

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 54 (1963)
Heft: 9

Artikel: Elektronische Waagen
Autor: Wälchli, R.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916475>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 14.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Elektronische Waagen

Von R. Wälchli, Zürich

681.267.7

Die elektronischen Waagen, insbesondere die mit Dehnungsmeßstreifen bestückten, haben heute einen Stand der Technik erreicht, die sie dank ihrer Robustheit und Unempfindlichkeit gegen mechanische und physikalische Beanspruchungen vielseitig in der Industrie verwenden lässt. Vor allem ist ihr Einsatz überall dort wirtschaftlich, wo mehrere Objekte nacheinander gewogen werden sollen, da eine einzige elektronische Messapparatur auf die verschiedenen Messorte umgeschaltet werden kann, und wo eine Automatik mit dem Wiegevorgang verbunden werden soll, z. B. beim Dosieren, bei Füll- und Entleervorgängen und beim Tariieren, sowie beim Weiterverarbeiten der Messwerte in Rechenanlagen. Die elektronische Waage wird mit Vorteil bei der Behälter-Wägung (Silos und Bunker), bei Geleise- und Brückenwaagen, bei Kranwaagen, bei Förderbandwaagen und bei Misch- und Dosieranlagen eingesetzt. Ihr Arbeitsbereich liegt in der Gewichtsbestimmung, zwischen 20 kg...1000 t.

1. Einleitung

Der Ursprung der Waage ist auf die Zeiten der Entstehung der menschlichen Kultur zurückzuführen. Jedenfalls sind schon Waagen in ägyptischen Reliefs im 3. Jahrtausend v. Chr. dargestellt worden. Die älteste Form stellt die zweiarmige Balkenwaage dar, in der zwei Gewichte miteinander verglichen werden. Doch auch bereits die alten Ägypter schufen Waagen mit Laufgewichten, die das Gleichgewicht nicht mehr durch Änderung des Gewichtszusatzes erzielten, sondern durch das Verschieben eines unveränderlichen Gewichtes längs eines Hebelarmes.

Die Federwaage ist neueren Ursprungs (18. Jahrhundert) und auch die Erfindung der Dezimalwaage liegt im 19. Jahrhundert. Diese erlaubt, dank Hebelübersetzungen, mit kleinen Gewichten viel schwereres Gut zu wägen, was besonders bei grossen Lasten vorteilhaft ist. Die Federwaage bedient sich der Wegmessung, indem eine Feder zusammengedrückt oder gedehnt und deren Abstandsänderung meistens durch ein mechanisches System mit grossem Übersetzungsfaktor angezeigt wird.

Die elektronische Waage bedient sich des gleichen Prinzips, nur mit dem Unterschied, dass die Verarbeitung der Wegmessung mit elektronischen Methoden geschieht.

2. Das Prinzip der elektronischen Waage

Die heute sehr weit verbreitete und in der Technik äusserst vollkommene mechanische Waage kann nur durch wesentliche Vorteile bietende andere Systeme verdrängt werden. Präzisionswaagen im herkömmlichen Sinne zum Wägen von sehr kleinen Gewichten, sind z. B. bis heute praktisch allein der Mechanik vorbehalten geblieben. Ausnahmen bilden Spezialanwendungen wie das Bestimmen der auftretenden Kräfte bei Flugmodellversuchen unter erschwerten Bedingungen usw.

Wie bereits erwähnt, beruht das häufigst angewandte Prinzip der elektronischen Waage auf einer Wegmessung, wie es auch bei der mechanischen Federwaage ausgenützt wird. Durch die Einwirkung einer Kraft auf das Federsystem erfolgt eine Verschiebung, die ihrerseits wieder in eine elektrische Grösse umgewandelt wird. Als Wandler fallen Widerstände, Selbstinduktionen oder Kapazitäten, die in ihrer Grösse durch das mechanische Federsystem beeinflusst werden, in Betracht.

Les balances électroniques, notamment celles qui sont équipées de capteurs extensométriques, sont maintenant insensibles aux contraintes mécaniques et physiques, de sorte qu'elles trouvent de multiples emplois dans l'industrie. Elles sont surtout économiques lorsque de nombreux objets doivent être pesés successivement, car il suffit de commuter un seul appareillage électronique aux différents endroits de mesure, et lorsqu'un dispositif automatique doit être combiné avec le processus de pesage, par exemple pour le dosage, le remplissage et le vidage, ainsi que le tarage, de même que pour l'utilisation des valeurs mesurées dans des calculateurs. La balance électronique s'utilise avantageusement pour le pesage de récipients (silos et soutes), comme pont à bascule, balance d'engin de levage, balance de bande transporteuse, de même que pour des installations de mélangeage et de dosage. Sa force est de l'ordre de 20 kg à 1000 t.

Die Kraftmessung nach dem magneto-elastischen Prinzip (Fig. 1) arbeitet in der Ausrichtung der statistisch in ihrer Orientierung verteilten Elementar-Magnetchen unter dem Einfluss einer äusseren Kraft. Wird an dieser weich-magnetischen Legierung eine Wicklung angebracht und diese mit einer konstanten Speisespannung beaufschlagt, so ändert sich der Strom in seiner Grösse umgekehrt proportional zu der Permeabilität der Legierung und demzufolge der angelegten Kraft. Diese Methode ist sehr ergiebig, erhält man doch eine Stromänderung bis zu 100 %. Die magneto-elastischen Messfühler können deshalb direkt in einer verstärkerlosen Mess-Schaltung aufgenommen werden. Sie eignen sich für Kräfte von 100 kg...100 t. Die Reproduzierbarkeit beträgt ca. 0,3 % bezogen auf den Nennwert und die Längenänderungen 10...20 μm , was praktisch als weglose Messung bezeichnet werden kann. Die Genauigkeit der gesamten Messeinrichtung ist besser als 1 %. Die Linearität, die mechanische Schlagempfindlichkeit, sowie die Überlastbarkeit sind höheren Anforderungen nicht gewachsen.

Kapazitive Messmethoden, die auf einer Änderung der Distanz zweier Platten, die zusammen einen Kondensator bilden, beruhen, werden heute sehr wenig angewendet, obwohl viele Vorteile, besonders bei der Messung sehr kleiner Kräfte, für diese Methode sprechen.

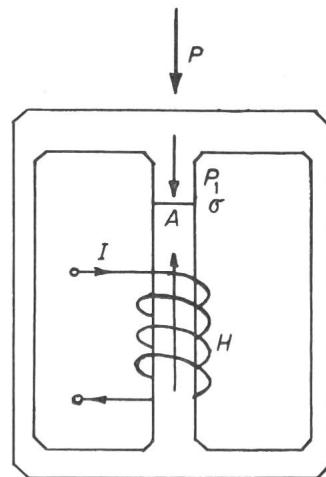


Fig. 1

Kraftaufnehmer nach dem magneto-elastischen Prinzip
(Ausnutzung der Umkehrung der Magnetostriktion)
P, P_1 Kräfte; A Querschnittsfläche; σ mechanische Spannung;
H magnetische Feldstärke; I Erregerstrom

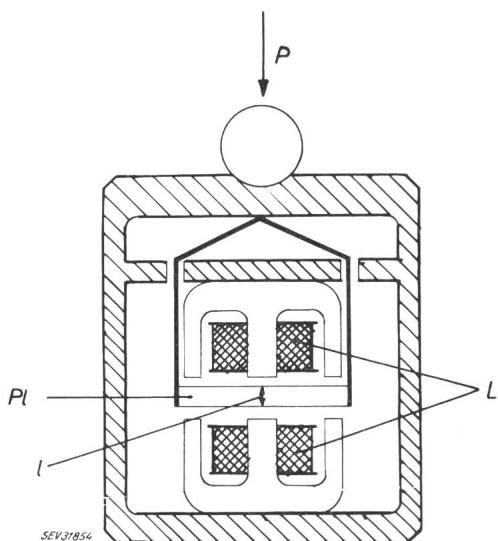


Fig. 2

Kraftaufnehmer nach dem induktiven Prinzip

P Kraft; L Induktivitäten; Pl federnde Platte; l Weg der ferromagnetischen Platte

Bei der *induktiven Methode* (Fig. 2) wird die Selbstinduktion einer Spule durch die Variation des Luftspaltes des magnetischen Kreises beeinflusst. Durch die Verwendung von zwei Induktivitäten in einem Brückenkreis, die sich gegenüberstehen, und in deren magnetischem Feld sich eine federnde Platte befindet, wird in einem grösseren Bereich ein lineares Verhalten der Ausgangsspannung der stromdurchflossenen Induktivitäten gegenüber der mechanischen Verschiebung erreicht. Auch besteht für die Wegmessung die Möglichkeit der Verwendung eines Differential-Transformators mit beweglichem Kern. Die erreichbaren Strom- oder Spannungsänderungen betragen ca. 1 % des Nominalwertes. Die Linearität ist besser als bei der magneto-elastischen Methode.

