

Wägetheorie

Dem Wägen oder, genauer gesagt, dem Bestimmen der Masse eines Körpers liegen bestimmte physikalische Gesetze zugrunde, die wir hier kurz festhalten wollen.

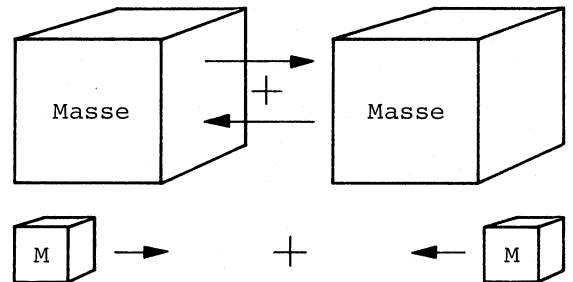
Die Masse

Jeder Körper, auch das leichteste Gas, hat Masse. Die Masse eines Körpers hängt ab von seiner Grösse und seiner Dichte. Wenn wir die Masse eines Körpers bestimmen wollten, müssten wir also zwei Grössen angeben, nämlich sein Volumen und seine Dichte, z.B. pro cm^3 , wenn uns nicht ein nächstes physikalisches Gesetz zu Hilfe käme.

Die Gravitation

Zwischen zwei Massen herrscht immer eine Anziehungskraft. Diese Kraft ist um so grösser, je grösser die beiden Massen sind und je näher beisammen sie sich befinden.

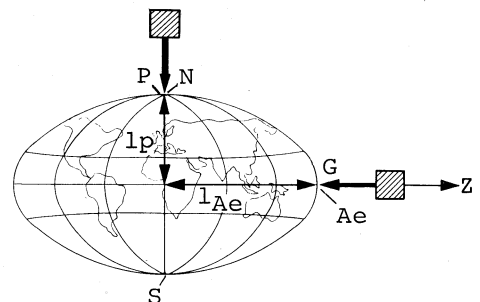
Umgekehrt nimmt diese Kraft ab, je kleiner die beiden Massen sind und je weiter entfernt voneinander sie sich befinden. Wir nennen diese Kraft die Gravitation.



Die Schwerkraft

Die uns bekannteste Wirkung der Gravitation ist die Schwerkraft, die Anziehungskraft der Erde auf alle Körper. Diese Kraft nun erlaubt uns, die unbekannte Masse eines Körpers zu bestimmen. Wir messen die Kraft der unbekannten Masse, indem wir sie mit einer bekannten Kraft vergleichen. Wir nennen diesen Vergleich Wägen, und die Kraftwirkung einer Masse ist deren Gewicht.

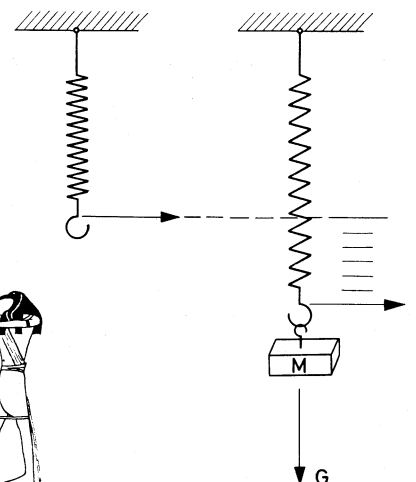
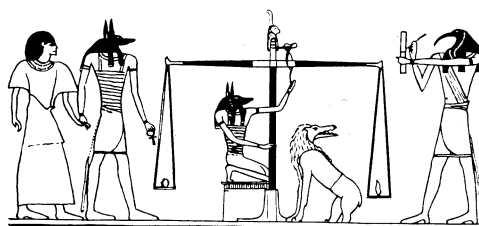
Leider ist die Schwerkraft nicht überall auf der Erde gleich gross. Am Äquator ist die Entfernung zum Angriffspunkt der Schwerkraft (l_{Ae}) grösser als am Pol (l_p), und zudem wirkt die Zentrifugalkraft (Z) der Schwerkraft entgegen. Ein Körper von einem Kilogramm Masse wiegt am Pol ca. 5 g mehr als am Äquator. Somit ist 1 kg Masse nicht unbedingt auch 1 kg Gewicht. Welches Gewichtskilogramm dem Massenkilogramm entsprechen soll, ist eine reine Abmachung, und diese ist im Urkilogramm von Sèvres bei Paris festgelegt.



Die Waage ist das Gerät, das uns erlaubt, eine bekannte Kraft mit der unbekannten des Wägegutes zu vergleichen. Wir kennen zwei grundsätzlich verschiedene Waagen-systeme: die Federwaage und die Balkenwaage.

Die Federwaage

Die Federwaage vergleicht die bekannte Kraft der Feder mit dem Gewicht (Kraftwirkung) des Wägegutes. Je schwerer das Wägegut, desto mehr wird die Feder auseinandergezogen. Die Federwaage hat aber den grossen Nachteil, dass die Kraft der Feder konstant ist, die angreifende Schwerkraft jedoch auch auf der Erdoberfläche variabel. Sie gibt also für eine bestimmte Masse nicht überall das gleiche Gewicht an und muss folglich von Ort zu Ort neu geeicht werden. Masse gegen Masse vergleicht uns nur die Balkenwaage, die schon den alten Ägyptern bekannt gewesen ist. Die Balkenwaage ist eine Anwendung der Hebelgesetze.



Die Hebelgesetze

Ein Hebel ist ein starrer Körper, der in einem Punkte drehbar gelagert ist. Zwei Grundformen sind möglich: der einarmige und der zweiarmige Hebel.

Wirkt eine Kraft auf das bewegliche Ende eines Hebels, so entsteht ein Drehmoment. Das Drehmoment wird bestimmt durch die angreifende Kraft und die Länge des Hebelarmes:

MD (Drehmoment)	=	F (Kraft)	·	l (Länge)
--------------------	---	--------------	---	--------------

Hebelgesetz: Das Hebelgesetz sagt nun aus, dass ein Hebel nur dann im Gleichgewicht ist, wenn die beiden an ihm angreifenden Drehmomente gleich gross sind:

$F_1 \cdot l_1 = F_2 \cdot l_2$

Die Balkenwaage

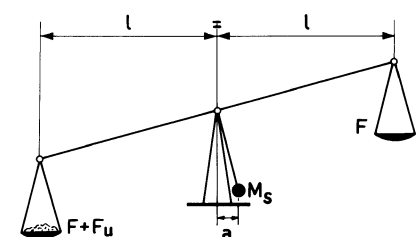
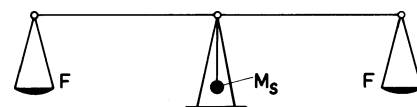
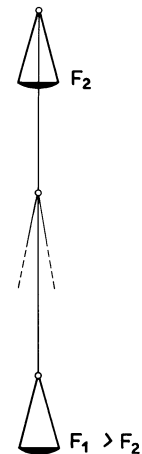
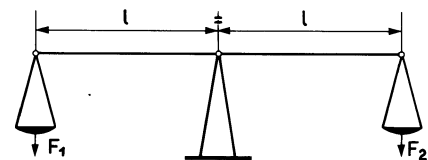
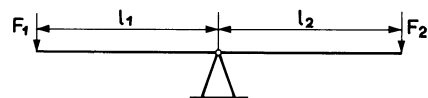
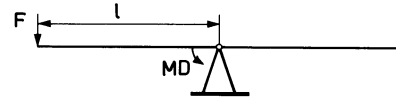
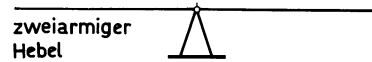
An den gleich langen Armen eines zweiarmigen Hebels, des Waagbalkens, greift auf der einen Seite das Gewicht des zu wägenden Körpers an, auf der andern das der Vergleichskörper, der Gewichtsstücke oder des Gewichtssatzes. Wenn die beiden Gewichte genau gleich sind, bleibt der Waagbalken in horizontaler Lage. Der Hebel ist im Gleichgewicht, da $F_1 = F_2$ und damit auch

$F_1 \cdot l = F_2 \cdot l$

Beim kleinsten Uebergewicht auf einer Seite ist jedoch diese Gleichgewichtsbedingung nicht mehr erfüllt. Der Waagbalken verlässt die horizontale Lage und kommt erst wieder in senkrechter Lage zur Ruhe.

