

Motorleistung  $N$  muß dementsprechend größer sein als die Nutzleistung; wir müssen sie zu 825 mkg in der Sekunde annehmen, da  $0,74 \times 825$  gleich der oben berechneten Nutzleistung von 610 mkg ist. Nun pflegt man eine Leistung von 75 mkg in der Sekunde als Pferdestärke

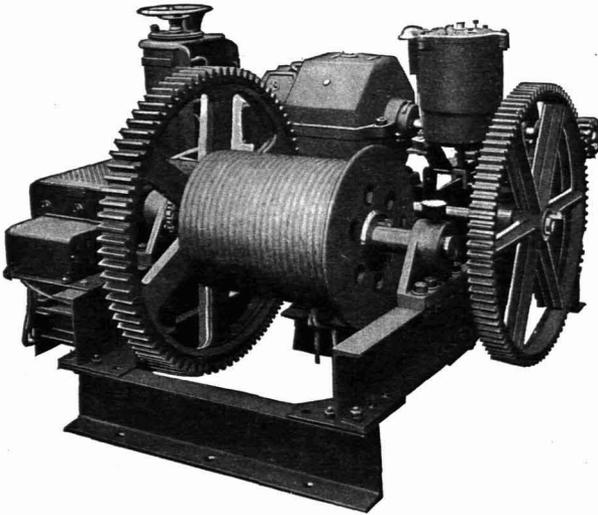


Abb. 57. Elektrisch betriebene Zahnradwinde

zu bezeichnen, der Motor muß also  $\frac{825}{75} = 11$  Pferdestärken leisten können.

Man kann die Winde auf ganz verschiedenartige Weise antreiben, z. B. mit einem Elektromotor, einer Dampfmaschine, einem Benzinmotor oder durch einen hydraulischen Kolben. Grundsätzlich ist das gleichgültig, wenn nur der Motor die Leistung hergibt, die wir von ihm fordern müssen.

## 5. Berechnung der Arbeitsleistung einer Dampfmaschine.

Wie können wir jetzt beispielsweise bei einer Dampfmaschine berechnen, wieviel Pferdestärken sie leistet?

Diese Frage führt auf ein neues Gebiet, in dem sich andere Vorgänge abspielen und neue Gedankenreihen ergeben. Das Streben muß auch hier sein, die Erscheinungen in unserem Denken so zu verarbeiten und zu zergliedern, daß wir mit Hilfe der einfachen Grundgesetze und Denkverfahren, die nun schon in vielen Fällen mit Erfolg angewandt wurden, zu einer einfachen Betrachtungsweise und zu einfachen Regeln für die Berechnung kommen.

Bekannt ist, daß, wenn man ein Gefäß mit Wasser, auf dem ein gut schließender Deckel liegt, stark erhitzt, der hierbei sich bildende Dampf gewaltsam einen Ausweg sucht und den Deckel hebt, so daß er ins Freie treten kann. Je schwerer der Deckel ist, um so stärker wird die Spannung des Dampfes im Gefäß, und wenn der Deckel festgeschraubt ist, so kann schließlich eine Explosion des Gefäßes eintreten, selbst wenn seine Wände sehr stark sind. Hieraus geht hervor, daß der Dampf ganz gewaltige Kräfte auf die Gefäßwände auszuüben vermag,

Beim Dampfmaschinenbetrieb wird nun das Wasser in einem großen Kessel so weit erhitzt, daß der Dampf eine hohe Spannung annimmt. Durch ein Rohr wird der Dampf in den Zylinder der Maschine geleitet, Abb. 58. Er sucht sich auszudehnen und schiebt infolgedessen den Kolben der Maschine mit großer Kraft vor sich her. Hat der Kolben z. B. einen Durchmesser von 20 cm, so ist die Fläche, auf die der Dampf drückt,  $\frac{1}{4} \times 3\frac{1}{7} \times 20^2 = 314 \text{ cm}^2$  (Quadratcentimeter). Die Spannung im Dampf mag so hoch sein, daß er auf jedes einzelne Quadratcentimeter einen Druck von 6 kg ausübt. Wird also die Fläche des Kolbens, wie in Abb. 58 links angedeutet, in 314 einzelne Quadratcentimeter zerlegt, so kann man sich vorstellen, daß 314 einzelne Kräfte von 6 kg auf den Kolben drücken, so daß die insgesamt ausgeübte Kolbenkraft  $314 \times 6 = 1880 \text{ kg}$  beträgt.<sup>1)</sup> Diese Kraft wirkt weiter, während der Kolben vorwärts geht, und zwar so lange, bis das Dampfrohr verschlossen wird, so daß kein frischer Dampf mehr in den Zylinder nachströmen kann.

