

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 15/16 (1890)
Heft: 1

Artikel: Ueber eine electrische Methode zur Messung des Kraftverbrauchs von Arbeitsmaschinen
Autor: Denzler, Albert
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-16422>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.05.2025

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

INHALT: Ueber eine electriche Methode zur Messung des Kraftverbrauchs von Arbeitsmaschinen. Von Dr. Albert Denzler. — Wettbewerb für den Bau „de Rumine“ in Lausanne. V. — Miscellanea: Schweizerische Eisenbahnen. — Vereinsnachrichten: Stellenvermittlung.

Hiezu eine Lichtdruck-Tafel: Wettbewerb für den Bau „de Rumine“ in Lausanne. Zweite Prämie. Motto: „A toi beau pays de Vaud“. Verfasser: Richard Kuder & Joseph Müller, Architekten in Strassburg i. E. Perspective.

Ueber eine electriche Methode zur Messung des Kraftverbrauchs von Arbeitsmaschinen.

Von Dr. Albert Denzler. Privatdocent für Electrotechnik am eidgenössischen Polytechnikum.

Je mehr der Bau dynamo-electrischer Maschinen im Verlaufe der letzten 10 Jahre verbessert wurde, um so stärker machte sich auch für den Constructeur das Bedürfniss nach geeigneten practischen Methoden geltend, die eine einfache und genaue Bestimmung des mechanischen Nutzeffectes solcher Maschinen gestatten. So lange derselbe wie zu Anfang der Entwicklungsperiode noch sprunghaft von 50 auf 60, 70, 75 und 80 % zunahm, machte man noch keine grossen Ansprüche an die Genauigkeit dieser Angaben, sondern begnügte sich im Nothfalle mit der Constaturung eines merklich reducirten Verbrauchs an Kohle, Gas oder Wasser; später jedoch als der Nutzeffect anfangs asymptotisch dem zur Zeit erreichten Werthe von 93 % zu nähern und die auf die einzelnen Verbesserungen entfallenden Zunahmen sich nach einem Procent und Bruchtheilen eines solchen bemessen, machte sich der Umstand fühlbar, dass die früher gebräuchlichen Messverfahren überhaupt ungenügend waren um solch kleine Differenzen auch nur zu erkennen. Es mussten sich schon die Resultate einer Reihe von constructiven Abänderungen addiren, damit eine Erhöhung des Nutzeffectes mit Sicherheit nachweisbar wurde. Man darf sich daher nicht wundern, wenn mancher dieser Summanden als negative Grösse in die Rechnung einging und so lange darin blieb, bis genauere Messungen erlaubten, das Schlussresultat auf seine verschiedenen Componenten zu analysiren.

Die Ermittlung des mechanischen Nutzeffectes erfordert bekanntlich die Bestimmung der an den Klemmen der Dynamomaschine nutzbaren electricen Energie und der von ihr absorbirten mechanischen Arbeit, beziehungsweise der einem Electromotor zugeführten electricen Energie und der an seiner Riemenscheibe gemessenen Leistung an mechanischer Arbeit.

Die Ausführung der *electricen Messungen* bot keine Schwierigkeit, da die bezüglichen Methoden längst in aller Schärfe ausgebildet und in den physicalischen Laboratorien im Gebrauch waren; es wurde im Gegentheil eingesehen, dass man für technische Zwecke ohne Gefahr einen Theil der erreichbaren Genauigkeit opfern dürfe, um dadurch die Apparate und Messmethoden zu vereinfachen und ein bequemes, rasches Arbeiten zu erzielen. Für practische Bedürfnisse begnügte man sich denn auch als Limite festzusetzen, dass die Resultate innerhalb 1 % genau seien; denn man sagte sich mit Recht, dass es keinen Sinn habe, die Genauigkeit der electricen Messungen, insofern sie nicht für sich allein verwertbar sind, auf Kosten des Zeitaufwandes über eine gewisse Grenze hinaus zu erhöhen, so lange die Unsicherheit des Schlussresultates practisch gänzlich durch die grossen, den *mechanischen Messungen* anhaftenden Fehler bedingt ist.

So weisen z. B. *Messungen der Geschwindigkeit* mittelst *Tourenzähler* und *Tachometer* eine Unsicherheit von mindestens $\pm 2\%$ auf, sobald mit demselben Apparat Touren zu messen sind, die von 1 : 10 variiren können; dazu kommt noch, dass der wahrscheinliche Fehler einer Bestimmung zunimmt, je grösser die mittlere Tourenzahl ist, mit der gearbeitet werden soll.