Die induktiven Druckaufnehmer können für Kräfte zwischen 1 kg und 1000 t gebaut werden. Infolge der verhältnismässig grossen Nullpunkt-Drift dieser Aufnehmer lassen sich die Fehlertoleranzen induktiver Kraft- und Druckmesseinrichtungen über längere Zeit meist nicht wesentlich unter 2...3 % halten. Sie eignen sich besonders für dynamische Messungen.

Oft wird auch zur Kraft- bzw. Gewichtsmessung die *Eigenfrequenz* eines gespannten Drahtes herangezogen, deren Änderung bei einer Variation der Draht-Spannung gemessen wird.

Als einziger aktiver Messfühltyp sei noch der Druckaufnehmer nach dem vom Kristall-Tonabnehmer her bekannten *piezoelektrischen Effekt* erwähnt. Er zeichnet sich durch besonders kleine Abmessungen, seine Festigkeit gegen schroffe Temperaturwechsel und hohe Eigenresonanz aus, die ihn besonders für dynamische Messungen geeignet machen. Infolge der geringen Nullpunktstabilität ist er jedoch für genauere statische Langzeitmessungen ausgeschlossen.

Am häufigsten wird heute die Messung der Wegänderung mittels *Dehnungsmeßstreifen* angewendet. Die Dehnungsmeßstreifendose unterscheidet sich von den anderen Messdosen durch ihre ausgezeichnete Linearität, sowie die grosse Überlastbarkeit. Die erzielbaren Strom- oder Spannungsänderungen sind jedoch gering, sie betragen ca. 1 % des Nominalwertes. Die folgenden Ausführungen befassen sich ausführlicher mit dieser seit langem bewährten Messmethode.

3. Vorteile der elektronischen Waagen

Die elektronischen Waagen ersetzen das Schneide-Hebelwerk der mechanischen Waagen durch ein elektronisches Übertragungssystem, das keiner Trägheit unterworfen ist und demzufolge bei einfacher Bedienung eine sehr schnelle Anzeige des Messwertes erlaubt. Durch die Verwendung von sehr robusten Federsystemen wie z. B. durch die Dehnung oder Stauchung eines Stahlstabes, wird die zu messende Wegstrecke sehr klein (in der Regel max. 0,1 mm), und beeinflusst dadurch das zu wägende Objekt kaum. Die infolge der äusserst kleinen Wegänderungen auftretenden Reibungskräfte sind bei entsprechender Konstruktion praktisch zu vernachlässigen. Die eigentlichen Aufnahmerelemente beanspruchen sehr wenig Raum, sie stehen unter feucht- und staubdichtem Verschluss, sind äusserst robust dank dem einfachen Messprinzip und benötigen keine Wartung. Da keine Schneiden oder bewegliche Teile vorliegen, sind diese Druck-Aufnehmer gegen Schmutz, Korrosion, Staub, Dämpfe und Feuchtigkeit in höchstem Massse unempfindlich. Selbst starke Stoßbeanspruchungen, die den zulässigen, hohen Wert überschreiten sollten, können durch gefederten Einbau der Messelemente aufgefangen werden. Einer der Hauptvorteile liegt jedoch in der Möglichkeit der Fernanzeige und Übertragung der Messwerte auf grosse Distanzen, sowie in ihrer weiteren Verarbeitbarkeit in elektronischer Hinsicht, z. B. in Regelsystemen, Rechenautomaten und Druckwerken. Durch dasselbe elektronische Messinstrument können sodann mit den gleichen Gebern viele Messbereiche bestrichen werden. Das Messinstrument kann auch auf mehrere Gebersysteme umgeschaltet werden, um das Wägen verschiedener Objekte nacheinander zu ermöglichen.

4. Die elektronische Waage auf Dehnungsmeßstreifenbasis

Bei Verwendung von Gebern, deren Federstab aus Spezialstahl hergestellt wird, ist eine lineare und hysteresefreie Wegmessung über einige 100stel mm zulässig. Die vom Dehnungsmeßstreifen-Geber gelieferten Spannungen sind klein und müssen durch eine exakt arbeitende Einrichtung verstärkt und angezeigt werden.

Genauigkeiten von 0,2 % und darunter, werden in der elektrischen Messtechnik als Präzisionsmessungen bezeichnet. Die üblichen Anzeige- und Registriergeräte besitzen eine Klassengenauigkeit von 1...2,5 % und scheiden aus diesem Grunde zum vornherein aus. Selbst mit Präzisionsmessgeräten lässt sich im Ausschlagverfahren kaum eine befriedigende Genauigkeit erzielen, da sich Messverstärker mit dem erforderlichen, gleichbleibenden Verstärkungsgrad über längere Zeit kaum oder nur mit sehr grossem Aufwand verwirklichen lassen.

Die genauesten Messverfahren der Elektrotechnik sind die Kompensationsverfahren, deren Messgenauigkeit nur von der Präzision der verwendeten Brücken und Abgleich-Widerständen abhängt. Eine Hand-Kompensation ist für betriebliche Messungen nicht rationell. Ferner wird an Stelle des Nullindikators ein hochempfindliches Servosystem verwendet, das den automatischen Nullabgleich besorgt. Die Verstärkung, die dabei der Zeigerausschlag durch das elektronische System im Verhältnis zur Grösse der mechanischen Stauchung oder Dehnung des Federstabes erfährt, kann leicht Grössen von 10 000 erreichen.

5. Aufbau und Wirkungsweise

Als Wandler der mechanischen Wegänderung in eine elektrische Grösse dienen die bekannten Dehnungsmess-Streifen. Ein solcher besteht grundsätzlich aus einem dünnen Widerstandsdräht (ca. 20 μm Durchmesser) der schleifen- oder zickzackförmig auf, um, oder zwischen Kunststoff- oder Papier-Streifen gekittet ist. Auf den Federstahl geklebt, folgt der Streifen und damit sein Drahtbelag den Längenänderungen der Objektoberfläche, die auf diese Weise in elektrische Widerstandsänderungen umgesetzt werden. Die mit Messbrücken messbaren Widerstandsänderungen entsprechen innerhalb eines grossen Bereiches der spezifischen Längenänderung der Oberfläche. Nach dem Hookeschen Gesetz lässt sich, sofern der Elastizitätsmodul E bekannt ist, die Materialspannung aus folgender Formel bestimmen:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E} \quad (1)$$

wobei ε die Dehnung, $\Delta l/l$ die relative Längenänderung, σ die mechanische Spannung $\sigma = \frac{F}{A} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}}$ bedeuten.

Bei der Messung von Metallen mit gleichbleibendem Elastizitätsmodul, wie dies bei den Gebern für die elektronischen Waagen der Fall ist, kann die gemessene Widerstandsänderung entsprechend dem Hookeschen Gesetz direkt in Materialspannung und, da der Querschnitt des Federstahls bekannt ist, direkt in kg geeicht werden.

Da das Gewicht eines Dehnungsmess-Streifens äusserst gering ist (Grössenordnung von 0,1 g) wird das Messobjekt weder beeinflusst noch gedämpft.

Fig. 3 zeigt den schematischen Aufbau eines Dehnungsstreifens: Der dünne Widerstandsdräht 1 ist mäanderförmig auf den Kunststoffträger 2 geleimt. An die Elektroden 3 wird die Leitung zur Messbrücke angeschlossen. Um die Lötstellen 4 mechanisch zu entlasten, sind die Elektroden ein Stück eingeklebt.