An dieser Stelle ist es indessen mit der Kraftäußerung nicht etwa zu Ende. Der eingeschlossene hochgespannte Dampf hat ja immer noch das Bestreben, sich auszudehnen, und äußert dabei weiter einen Druck auf den Kolben. Man stelle sich eine Feder vor, die stark zusammengedrückt war. Wenn die Feder sich ausdehnt, so drückt sie immer noch weiter, aber der Druck wird nach und nach geringer. So nimmt auch die Spannkraft des Dampfes während der Ausdehnung ab, und die auf den Kolben ausgeübte Kraft wird nach und nach kleiner.

Die Gesetze, nach denen die Abnahme der Dampfspannung erfolgt, kennen wir. Es macht also keine Schwierigkeiten, für jede Stellung des Kolbens die Kolbenkraft festzustellen.

Die Vorgänge im Zylinder lassen sich am besten übersehen, wenn

<sup>1)</sup> Die genaue Zahl 1884 ist auf 1880 abgerundet, weil es in der Technik bei der Berechnung von Kräften zwecklos ist, mit so genauen Zahlen zu rechnen. Die Fehler infolge von Zufälligkeiten sind immer viel größer als diese kleinen Unterschiede.

man diese Kräfte in einer Zeichnung, einer „Schaulinie“ oder einem „Diagramm“, aufträgt, wie es in der Nebenfigur zu Abb. 58 geschehen ist. Hier sind die Kräfte als senkrechte Linien in der Weise dargestellt, daß 1 mm jedesmal 150 kg bedeutet; die Kraft 1880 ist also in der Zeichnung durch eine Strecke von 12,5 mm zum Ausdruck gebracht. Der Weg oder „Hub“ des Kolbens, der mit 30 cm angenommen sei, ist wagerecht im Maßstab 1:15 aufgetragen, d. h. als eine Strecke von 20 mm. Dieser Weg ist in einzelne Teile von 2 mm Länge, also jedesmal  $\frac{1}{10}$  des ganzen Kolbenweges, geteilt, und für jeden dieser Punkte ist die Kolbenkraft berechnet. Die Dampfzufuhr mag bei  $\frac{3}{10}$  des Kolbenweges, also bei 9 cm, abgeschnitten werden.

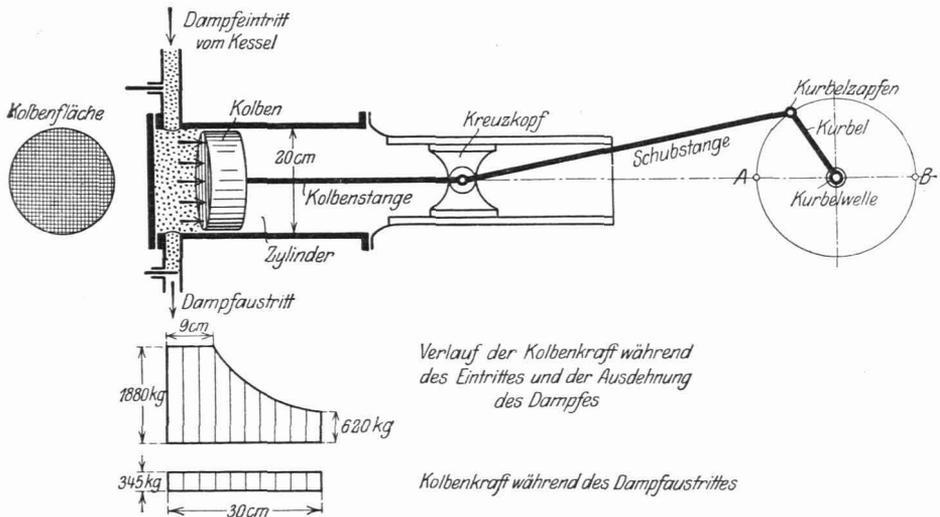


Abb. 58. Skizze zur Erläuterung des Arbeitsvorganges in einer Dampfmaschine.