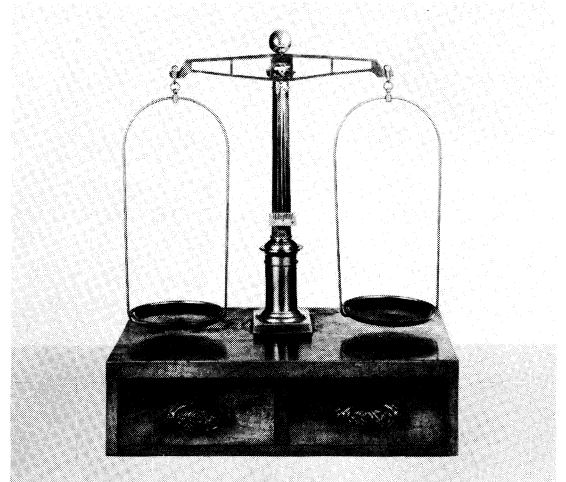
Damit die Waage brauchbar wird, muss sie ein kleines Zusatzgewicht M_s erhalten, dessen Drehmoment sich dem jeweiligen Uebergewicht anpasst: Zuerst legen wir auf beide Schalen dasselbe Gewicht F . Die Waage ist nun im Gleichgewicht, d.h. die Drehmomente der beiden Gewichte F heben sich auf und brauchen bei den folgenden Betrachtungen nicht mehr berücksichtigt zu werden. Bringen wir nun auf die linke Waagschale das Uebergewicht F_u , so neigt sich die Waage infolge des Zusatzmomentes $F_u \cdot l$. Durch die Neigung übt das Gewicht M_s jetzt aber ein Gegenmoment aus. Die Waage ist im Gleichgewicht, wenn der Hebelarm a so gross geworden ist, dass $F_u \cdot l = M_s \cdot a$.

Je kleiner das Gewicht M_s ist, oder je näher es sich dem Drehpunkt befindet, desto stärker neigt sich der Waagbalken bei einem bestimmten Uebergewicht auf der einen Seite. Das Verhältnis der Neigung des Waagbalkens zu der sie verursachenden Belastungsänderung nennt man die Empfindlichkeit. Im Gegensatz zur Federwaage kennt die Balkenwaage keinen Fehler durch die Variation der Schwerkraft, denn die Masse des Gewichtssatzes und die Masse des Wägegutes unterliegen der gleichen Schwerkraft, da sie sich am praktisch gleichen Ort der Erdoberfläche befinden. Gehen wir mit der Waage an einen andern Ort der Erdoberfläche und verändern damit die Schwerkraft, so entsteht deswegen kein Fehler, weil die Kraftänderung beide Seiten des Hebels gleichmässig trifft.



Von der gleicharmigen Waage zur Substitutionswaage

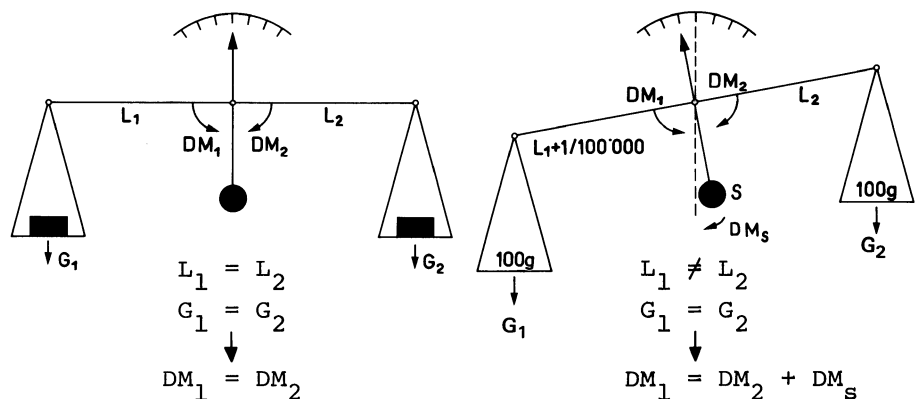
Bei Präzisionswaagen vom Typ der gleicharmigen Hebelwaage hat der Waagbalken als Drehachse eine Stahlschneide, die auf einer Unterlage aus Stahl oder Achat ruht. In möglichst gleichen Abständen von dieser Drehachse befinden sich zwei nach oben gerichtete Schneiden, an denen die beiden Waagschalen hängen. Alle drei Schneiden müssen parallel sein und in derselben Ebene liegen. Der Schwerpunkt des Waagbalkens liegt etwas unter dem Drehpunkt. Der Waagbalken ist also im stabilen Gleichgewicht und stellt sich bei gleicher Belastung der beiden Schalen ungefähr horizontal ein. Ein in der Mitte des Waagbalkens befestigter Zeiger spielt vor einer Skala und gestattet, die genaue Stellung des Waagbalkens abzulesen.



Eine Dreischneidenwaage vom eben beschriebenen Typ weist zwei systembedingte Fehler auf: den Hebelfehler und den Empfindlichkeitsfehler. Diese beiden Fehler können nicht vermieden werden und treten bei jedem Fabrikat mehr oder weniger stark auf und führen zu Wägefehlern.

Der Hebelfehler

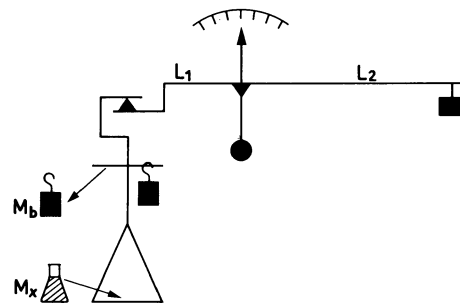
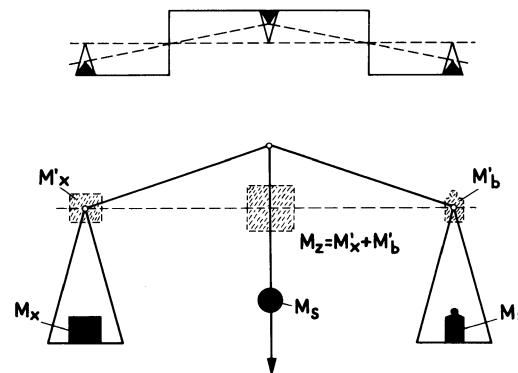
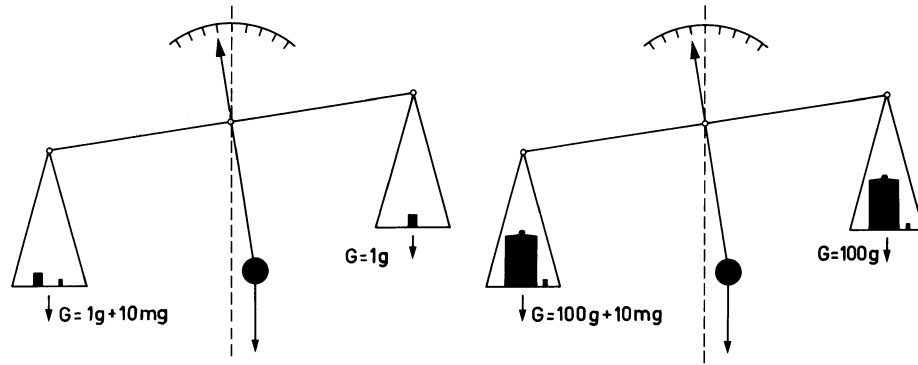
Wir nehmen an, dass die beiden Kräfte, die am Wägegut und am Gewichtssatz angreifen, ganz genau gleich gross sind, d.h. dass Wägegut und Gewichtssatz genau das gleiche Gewicht haben. Die beiden Kräfte erzeugen über den entsprechenden Arm des Waagbalkens je ein Drehmoment auf dessen Drehpunkt. Wenn die beiden Arme absolut gleich lang sind, heben sich die zwei Drehmomente auf, und der Waagbalken bleibt in der horizontalen Lage. Die Forderung nach identischer Länge der Arme lässt sich praktisch aber nicht erfüllen. Wenn der eine Arm auch nur 1/100 000 länger ist als der andere, ergibt das einen Fehler von 1/100 000 des aufgelegten Gewichtes. Bei einer Belastung von 100 g macht das immerhin 1 mg aus. Dieser Fehler kann bei der Wägung nur korrigiert werden, wenn das Wägegut nach der Methode der Doppelwägung zuerst auf der einen und dann auf der anderen Waagschale gewogen wird. Das Mittel der beiden Messungen liefert dann das richtige Resultat.