Der dünne Kunststoffträger muss die Oberflächenbewegungen des Prüfobjektes getreu auf den Widerstandsdräht übertragen. Teilt nun die Werkstoffverformung über den Kunststoffträger und die Klebeschichten dem Widerstandsdräht eine Längenänderung (Verlängerung oder Verkürzung) mit, entsteht eine Widerstandsänderung, die dieser Längenänderung proportional ist. Mathematisch lässt sich die Widerstandsänderung folgendermassen ableiten:

Der Widerstand des Dehnungsmess-Streifens beträgt:

$$R = \frac{4l}{\pi D^2 \varrho} \quad (2)$$

worin ϱ der spezifische Widerstand des Metalldrahtes, l die Länge und D der Durchmesser des Drahtes bedeuten. Diffe-

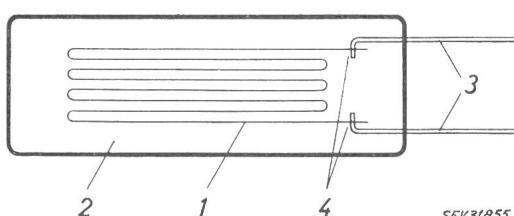


Fig. 3
Dehnungsmessstreifen

1 Widerstandsdräht; 2 Kunststoff- oder Papierträger; 3 Elektroden;
4 Lötstellen

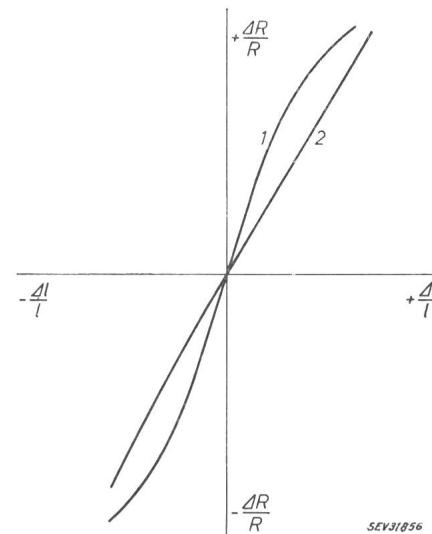


Fig. 4

Beziehung zwischen relativer Widerstandsänderung $\Delta R/R$ und

relativer Längenänderung $\Delta l/l$

1 Chromnickeldraht; 2 Konstantandraht

renziert ergibt sich daraus:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - 2 \frac{dD}{D} \quad (3)$$

Nach dem Poissonschen Gesetz der Querkontraktion (Durchmesserverringerung eines dehnten Körpers) ist:

$$\frac{dD}{D} = -\mu \frac{dl}{l} \quad (4)$$

(μ Poissonsche Konstante)

Wird dieser Ausdruck in Gl. (3) eingesetzt, erhält man:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} (1 + 2\mu) = \frac{dl}{l} k \quad (5)$$

Die Poissonsche Konstante μ liegt bei Metallen zwischen 0,25 und 0,4. Der Eichfaktor k (die Empfindlichkeitskonstante) sollte demnach einen Wert zwischen 1,5 und 1,8 annehmen. Weil aber der spezifische Widerstand ϱ des Drahtes in gewissem Masse von dem Verformungszustand abhängig ist, hat der Faktor k der meisten Dehnungsmeßstreifen einen höheren Wert (ungefähr 2).

Richtwerte des spezifischen Widerstandes, des Eichfaktors (innerhalb der Elastizitätsgrenze) und des Widerstandstemperaturkoeffizienten verschiedener Materialien.

Tabelle I

Material	spez. Widerstand $\mu \Omega \text{ m}$	Faktor k	Temperaturkoeffizient $10^{-6}/^\circ\text{C}$
Eisen	0,1	-4	5000
Konstantan	0,5	2	1
Chromnickel	1	3	40
Kohlenstoff	70	20	-500

Fig. 4 zeigt die Beziehung zwischen der relativen Widerstandsänderung und der relativen Längenänderung bei Streifen, die mit Chromnickelstahl 1 bzw. mit Konstantandraht 2 hergestellt sind. Die Neigung der Kurven entspricht dem Eichfaktor k . Sie ist nur für Konstantan in einem grösseren Bereich geradlinig. Die geringere Temperaturabhängigkeit des Widerstandes von Konstantan ist ein weiterer Grund für seine

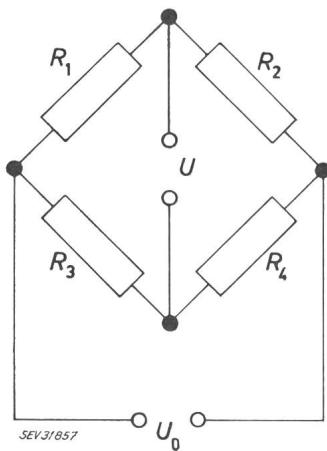


Fig. 5

Brückenschaltung zur Kompensation des Temperatureinflusses

R_1, R_4 aktiver Streifen; R_2, R_3 Kompensationsstreifen;
 U Meßspannung; U_0 Speisespannung

bevorzugte Verwendung als Werkstoff für den Messdraht (Tabelle 1). Da jede Widerstandsänderung bei der Messung als Verformung gedeutet wird, muss der Temperatureinfluss auf den Widerstandsdrähten des Dehnungsmess-Streifens möglichst gering bleiben. Trotzdem wirken sich Temperaturschwankungen über 3 Faktoren auf das Messergebnis betriebsmässig aufgeklebter Streifen aus:

1. Durch den linearen Temperaturdehnungs-Koeffizienten des Federstahls;
2. Durch den linearen Temperaturdehnungs-Koeffizienten des benützten Widerstandsdrähtes;
3. Durch die relative Widerstandszunahme des Drahtes, pro $^{\circ}\text{C}$.

Sofern die Temperaturdehnungs-Koeffizienten des Messobjektes und des Drahtes praktisch gleich sind, und wenn zudem der Widerstandstemperatur-Koeffizient des Meßstreifens sehr klein ist, werden die Temperaturinflüsse weitgehend kompensiert. Konstantdraht auf Stahl geklebt, lässt z. B. die Abweichungen infolge von Temperaturschwankungen sehr gering bleiben.

Die automatische Korrektur der temperaturbedingten Messfehler erfolgt durch die Aufnahme eines zweiten, unbelasteten, jedoch auf das gleiche Material geklebten Dehnungsmess-Streifens (Kompensationsstreifen) in einer Brückenschaltung (Fig. 5). Die Meßstreifen werden dabei so geschaltet, dass sich die temperaturabhängigen Widerstandsänderungen der beiden Streifen aufheben. Zur Messung einer Biegespannung werden der aktive Streifen der Dehnung und der Kompensationsstreifen der Stauchung ausgesetzt. Dadurch wird die doppelte Empfindlichkeit erhalten bei Gewährleistung der Temperaturkompensation.

Statische und quasistatische Messungen können nach zwei Methoden durchgeführt werden:

1. Die infolge der Belastung eines oder zweier Streifen auftretende Brückenspannung wird mit Hilfe eines dazu geeigneten Instrumentes gemessen. Es handelt sich um ein direktanzeigendes Verfahren (Ausschlagsverfahren).

2. Die Brücke wird nach dem Anbringen der Belastung mit Hilfe der einstellbaren Brückenelemente, meistens eines Schleifdrahtpotentiometers, entweder von Hand oder automatisch erneut ins Gleichgewicht gebracht (Kompensationsmethode). In diesem Fall ergibt der Unterschied zwischen den beiden abgeglichenen Zuständen des Schleifdrahtpotentiometers den gesuchten Messwert. Dieses Verfahren wird als Nullmethode bezeichnet.

Für das direktanzeigende Messverfahren müssen die Brückenelemente nicht den höchsten Präzisionsanforderungen entsprechen. Die Messgenauigkeit hängt nur von der Genauigkeit und der Stabilität des Anzeigeteils des Messgerätes mit dem dazugehörigen elektronischen Verstärker ab. Bei der Nullmethode hingegen ist die erreichbare Präzision direkt der Stabilität und Linearität der Brückenelemente proportional. Der Verstärker und das Anzeigegerät dienen ausschliesslich der Nullanzeige und sind daher weniger strengen Bedingungen unterworfen.

