

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 50 (1959)

Heft: 20

Artikel: Mechanische und elektrische Wägemethoden von Präzisionswaagen

Autor: Biétry, L.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059481>

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: 09.01.2026

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

Mechanische und elektrische Wägemethoden von Präzisionswaagen

Von L. Biétry, Zollikon

681.26

Der Aufsatz enthält in der Einleitung eine Zusammenfassung der Anforderungen, die an ein beliebiges Wägesystem gestellt werden müssen. Ein Überblick über die mechanischen Waagen und die gebräuchlichen Wägemethoden bilden die Grundlage für den darauffolgenden Vergleich mit den heute gebräuchlichen elektrischen Waagen. Die Zusammenfassung zeigt die wichtigsten Gründe für die Überlegenheit der mechanischen Waagen gegenüber den elektrischen Waagen auf und belegt sie mit einer entsprechenden graphischen Darstellung.

Einleitung

Die exakte Bestimmung von Massen und Kräften, also von Gewichten, hat von jeher in Wissenschaft und Technik eine massgebende Rolle gespielt. Gewohnt, mit rein elektrischen Einheiten zu rechnen, vergisst der Elektrofachmann oft die Tatsache, dass eine genaue Bestimmung dieser Werte irgendwo und irgendwann immer wieder auf eine äusserst exakte Gewichtsbestimmung hinausläuft. Solange eine Masse auf dem Umweg über deren Kraftwirkung bestimmt werden muss, sind dazu Waagen, d. h. Kräfte- und Drehmomentvergleicher, unerlässlich. Auf den ersten Blick erscheint es ein wenig merkwürdig, dass heute, im Zeitalter der Elektronik, für Präzisionsmessungen die rein mechanischen Methoden der Gewichtsbestimmung beibehalten worden sind. Wenn neuerdings da und dort elektrische Präzisionswaagen auftauchen, so ist man leicht geneigt, anzunehmen, dass der moderne Physiker und Chemiker endlich eingesehen hat, dass das Schlagwort «Elektrisch geht's einfacher» auch auf den Vorgang der Wägung zutrifft. Bei den elektrischen Waagen handelt es sich um Systeme, bei denen das unbekannte Drehmoment der Last mit einem elektrischen Drehmoment verglichen wird. Ein Vergleich zwischen beiden Wägemethoden und den ihnen zukommenden Möglichkeiten ist daher heute sehr aktuell.

Die Forderungen, die an ein Wägesystem, gleichgültig welcher Art, gestellt werden müssen, sind folgende:

- Aussere Einflüsse, wie Luftdruck, Temperatur und Feuchtigkeit sollen sich im Rahmen des Möglichen nicht auf das Resultat auswirken.
- Die systembedingten Waagekonstanten (Hebel, Schwerpunktllage) dürfen sich bei variabler Belastung nicht verändern.
- Im Interesse einer optimalen Reproduzierbarkeit müssen die die Systemreibung bestimmenden Grössen, wie Lagerdruck und Beschaffenheit der Lager selber, nicht nur bei jeder Belastung, sondern auch über eine längere Gebrauchsduer möglichst konstant bleiben.
- Die Ablesemöglichkeit der Resultate soll in einem richtigen Verhältnis zu der Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Waage stehen.

Inwieweit man diesen Forderungen mit der klassischen Pendel- oder Balkenwaage gerecht werden kann, soll folgende Überlegung zeigen.

Die Balkenwaage

Bei einer unbelasteten, im Gleichgewicht befindlichen Pendelwaage liegt der Systemschwerpunkt

Indication des exigences qui doivent être posées à un système de pesage quelconque. Aperçu des balances mécaniques et des méthodes usuelles de pesage. Comparaison avec les balances électriques actuellement en usage. Exposé des principales raisons de la supériorité des balances mécaniques sur les balances électriques. Représentation graphique à l'appui.

vertikal unterhalb der Mittelschneide und ist die Summe aller im Drehpunkt wirkenden Drehmomente gleich null (Fig. 1). Wird die Waage durch Auflegen des zu wägenden Wägegutes einseitig mehr belastet, so geht der Balken zunächst in eine der Endlagen nach Fig. 2 über, die durch die Anschläge