Der Empfindlichkeitsfehler

Durch die Masse des Schwerpunktes und ihren Abstand vom Balkendrehpunkt ist die Empfindlichkeit einer Waage gegeben. Diese muss über den ganzen Wägebereich konstant sein. In einem Beispiel: 10 mg Uebergewicht müssen genau den gleichen Zeigerausschlag ergeben, ganz gleich, ob die Waage mit 1 g + 10 mg oder mit 100 g + 10 mg belastet ist. Dies ist aber nur der Fall, wenn die drei Lagerstellen, d.h. die drei Schneiden, genau auf einer Linie liegen. Auch diese Forderung ist praktisch nicht zu erfüllen, denn der Waagbalken kann sich mit zunehmender Belastung durchbiegen, und die Schneiden nützen sich durch den Gebrauch der Waage in entgegengesetzter Richtung ab. Dadurch entsteht eine geknickte Schneidenlinie. Bei Belastung entsteht ein neuer zusätzlicher Schwerpunkt unterhalb des Drehpunktes des Waagbalkens, der mit zunehmender Belastung zunimmt und die Empfindlichkeit der Waage herabsetzt. Dieser Fehler lässt sich zwar mit einem Gegengewicht ausgleichen, aber immer nur für eine bestimmte Belastung der Waage. Mit wechselnder Belastung der Waage muss also jedesmal die Empfindlichkeit neu eingestellt werden.

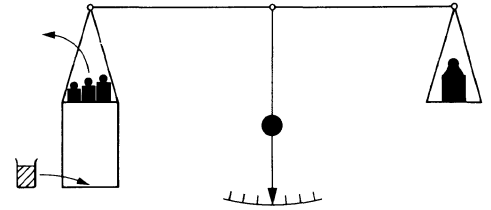
Wenn wir die beiden systembedingten Fehler der Dreischneidenbalkenwaage vermeiden wollen, müssen wir die absolute Identität der Hebellänge und die immer gleiche Belastung garantieren können. Beides ist möglich, wenn wir Wägegut und Gewichtssatz am gleichen Hebelarm aufhängen. Und damit sind wir beim Substitutionsprinzip angelangt.



Der Aufbau der Waage

1. Das «Herz» der Waage: der Waagbalken

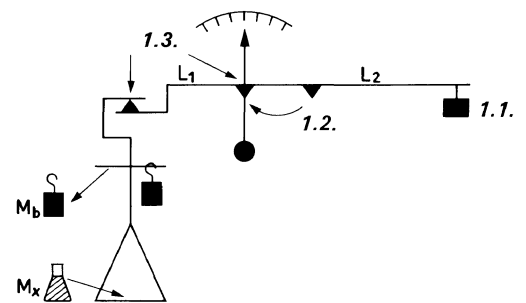
Natürlich liesse sich eine Substitutionswägung auch mit einer ganz gewöhnlichen Balkenwaage durchführen. Wir würden dann etwa gemäss Bild vorgehen und hätten damit bereits die zwei systembedingten Fehler der Balkenwaage ausgeschaltet. Eine solche Wägung wäre allerdings nicht sehr bequem.



Und nun die Ueberlegungen, die zum heutigen asymmetrischen Zweischneidenbalken führten:

1.1. Da das Ausgleichsgewicht konstant ist, kann es fest mit dem Waagbalken verbunden werden. Wir haben somit nur noch zwei Schneiden und eine kleinere Reibung. Veränderungen der Empfindlichkeit sind korrigierbar, da die Substitutionswaage immer mit der gleichen Belastung arbeitet.

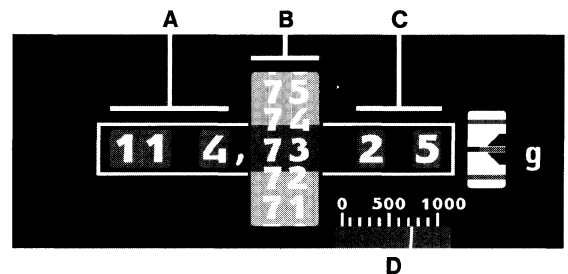
1.2. Beim Substitutionsprinzip hängt an jedem Schenkel des Waagbalkens ein Gewicht, das der maximalen Belastung der Waage entspricht. Die Schneide im Drehpunkt der Waage ist also mit einem Gewicht belastet, das der doppelten Kapazität der Waage entspricht. Um diese Belastung zu reduzieren, wurde der Drehpunkt des Waagbalkens in Richtung Waagschale verschoben. So kann das starre Gegengewicht verkleinert und die Belastung der Balkenschneide verringert werden.



1.3. Um die Reibung nochmals herabzusetzen, wurden die Schneiden und Pfannen aus synthetischem Saphir hergestellt. Dieses Mineral besitzt gegenüber dem früher verwendeten Achat bessere Lagereigenschaften und eine viel höhere Lebensdauer.

2. Blick hinter das Ablesebild

Die Zifferngruppe A gibt den Wert der abgehobenen Gewichte an. Der Gewichtssatz besteht aus Ringgewichten, die das Gehänge absolut symmetrisch belasten und daher beim Schalten keine Gehängependelungen verursachen. Aus rostfreiem Stahl hergestellt, bleiben diese Gewichte viel länger eichgenau als solche aus Messing; sie oxydieren nicht und werden durch den Abhebe-mechanismus nicht abgenützt.



Die Zifferngruppe B ist das optisch vergrösserte Bild der Strichplatte. Ihr Wert ergibt sich aus der Neigung des Waagbalkens im Gleichgewichtszustand und entspricht der Zeigerstellung auf der Skala der alten Pendelwaage. Der Lichtweg führt von der Lampe über den Kondensor durch die Strichplatte zum Objektiv und von dort über verschiedene Spiegel auf die Mattscheibe. Der Spiegel 1 dient zur optischen Verschiebung des Nullpunktes um ± 5 Teilstriche.

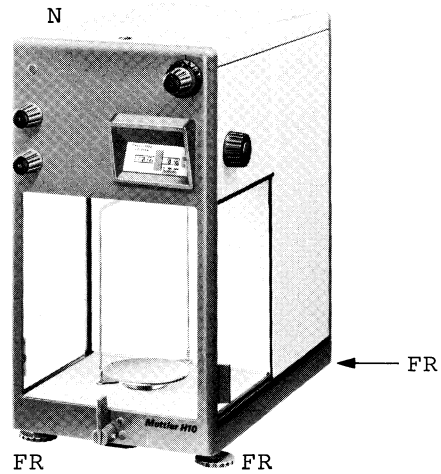
Die Zifferngruppe C ergibt die letzten zwei Dezimalen des Wägeresultates. Da der Waagbalken in den seltensten Fällen genau auf einem Teilstrich einpendelt, müssten wir den Zwischenwert schätzen. Diese Aufgabe übernimmt die Digitalanzeige. Der Spiegel 2, dessen Bewegung als Ziffern auf der Digitalanzeige erscheint, verschiebt das Skalenbild, bis der Teilstrich der Skala genau im Lichtspalt der Indexgabel liegt. So sind Schätzungsfehler ausgeschlossen.

Die Einwägehilfe D gestattet das rasche Zuschütten des Wägegutes sowie das schnelle Zurückstellen der Tara durch Grobanzeigeung des Gewichtes im Bereich der optischen Skala.

3. Die Hilfsfunktionen

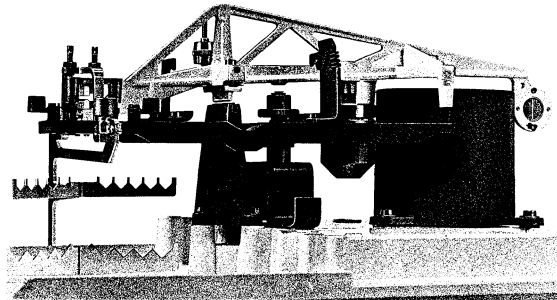
3.1. Die Nivellierung

Da sich der Waagbalken unabhängig von der Stellung der Waage immer ins Gleichgewicht stellt, die Skala oder Optik aber am Gehäuse befestigt ist, würden wir ein falsches Resultat ablesen, wenn die Waage nicht genau horizontal wäre. Darum ist das Waagengehäuse nivellierbar. Mit Hilfe der Fussrändelschrauben FR können wir die Waage an drei Punkten heben oder senken, bis sich die Luftblase der Niveauanzeige N ganz genau in der Mitte befindet.



3.2. Die Abhebung

Wenn wir die Waage arretieren, heben wir den Waagbalken und das Gehänge je an drei Punkten, so dass sich Schneide und Pfanne nicht mehr berühren. So schützen und entlasten wir die Schneiden, und beim Entarretieren werden Waagbalken und Gehänge garantiert richtig auf die Pfannen gelegt. Die Halbentarretierung lässt zwar dem Waagbalken eine geringe Freiheit, schützt aber die Schneiden doch vor allfälligen Schlägen, z.B. bei der Betätigung der Gewichtsschaltknöpfe.