Die Diagonalspannung der klassischen Wheatstoneschen Brückenschaltung ergibt sich zu:

$$U_0 = U \frac{R_1}{R_1 + R_2} - U \frac{R_3}{R_3 + R_4} \quad (6)$$

Obwohl die Widerstandsschwankungen nicht als unendlich klein zu bezeichnen sind, kann, durch Differentierung dieser Gleichung, mit ausreichender Genauigkeit die Brückenspannung beim Auftreten einer Widerstandsschwankung in dem aktiven Meßstreifen gefunden werden und zwar durch

$$dU_0 = U \frac{R_2 \cdot dR_1}{(R_1 + R_2)^2} = U \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \cdot \frac{k \sigma}{E} \quad (7)$$

Aus dieser Formel ist der lineare Zusammenhang zwischen der auftretenden Materialspannung und der spezifischen Widerstandsschwankung des Streifens zu erkennen. Voraussetzung ist hier, wie bereits erwähnt, dass die Widerstandsänderungen klein bleiben, was auch in der Praxis tatsächlich der Fall ist. Nun wird bei elektronischen Waagen der Widerstand R_1 stets gleich gross wie R_2 gewählt, da der zweite Streifen der Temperaturkompensation dienen soll. Unter Berücksichtigung von $R_1 = R_2$ erhält man aus Gl. (7) für die Empfindlichkeit:

$$dU_0 = U k \frac{\sigma}{4E} \quad (8)$$

Daraus folgt, dass die Empfindlichkeit nicht vom Widerstandswert der Dehnungsmeßstreifen abhängig ist, sondern

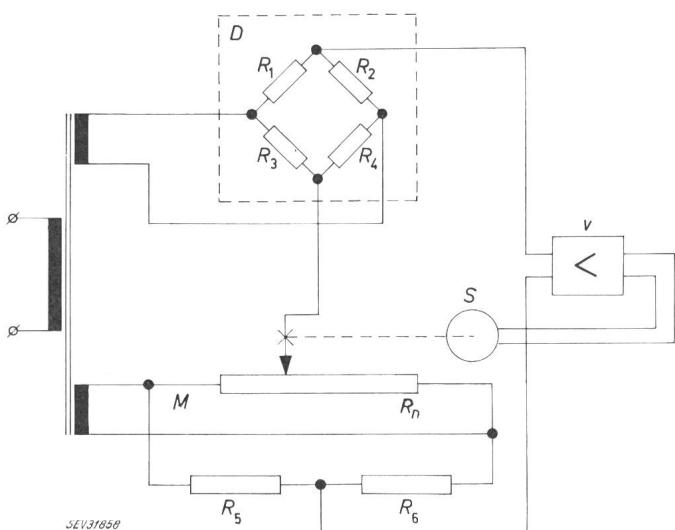


Fig. 6
Prinzipschaltbild der elektronischen Waage

D Druckaufnehmer; V Verstärker; S Servomotor für Brückenabgleich; $R_1 \dots R_4$ Brückewiderstände des Druckaufnehmers; M Messbrücke; R_n Messpotentiometer; R_5 Widerstand zur Nullpunktverstellung; R_6 Widerstand zur Bestimmung des Messbereiches

ausschliesslich durch die angelegte Spannung U und durch den Eichfaktor k bestimmt wird.

6. Die automatisch abgleichende elektronische Messbrücke

Fig. 6 zeigt das Prinzipschaltbild einer automatischen Messbrücke (Fig. 7), wie sie für elektronische Waagen oft verwendet wird. Die Messapparatur besteht aus zwei Wheatstoneschen Brücken. Die erste Brücke wird aus den 4 Dehnungsmeßstreifen des Druckaufnehmers D gebildet. Werden mehrere Geber verwendet, was dem Normalfall entspricht, so werden diese Brücken einander parallel geschaltet. Die zweite Brückenschaltung bildet die sog. Messbrücke M , deren Diagonalspannung durch einen motorisch angetriebenen Schleifkontakt verstellt wird. Beide Brücken werden durch eine Wechselspannung (z. B. ≈ 10 V, 50 Hz) von einem Transformator mit zwei gleichen Sekundärwicklungen aus dem Netz gespiesen. Netzspannungsschwankungen bleiben so ohne Einfluss und eine direkte Speisung aus dem Netz vereinfacht den Schaltungsaufwand. Die Diagonalspannungen der beiden Brücken werden mit Hilfe des Verstärkers miteinander verglichen, dessen verstärkte Ausgangsspannung einem Servomotor S zugeführt wird. Dieser ist mechanisch mit dem Gleitkontakt des Messpotentiometers R_n gekoppelt und bewegt den Kontakt stets in derjenigen Richtung, in der die Differenzspannung sich verkleinert, bis sie schliesslich Null wird. Die beiden Brückenschaltungen stehen nun im Gleichgewicht zueinander, der Verstärker V erhält keine Spannung mehr und der Servomotor steht still. Die Lage des Gleitkontakte auf R_n entspricht im Gleichgewichtszustand einem bestimmten Widerstandswert, der proportional der Widerstandsänderung des Druckgebers ist. Der Gleitkontakt ist mit einem Zeiger verbunden, der den entsprechenden Messwert auf einer Skala anzeigt. Mit Hilfe des Widerstandes R_5 kann die Ausgangslage des Zeigers eingestellt werden. Es ist also möglich, elektronisch durch Verstellen dieses Widerstandes, ein bestimmtes Gewicht, das auf den Gebern lastet, z. B. das Leergewicht eines Behälters (Tara), zu kompensieren. Mit Hilfe des Widerstandes R_6 wird im Prinzip der Umfang des Messbereiches bestimmt.

Wie bereits erwähnt, liefert das Messpotentiometer R_n einen sehr stark ins Gewicht fallenden Beitrag zur totalen Messgenauigkeit der Apparatur. Es besteht aus einem langen,

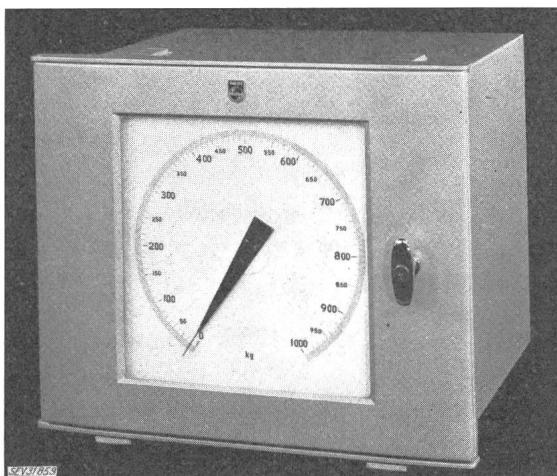


Fig. 7
Automatische elektronische Messbrücke

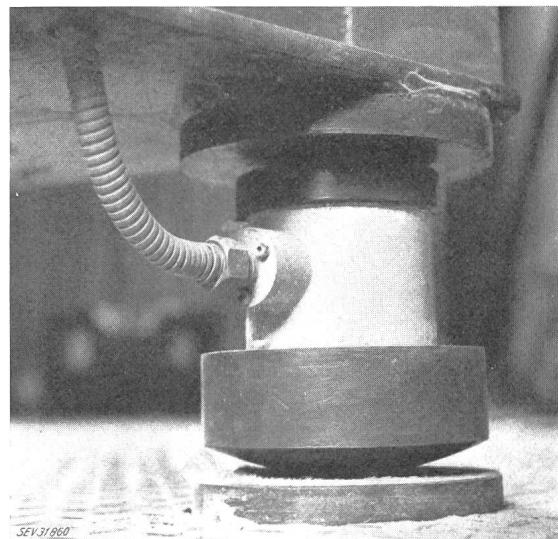


Fig. 8
Druckaufnehmer für Drücke von 20 kg...500 t

Zur Vermeidung von Querkräften ruht die Druckdose auf einer Kugelkalotte

keramischen Rohr mit darauf gewickeltem Widerstandsdräht einer speziellen korrosionsbeständigen Legierung. Die grosse Windungszahl von mindestens 1000 Windungen, die infolge der hohen Ansprüche an die Linearität sehr genau angebracht werden müssen, garantiert ein grosses Auflösungsvermögen.

Um eine schnelle und aperiodische Einstellung des Zeigers zu erreichen, ist an die Welle des Servomotors S ein Generator angebracht, der eine einstellbare geschwindigkeitsabhängige Spannung in den Verstärkereingang zurückspeist. Die optimale Dämpfung des Servosystems kann mit Hilfe dieser Spannung eingestellt werden. Ist sie zu gross oder zu klein, so tritt ein Kriechen bzw. ein Überschwingen des Zeigers ein.