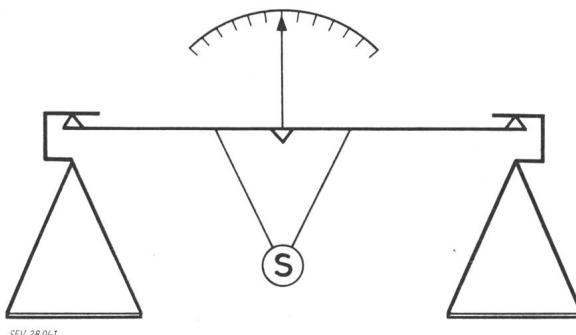


Fig. 1
Pendelwaage mit 3 Lagerstellen
S Systemschwerpunkt

A_1 und A_2 gegeben sind. Mittels geeichter Gewichtseinheiten, die man auf die andere Schale legt, gelingt es immer, den Balken in eine stabile Lage innerhalb der Neigungszone zu bringen.

Das Totalgewicht des Körpers setzt sich somit aus der Summe der auf der Gegenseite aufgelegten geeichten Gewichtseinheiten zusammen zuzüglich dem Gewichtsanteil, der durch den Neigungswinkel α repräsentiert wird.

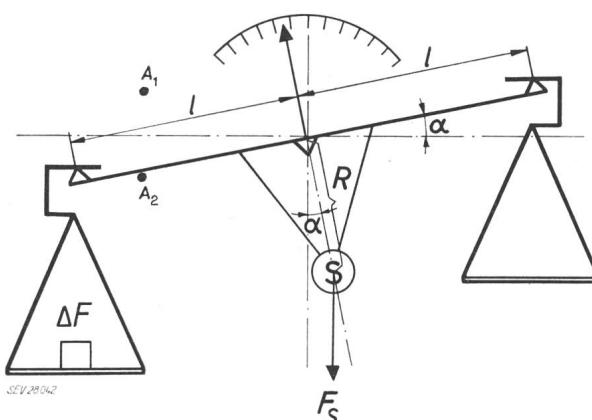


Fig. 2
Pendelwaage belastet
Bezeichnungen siehe im Text

Die Eichung einer Pendelwaage erfordert daher zwei Eichprozesse: die Eichung des Gewichtssatzes und die Eichung des Neigungsbereiches. Normalerweise legt der Chemiker grösseren Wert auf die Ge-

nauigkeit der Anzeige im Neigungsbereich, da seine Gewichtsbestimmungen sich fast immer im Bereich von 10...100 mg bewegen. Die Ultra-Mikroanalyse, die immer mehr an Bedeutung gewinnende Analysenform, begnügt sich sogar mit Substanzmengen von einigen Milligramm.

Immerhin muss eine Waage auch imstande sein, die für die Wägung nötigen Gefässe (Platinschiffchen) zu tragen, die in den meisten Fällen ein Vielfaches des Nettogewichtes ausmachen.

Stellt man für die in Fig. 2 dargestellte Situation die Drehmomentengleichung auf und löst dieselbe auf den Ausschlag α , indem man, wie es für kleine Winkel zulässig ist, $\operatorname{tg} \alpha = \alpha$ setzt, so ist aus der Gleichung klar ersichtlich, welche Kompromisse bei der Konstruktion einer Balkenwaage geschlossen werden müssen:

$$\alpha = \frac{\Delta F l}{F_s R} \pm \frac{M_r}{F_s R}$$

In der Gleichung bedeuten:

ΔF Übergewicht einer Schale im Neigungsbereich

l Länge des Lasthebels

F_s Gewicht des Systemschwerpunktes

R Distanz des Systemschwerpunktes vom Drehpunkt

M_r Reibungsmoment des Systems

α Ausschlag des Balkens

Eine grosse Empfindlichkeit, d. h. ein grosser Ausschlag α bei gegebenem Übergewicht ΔF würde bedingen, dass die Balkenlänge l gegenüber der Distanz des Systemschwerpunktes R vom Drehpunkt sehr gross gemacht wird. Aus Gründen der Stabilität kann aber l nicht beliebig gross gemacht werden. Anderseits wäre es im Interesse einer guten Reproduzierbarkeit erwünscht, dass das stabilisierende Drehmoment $F_s R$ gross gegenüber dem Reibungsmoment M_r ist.