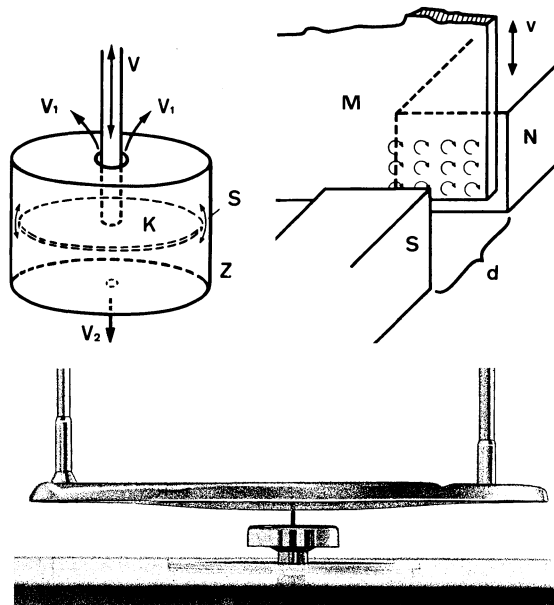


3.3. Die Dämpfung

Damit der Waagbalken schnell einschwingt, werden seine Bewegungen gedämpft. Dazu haben sich zwei Dämpfungssysteme bestens bewährt: die Luftdämpfung und die Wirbelstromdämpfung.

Bei der Luftdämpfung bewegt sich der Kolbenteller K am Waagbalken innerhalb des Zylinders Z und drängt je nach Bewegungsrichtung die Luft im oberen oder unteren Teil des Zylinders zusammen. Die erzeugte Bremswirkung nimmt ab, je kleiner die Bewegung des Kolbentellers ist, und wird bei stillstehendem Kolbenteller Null.

Bei der Wirbelstromdämpfung bewegt sich eine antimagnetische Metallplatte M zwischen zwei Polen. Die durch die Bewegung erzeugten Wirbelströme bremsen die Dämpfungsfahne ab und damit auch den Waagbalken.

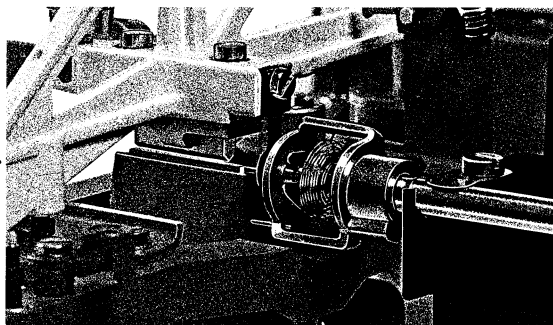


3.4. Die Schalenbremse

Die Schalenbremse vernichtet durch mechanische Reibung die Bewegungen der Schale. Beim Entarretieren wird die Schalenbremse abgesenkt, so dass die Schale frei hängt.

3.5. Die Tarierung

Moderne Waagen gestatten das Austarieren der Einwiegegefäße und ersparen uns so das Rechnen. Die Austarierung des Gewichtsteiles im optischen Bereich geschieht durch Federkraft, die den Waagbalken wieder in die Nullpunktlage zwingt.



Wägefehler

Die Ursachen für das Auftreten von Wägefehlern lassen sich in zwei Gruppen gliedern:

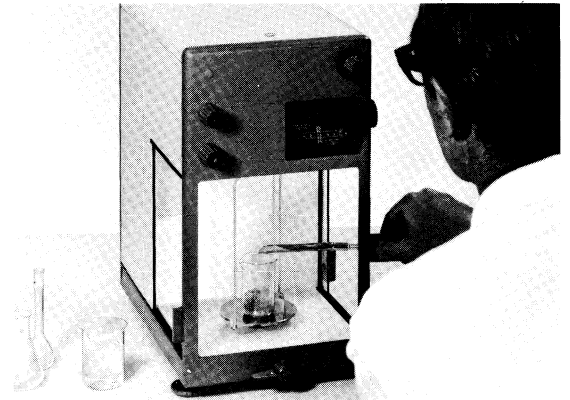
1. Gewichtsveränderungen des Wägegutes infolge scheinbarer Massenvergrößerung (Wasserhaut, Feuchtigkeit, Verunreinigungen).
2. Scheinbare Gewichtsveränderungen durch das Auftreten von zusätzlichen Kräften (Luftauftrieb, elektrostatische Kräfte).

1. Tatsächliche Gewichtsveränderungen

1.1. Wägefehler infolge Wasserhaut

Ursache: An jedem Körper haftet eine dem Wasserdampfgehalt der Umgebungsluft entsprechende Wasserhaut. Die Stärke dieser Wasserhaut ist um so grösser, je tiefer die Temperatur des Körpers gegenüber der Umgebung ist. Ein kalter Körper erscheint daher schwerer, ein warmer leichter.

Abhilfe: Der zu wägende Körper soll erst dann auf die Waagschale gelegt werden, wenn seine Temperatur mit der Umgebungstemperatur übereinstimmt.

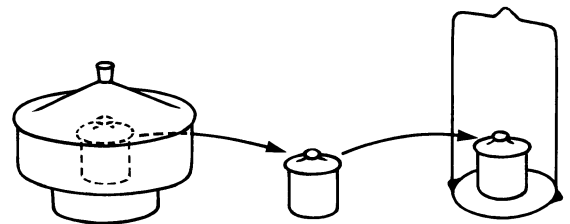


$$t_{\text{Wägegut}} = t_{\text{Waage}} = t_{\text{Raum}}$$

1.2. Wägefehler infolge Feuchtigkeit

Ursache: Beim Wägen feuchter Substanzen wird die Menge der enthaltenen Flüssigkeit mitgewogen. Die Substanz erscheint daher zu schwer. Hygroskopische Substanzen können ihr Gewicht sogar während des Wägevorganges verändern, was sich am Wandern der Waagskala erkennen lässt.

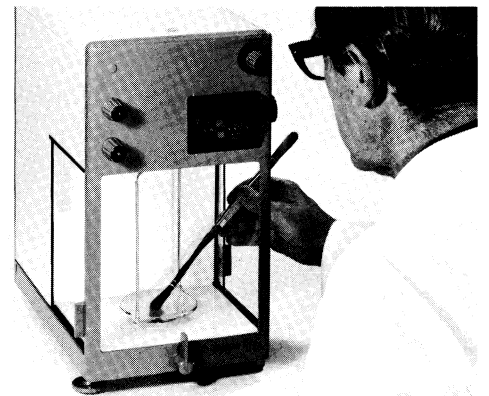
Abhilfe: Die Substanz wird vor der Wägung in einem Exsikkator getrocknet. Wichtig dabei ist, dass die so getrocknete Substanz in einem verschlossenen Gefäss abgekühlt und auf die Waagschale gebracht wird, um zu vermeiden, dass sie neuerdings aus der Umgebungsluft Wasser aufnimmt.



1.3. Wägefehler durch Fremdkörper

Ursache: Das Gewicht von Fremdkörpern und Verunreinigungen kann das Gewicht des Wägegutes verfälschen.

Abhilfe: Zum Wägen verwende man nur absolut saubere Wägegefässe. Sie sollen nicht von Hand, sondern nur mit der Pinzette auf die Schale gelegt werden. Verschüttetes Wägegut ist vor der Wägung von der Waagschale zu entfernen.

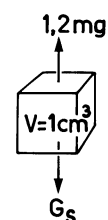


2. Scheinbare Gewichtsveränderungen

2.1. Wägefehler infolge Luftauftriebes

Ursache: Nach dem Gesetz von Archimedes verliert ein Körper scheinbar soviel an Gewicht, wie das Gewicht des von ihm verdrängten Mediums beträgt. Da ein Kubikzentimeter Luft bei 20°C 1,2 Milligramm wiegt, können besonders bei spezifisch leichten Körpern unzulässig grosse Fehler auftreten.

Abhilfe: Nach der Wägung wird zum festgestellten Gewicht des Körpers das Gewicht der verdrängten Luft hinzuaddiert. Die Grösse des Auftriebes berechnet man durch Multiplikation des Körpervolumens mit dem Luftgewicht (1,2 mg/cm³).

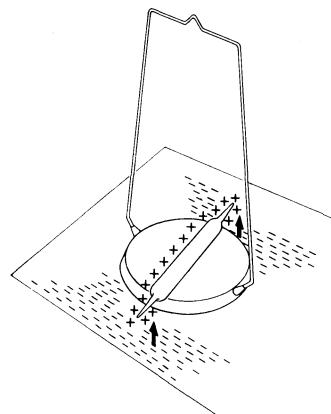


$$G = G_s + 1,2 \text{ mg} \cdot V$$

2.2. Wägefehler infolge elektrischer Kräfte

Ursache: Elektrisch geladene Körper erfahren nebst dem Gewicht noch zusätzliche Kraftwirkungen. Ist das Wägegut und dessen Umgebung gleichnamig geladen, so erfolgt eine Abstossung, bei ungleichnamiger Ladung ziehen sich Wägegut und Umgebung an. Es hängt daher vom Zufall ab, ob ein geladener Körper zu leicht oder zu schwer erscheint.