Bis hierher ist die Kolbenkraft unverändert 1880 kg; dann sinkt sie rasch und wird z. B. bei  $\frac{4}{10}$  Kolbenweg 1450, bei  $\frac{5}{10}$  Kolbenweg 1170 kg, bis sie am Schluß noch 620 kg beträgt.

Der Kolben überträgt seine Kraft in die Kolbenstange, die am anderen Ende durch den Kreuzkopf, der in einer festen Bahn gleitet, geführt wird; von da geht sie durch die Schubstange auf die Kurbel über und dreht die Welle, auf der die Kurbel sitzt. Ist der Kurbelzapfen in der Stellung *B* angekommen, so kann der Kolben nicht weiter, sondern er wird jetzt, wenn die Kurbel sich weiter dreht, zurückgeschoben. Dabei drängt er den Dampf aus dem Zylinder heraus in die freie Luft, nachdem der Auslaß dorthin rechtzeitig geöffnet ist, und zwar ist auch hierzu eine gewisse Kraft aufzuwenden, die un-



andere Zwecke gefunden waren, legt nun den Gedanken nahe: Ist es wirklich erforderlich, daß wir alle die Zwischenglieder, Kreuzkopf, Schubstange und Kurbel, berücksichtigen? Sollte es nicht wieder möglich sein, auf Grund einer theoretischen Überlegung ohne Umwege die Arbeit zu ermitteln, welche die Maschine leistet?

Die Antwort auf diese Frage ist sehr einfach. Es war immer wieder darauf hingewiesen worden, daß ein Verschwinden von Arbeit ausgeschlossen ist. Demnach muß es auch bei der Dampfmaschine genügen, die Arbeit zu berechnen, die der Kolben leistet, denn sie ist — von den Reibungsverlusten abgesehen — ohne weiteres gleich der Arbeit, die die Kurbel an die Maschinenwelle überträgt, ganz gleichgültig, wie die Verhältnisse des Zwischengetriebes gewählt werden.

Diese Kolbenarbeit ist aber mit Hilfe des Diagrammes der Kolbenkräfte nach Abb. 58 sehr rasch zu berechnen. In Abb. 60 ist

das Diagramm noch einmal in größerem Maßstab wiederholt. Vom Punkt 0 bis 3 beträgt die Kolbenkraft 1880 kg, der Weg 9 cm, die geleistete Arbeit ist also  $1880 \times 9 = 16920$  cmkg. Zwischen den Punkten 3 und 4 ändert sich der Kolbendruck. Wir nehmen deshalb für diesen Weg von 3 cm die mittlere Kraft, die 1650 kg beträgt, und erhalten als geleistete Arbeit  $1650$

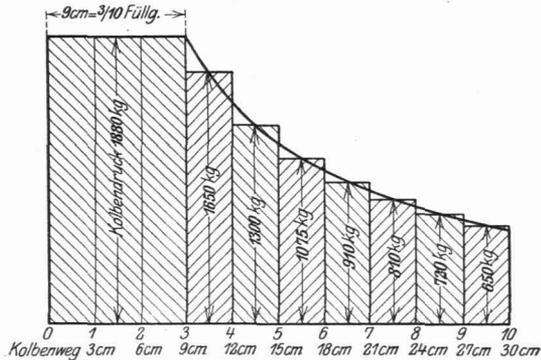


Abb. 60. Schaulinie der Kolbenkräfte (Dampfdiagramm) bei einer Dampfmaschine.

$\times 3 = 4950$  cmkg. Und in dieser Weise gehen wir weiter, indem wir in jedem Abschnitt die mittlere Kraft herausmessen und sie mit dem Wege — 3 cm — multiplizieren. Alle diese einzelnen Arbeiten zusammen addiert ergeben 38300 cmkg oder 383 mkg.

Die Rechnung kann auch so aufgefaßt werden, daß damit der Inhalt der Diagrammfläche bestimmt worden ist. Der erste Arbeitsposten:  $1880 \text{ kg} \times 9 \text{ cm}$  ist ja nichts anderes als der Flächeninhalt des Rechteckes über der Grundlinie von 9 cm. Nachher haben wir dann den Inhalt jedes einzelnen Rechteckes mit 3 cm Grundlinie und der mittleren Kolbenkraft als Höhe bestimmt und alle diese Inhalte addiert, so daß sich der Gesamtinhalt des Diagramms ergab. Daraus folgt das überraschende Ergebnis, daß die von dem Kolben geleistete Arbeit durch den Inhalt der Diagrammfläche

gemessen werden kann. Für die Untersuchung aller Kolbenmaschinen ist diese Erkenntnis von größter Bedeutung.