Eines geht aus der Gleichung ganz klar hervor, dass eine sog. «empfindliche» Waage, also eine Waage mit kleinem $F_s R$, nicht unbedingt eine «gute» Waage zu sein braucht, denn zum Charakteristikum einer guten Waage gehört, dass der ganze zweite Ausdruck rechts vom Gleichheitszeichen $M_r/F_s R$ möglichst klein wird. Merkwürdigerweise geben sich viele Waagengebraucher von diesem Zusammenhang keine Rechenschaft und der Ruf nach einer «empfindlichen» Waage, gleichgültig, ob sie eine grosse oder kleine Streuung ihrer Anzeigen aufweist, wird wohl nie verstummen.

Eine andere Art der Selbsttäuschung besteht darin, dass man den optischen Ausschlag ohne Rücksicht auf die tatsächlich vorhandene Reproduzierbarkeit beliebig steigert, obwohl damit auch gleichzeitig die Streuung der Anzeigen mitvergrössert wird.

Überlegt man, wie die vier eingangs erwähnten Forderungen von einem Wägesystem nach Fig. 1, also von einer sog. Dreischneidenwaage, erfüllt werden, so muss man folgendes feststellen:

a) Die äusseren Einflüsse lassen sich bei diesem Waagentyp ziemlich einfach durch Kompensation ausschalten.

b) Was die Hebelsymmetrie und die Schwerpunktlage anbetrifft, so sind diese Waagen gegen ungleiche Erwärmung der beiden Hebelarme und Abnutzung der Schneiden ausserordentlich empfindlich. Hebelasymmetrien ergeben nicht blos Nullpunktverschiebungen, sondern auch falsche Gewichtsanzeigen, während die Abnutzung der Schneiden Schwerpunktverlagerungen und damit unkorrigierbare Empfindlichkeitsänderungen ergeben, zumal in solchen Fällen die Grösse des stabilisierenden Momentes durch die Grösse der Schalenbelastung mitbestimmt wird.

c) Die Systemreibung, also die Reibung an der Mittelschneide und an den beiden Gehängeschneiden variiert natürlich auch mit der jeweiligen Schalenbelastung, so dass die Reproduzierbarkeit der Resultate ebenfalls lastabhängig wird.

d) Die Ablesemöglichkeit endlich kann vom Waagenkonstrukteur frei gewählt werden. Sie wird nicht selten in einem Masse verfeinert, das in keinem Verhältnis zu den vorhandenen Möglichkeiten steht.

Die klassische Balkenwaage nach dem Kompressionsprinzip betrieben, erweist sich aus diesem Gesichtspunkt gesehen tatsächlich als mit grossen Mängeln behaftet. Schon sehr früh suchte man daher einen Weg, die bestehenden Nachteile zu beseitigen, unter Beibehaltung der vorhandenen Vorteile der mechanischen Wägung.

Die unter der Bezeichnung «Substitutionsmethode»¹⁾ bekannte Wägemethode stiess merkwürdigweise bei den Fachleuten immer wieder auf Skepsis, obwohl sie die einzige Möglichkeit einer zuverlässigen Gewichtsbestimmung darstellt. Erst in neuerer Zeit, nach der Einführung eigentlicher Substitutionswaagen, wurden die unbestreitbaren Vorteile erkannt und auch in der Praxis bestätigt. Bei dieser Waage handelt es sich um ein System nach Fig. 3.

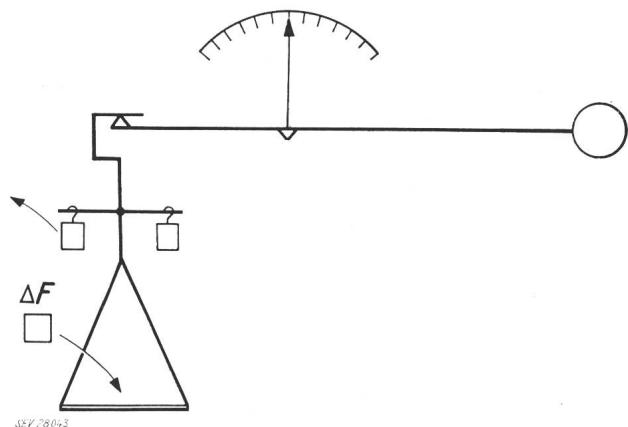


Fig. 3
Pendelwaage mit zwei Lagerstellen (Substitutionswaage)
 ΔF Übergewicht der Schale

Anstelle der Schale rechts in Fig. 2 ist ein festes Gegengewicht getreten. Gewichtssatz und Wägegut hängen an ein und demselben Hebelarm. Wird der zu wägende Körper auf die Schale gelegt, so nimmt man von der vollbelasteten Gewichtsschale so viel weg, dass der Balken innerhalb der Neigungszone zur Ruhe kommt. Die Vorteile, die sich aus dieser

¹⁾ Siehe Chimia Bd. 11(1957), Nr. 4, S. 92...96.