Dank der reichlichen Dimensionierung des Verstärkers erreicht der Motor bei normalen Brücken-Verstimmungen in sehr kurzer Zeit, z. B. bereits nach 0,1 s, seine volle Geschwindigkeit und stellt sich auch mit dieser Geschwindigkeit auf den neuen Wert ein.

Um die heute erreichbare Genauigkeit von 2,5 % des Messbereiches mit elektronischen Waagen zu erreichen, muss der Verstärker eine Eingangsempfindlichkeit von wenigen μV aufweisen. Die noch messbaren Dehnungen liegen in der Größenordnung von 10^{-6} , was einer Spannung in Stahl von nur ca. $0,1 \text{ kg/mm}^2$ entspricht. Die Reproduzierbarkeit liegt bei 1 % des Skalenendwertes.

7. Der Druckaufnehmer

Die Konstruktion der Druckaufnehmer ist gemäss den hohen betrieblichen Anforderungen äusserst robust ausgeführt (Fig. 8). Der eigentliche Messkörper besteht aus einem Spezial Chrom/Nickelfederstahl-Zylinder, -Rohrstück oder -Ring mit der hohen maximal zulässigen Spannung von 110 kg/mm^2 . Das untere Ende des Messkörpers ist mit dem Gehäuse verbunden, währenddem der obere Teil durch eine dünne Stahlmembran hermetisch abgeschlossen wird. Durch die Einleitung der Kraft über gehärtete Kugeln greift sie auf der einen Seite der Kraftmessdose punktförmig an. Dadurch wird eine gleichmässige Kraftverteilung, weitgehend unabhängig von Schubkräften, in einem bestimmten Abstand vom

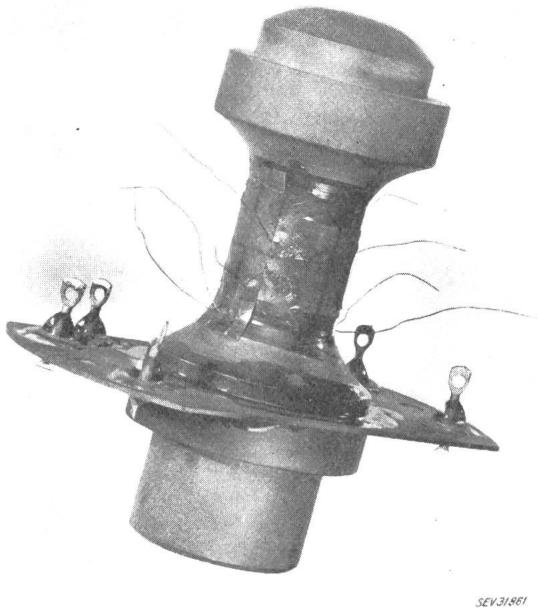


Fig. 9

Beispiel eines Messteils einer Druckdose aus Spezial-Federstahl
Die aufgeklebten Dehnungsmeßstreifen sind gut sichtbar

Angriffspunkt erreicht. Die andere Seite der Kraftmessdose ruht auf einer Kugelkalotte, die eine Einstellung der Druckdose in die Richtung der wirkenden Kraft gestattet und so das Auftreten von Querkräften weitgehend verhindert. An speziell ausgewählten Stellen werden 4 oder mehr längs aufgeklebte Meßstreifen derart mit einer entsprechenden Anzahl Kompensations-Meßstreifen angebracht, dass sie in ihrem Endeffekt zusammen mit quer angebrachten Dehnungsmessstreifen, aufgenommen in einer elektrischen Brückenschaltung, die noch restlich auftretenden Querkräfte und Biegespannungen eliminieren (Fig. 9).

Der elektrische Nullpunkt der Brücke wird sehr genau abgestimmt, ebenso werden Korrekturen der Wärmeeinflüsse und der Empfindlichkeit in der Druckdose vorgenommen. Auch die Eingangs- und Ausgangs-Impedanzen werden auf einen bestimmten Wert eingestellt (zwischen 100 und 1000 Ω), so dass die Druckdosen untereinander ausgetauscht werden können.

Das Material des dem Drucke ausgesetzten Zylinders wird bei Nennlast mit ca. 18 kg/mm² beansprucht, was einer Dehnung $\Delta l/l$ von 0,9 % entspricht. Der Druckzylinder wird dabei weniger als 0,1 mm zusammengedrückt. Die Empfindlichkeit ist so abgeglichen, dass die Brücke eine Spannung von 1...1,5 mV pro V Speisespannung bei Nennlast abgibt. Die Temperatureinflüsse auf den Elastizitätsmodul und auf die Empfindlichkeit sind für normale Betriebsverhältnisse bis 65 °C kompensiert. Ein Druckaufnehmer kann für Messbereiche von 0...20, bzw. 0...150 % seiner Nennlast, für Messzwecke verwendet werden, ohne dass Nullpunktverschiebungen der Brücke oder andere nachteilige Begleiterscheinungen auftreten. Bei Inkaufnahme eines kleinen Nullpunktverlaufes ist er für Messzwecke sogar bis 200 % belastbar. Mechanisch kann er jedoch 5 mal ohne Schaden überlastet werden. Den Innenaufbau eines solchen Druckgebers zeigt Fig. 10.

Die Messgenauigkeit der Drucksorten hängt vor allem von der Linearität, der Hysterese und dem Kriechen ab

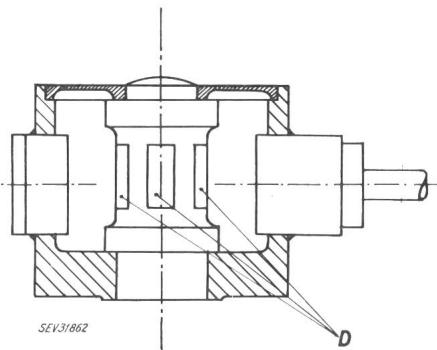


Fig. 10

Schnitt durch eine Druckdose bestückt mit Dehnungsmeßstreifen D

(Hysterese des Messfederstahles, des Widerstandsrahtes und der Klebeschicht, Kriecheffekte in Messfederstahl und den Dehnungsmeßstreifen). Teilweise ist es heute schon möglich, die Linearität, die Hysterese und das Kriechen innerhalb $\pm 1 \%$, bezogen auf den jeweiligen Sollwert, zu halten.

8. Sollwert-, Programm- und Tariereinheiten

Durch den Einsatz von Sollwert-, Programm- und automatischen Tariereinheiten kann ein Wiegevorgang nach voreingestellten Werten halb- oder vollautomatisch ausgeführt werden. Zum Dosieren einer bestimmten Menge wird in umgekehrtem Sinne wie bei einer Wägung vorgegangen, indem mittels eines zum Messpotentiometer R_n parallel geschalteten Widerstandes die Messbrücke selbst auf den gewünschten Wert (Sollwert) verstimmt wird. Eine Automatik, betätigt durch das Meßsystem, hält nur so lange den Füllvorgang aufrecht, bis die beiden Messbrücken, d. h. die Brücke des Druckgebers und die eigentliche Messbrücke einander gleich sind. An Stelle eines festeingestellten Wertes des Parallelwiderstandes zum Messpotentiometer R_n kann auch ein, nach einem bestimmten Programm, gesteuerte Widerstand geschlossen werden. Die elektrische Waage kann auf diese einfache Weise als Automat für Füll-, Entleer- oder kombinierte Vorgänge und Programmsteuerungen erweitert werden.

Bei automatischen Dosievorgängen ist es unvermeidlich, dass nacheinander verschiedene Behälter gewogen werden müssen, deren Eigengewicht voneinander abweichen. Die Möglichkeit der Tarierung, d. h. der Eliminierung des Netto-Gewichtes eines solchen Behälters, wurde bereits gestreift. Durch Verändern des Widerstandes R_5 (Fig. 6) kann der Nullpunkt des Meßsystems um den Betrag der Tara verstellt werden. Es ist nun mit Hilfe einer Tariereinheit möglich, diese Tarierung automatisch durchzuführen zu lassen. Der Tarievorgang wird dabei entweder von Hand mittels eines Druckknopfes oder von einer Programmeinheit ausgelöst.