Abhilfe: Elektrisch leitende Körper können durch eine Metallpinzette, die über einen Draht oder eine Kette geerdet ist, entladen werden. Nichtleitende Wägegüter müssen mit Hilfe einer ionisierenden Substanz (radioaktive Präparate usw.) entladen werden. In jedem Falle empfiehlt sich die Erdung des Waagenmechanismus durch Anschluss an eine Wasserleitung.



Installation von Waagen

Waagen sind nicht nur gegen Erschütterungen empfindlich, sondern reagieren auch auf schnelle Temperaturschwankungen und Luftzug. Bei der Installation sind daher folgende prinzipiellen Punkte zu beachten:

1. Aufstellungsort

Der Raum, in welchem die Waage aufgestellt wird, sollte wenn möglich nur einen Zugang besitzen, so dass er nicht als Durchgangsraum benützt werden kann. Als Arbeitsplatz eignen sich besonders die Ecken eines Raumes, da sie die steifsten Stellen eines Gebäudes sind.

Keinesfalls darf eine Waage in unmittelbarer Nähe von Fenstern aufgestellt werden, da sonst die Gefahr besteht, dass sich die Waage durch die direkte Sonnenbestrahlung ungleichmässig erwärmt. Dasselbe gilt auch in bezug auf in der Nähe befindliche Heizkörper, welche nebst der direkten Wärmestrahlung oft ziemlich starke Luftströmungen erzeugen können.

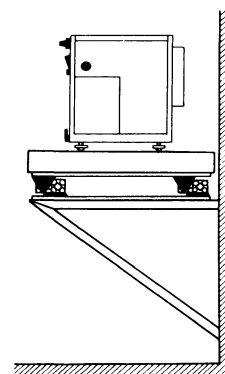


Abb. 1

2. Wägetische

Zur Konstruktion von Wägetischen sind massive Steinplatten besonders geeignet. Man befestigt sie mittels Konsolen an der Wand (Abb.1) oder legt sie auf zwei massive Trageile, die auf dem Boden stehen (Abb.2). Gleichzeitige Befestigung an der Wand und am Fussboden ist nicht günstig, da sonst die Erschütterungen der Wand und des Bodens übertragen werden. Der Wägetisch sollte nicht als Ablageort für schwere Objekte benützt werden. Will man den Wägetisch zum Notieren und Schreiben benützen, so empfiehlt sich die Anordnung nach Abb. 3. Die Schreibfläche aus Holz oder Metall ist hier um den eigentlichen Wägetisch herumgebaut. Wichtig bei dieser Konstruktion ist, dass zwischen Wägetisch und Schreibfläche keine mechanische Verbindung vorhanden ist.

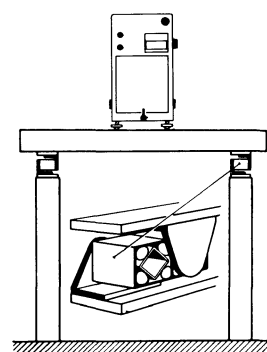


Abb. 2

3. Beleuchtung

Am besten geeignet ist eine künstliche Beleuchtung in einem fensterlosen Raum. Die Beleuchtungskörper müssen in genügender Entfernung vom Wägetisch angebracht sein. Um störende Wärmestrahlungen zu vermeiden, installiere man keine Lampen grosser Leistung. Empfehlenswert sind Leuchtstoffröhren.

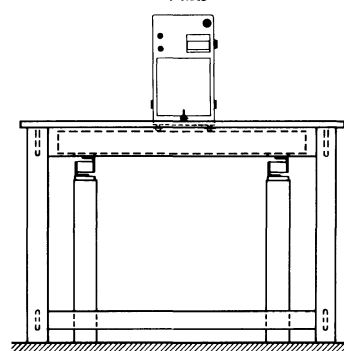


Abb. 3

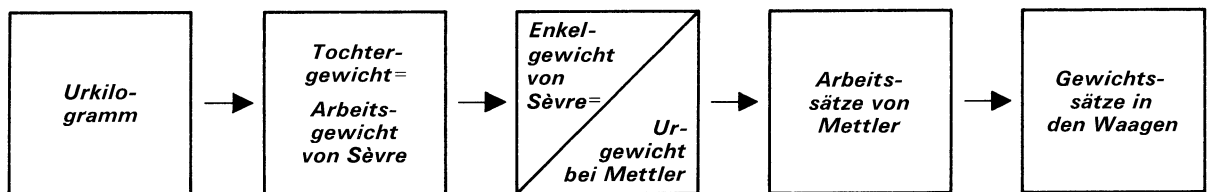
Die Qualitätsbegriffe bei Waagen

1. Die Genauigkeit

Wägen wir irgendein Objekt, dann wollen wir dessen unbekannte Masse mit der bekannten Masse des Urkilogramms auf dem Umweg über das Gewicht vergleichen. Der Begriff "Genauigkeit einer Waage" sagt aus, wie präzise dieser Vergleich gemacht werden kann, d.h. wie weit die Gewichtsanzeige mit dem wahren Gewicht übereinstimmt. Meistens setzt sich ein Wägeergebnis aus dem Wert der abgehobenen Gewichte und einem Gewichtsanteil im Neigungsbereich zusammen. Die Genauigkeit des Resultates ist daher abhängig von der Genauigkeit der Gewichte und der Genauigkeit der Skala im Neigungsbereich.

1.1. Die Genauigkeit der Gewichte

Die in den Waagen verwendeten Gewichtssätze sind indirekte Kopien des Urkilogramms von Sèvres bei Paris.



Der Angleich der Gewichtssätze an das Normgewicht kann im Prinzip mit jeder gewünschten Genauigkeit erfolgen. Es ist dies lediglich eine Sache des Arbeitsaufwandes.

Eine kleine Komplikation ergibt sich aus der Wahl des Materials für die Gewichtssätze. Wurde früher als Standardmaterial praktisch ausschliesslich Messing (Dichte $8,4 \text{ g/cm}^3$) verwendet, so ist es heute rostfreier Stahl (Dichte $7,8 \text{ g/cm}^3$). Würde man die Gewichtsanzeige von Messinggewichten mit derjenigen einer modernen Waage vergleichen, so würden sich bei Wägungen im Vakuum geringfügige Differenzen ergeben, da der Luftauftrieb für beide Materialien verschieden ist. Deshalb gleicht man Stahlgewichte auf Messing ab, indem man sie bei einer normalen Luftdichte von $1,2 \text{ mg/cm}^3$ mit Messinggewichten eicht. Für diese Luftdichte müssen also die Gewichtsanzeigen von Waagen mit Messing- bzw. Stahlgewichten übereinstimmen. Für Luftdichten, die von dem genannten Standardwert abweichen, müssten die Anzeigen rechnerisch oder grafisch korrigiert werden.

1.2. Die Genauigkeit des optischen Anzeigebereiches

Bestimmend für die Genauigkeit im Neigungsbereich ist die Präzision der Skalenteilung der Strichplatte (Skala) und der Ablesehilfen, wie z.B. des Nonius oder des Mikrometers. Ein grosser Teil aller Wägungen wird ausschliesslich im Neigungsbereich durchgeführt; deshalb ist die Genauigkeit dieser Teile von besonderer Bedeutung.

2. Die Reproduzierbarkeit

Wenn wir auf einer Waage einen bestimmten Gegenstand viele Male wägen, erhalten wir eine gewisse Streuung der Resultate. Diese ist abhängig von der Lagerreibung der beweglichen Teile; je grösser die Reibung, desto grösser die Abweichung. Der Qualitätsbegriff, der diese Streuungen umschreibt, heisst Reproduzierbarkeit und ist folgendermassen definiert:

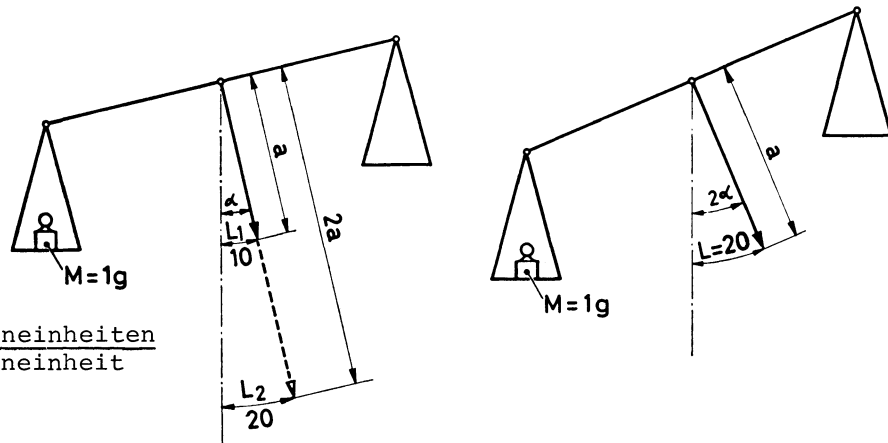
Unter Reproduzierbarkeit versteht man die Uebereinstimmung der Gewichtsanzeige bei beliebig vielen Wägungen des gleichen Körpers auf der gleichen Waagen unter den gleichen Messbedingungen. Als Mass für die Reproduzierbarkeit dient die Standardabweichung, die nach der Gauss'schen Verteilungskurve berechnet wird. Da die Standardabweichung um einen Mittelwert schwankt, wird ihre Zahl immer mit dem Zeichen \pm versehen.