Was *Bremssversuche* anbelangt, so steht fest, dass es ganz ausnahmsweise günstiger Versuchsbedingungen bedarf, wenn eine Genauigkeit von 2 % erreicht werden soll; hat eine und dieselbe Bremse bei verschiedenen Tourenzahlen Kräfte zu messen, die zwischen 1 : 10 schwanken, so ist

die Unsicherheit mit $\pm 3\%$ nicht zu hoch angenommen. Auch hier nimmt die Genauigkeit der Messung mit grösseren Kräften ab.

Am schlimmsten steht es indessen mit den *dynamometrischen Messungen*; es geht dies sehr deutlich aus dem Bericht der Münchener Electricitätsausstellung hervor, woselbst neben zahlreichen electricen Messungen auch Kraftmessungen mit einem als vorzüglich bezeichneten Dynamometer, System von Hefner-Altenneck, vorgenommen wurden. Während z. B. bei der Untersuchung der Kraftübertragungsanlage von Marcel Deprez alle auf electriche Grössen bezüglichen Daten bis auf die dritte Stelle genau angegeben sind, constatirt der Bericht, dass bei der dynamometrischen Ermittlung der transmittirten Kraft die Unsicherheit bis auf 10 % ansteigen konnte; die Tourenzahl der Dynamomaschine war allerdings gross und die zu messende Kraft betrug nur etwa 1 HP., während das verwendete Dynamometer sonst für Leistungen bis zu 13 HP. benützt wurde. Seit dem Jahr 1883 sind nun zwar wenigstens ein Dutzend neue Dynamometer construirt worden; doch sind keine zuverlässigen Messresultate bekannt, welche den Nachweis liefern könnten, dass heute directe dynamometrische Messungen mit einer grösseren Genauigkeit als 3—4 % ausführbar sind, wieder vorausgesetzt, dass sich Tourenzahl und Kraft innerhalb der Grenzen von 1 : 10 bewegen. Uebersteigen die zu messenden Kräfte 30 HP, so werden die benöthigten Dynamometer sehr voluminös und erfordern im Allgemeinen viel Platz für ihre Aufstellung, wenn eine richtige Riemenentwicklung möglich sein soll; kleine Leerlaufarbeiten lassen sich natürlich um so schwieriger messen, je grösser die normale Kraftleistung des Apparates ist.

Man pflegte daher bis jetzt in solchen Fällen meistens indirecte Methoden anzuwenden, bei welchen Bremsungen die dynamometrischen Messungen ersetzen müssen. Ist z. B. für den Antrieb der zu untersuchenden Arbeitsmaschine eine separate Dampfmaschine vorhanden, so wird für eine gegebene Belastung ein Indicordiagramm aufgenommen; hierauf schaltet man die Arbeitsmaschine aus und bestimmt durch Bremsversuche die bei gleicher indicirter Leistung an der Riemenscheibe vorhandene effective Kraft, welche annähernd derjenigen entsprechen wird, welche die Arbeitsmaschine absorbirte. Bei Turbinen ist die Versuchsanordnung ähnlich; man bestimmt durch Bremsung die von der Turbine bei einer gegebenen Beaufschlagung erhältliche Kraft, unter Voraussetzung, dass Tourenzahl- und Niveaudifferenz zwischen Ober- und Unterwasserspiegel beziehungsweise der Druck genau dieselben seien wie im Momente, wo die Arbeitsmaschine angehängt war.

Diese Art der Bestimmung kann angehen, so lange es sich darum handelt einen oder nur wenige Punkte der Kraftcurve zu ermitteln; soll jedoch der ganze Verlauf derselben studirt werden, so dürfte sich die Methode als zu zeitraubend erweisen. Die unvermeidlichen Fehler beim Nivelliren bewegter Wasserspiegel, beim Abschätzen der Coincidenz der Diagramme, Tourenzahlen u. s. f. zusammen mit den beim Bremsen zu erwartenden Fehlern lassen die Unsicherheit einer derartigen Bestimmung unter günstigsten Verhältnissen kaum kleiner als 3—4 % annehmen. Liegen die Curvenpunkte weit auseinander und muss zwischen denselben noch interpolirt werden, so ist der zu erwartende Fehler einer Bestimmung jedenfalls $\geq \pm 5\%$.