Die Funktion der automatischen Tariereinheit (Fig. 11) ist kurz folgende: Mit dem Einstellzeiger wird auf der Skala des Messgerätes I der Tarierwert d eingestellt. Entspricht nun der gemessene Wert e nicht dem eingestellten Wert d , so wird die Differenzspannung des Potentiometers dem Verstärker V_2 zugeführt, der mit dem Servomotor S_2 der Tariereinheit II gekoppelt ist. Dieser Servomotor bringt bei der Tarierung eine dritte Brücke b , die mit der Messbrücke a und der Brückenschaltung der Druckdose c in Serie steht, aus ihrem Gleichgewicht. Hierdurch wird dem Verstärker V_1

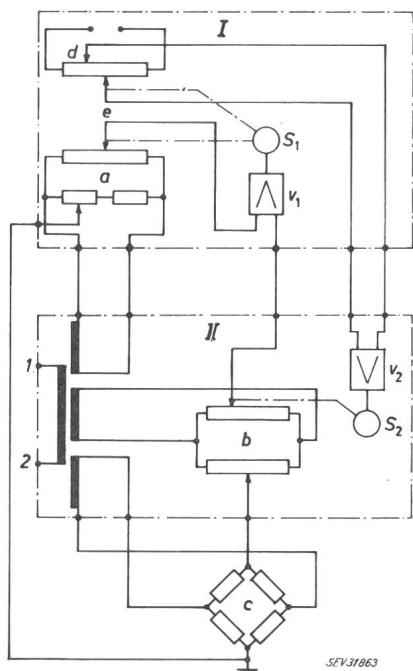


Fig. 11

Prinzipschaltbild der automatischen Tarierung

I Messgerät (Kompensator); II Tariereinheit; a Messbrücke; b Tarierbrücke; c Druckdose; d Tarierwert (Nettogewicht des Behälters); e Messwert; 1, 2 Netzanschluss; V_1, V_2 Verstärker; S_1, S_2 Servomotor

im Messgerät eine Spannung zugeführt, die den mit diesem Verstärker gekoppelten Servomotor S_1 die Messbrücke derart verstehen lässt, bis der gemessene Wert mit dem eingestellten Wert zusammenfällt.

9. Fernanzeige, Weiterverarbeitung der Messwerte

Zur Fernanzeige von Messwerten kann ein zum Messpotentiometer R_n parallel verlaufendes zweites Potentiometer, dessen Schleifkontakt mechanisch mit dem Zeiger des Messpotentiometers gekuppelt wird, verwendet werden. In einfachen Fällen genügt ein Folgemessinstrument, das durch dieses Potentiometer gespeist wird. Sind die Anprüche an die Präzision höher, ist als Folgeinstrument ein Kompensator vorzusehen. Genauere Übertragungsmethoden erreicht man durch die Umwandlung der an diesem zweiten Potentiometer abgegriffenen Spannung in digitale Messwerte, z. B. mit Hilfe einer Thompson-Varley-Brücke mit automatischem Abgleich. Dieser Analog-Digital-Converter tastet mit Hilfe von Relaisketten das Potentiometer ab. Schnellere Einheiten arbeiten rein elektronisch.

Digital arbeitende Kompensatoren können auch unmittelbar, unter Umgehung des automatischen Kompensators mit Folgepotentiometer, für elektronische Waagen eingesetzt werden. Die ganze Anlage dürfte dann jedoch preislich ungünstiger liegen, besonders wenn gleichzeitig eine Registrierung der Messwerte erforderlich ist. Digitale Werte können über beliebige Distanzen mit unverminderter Präzision übertragen werden. Oft wird dieses System auch zur digitalen Grossanzeige mittels Leuchtziffern verwendet.

Durch die beliebige Zusammenstellung der beschriebenen Einheiten kann jedes gewünschte Programm für Wäge- oder Dosierprozesse, betätigt von Hand oder gesteuert durch Halb- oder Vollautomaten, durchgeführt werden. Sind die Messwerte einmal in digitaler Form vorhanden, können sie

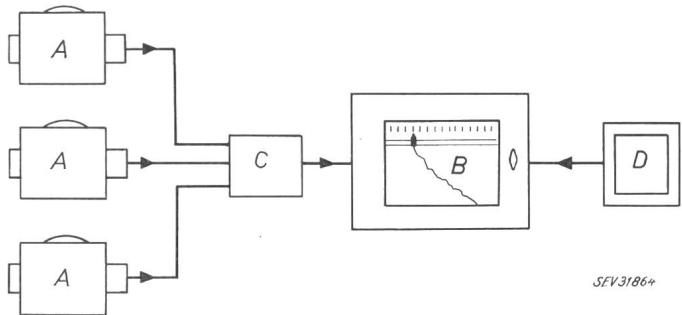


Fig. 12

Blockschema einer elektronischen Waage

A Druckaufnehmer; B Messbrücke nach dem Kompensationsverfahren; C Kabelverteilkasten oder Umschalter; D Tariereinheit zum automatischen Abgleich des Leergewichtes des Wiegeobjektes

leicht mittels Druckern oder Lochstreifenstanzen festgehalten oder in elektronischen Rechenanlagen weiterverarbeitet werden.

10. Anwendungsgebiet elektronischer Waagen

Die Zusammenstellung der benötigten Geräte für eine elektronische Waage ist in Fig. 12 schematisch dargestellt. Die zu messende mechanische Belastung wird von den Gebilden A aufgenommen, wobei die Deformation durch Dehnungsmeßstreifen in eine proportionale Widerstandsänderung umgesetzt wird. Die von den Druckdosen herkommenden Leitungen werden im Kabelkasten C vereinigt (meistens parallel geschaltet), und anschließend der Messbrücke B zugeführt. An Stelle des Kabelverteilkastens kann auch ein Umschalter zur Messung an den einzelnen oder den parallel geschalteten Druckdosen von Messanlagen vorgesehen werden. Die Tariereinheit D dient, wie bereits früher erwähnt, zur Eliminierung des Nettogewichtes des Wiegeobjektes.

Im folgenden seien einige typische Anwendungen beschrieben:

11. Behälter-Inhaltsmessungen

Der grundsätzliche Aufbau einer Behälterwaage zeigt Fig. 13. Überall dort, wo der Inhalt von Behältern mit aggressiven, zähflüssigen, heißen oder unter Druck stehenden Substanzen erfasst werden soll, also vorzugsweise in der chemischen Industrie, in Papier- und Zuckerfabriken, versagen die meisten bisherigen Verfahren. Hier hilft die elektronische Waage. Die Behälter werden meist auf einer Seite beweglich gelagert, um auf der anderen Seite auf einer Druckdose aufzuliegen. Die Eichung erfolgt derart, dass nur der Inhalt, also das Nettogewicht, angezeigt wird (Fig. 14).

Für ganz genaue Wägungen sowie für unsymmetrisch geformte Behälter kann eine Auflage auf 3 Druckdosen vorgesehen werden. Die Anzeigen der einzelnen Dosen werden hiebei elektrisch summiert.

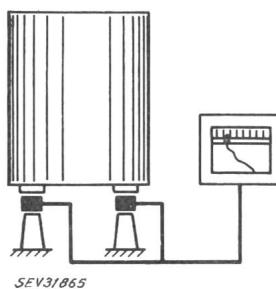


Fig. 13
Elektronische Behälterwaage für
Inhaltsbewegung und Inhalts-
überwachung

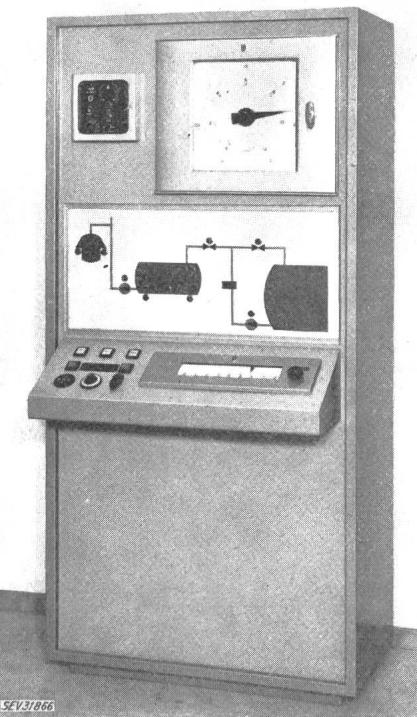


Fig. 14

Messteil einer halbautomatischen Tankwiegeanlage

oben links die Tariereinheit, rechts daneben die elektronische Waage,
darunter der Sollwertgeber