Je kleiner der Zahlenwert der Reproduzierbarkeit ist, desto besser ist eine Waage. Keine Wägung kann genauer sein als die Reproduzierbarkeit. Die experimentelle Bestimmung der Standardabweichung gestattet den objektiven Vergleich der Güte des Wägemechanismus von Waagen verschiedener Bauart und Herkunft.

3. Die Empfindlichkeit

Die Empfindlichkeit (E) ist das Verhältnis der Verschiebung (L) des Einspielanzeigers zu der sie verursachenden Belastungsänderung (M).

$$E = \frac{L}{M} \text{ gemessen in } \frac{\text{Längeneinheiten}}{\text{Masseneinheit}}$$

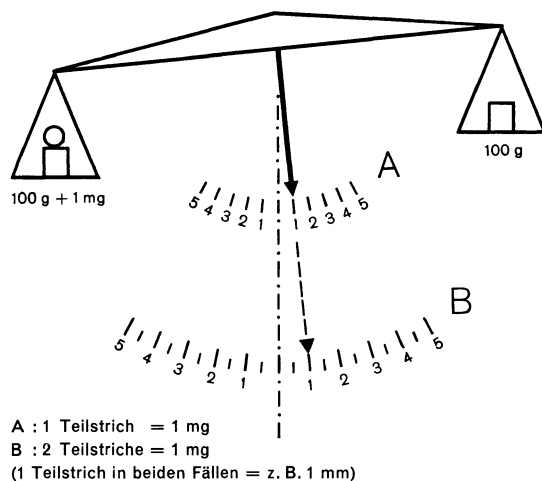


Aus den Skizzen geht hervor, dass durch Verlängerung des Zeigers (oder durch optische Vergrößerung) wie auch durch Höherlegen des Systemschwerpunktes (Verkleinerung des Pendelgewichtes) jede beliebige Empfindlichkeit erreicht werden kann, ohne dass eine mechanische Verfeinerung der Waage notwendig wäre. Durch die gegebene und unvermeidliche Systemreibung werden aber die Streufehler mitvergrößert, so dass auf diesem Wege keine echte Verbesserung des Wägeresultates erzielt werden kann.

4. Die Ablesbarkeit

Unter Ablesbarkeit einer Waage versteht man den kleinsten Bruchteil eines Skalentails, der noch mit Leichtigkeit geschätzt oder mit Hilfe eines Nonius (Mikrometers) abgelesen werden kann.

Je mehr wir das Skalenbild optisch vergrößern, oder je mehr wir den Mikrometer unterteilen, desto besser wird die Ablesbarkeit. Aber auch damit werden nur die Streufehler mitvergrößert, und wiederum wird keine echte Verbesserung des Wägeresultates erzielt.



Zusammenfassend stellen wir fest:

Entscheidend für die Beurteilung einer Waage sind die Angaben über die Genauigkeit und die damit zusammenhängende Reproduzierbarkeit. Nur aus den betragsmäßigen Werten dieser beiden Begriffe lässt sich die Übereinstimmung der Gewichtsanzeige einer Waage mit dem wahren Gewicht verbindlich angeben. Empfindlichkeit und Ablesbarkeit aber sind unwesentlich für die Qualität.

Saphirschneiden und Saphirpfannen

Schneiden und Pfannen (Lagersteine) gehören zu den wichtigsten Teilen einer Analysenwaage. Von ihrer Qualität hängt die Reproduzierbarkeit ab. Darum werden zwei Hauptforderungen an diese Teile gestellt:

1. Härte, also geringe plastische Deformierbarkeit, zur Verringerung der Reibung.
2. Homogenität und Reinheit des Materials zur Verringerung der Abnutzung.

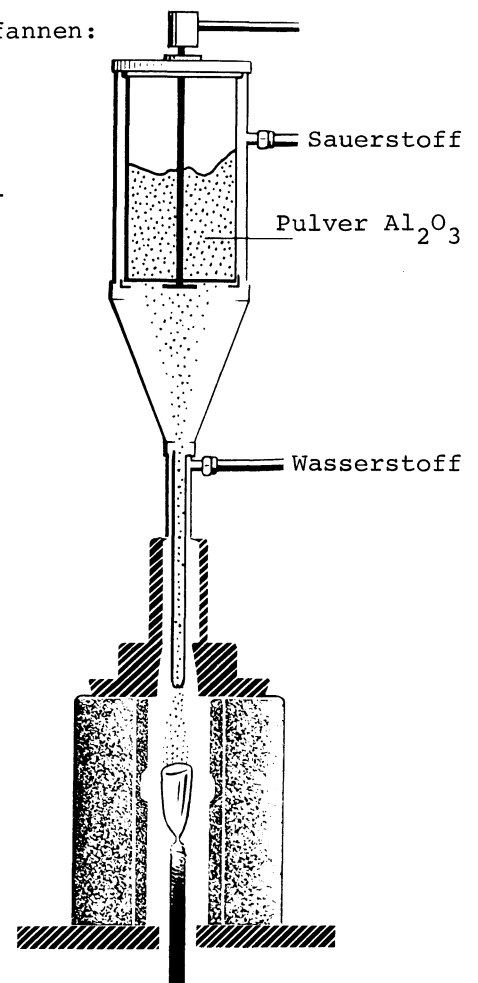
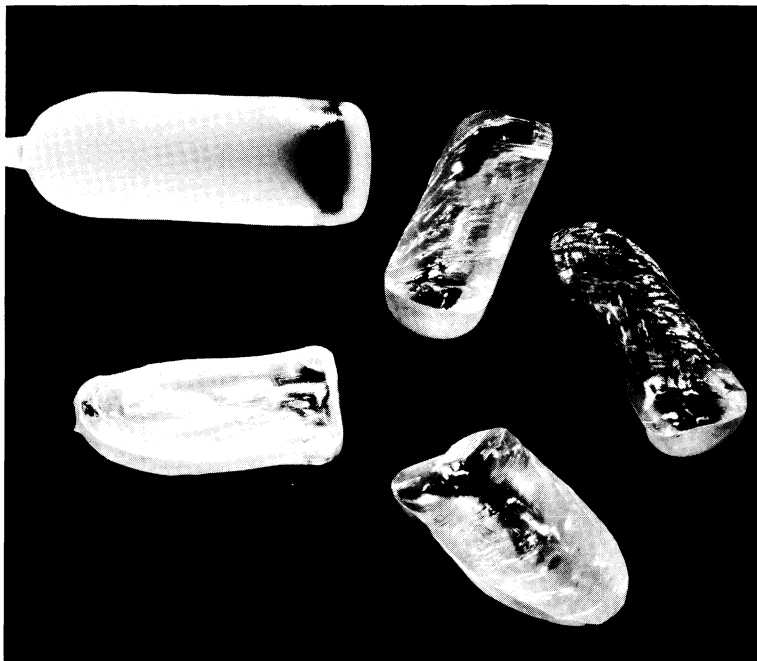
Das klassische Material für die Lager der Analysenwaagen war Achat. Allerdings hat reiner Achat einen Härtegrad von nur 6,4, und als Naturstein ist er immer mit geringfügigen Verunreinigungen oder sogar Einschlüssen durchsetzt. Seine Reibung ist also relativ gross, und die Neigung zum Abbröckeln oder Ausbrechen beschleunigt die Abnutzung.