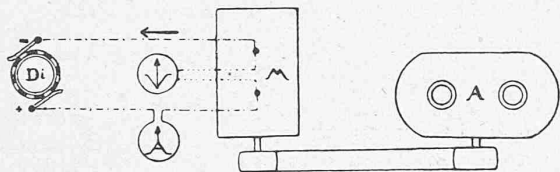
Solche Verhältnisse nöthigten die Electriciker sich nach genauern Messmethoden umzusehen und namentlich die Frage zu prüfen, ob den dynamometrischen Messungen nicht electriche substituirt werden könnten. Es zeigte sich, dass letzteres in weitgehendster Weise möglich ist und bewirkte, dass das neue Verfahren nach und nach fast ausschliesslich zur Ermittlung des Nutzeffectes electricer Maschinen An-

wendung findet, da dasselbe gestattet, die Unsicherheit des Endresultates auf 1 % zu reduciren.

Diese elektrische Methode bietet so grosse Vorteile, dass sie geeignet erscheint auch auf dem Gebiete des allgemeinen Maschinenbaues und in der Industrie die alten dynamometrischen Verfahren zu verdrängen.

Es soll daher mit Rücksicht auf diese letztern Anwendungen das Princip der electrischen Messungsweise kurz entwickelt und deren Empfindlichkeit an einem practischen Beispiel gezeigt werden.

A sei die Arbeitsmaschine, deren Kraftbedarf gemessen werden soll; dieselbe erhält ihren Antrieb von einem



Electromotor M , mit dem sie entweder direct gekuppelt oder durch einen Riemen verbunden ist. Führt man M von der Electricitätsquelle D , z. B. einer Dynamomaschine oder Accumulatorenatterie aus ein gewisses Quantum electrischer Energie zu, so ist der Motor im Stande, eine bestimmte Arbeit zu leisten, welche zum Betrieb der Arbeitsmaschine aufgewendet wird. Diese Arbeit steht nun zu der vom Motor absorbierten in einem einfachen angebbaren Verhältniss; man kann daher sagen, die von der Arbeitsmaschine absorbierte mechanische Arbeit bezw. die zu ihrem Betriebe erforderliche Kraft lässt sich berechnen, so bald bekannt ist, wie viel electrische Energie dem Electromotor zugeführt werden musste, um einen bestimmten Betriebszustand zu erhalten. Damit ist aber die Kraftmessung auf electrische Messungen zurückgeführt, denn die Ermittlung der eingeführten Energie kommt auf die Messung der an den Klemmen des Motors herrschenden Spannungsdifferenz und diejenige der Intensität des durchfliessenden Stromes hinaus.

Ergiebt die Ablesung an dem in die Leitung eingeschalteten Voltmeter V und Amperemeter C eine Klemmenspannung von p Volts und einer Stromstärke von i Ampères, so entspricht dies einem Effect von

$$E_e = i \cdot p \text{ Watts} = \frac{i \cdot p}{736} \text{ HP.}$$

Davon entfallen auf den Betrieb von A

$$E_a = E_e - E_i$$

wo E_i die sog. *innere*, im Motor verlorene Arbeit bezeichnet. Dieselbe setzt sich zusammen aus der eigentlichen Leerlaufsarbeit E_l , hervorgerufen durch Reibung in den Lagern, am Collector, Luftwiderstand, Foucaultströme und Magnetisirungsarbeit im rotirenden Armaturkern, sowie aus der beim Durchgang des Stromes in den Drahtwindungen des Motors sich entwickelten Wärme E_w .

Beträgt der innere, zwischen den Polklemmen gemessene Widerstand des Motors w Ohms, so ist

$$E_w = \frac{i^2 w}{736} \text{ HP.}$$

hieraus folgt

$$E_a = E_e - E_w - E_l = \frac{i \cdot p}{736} - \frac{i^2 w}{736} - E_l$$

p und i werden direct abgelesen; das zweite Glied lässt sich berechnen, da w als eine Constante der Maschine bekannt ist, E_l dagegen muss experimentell bestimmt werden. Dies geschieht dadurch, dass man zu Anfang der Versuche den Riemen zwischen Motor und Arbeitsmaschine abwirft bezw. die Kupplung löst und dem Motor so viel Strom zuführt, bis er im Leerlauf diejenigen Geschwindigkeiten n' n'' annimmt, mit denen er später belastet arbeiten soll; dieselben Messungen werden nach Beendigung der Versuche, wenn wünschbar, nochmals vorgenommen. Aus den correspondirenden Mittelwerthen i_0' und p_0' i_0'' p_0'' leitet sich dann der Werth für