12. Füllstandsmessungen von Silos und Bunkern

Die Hauptschwierigkeit bestand bisher in der Erfassung des Inhaltes mit traditionellen Methoden infolge der unhomogenen Dichte des Schüttgutes, sowie wegen der Schüttkegel und Brückenbildung. Höhenstandmessungen z. B. liefern in solchen Fällen falsche Resultate. Stellt man das Silo oder den Bunker auf Druckdosen und summiert die Auflagedrücke, so entfallen diese Schwierigkeiten. Anwendungen finden sich

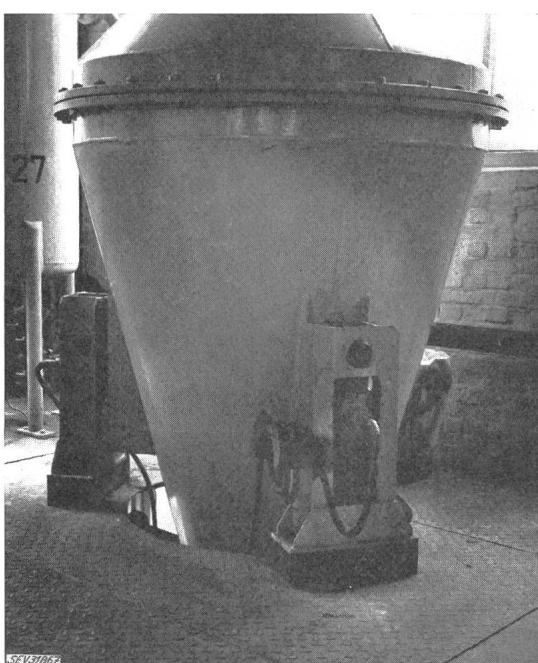
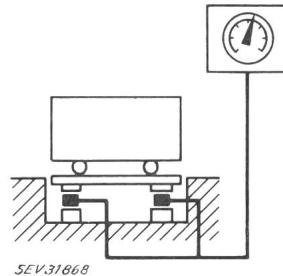


Fig. 15

Wiegen eines Tankinhaltes

Der Tank ist an drei Punkten einer Tragkonstruktion aufgehängt.
Es werden 3 Zugkraftgeber von je 500 kg verwendet

Fig. 16
Elektronische Brückenzaage für
Lasten und Fahrzeuge



in der Zement-, Kohlen- und Nahrungsmittelindustrie sowie bei der Wägung von Säuretanks oder Futtersilos.

An Stelle der Verwendung von Druckdosen können nach dem gleichen Prinzip hergestellte Zugkraft-Messdosen verwendet werden, an denen die Silos aufgehängt werden. Fig. 15 zeigt das Wiegen eines Tankinhaltes mit Hilfe von Zugkraftgebern. Der Tank ist an drei Punkten in einer Tragkonstruktion aufgehängt.

13. Stationäre Brückenzaagen

Den schematischen Aufbau einer stationären Brückenzaage zeigt Fig. 16. Die Brücke ist freischwingend und wird bei Stoßbelastung gefedert. Benötigt werden 4 oder mehr Druckdosen, je nach der gestellten Aufgabe. Ein nicht zu unterschätzender Vorteil der Druckdosen ist ihre Kleinheit und ihre Unempfindlichkeit gegen Schmutz und Nässe. Dank der weglosen Funktion braucht die Waage nicht arretiert zu werden. Die Wägung selbst benötigt sehr kurze Messzeiten, so dass auch dynamische Messungen möglich sind, z. B. an langsam fahrenden Fahrzeugen; sie wird sowohl für strassen- wie für schienengebundene Transportmittel verwendet. Dank ihrer weglosen Funktion eignet sie sich auch vorzüglich für das Ausbalancieren des Achsdruckes von mehrachsigen Lokomotiven.

14. Kranwaagen

Die einfachste und billigste Lösung der Messung des an einem Kranseil hängenden Gewichtes besteht in der Zwischenschaltung einer Zugdose im Kranseil. Diese Methode ist jedoch infolge der langen, mechanisch und temperaturmäßig stark beanspruchten elektrischen Zuleitung ziemlich ungenau (Messfehler bis zu 5%). Werden demgegenüber sämtliche Radlasten der Laufkatze gewogen (Fig. 17), so ergibt sich ein Wiegefehler je nach Ausführung von 0,2...1 %.

Mit Hilfe einer Kranwaage können oft beachtliche Zeiten eingespart werden, weil man die Last nicht zuerst zu einer ortsfesten Waage transportieren und abwägen muss. Als Anwendungsgebiete fallen in Betracht: Eisen- und Hüttenindustrie, Papierindustrie, Beladen und Entladen von Schüttgütern mit Greifern. Die geförderte Menge kann auch automatisch summiert werden.

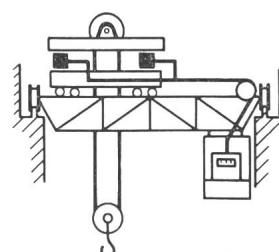
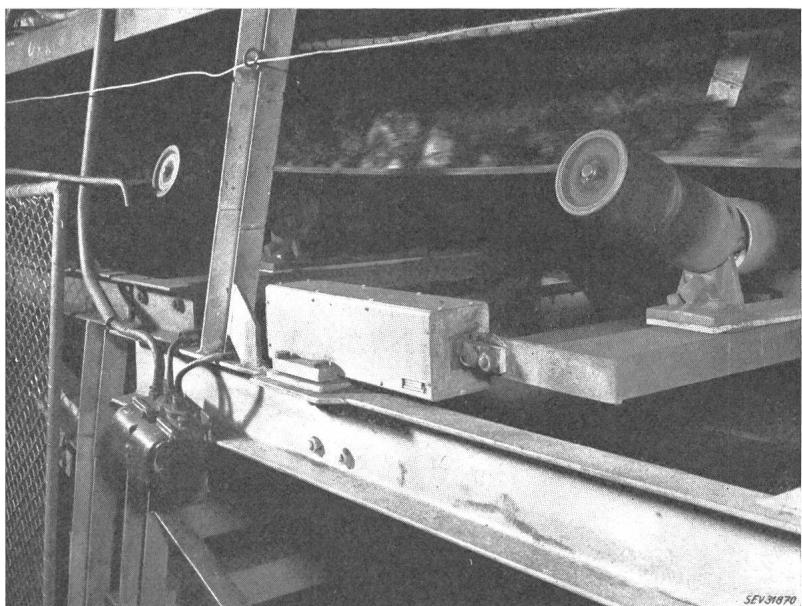


Fig. 17
Elektronische Kranwaage

Fig. 18

Elektronische Förderbandwaage für laufende Gewichtsbestimmung des geförderten Erzes



SEV31870

15. Förderband- und Spezialwaagen

Das Fördergut wird mittels zwei Rollen, auf denen das Förderband läuft und die auf Druckdosen gelagert sind, gewogen (Fig. 18). Mit Hilfe eines Integrators kann über die Zeit oder die Bändlänge integriert und damit die beförderte Gesamtmenge bestimmt werden.

Spezialwaagen unterscheiden sich von den üblichen Waagen hinsichtlich Grösse, äusseren Abmessungen, Einsatzbedienungen und Wägebegang. Für mechanische Waagen sind dazu oft umfangreiche Sonderkonstruktionen nötig, bei elektronischen Waagen hingegen ist die gestellte Aufgabe dank der robusten und kleinen Messelemente meistens ohne Schwierigkeiten zu lösen.