Die ermittelten 383 mkg stellen die Arbeit dar, die beim Hingang des Kolbens, d. h. bei der Bewegung nach rechts, geleistet wurde. Beim Rückgang nach links muß der Kolben gegen den unveränderlichen Druck von 345 kg vorwärts geschoben werden, und zwar auf einem Wege von 0,30 m, so daß von der geleisteten Arbeit eine Gegendruckarbeit von  $345 \times 0,30 = 103$  mkg abzuziehen ist. In Wahrheit leistet also die Maschine bei jedem Hin- und Rückgang des Kolbens  $383 - 103 = 280$  mkg.

Um die wirklich an die Kurbelwelle abgegebene Arbeit zu erhalten, müssen wir nun allerdings noch bedenken, daß auch bei dieser Maschine Arbeit aufgewendet werden muß, um die Reibungswiderstände zu überwinden. Bei einer kleinen einfachen Maschine, wie

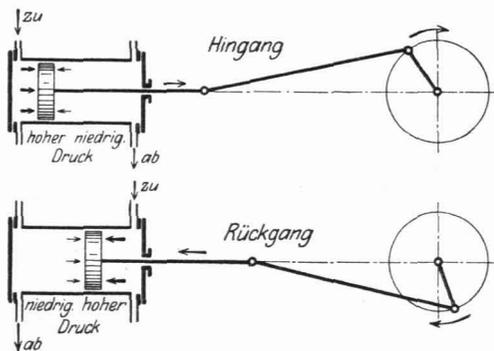


Abb. 61. Doppelt wirkende Dampfmaschine bei verschiedenen Kurbelstellungen (Hingang und Rückgang).

wir sie hier vor uns haben, ist dieser Verlust ziemlich hoch, er wird sich auf etwa 30% stellen, so daß der „mechanische Wirkungsgrad“ der Dampfmaschine nur 70% oder 0,70 beträgt und mit einer nutzbaren Arbeit von  $0,70 \times 280 = 196$  mkg für jedes Spiel zu rechnen ist.

In der Praxis werden Dampfmaschinen dieser Art stets mit allseitig geschlossenem Zylinder gebaut, so daß, wenn der Kolben zurückgeht, Dampf von der anderen Seite her vor den Kolben treten kann, Abb. 61. Infolgedessen wird bei einer solchen doppelt wirkenden Dampfmaschine die Arbeit von 196 mkg zweimal geleistet, so daß die wirkliche Arbeit bei einer Umdrehung der Kurbelwelle 392 mkg beträgt.

Kehren wir zu unserer Winde, Abb. 56, zurück. Die Leistung des Antriebsmotors sollte 11 Pferdestärken sein, oder  $11 \times 75 = 825$  mkg in der Sekunde. Um die notwendige Leistung zu erreichen, muß also, wenn wir statt des Elektromotors die hier in Rede stehende Dampfmaschine nehmen, diese in der Sekunde  $\frac{825}{392} = 2,1$  Spiele oder in der Minute  $2,1 \times 60 = 126$  Umdrehungen machen. Die Zahnräder sind dann folgendermaßen zu berechnen. Die Last soll mit einer Geschwindigkeit von 0,35 m in der Sekunde

oder  $0,35 \times 60 = 21$  m in der Minute gehoben werden. Hat die Trommel 0,4 m Durchmesser, so ist ihr Umfang  $3\frac{1}{7} \times 0,4 = 1,26$  m, sie muß sich also in der Minute  $\frac{21}{1,26} = 16,7$  mal drehen. Das Verhältnis der Umdrehungszahlen der Trommelwelle und der Kurbelwelle der Dampfmaschine beträgt  $\frac{16,7}{126} = 1:7\frac{1}{2}$ . Zahnräder, deren Durchmesser sich verhalten wie  $1:7\frac{1}{2}$ , d. h., bei denen das größere Rad  $7\frac{1}{2}$  mal so groß ist als das kleinere, lassen sich praktisch noch ausführen. Wir kämen also mit einem einzigen Rädervorgelege aus, statt mit zweien, wie in Abb. 56 angenommen war. Die Reibungsverluste sind dann etwas geringer, und wir brauchen für die gleiche Hubleistung etwas weniger Arbeit aufzuwenden.