$$E_{l_0} = \frac{i_0' p_0'}{736} - E_{l_0}'' \dots \dots \text{ ab.}$$

Hierauf wird die Arbeitsmaschine leerlaufend in Gang gesetzt und entsprechend für die nämlichen Tourenzahlen n' n'' n''' wie oben p_1' i_1' p_1'' i_1'' abgelesen. Die Differenzen zwischen p_1' i_1' und p_0' i_0' enthalten ausser den Leerlaufsarbeiten von M und A auch noch die Arbeitsverluste im Riemen und die durch den Riemenzug bedingte Vermehrung der Zapfenreibung. Besitzt die Maschine A eine leicht laufende Leerrolle, so lässt sich die Grösse dieser beiden letzten Verluste getrennt ermitteln. Variirt man sodann die Belastung von A , so ergiebt sich schliesslich ein System von Gleichungen, aus dem sich alle auf den Kraftverbrauch bezüglichen Fragen beantworten lassen.

$$E_{a_2} = \frac{i_2 p_2}{736} - \frac{i_2^2 w}{736} - \frac{i_0 p_0}{736}$$

$$E_{a_2}' = \frac{i_2' p_2'}{736} - \frac{i_2'^2 w}{736} - \frac{i_0' p_0'}{736} \text{ u. s. f.}$$

Vom theoretischen Standpunkte aus lässt sich einwenden, dass die Leerlaufsarbeit des Motors nicht als eine Constante aufgefasst werden darf, weil sowohl Foucaultströme als Magnetisirungsarbeit mit wachsendem i zunehmen; dies ist richtig, jedoch ohne alle practische Bedeutung, da es nur Correctionsgrössen zweiter und dritter Ordnung sind, die gar nicht mehr in Betracht fallen.

Ferner ist zu berücksichtigen, dass sich bei lange andauernden Versuchen der Motor erwärmt und w in Folge dessen grösser wird. Die Variation von w kann entweder angenähert berechnet oder auch direct durch Versuche gefunden werden, indem man p_0 und i_0 vor und nach den Versuchen bei festgehaltener Armatur misst.

Die nachstehende Versuchsreihe wird die practische Anwendung der Methode erläutern und ihre Vortheile erkennen lassen; die betreffenden Messungen wurden ausgeführt, um die Belastungsverhältnisse und den Nutzeffect einer kleinen Hochdruckturbine zu ermitteln, welche zum Betrieb einer Anzahl sog. Drahtspinnmaschinen sowie einiger Holzbearbeitungsmaschinen dient¹⁾.

Es sollen hier nur diejenigen Zahlen aufgeführt werden, welche direct auf die electrischen Beobachtungen Bezug haben, da es sich zunächst nur darum handelt nachzuweisen, welche Variationen im Kraftverbrauch mit der Methode noch messbar sind.

No.	Belastung des Motors	$i \cdot p$ $i^2 w$ $i_0 p_0$			
		Watts	Watts	Watts	
1	Der Motor läuft leer ohne Riemen.	402 414 419	35 30 24	367 393 395	bei 590 Touren. 718 846 bei 687 Touren.
2	Leerlauf des Motors + Riemenverlust + Leerlauf der Vorgelege, Transmissionen in d. Drahtspinnerei und Schreinerei.	1827	144	378	Leerlaufsarbeit der Transmission 1305 Watts = 178 HP.
3	wie in 2 + 1 Klöppelmaschine und 4 Drahtspinnmaschinen.	2080	188	378	Nutzarbeit der Spinnmaschine = 209 Watts = 0,285 HP.
4	wie in 3 + Holzdrehbank, Bandsäge sammt Vorgelege, Schleifstein, verticales Bohrmaschinen, alles leerlaufend.	2555	237	378	Leerlaufsarbeit der Maschinen in der Schreinerei = 426 Watts = 0,58 HP.
5	wie in 4 + Holzkehlmaschine (3000 Touren) sammt Vorgelege, leer laufend.	3409	315	378	Leerlaufsarbeit der Kehlmaschine mit Vorgelege = 776 Watts = 1,05 HP.
6	wie in 5 + Bandsäge, schneidet 2,5 cm Dachlatten.	3688	343	378	Nutzarbeit der Bandsäge = 251 Watts = 0,34 HP.
7	wie in 6 + Bandsäge, leer laufend, Kehlmaschine schneidet Nuten von 15 × 10 mm in Hartholz.	4177	427	378	Nutzarbeit d. Kehlmaschine = 656 Watts = 0,89 HP.
8	wie in 7 + Bandsäge schneidet 6 cm dickes Hartholz.	4736	427	378	Nutzarbeit d. Bandsäge = 559 Watts = 0,76 HP.