16. Automatische Dosieranlagen

Eine wirtschaftlich und technisch bedeutende Erweiterung des Gebietes der elektronischen Waagen besteht in der Anwendung der Dosierautomatik (Fig. 19) zur vorprogrammierten vollautomatischen Durchführung von Gewichtsdosierungen von festen oder flüssigen Komponenten unter gleichzeitiger Steuerung anderer Arbeitsgänge, die bei einem Dosier- oder Mischvorgang, nötig sind. Als Beispiel sei die Beton- und Asphaltherstellung, sowie die Mischprozesse in der Lebens- und Genussmittel- und chemisch-pharmazeutischen Industrie erwähnt. Die elektronische Waage wird hier, in Verbindung mit Sollwertgebern, Messbereichwahleinheiten, Reihenfolgereglern und Messpunktwahlseinheiten, durch eine Programmatommatik gesteuert. Die Gewichte der einzelnen Komponenten können durch Nachschaltung einer han-

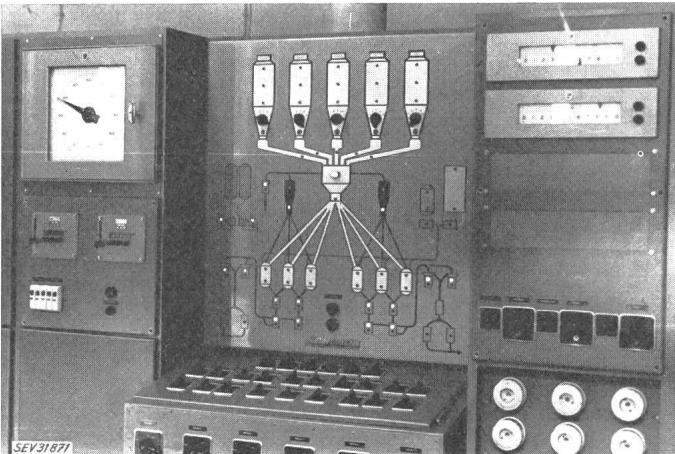


Fig. 19

Dosieranlage zur automatischen Waschpulverherstellung

links der Rundskalenindikator der elektronischen Waage, rechts die Sollwertgeber
Aus 5 Vorratsilos werden in einstellbarer Reihenfolge die Komponenten gewogen und automatisch den Rührwerken zugeführt

delsüblichen Rechen- oder Buchungsmaschine festgehalten werden.

Die Dosierautomatik wird aus Standard-Bauelementen aufgebaut. Obwohl jede Anlage infolge der an sie gestellten spezifischen Anforderungen eine eigene Lösung verlangt, besteht durch die richtige Auswahl und Zusammenstellung der einzelnen Bauelemente immer die Möglichkeit, das Problem zu lösen.

Die Grundlage zur Durchführung einer automatischen Dosierung liegt in der Aufteilung der Vorgänge in sich folgende Einzelhandlungen (Fig. 20). Dieses Sequenzverfahren zeichnet sich durch gegenseitige Verriegelung der Einzelhandlungen aus, die nun stattfinden können, wenn das Signal der Beendigung des vorhergehenden Arbeitsvorganges eingetroffen ist. Die Sollwerte (Gewichte) für die einzelnen Kompo-

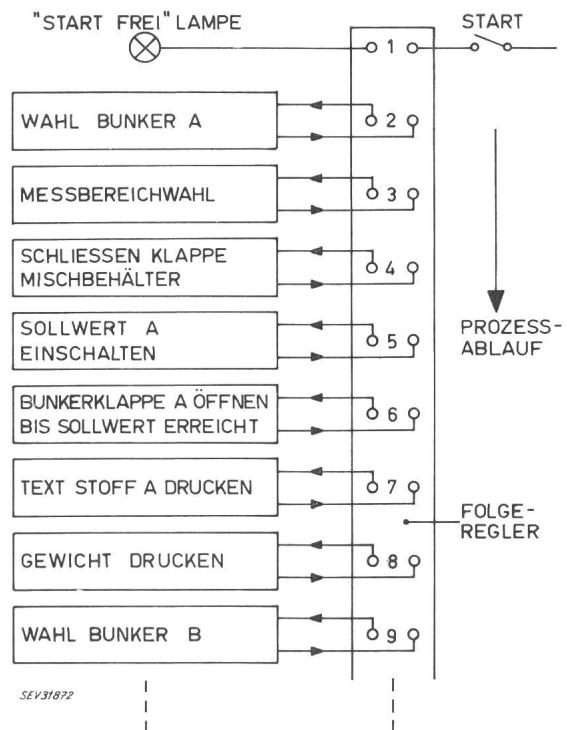


Fig. 20
Beispiel eines Sequenzverfahrens

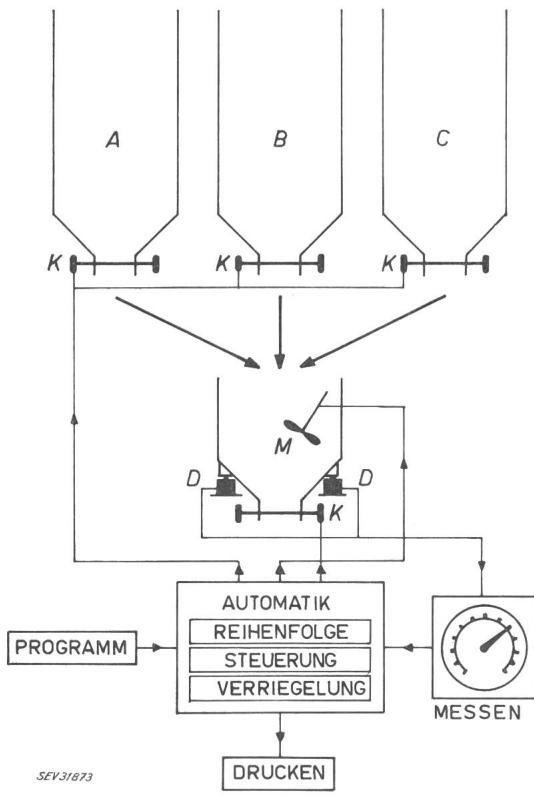


Fig. 21

Blockschaltbild einer einfachen Dosierautomatik

A, B, C Mischkomponenten; K Klappe oder Ventil; M Mischer;
D Druckdose

Signal leuchtet auf, wenn der gemachte Fehler einen bestimmten Wert überschreitet.

Fig. 21 zeigt den schematischen Aufbau einer einfachen Dosierautomatik. Die drei Komponenten A, B und C sollen in einem bestimmten Verhältnis gemischt werden, wobei auch ihre Reihenfolge vorgeschrieben ist. Dazu werden die benötigten Gewichtsmengen der Komponenten, sowie die Reihenfolge der Zufuhr (und evtl. andere Arbeitsgänge), in der Programmierseinheit eingestellt und der Zyklus gestartet. Der weitere Ablauf des Dosier- und Mischvorganges, wie Öffnen und Schliessen der Klappen und Ventile K auf Grund der von den Geben gemeldeten Werte, wird durch die Steuer- und Verriegelungseinheiten erledigt. Die direkte Anzeige der Momentanwerte der Einzelmengen erfolgt analog oder digital im Messteil. Das Gesamtergebnis kann in Zahlen gedruckt oder auf Lochstreifen festgehalten werden.

17. Schlussbetrachtungen

Dort, wo mechanische und elektronische Waagen miteinander konkurrieren, wird gerne ein Preisvergleich durchgeführt. Wenn man von den vielen Vorteilen der weiteren Messwertverarbeitung der elektronischen Waage absieht, ergibt sich eine Preisgleichheit bei einem Messbereich von einigen Tonnen. Darüber sind die elektronischen Waagen billiger, darunter die mechanischen, denn der Preis einer mechanischen Waage nimmt annähernd proportional zum Messbereich zu, währenddem derjenige der elektronischen Waage davon fast unabhängig ist.

Literatur

- [1] Biermasz A. L. und Hockstra H.: Die Messung von Längenänderungen mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen. Philips Techn. Rundschau 11. Jahrgang. Heft.
- [2] Engel W.: Mechanische Probleme bei elektrischen Kraftmessdosen ATM, Februar 1960, S. r13 — R 17.
- [3] Emanuel J.: Wägen auf elektronischem Wege. Elektronik und Maschinenbau 72. Jahrgang Heft 24.
- [4] van Wijngaarden J. K. Jr.: The electronic dynamometer and one of its specific applied uses. Philips Serving Science and Industry. Vol. 3 Nr. 6.
- [5] Horn K.: Elektrische Messung von Kräften und Drücken V-P-J. — Berichte Nr. 54; 1961.
- [6] Hörner H.: Elektronische Waagen im Produktionsfluss. Int. Masch. Rundschau Heft 1/2, 1962.
- [7] Haack W.: Philips wiegt elektronisch. Industrie Elektronik. 8. Jahrgang Heft 3, Oktober 1960.
- [8] Dehnungsmeßstreifen-Messtechnik, Philips' Techn. Bibl. 1951.

Adresse des Autors:

R. Wälchli, Dipl. Ingenieur ETH, Philips AG, Postfach, Zürich 27.