Würde die Maschine die Last nun in jeder Lage anheben können? Die Rechnung stimmte. Wir haben die Arbeitsleistung berechnet, die für das Heben der Last aufzuwenden ist, und haben die Dampfmaschine entsprechend stark gemacht, so daß sie diese Leistung hergibt. Der Kran braucht 11 Pferdestärken, und die Dampfmaschine ist imstande, diese Leistung hervorzubringen. Trotzdem würde der Konstrukteur, der diese Maschine in einen Kran hineinbaute, eine Enttäuschung erleben.

Wir haben den Fehler gemacht, uns ganz und gar auf theoretische Überlegungen zu verlassen, und dabei vergessen, uns die Maschine vorzustellen, wie sie wirklich arbeitet. Sehen wir uns die Winde einmal genauer an.

Die Last hängt stets am Umfang der Trommel in unveränderlichem Abstand von deren Drehachse, sie bringt also immer dasselbe Drehmoment hervor. Diesem Drehmoment muß die Dampfmaschine in jedem Augenblick das Gleichgewicht halten, es müßte also auch von der Dampfmaschine ein unveränderliches Drehmoment von bestimmter Größe ausgeübt werden. Wie steht es aber nun hiermit?

In Abb. 59 war schon gezeigt worden, wie die Kurbelkräfte  $P$  und damit auch die Drehmomente berechnet werden. Führen wir das nun einmal für fünf verschiedene Kurbelstellungen beim Hingang des Kolbens durch, Abb. 62, S. 42, so zeigt es sich, daß in Stellung I das Drehmoment  $= 0$  ist, weil die Schubstange in dieser sogenannten „Totlage“ in einer Linie mit der Kolbenstange und der Kurbel liegt. In Stellung II ist das Drehmoment 19 200 cmkg, in Stellung III schon niedriger, weil der Dampfdruck kleiner geworden ist, in Stellung IV ziemlich klein und in Stellung V wieder gleich 0. Bei der Weiterdrehung, also beim Rückgang des Kolbens, spielt sich der Verlauf ähnlich ab.

Wir sehen hieraus, daß die Dampfmaschine in den beiden Totlagen I und V völlig außerstande ist, eine Kraft zu äußern und die Last zu heben. In der Stellung II ist ein bedeutender Überschuß

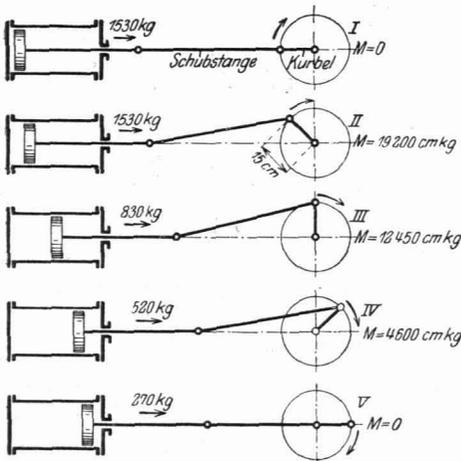


Abb. 62. Drehmomente bei verschiedenen Kurbelstellungen.

vorhanden, und nur bei einer der Zwischenstellungen wird in einem Augenblick das Moment wirklich genau die richtige Größe haben.

Es kann uns nicht einmal etwas helfen, daß wir die Maschine noch stärker machen. Denn in den Totlagen ist eben bei keiner Pleuelstange eine Kraftabgabe nach außenhin möglich, gleichgültig, wie groß der Pleueldruck ist. Dagegen kommen wir zum Ziele, wenn wir eine Dampfmaschine mit zwei getrennten Zylindern anwenden und die Pleueln,

wie in Abb. 63 schematisch angedeutet, rechtwinklig gegeneinander stellen, so daß der eine Pleuel ungefähr das größte Drehmoment äußert, wenn der andere in der Totlage ist, und beide sich also gegenseitig aushelfen.