Methode ergeben, sind offensichtlich. Dadurch, dass Wägegut und Gewichtsatz am selben Hebelarm wirken, ist der Hebefehler automatisch ausgeschlossen. Die konstante Belastung ergibt eine konstante Schwerpunktllage und damit eine konstante Empfindlichkeit. Die Systemreibung wird dank der konstanten Belastung zur definierten Grösse, ein Umstand, der bei der Betrachtung dieser Methode früher nicht genügend beachtet wurde. Im Gegenteil, gerade die dauernde Vollbelastung der Waage bildete das Haupthindernis bei der Einführung dieser Methode. Unter falscher Einschätzung des Begriffes «Empfindlichkeit» gab man sich gar keine Rechenschaft darüber, dass es nur dann einen Sinn hat, von dieser Grösse überhaupt zu sprechen, wenn es sich um eine Waagekonstante handelt. Empfindlichkeitsangaben in Skalenteilen pro Gewichtseinheit, ohne gleichzeitige Angabe der Reproduzierbarkeit, sind wertlos und unlogisch. Diese Tatsache ist jedem Elektrotechniker klar, der einmal bei einer Serie von Eichmessungen an einem Galvanometer die Streuung festgestellt hat.

Zusammenfassend kann man feststellen: Mit mechanischen Wägemethoden lassen sich, sofern sie methodisch richtig sind, Wägebereiche von $1 : 10^{-7}$ einwandfrei beherrschen. Dieses Verhältnis gewinnt an Bedeutung, wenn man die Möglichkeiten, die in den sog. elektrischen Waagen vorhanden sind, näher betrachtet.

Elektrische Waagen

Der Gedanke, Gewichtsbestimmungen auf elektrischem Wege vorzunehmen, drängt sich jedem auf, der mit elektrischen Zeigerinstrumenten zu tun hat. Es ist daher nicht verwunderlich, dass gerade in letzter Zeit immer wieder Waagen auftauchen, die auf der Basis von elektrischen Drehspulinstrumenten arbeiten. Prinzipiell handelt es sich um Anordnungen nach Fig. 4. Am Zeiger Z eines Drehspul-

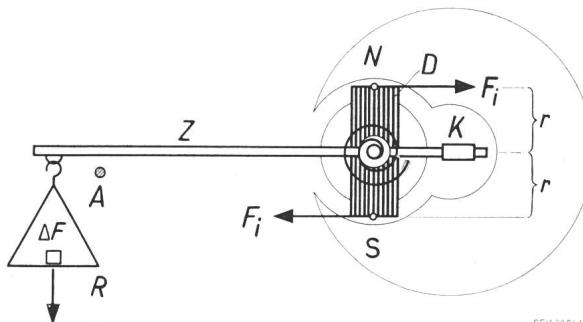


Fig. 4
Drehspulsystem einer elektrischen Waage

ΔF Übergewicht; R Schale; K Gegengewicht; F_i Angriffs punkt des Gegenmomentes; D Drehspule; r Hebelarm des Gegenmomentes

Weitere Bezeichnungen siehe im Text

instrumentes hängt die kleine Waagschale R. In stromlosem Zustand ist die Waage im Gleichgewicht, indem das Gegenmoment teils durch die Stromzuführungsfedern und teils durch das Gegengewicht K aufgebracht wird. Die Drehspule D bewegt sich in einem homogenen Magnetfeld und ist in Spitzen gelagert. Wird die Schale belastet, so senkt sich der Zeiger bis zum Anschlag A. Mit Hilfe eines geeich-

ten Potentiometers P (Fig. 5) stellt man nun den Strom in der Drehspule so ein, dass sich der Zeiger wieder in seine ursprüngliche Gleichgewichtslage, die durch den festen Zeiger markiert ist, einstellt. Als Mass für das notwendige Rückstellmoment dient die Stellung des geeichten Potentiometers P. Die erste Voraussetzung für das taugliche Funktionieren dieser einfachen Vorrichtung ist das Vorhandensein einer extrem stabilisierten Speisespannung U.