¹⁾ Die Versuche wurden im December 1889 in der Fabrik der Zürcher Telephon-Gesellschaft vorgenommen.

Der verwendete Electromotor Modell M₃ der Zürcher Telephon-Gesellschaft war mit Serienwicklung versehen und für eine normale Leistung von 8 HP berechnet, sein innerer Widerstand w fand sich = 1,92 Ohms bei 15° Celsius; die mittlere Tourenzahl während der Versuche betrug 685—690; der Motor arbeitete auf die gleiche Riemenscheibe des Doppelvorgeleges wie sonst die Turbine; er erhielt seinen Strom von einer gleichfalls direct gewickelten Bogenlichtmaschine, deren Klemmenspannung durch Variation der Tourenzahl beliebig regulirt werden konnte.

Stromstärke und Spannung wurden an ähnlichen Messinstrumenten abgelesen, wie sie gewöhnlich auch bei electrischen Beleuchtungsanlagen verwendet werden.

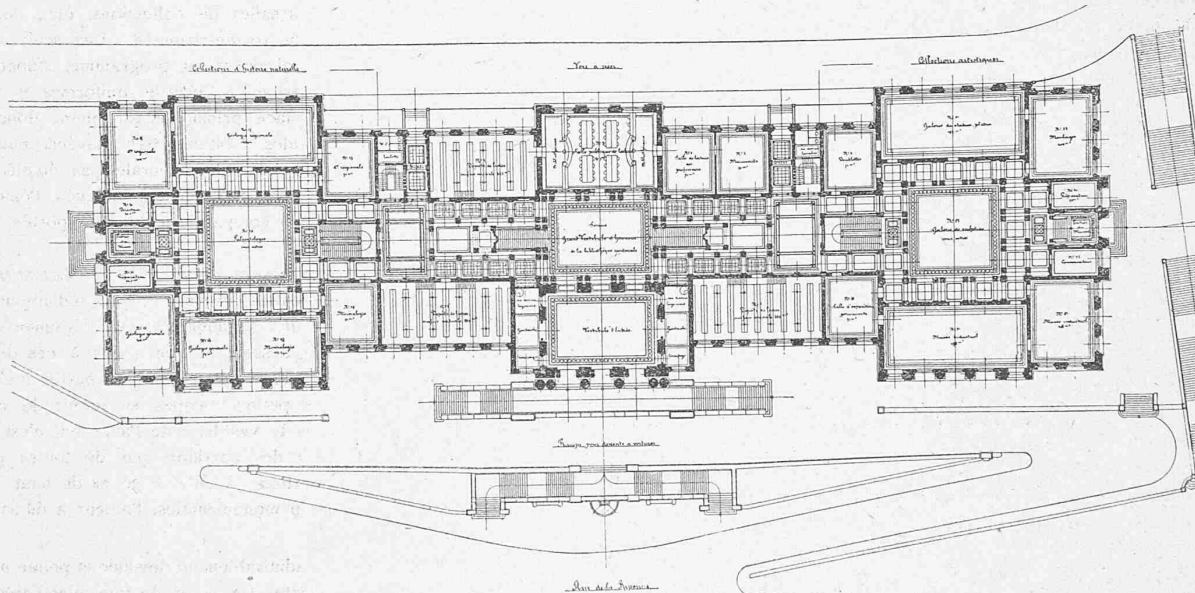
Es geht schon aus diesen wenigen Zahlen hervor, dass hier noch sehr kleine Differenzen im Kraftverbrauch sicher nachweisbar sind. Bei kleineren Motoren machen sich selbst Aenderungen des Bürstendrucks gegen den Collector, der Grad der Riemensteifigkeit u. s. w. sehr wohl bemerklich. Die Belastung variierte während der Versuche nahezu um das Zwölfte ihres anfänglichen Werthes; sie hätte mit den näm-

ders hergerichteten Versuchsstelle zu transportiren. Dies dürfte in der Folge wohl eine Reihe Kraftmessungen veranlassen, die man bis jetzt einfach der Umständlichkeit wegen unterliess.