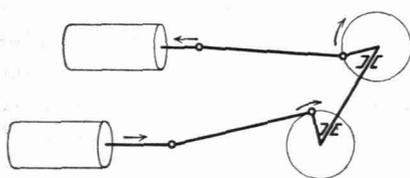


Abb. 63. Dampfmaschine mit zwei Zylindern; Pleueln um  $90^\circ$  versetzt.

Außerdem muß auch die Füllung, d. h. der Teil des Pleuelhubes, auf dem Dampf in den Zylinder eingeführt wird, mehr betragen als  $\frac{3}{10}$ , wie in Abb. 58 und 60 angenommen, damit die Pleuelkräfte gegen den Schluß des Hubes nicht zu sehr heruntergehen und die Drehmomente in Stellung II und IV weniger verschieden sind. Man trifft die Einrichtung meistens so, daß der Kranführer die Füllung nach Bedarf, d. h. je nach der Größe der Last, verändern kann. Auf Grund dieser Gesichtspunkte ist eine neue Rechnung durchzuführen.

Der Fall lehrt, wie bedenklich es ist, irgendein technisches Problem anzugreifen, ohne daß die theoretischen Überlegungen beständig durch eine lebhaftere Vorstellung der Wirklichkeit nachgeprüft werden. Nur durch unsere Vorstellungskraft ist es uns möglich geworden, Krane, Brücken und

Türme als einfache Hebel aufzufassen und auf diese Weise viele Aufgaben, die sehr schwierig und verwickelt zu sein schienen, in einfachster Weise mit Hilfe der Grundgesetze der Mechanik zu lösen. Und ohne Vorstellungsvermögen wären wir auch nicht imstande, vom Heben der Last am Kranhaken zu dem Dampfmaschinen-diagramm überzuspringen, ohne daß wir uns um die Konstruktion im einzelnen, um Trommel, Zahnräder, Kurbel, Schubstange, Kreuzkopf kümmern. Darum darf aber der Techniker auch nie, an keinem Punkte seiner Arbeit, die lebendige Anschauung ausschalten und glauben, sie entbehren zu können, nachdem sie ihre Schuldigkeit getan hat, sondern der Weg, der durchlaufen wurde, um das einfache Rechnungsverfahren zu finden, muß seinem Auge beständig gegenwärtig bleiben. Eine richtige Theorie kann niemals falsch sein, wohl aber kann sie falsch angewendet werden. Der Übergang von der Arbeit am Kranhaken zur Arbeit im Dampfmaschinenzylinder ist an sich korrekt — auch bei der neuen Berechnung kann sich nie etwas anderes ergeben, als daß diese Arbeiten, unter Mitberücksichtigung des Reibungsverlustes, einander gleich sind. Aber außer dieser Bedingung sind eben noch andere Forderungen zu erfüllen, die demjenigen, der seine Formeln und Verfahren mechanisch anwendet, entgehen. Vorstellungsfehler sind weit häufiger und folgenreicher als eigentliche Rechenfehler; diese kommen infolge der vielfachen Kontrollen, die man bei jeder technischen Rechnung anzuwenden pflegt, meistens noch rechtzeitig zutage, während die richtige Annahme der Rechnungs- und Konstruktionsgrundlagen sich erst in der Ausführung der Maschine selbst kontrolliert, wenn die Richtigstellung nicht mehr möglich ist oder zu großen Kosten und Zeitverlusten führt.

## 6. Massenwirkungen. Schwungradberechnung.

Das Dampfmaschinenproblem, das hier erörtert wurde, führt uns übrigens noch auf ein anderes Gebiet der technischen Wissenschaft. Wenn die Maschine nicht, wie es bei einer Kranwinde der Fall ist, häufig zum Stillstand gebracht werden und wieder anlaufen muß, sondern längere Zeit gleichmäßig weiterarbeiten kann, so läßt sich die Änderung des Drehmomentes dadurch unschädlich machen, daß man ein Schwungrad anwendet, das auf der Kurbelwelle der Dampfmaschine sitzt und mit ihr herumläuft. Wie sich schon aus dem natürlichen Gefühl ergibt, ist dieses Schwungrad durch seine „Wucht“ oder „lebendige Kraft“ imstande, den Kolben über solche Strecken hinwegzuschleppen, auf denen der Dampfdruck allein die Arbeitswiderstände nicht zu überwinden vermag. Um die Wirkung