Als weit besser geeignetes Material erweist sich der synthetische Saphir. Dieses Material wird für alle Präzisionsinstrumente, Uhren, Zähler usw., zur Lagerung der empfindlichen Teile verwendet. Saphir gehört mit dem Rubin zu den Korunden. Korund ist kristallisiertes Aluminiumoxyd. Während der Saphir farblos ist, enthält der Rubin im Kristallgitter Chrom, was ihm die rote Farbe verleiht. Die farblosen Korunde haben folgende Charakteristiken:

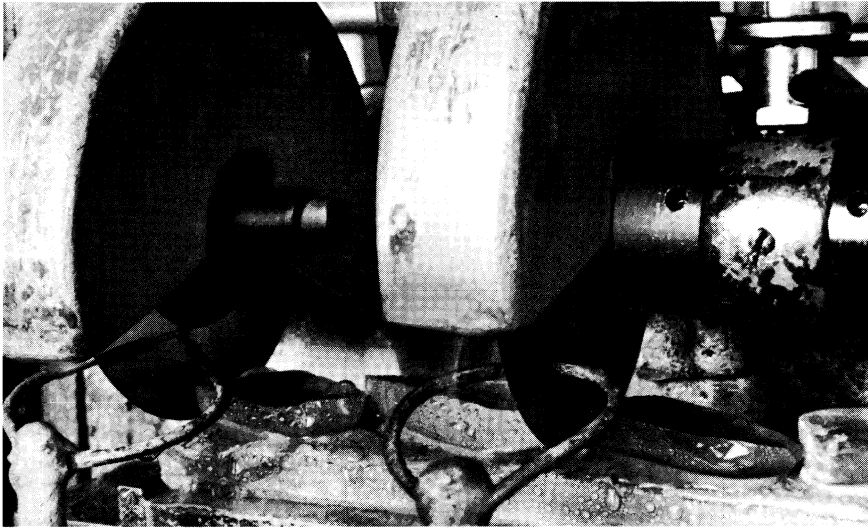
Chemische Formel:	Al_2O_3 extrarein
Spez. Gewicht:	3,99
Kristallform:	hexagonal
Schmelztemperatur:	2050°C
Wärmeausdehnung:	$5,4 \times 10^{-6}$
Druckfestigkeit:	210 kg/mm ²
Härte:	9 (Diamant 10)
Korrosion durch Säuren und Alkalien:	keine bis 300°C, unbedeutend bis 1000°C

Und nun die Herstellung der Saphirschneiden und -pfannen:

Absolut reines Aluminiumoxydpulver wird in der Knallgasflamme bei konstanter Temperatur geschmolzen, worauf es auskristallisiert. Dieses Verfahren wurde von Professor Verneuil am Conservatoire des Arts et Métiers in Paris 1904 gefunden. Der so entstandene synthetische Kristall, die sogenannte "Birne", wird dann in zwei Hälften gespalten.

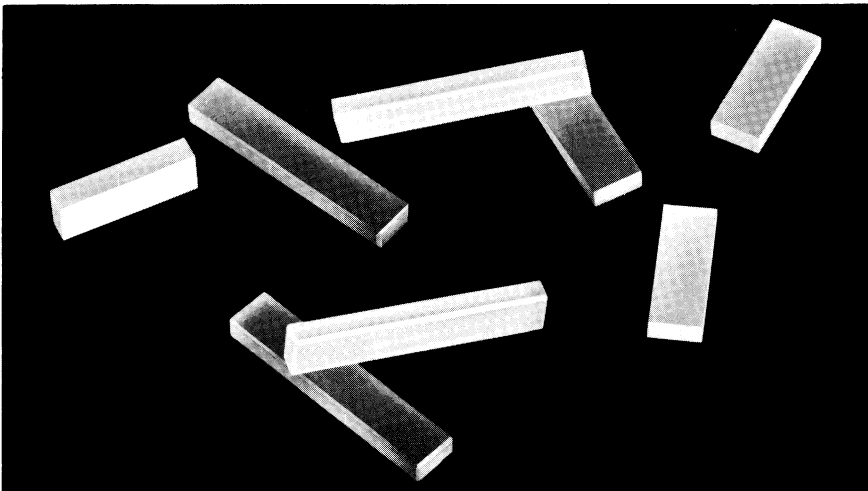


Diese rohen halben Saphirbirnen bilden das Ausgangsmaterial für die Herstellung der Schneiden und Pfannen. Da der Saphir nach dem Diamant das härteste bekannte Material ist, kann er nur mit Diamantwerkzeugen bearbeitet werden. Er wird mit Kupferscheiben, die an der Peripherie mit Diamantkörnern versehen sind, in Stücke, Platten und Stäbchen getrennt.

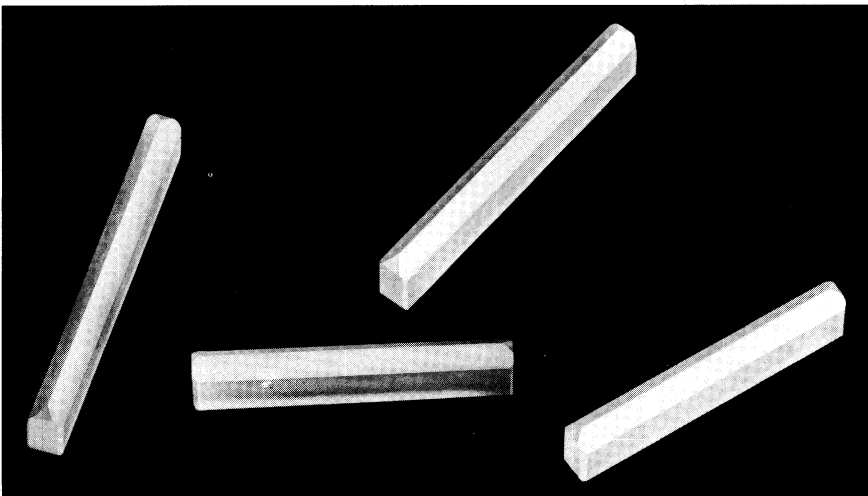


Saphirbirnen
werden gesägt

Die gesägten Rohlinge werden dann mit Diamantschleifscheiben auf die genauen Masse (Toleranz 0,01 mm) geschliffen.



Geschliffene
Pfannen



Geschliffene
Schneiden

Doch die wichtigste Feinarbeit beginnt erst jetzt. Um eine äusserst feine Oberfläche zu erzielen, werden Pfannen und Schneiden optisch poliert. Nur weil der synthetische Saphir aus reinsten Grundstoffen künstlich gezüchtet wird, ist er so homogen und rein, dass seine Oberfläche praktisch absolut plan geschliffen werden kann (Toleranzen von weniger als 0,000 05 mm).

Ringgewichte

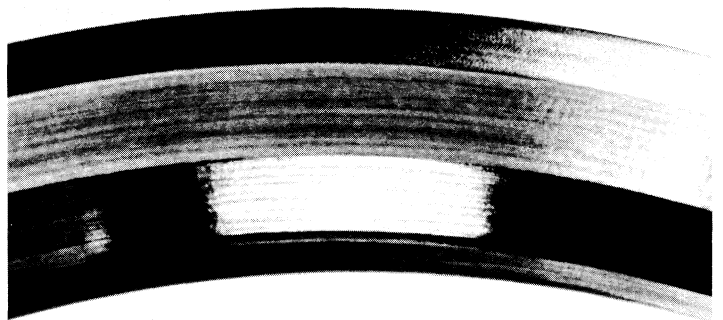
Vom Gewichtssatz hängt weitgehend die Genauigkeit des Massenvergleiches, der Wägung, ab. Dieser Gewichtssatz besteht in modernen Analysenwaagen aus Ringgewichten, die sehr genau gearbeitet sind. Damit sie aber ihre Genauigkeit nicht nur beim Verlassen der Fabrik ausweisen, sondern innerhalb der gegebenen Toleranz bleiben, ihr Gewicht also nicht im Laufe der Zeit durch Oxydation, Schmutzablagerung oder Abnützung verändern, wird als Rohmaterial hochwertiger Chromnickelstahl (Dichte $7,77 \text{ g/cm}^3$) verwendet.



Automatische Drehbank

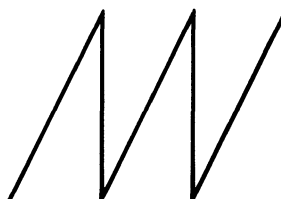
Das Abdrehen des Rohlings erfolgt in zwei Stufen auf eine Genauigkeit von $+0,2$ bis $+0,4 \text{ g}$ auf einer automatischen Zweispindel-Drehbank. Ungefähr jede Minute verlässt ein solches Zwischenprodukt die Drehbank, wird gereinigt, gewogen und nach Übergewicht vorsortiert.

Die Oberfläche des abgedrehten Gewichtes ist noch sehr rauh, sie gleicht einer Gebirgslandschaft. In den "Tälern" würden sich Staub und Schmutz ablagern und das Gewicht verfälschen. An der noch sehr grossen Oberfläche könnte sich eine Wasserhaut bilden.