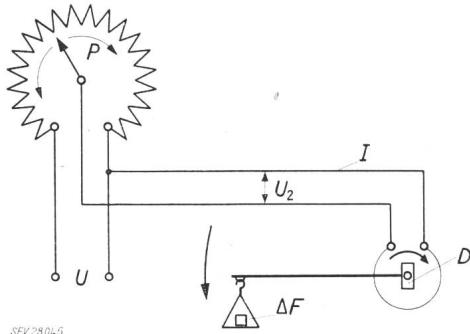


Fig. 5
Schaltung einer elektrischen Waage

U Eingangsspannung; U_2 Spannung an der Drehspule; P geeichtetes Potentiometer; I Strom in der Drehspule
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 4

Bei einer anderen Variante dieses Waagentyps wurde der Aufwand für die Spannungsstabilisierung dadurch umgangen, dass eine Brückenschaltung nach Fig. 6 zur Anwendung gelangte. Diese Schaltung arbeitet praktisch unabhängig von der Speisespannung, wodurch ein Betrieb mit Trockenbatterien möglich wird. Mit Hilfe des Potentiometers P_1 wird zunächst das Drehmoment für den Gewichtsausgleich am Zeiger eingestellt. Daraufhin verstellt man das geeichte Potentiometer P_2 so lange, bis das Galvanometer stromlos wird.

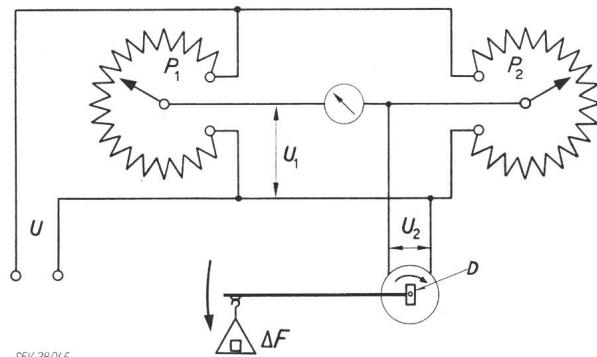


Fig. 6
Schaltung einer elektrischen Waage mit Null-Galvanometer
Bezeichnungen siehe in Fig. 5 und im Text

Ein schwerwiegender Nachteil dieser Waage besteht darin, dass sich beim Verstellen des Potentiometers P_2 gleichzeitig auch der Strom im Drehspul system mitverändert, so dass eine exakte Wägung ein mehrmaliges Einstellen von P_1 und P_2 erfordert.

Beiden Systemen ist gemeinsam, dass der durch das unbekannte Gewicht ΔF erzeugte Ausschlag elektrodynamisch kompensiert wird und die Ableitung des Wägeresultates auf einem in Gewichtseinheiten geeichten Potentiometer erfolgt. An Stelle einer direkten optischen Ablesung des Neigungswinkels des Waagbalkens bei der rein mechanischen

Waage tritt also hier die Ablesung des Drehwinkels eines Potentiometers, nachdem der Balken in seine Nullage zurückgeführt worden ist. Da es sich bei beiden Systemen um Drehmomentvergleicher handelt, sollte man hier eher von elektrifizierten Balkenwaagen als von eigentlichen elektrischen Waagen sprechen.

Einen Vorteil des elektrodynamischen Drehmomentausgleiches könnte man darin erblicken, dass über den ganzen Wägebereich kein Schaltgewichtssatz erforderlich ist, und dass an dessen Stelle geichte Widerstände verwendet werden können. Wendet man die aufgestellten Kriterien auf die elektrischen Waagen an, so ergibt sich folgendes Bild:

a) Da das Lastmoment und das Kompensationsmoment an zwei verschiedenen, nämlich an der Zeigerspitze einerseits und der Drehspule anderseits, angreifen, ist prinzipiell ein Hebelfehler möglich. Eine weitere Quelle für Fehler infolge Temperaturschwankungen und Belastungsänderungen besteht im Ohmschen Widerstand der Drehspule und des Abgleichsystems.