Auf den wesentlichsten Einwurf, der sich gegen die beschriebene Methode erheben lässt, dass dieselbe die Anwendung zweier Dynamomaschinen bedinge, ist zu bemerken, dass in den meisten Fällen nur die Beschaffung einer Maschine nöthig sein wird, da z. B. in der Schweiz wenige grössere industrielle Etablissements bestehen, die nicht bereits eine oder mehrere Dynamomaschinen für Beleuchtungszwecke besitzen. Da wo es sich nur um einmalige oder vorübergehende Messungen handelt, wird ein passender Electromotor sammt Messinstrumenten leicht miethweise von den Fabricanten solcher Maschinen erhältlich sein, wie das ja mit Bremsapparaten auch der Fall ist. Für Fabriken dagegen, welche regelmässig solche Messungen vorzunehmen haben, werden die Vortheile des electrischen Systems sich als so werthvoll erweisen, dass die grösseren Anschaffungskosten einer solchen Einrichtung gegenüber einem mechanischen Dynamometer gar nicht in Betracht fallen.

Wettbewerb für den Bau „de Rumine“ in Lausanne.

II. Prämie. — Motto: „A toi beau pays de Vaud“. Verfasser: Richard Kuder und Joseph Müller, Arch. in Strassburg i. E.



Grundriss vom Erdgeschoss. — Masstab 1 : 1000.

lichen Apparaten ohne Schwierigkeit noch bedeutend gesteigert werden können, wenn nicht bei stärkerer Beanspruchung der Riemen auf dem Vorgelege abgesprungen wäre.

Ein nicht zu unterschätzender Vortheil der Methode liegt in der ungemein leichten Regulirbarkeit des Motors, die nicht nur gestattet mit Hilfe eines Handrheostaten die Stromzufuhr der Belastung entsprechend zu ändern, sondern die auch eine Aenderung der Tourenzahl innerhalb weiter Grenzen ermöglicht. Dieser letztere Umstand ist sehr wichtig, denn in vielen Fällen ist zur Beurtheilung einer Maschine gerade die Kenntniss des Kraftverbrauchs bei variabler Geschwindigkeit erwünscht; solche Bestimmungen lassen sich jedoch mit gewöhnlichen Dynamometern nur ungenau ausführen und in Fällen, wo kein Betriebsmotor mit variirbarer Tourenzahl vorhanden ist, überhaupt gar nicht.

Der relativ geringe Raumbedarf eines Electromotors erleichtert dessen provisorische Aufstellung an beliebigen Orten ungemein; derselbe lässt sich z. B. leicht in einem Spinn- oder Websaal montiren und er erlaubt daher den Kraftverbrauch der zu untersuchenden Maschinen einzeln oder gruppenweise unter normalen Arbeitsverhältnissen zu messen, ohne dass es nöthig wäre die Maschinen zu demontiren und an eine für die dynamometrischen Messungen beson-

Zum Schlusse seien noch eine Reihe von Aufgaben angedeutet, die sich mit der electrischen Methode viel genauer lösen lassen, als dies bis jetzt möglich war, z. B. Bestimmung des Widerstandes rotirender Körper in Luft und Flüssigkeiten, Neubestimmung einzelner Coefficienten für Zahn- und Zapfenreibung u. s. f.; Feststellen genauer Grenzwerte des Kraftbedarfs diverser Arbeits- und Werkzeugmaschinen für Leerlauf und Vollbelastung; es dürfte sich dabei in manchen Fällen zeigen, dass die Mehrleistung neuerer Constructionen in keinem richtigen Verhältniss steht zu der gleichzeitigen Vergrößerung des Kraftbedarfes. Endlich ermöglicht die electrische Methode der Kraftmessung nicht blos eine bequeme Verification der häufig traditionell gewordenen Angaben über den Nutzeffect von Pumpen, Ventilatoren etc., sondern nöthigen Falls auch über diejenigen von Turbinen, Gasmotoren u. a. Für diesen letztern Zweck wird der Electromotor als Dynamomaschine zur Stromerzeugung verwendet und aus der an den Klemmen vorhandenen nutzbaren electrischen Energie rückwärts die effective Arbeitsleistung des zu untersuchenden Motors berechnet.