Mikroaufnahme des abgedrehten Gewichtes

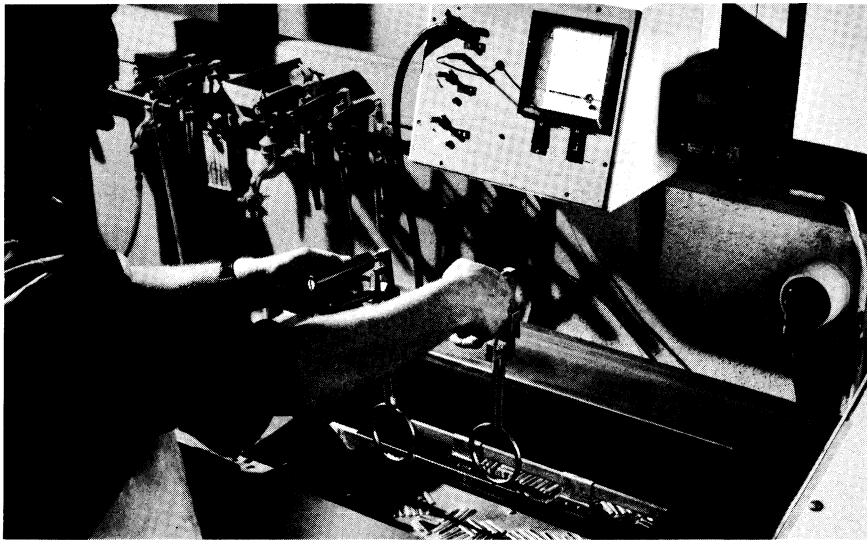
Feilen, Schleifen und Polieren genügt als Oberflächenbehandlung nicht, würden dabei doch nur Zacken und Spitzen flachgedrückt und umgelegt. Durch diese Verfahren entstehen zugedückte Schlupfwinkel für Schmutz und Wasser.



Zackige Oberfläche



Zacken mit umgelegten Spitzen



Elektrolytische
Abgleichung

Es ist deshalb nötig, Ringgewichte elektrolytisch abzugleichen und zu polieren. Die hier erreichte Genauigkeit liegt zwischen 0 und + 5 mg. Das durch die Elektrolyse abgetragene Material stammt vor allem von den "Bergketten", denn in der Tiefe der "Täler" kann die Säure nur schlecht wirken.

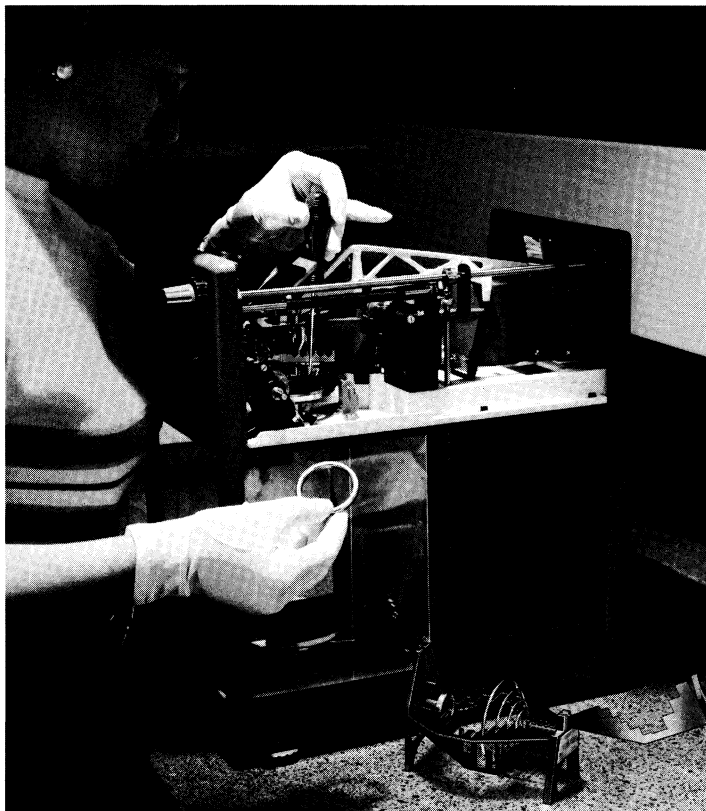
Die mikroskopische Aufnahme des elektrolytisch polierten Gewichtes zeigt jetzt eine sanfte "Hügellandschaft". Hier kann sich Staub und Schmutz nur noch schlecht absetzen, und die Verringerung der Oberfläche hat grossen Einfluss auf die Gewichtskonstanz bei Zu- oder Abnahme der Luftfeuchtigkeit.



Mikroaufnahme des abgeglichenen Gewichtes

In der Endfertigung werden die Ringgewichte auf die geforderte Toleranz von bis zu $\frac{1}{100}$ mg abgeglichen, zu Gewichtssätzen zusammengebaut, ausgesotten und mit Ultraschall gereinigt. Da beim Wägen meist mehrere Gewichte abgehoben werden, müssen die Gewichtssätze so zusammengestellt sein, dass beim Abheben - gleich in welcher Gewichtskombination - der mögliche Fehler die angegebene Toleranz nicht überschreitet.

Der Einbau des Gewichtssatzes in die Waage erfolgt mit grösster Sorgfalt in konditionierten Räumen. Als Schlussprüfung werden dann die Gewichte in der Waage nochmals genau getestet.



Einbau des Gewichtssatzes

Die Strichplatte

Die Strichplatte ersetzt bei den modernen Analysen- und Präzisionswaagen die Strichskala, die wir bei den alten Dreischneidenwaagen finden. Von der Qualität der Strichplatte hängt die Genauigkeit der Waage im optischen Bereich ab. Schon die Strichskala musste sehr genau geteilt sein; die Anforderungen an die Präzision einer Strichplatte aber sind noch wesentlich grösser, denn ihre Zeichen und Zahlen werden optisch vergrössert und projiziert. Da die Abmessungen der Strichplatten im allgemeinen sehr klein sind, betragen die minimalen Strichstärken oft nur $5/1000$ mm und weniger, und die gegenseitige Lagegenauigkeit der einzelnen Zeichen muss auf Bruchteile von $1\text{ }\mu$ gearbeitet sein.

Die Herstellung von Präzisionsteilungen erfolgte früher vorwiegend durch Gravieren in die Wachsschicht, nachträgliches Ätzen des Glases und Einlassen mit Farbe. Heute werden immer mehr fotochemische Verfahren angewandt, die in der Serienfertigung dem herkömmlichen Verfahren überlegen sind.

Schon seit den Anfängen der Fotografie wurde versucht, genaueste Teilungen fotografisch herzustellen. Das zunächst angewandte Silbersalzverfahren, das auf den gleichen Grundlagen beruht wie die bildmässige Fotografie, wird heute immer mehr durch ein fotomechanisches Verfahren abgelöst. Dabei wird die Kopierlösung, das sogenannte Fotoresist, bei der Belichtung nicht wie das Silbersalz geschwärzt, sondern gehärtet, unlöslich gemacht. Durch Wegwaschen der nicht belichteten löslich gebliebenen Schichtteile entsteht ein Auswasch- oder Härterrelief, das z.B. als Ätzschutzschicht für die darunterliegende Oberfläche dienen kann. In Kombination mit dem Aufdampfen von Metallschichten im Hochvakuum erreicht man saubere, sehr widerstandsfähige, reib-, kratz- und chemikalienbeständige Endprodukte von ausgezeichneter Strichqualität.

Bei Teilungen nach den Gravurmethode ist jede einzelne Strichplatte ein Original. Bei Fototeilungen kann das Original eine grossmassstäbliche Zeichnung oder Schichtgravur sein, die fotografisch zu einem Zwischenoriginal verkleinert wird. Das ganze Teilungsbild lässt sich aber auch durch Zusammenprojizieren von einzelnen Zeichen oder Zeichengruppen auf eine lichtempfindliche Schicht aufbauen, wozu hochpräzise Koordinatenmaschinen notwendig sind.

Nach den so erhaltenen Zwischenoriginalen wird das Endprodukt, die Strichplatte, in grossen Serien kopiert, je nach dem Massstab des Zwischenoriginals im Kontakt oder optisch durch Verkleinerung.

Die Fotomethoden bedeuten einen grossen Fortschritt in der industriellen Herstellung von Präzisionsteilungen. Die Anforderungen, die an Feinheit, Sauberkeit und Genauigkeit solcher Teilungen gestellt werden, sind so gross, dass die Fotofabrikation nur erfolgreich sein kann, wenn mit peinlichster Sorgfalt gearbeitet wird. Nur lange Erfahrung und die Nutzung der neuesten Erkenntnisse auf den Gebieten der Fotochemie, der Optik, der Mechanik und der Elektronik ermöglichen es, die fortlaufend steigenden Anforderungen zu erfüllen.

Werdegang einer Strichplatte