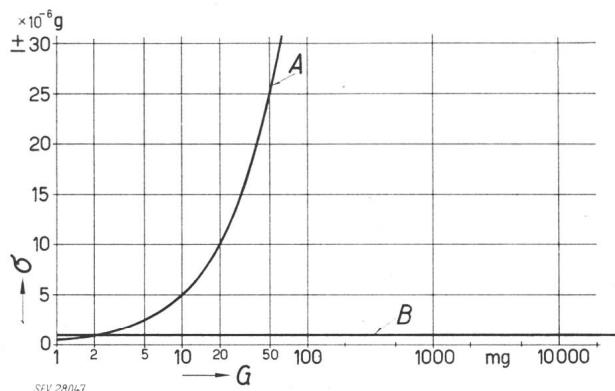


Fig. 7
Streuung σ der Anzeigen in Abhängigkeit von der Belastung G
A Elektrowaage; B Substitutionswaage

b) Da im Neigungsbereich die Waage als Federwaage arbeitet, sind Änderungen der Empfindlichkeit infolge Belastungsänderungen nicht zu erwarten, sofern die Spiralfedern keine Hysteresis aufweisen.

c) Was die Systemreibung anbetrifft, so scheint hier der schwächste Punkt der Elektrowaagen zu liegen, wie dies die Darstellung in Fig. 7 zeigt. Da horizontal liegende Spaltenlager verwendet werden, ergibt sich gegenüber den bei Balkenwaagen gebräuchlichen Schneidenlagern eine unzulässig hohe Reibung. Die schlechte Reproduzierbarkeit der Resultate ist auf diesen Umstand zurückzuführen. Die Angaben in Fig. 7 stammen von einer Ausführung, die zur Verminderung der Lagerreibung eine Vibrationseinrichtung besitzt. Da zudem für die Belastung und Entlastung keine Arretiervorrichtung zur Lagerschonung vorhanden ist, dürften die Werte von Fig. 7 nur über eine kurze Gebrauchsduer gültig sein.

d) Die Ablesemöglichkeit ist unter Berücksichtigung der vorhandenen Möglichkeiten zu hoch.

Zusammenfassung

Der Vergleich zwischen der mechanischen und der elektrischen Balkenwaage zeigt, dass es sich bei beiden Systemen um drehmomentvergleichende Vorrichtungen handelt. Beide Systeme bedingen daher notwendigerweise die Anwendung von Lagerstellen, deren Beschaffenheit weitgehend die Reproduzierbarkeit der Resultate beeinflusst.

Bei den elektrischen Waagen liegen die Verhältnisse insofern ungünstig, als hier nur horizontal-liegende Spaltenlager verwendet werden können, deren Reibungswerte um ein Vielfaches höher sind als dies bei den Schneidenlagern der Fall ist.

Wie aus Fig. 7 hervorgeht, können mit einer mechanischen Waage mit Schneidenlager Gewichte bis zu 20 g mit einer Reproduzierbarkeit von $\pm 2 \cdot 10^{-6}$ g gewogen werden; ein Resultat, das mit einer der beschriebenen elektrischen Waagen nicht erreicht werden kann.

In dieser eindeutigen Überlegenheit liegt der Grund, weshalb von den Fachleuten dem mechanischen Präzisions-Wägesystem gegenüber den elektrischen Waagen auch heute noch der Vorzug gegeben wird.

Adresse des Autors:
Dr. sc. techn. L. Biétry, Rotfluhrstrasse 6, Zollikon (ZH).

Die Dimensionierung von Asynchronmotoren mit Hilfe von Analogie-Rechenmaschinen

Von W. Güttinger, Niederteufen

681.142.001.57 : 621.313.333

Anhand eines Beispieles wird die Verwendung von Analogie-Rechengeräten für die Dimensionierung von Asynchronmotoren erklärt.

Cet article démontre la possibilité d'emploi de calculateurs analogiques dans le but de déterminer les grandeurs caractéristiques de moteurs asynchrones.

1. Einleitung

Während die Verwendung von Analogie-Rechengeräten zur Dimensionierung geschlossener Regelkreise und Antriebsysteme (z. B. Ward-Leonard-Antriebe mit elektronischen und magnetischen Verstärkern) weit verbreitet ist, wird dieses Hilfsmittel bei der Dimensionierung von Asynchronmotoren noch wenig verwendet. Insbesondere bei komplizierteren dynamischen Systemen ist es oft zeitraubend,

den Leistungsbedarf und die günstigste Schlupf-Charakteristik zu ermitteln. Die vorliegende Arbeit soll nun anhand eines einfachen Beispieles die Verwendung einer Analogie-Rechenmaschine für diese Zwecke erläutern.

2. Problemstellung

Bei Pressen und ähnlichen Werkzeugmaschinen kommt es oft vor, dass ein Maschinenteil während einer kurzen Zeit beschleunigt werden muss, dann