.
- [32] Peters, K.: Der Tunnel - das Eupalineion auf der Insel Samos. Veröffentlichung des Förderkreises Verm.-Techn. Museum. Bd 8 (Dortmund 1984)
- [33] Minow, H.: Levi ben Gerson zum 700. Geburtstag. In: *Der Vermessungsingenieur* 39. 1988. 156.
- [34] Cantor, M.: *Vorlesungen über Geschichte der Mathematik*. Bd I (Halle 1863)
- [35] Landels, J.G.: *Die Technik in der antiken Welt* (München 1989)
- [36] Burckhardt, J.: *Die Kultur der Renaissance in Italien* (Basel 1930)
- [37] Günther, A.: Römisches Landmesserinstrument aus Koblenz. In: *Germania* 15. 1931. 271.;
Grewe, K.: Über die Rekonstruktionsversuche des Chorobates, eines römischen Nivelliergerätes nach Vitruv. In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten* 88. 1991. 205.
- [38] Adam, J.P.: *La construction romaine. Matériaux et techniques* (Paris 1989)

- [39] G. Marchand, H. Petitot, L. Vidal: L'équerre d'arpenteur de l'Orme à Ennemain (Somme).
In: Autour de la Dioptré d'Héron d'Alexandrie (Colloque de St-Etienne, juin 1999) St-Etienne.
Univers. 2000
- [40] Rossi, G.: Groma e squadro (Turin 1877)
- [41] Ryff, H.W. (Rivius): Vitruvius Teutsch.
Erste deutschsprachige Ausgabe (Nürnberg 1547)
- [42] Baatz, D.: Groma oder Modius? Zu einem Fund aus dem Limeskastell Pfünz.
In: Bayerische Vorgeschichtsblätter 59. 1994. 73.
- [43] Pauly-Wissowa (Hrsg.): Realencyclopädie der classischen Altertumswissenschaft (Stuttgart 1912)
Hier ist die Rekonstruktion von Fabricius, die von Schulten übernommen wurde, in Band VII,
Seite 1884 dargestellt.



Konrad Peters

Geboren am 24. Oktober 1921 in Münster. Vermessungspraktikum im Eisenbahndienst. 1941 bis 1949 Wehrdienst und Kriegsgefangenschaft in Rußland. 1950 Ingenieur-Examen in Frankfurt am Main; anschließend Tätigkeit in der Ingenieurvermessung bei den Bundesbahndirektionen Münster und Essen. Seit 1983 im Ruhestand.

Schon seit 1951 Forschungen zur Vermessungsgeschichte mit dem Schwerpunkt des experimentellen Nachbaus antiker Meßgeräte. Mitarbeit an der Schausammlung „Praxis Geometriae“ als Kernstück der Ausstellung „5000 Jahre Vermessungswesen“. Gründungsmitglied des VDV-Arbeitskreises „Geschichte des Vermessungswesens“ und des Förderkreises Vermessungstechnisches Museum e.V.

Zahlreiche Veröffentlichungen und Vorträge sowie Beratung und praktische Mitarbeit an verschiedenen Ausstellungen.