

laufende Motor *I*. Seine Welle trägt das Schwungrad *S* und die während der Pausen leerlaufende Anlaßdynamo *II* für den Walzwerkmotor *III*, so daß dieser in keiner unmittelbaren Verbindung mit dem Netz steht. Der dem Motor *I* zugeführte Strom wird dazu benutzt, die Geschwindigkeit des Schwungrades, die während des Walzens gesunken war, wieder an die obere Grenze zu bringen. Soll gewalzt werden, so wird die Anlaßdynamo erregt; ihr Strom treibt den Motor *III* an, wobei die nötige Energie zum Teil durch den Motor *I* aus dem Netz, zum Teil aus dem Schwungrad unter Verminderung seiner Umlaufgeschwindigkeit auf das 0,9...0,85fache unter Schlüpfen des Ankers des Motors *I* entnommen wird. Dadurch, daß Ilgner das Schwungrad unter hohen oberen Geschwindigkeiten von 100 bis 150 m/sek laufen läßt, läßt es möglich, gewaltige Energiemengen aufzuspeichern und die Belastungsschwankungen des Netzes wirksam zu dämpfen.

3. Schwungräder an Kolbenmaschinen.

An Kolbenkraft- und -arbeitsmaschinen haben die Schwungräder eine zweifache Aufgabe, nämlich, beim Anlassen die Strecklagen des Kurbeltriebs überwinden zu helfen, während des normalen Laufs aber die Winkelgeschwindigkeit der Welle genügend gleichförmig zu machen.

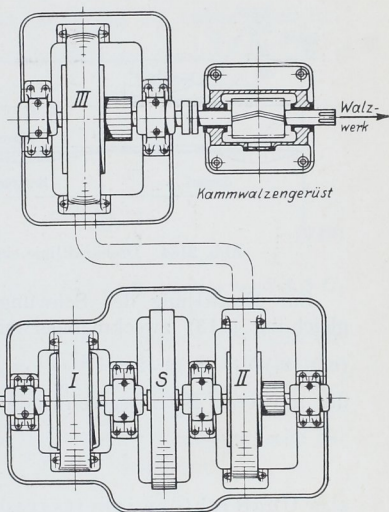


Abb. 2183. Ilgner-Umformer.

B. Berechnung der Schwungräder auf Grund der Arbeitsfähigkeit.

1. Berechnung an Hand des Tangentialdruckdiagrammes.

Auf S. 612 war an Abb. 1062 gezeigt worden, daß der die Kurbelwelle antreibende Tangentialdruck einer Einzylindermaschine erheblichen Schwankungen unterliegt und bald größer, bald kleiner als der von der Maschine zu überwindende Widerstand ist. Die über der Widerstandslinie liegende Überschussarbeit A_s muß vom Schwungrad unter geringer Steigerung der Umlaufgeschwindigkeit aufgespeichert und während der Zeit, wo das Drehmoment zur Überwindung des Widerstandes nicht ausreicht, unter Verringerung der Geschwindigkeit wieder abgegeben werden. Wie diese Arbeit an mehrachsigen Maschinen unter Beachtung der Versetzung der Kurbeln gegeneinander zu ermitteln ist, wurde an Abb. 1064 und 1067 dargetan. Dabei sei hervorgehoben, daß bei der Berechnung des Schwungrades stets die größte, während eines Spieles auftretende Über- oder Unterschussarbeit maßgebend ist. Für dieselbe kann die algebraische Summe mehrerer Teilflächen in Frage kommen, wenn gleichartige Flächen durch eine kleinere entgegengesetzter Art unterbrochen sind. Vgl. in der Beziehung die beiden Unterschussflächen in der linken Hälfte der Abb. 1067. Falls in einer einachsigen Anlage eine Arbeitsmaschine durch die Kolbenstange unmittelbar mit der Kraftmaschine gekuppelt ist, läßt sich die im Schwungrad aufzuspeichernde Arbeit einfacher durch Übereinanderzeichnen der Kolbenüberdrucklinien, in Abb. 1065 also durch den Inhalt einer der gestrichelten Flächen bestimmen.

Abb. 2184 zeigt die Drehkraftlinie einer einachsigen, einfach wirkenden Viertaktverbrennungsmaschine mit dem links wiedergegebenen Druckverlauf. Die während des dritten Hubes erzeugte Nutzarbeit muß zum größten Teil von einem genügend schweren Schwungrade aufgenommen werden, weil sich das Kräftespiel auf vier Hübe oder zwei

Umdrehungen der Welle verteilt. Günstigere Verhältnisse zeigen in der Beziehung Zweitakt- sowie doppelwirkende Verbrennungs- und Dampfmaschinen, an welchen die Vorgänge nach zwei oder sogar nach einem einzigen Hube wiederkehren, wenn der Druckverlauf auf beiden Seiten des Kolbens der gleiche ist.

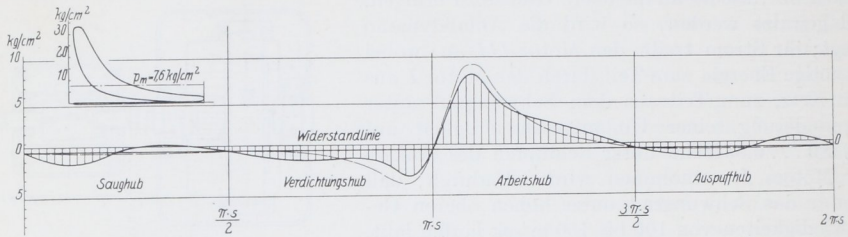


Abb. 2184. Drehkraftlinie einer einfach wirkenden Viertaktverbrennungsmaschine.

Zur Ermittlung des Schwungradgewichts an Kolbenmaschinen wird die Grundgleichung (713) zweckmäßigerweise dadurch umgestaltet, daß man $v_2^2 - v_1^2$ durch $(v_2 + v_1)(v_2 - v_1) = 2 v_m \frac{v_2 - v_1}{v_m} \cdot v_m = 2 v_m^2 \cdot \delta_s$ ersetzt, wobei $\frac{v_2 + v_1}{2}$ genügend genau der mittleren Betriebsgeschwindigkeit v_m entspricht,

$$\delta_s = \frac{v_2 - v_1}{v_m} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_m} = \frac{n_2 - n_1}{n_m} \tag{714}$$

aber Ungleichförmigkeitsgrad heißt. Er gibt an, um welchen Betrag die äußersten Geschwindigkeiten v_1 und v_2 der Schwungmasse von der mittleren bei normaler Drehzahl der Maschine abweichen. Damit wird:

$$A_s = M \cdot v_m^2 \cdot \delta_s = J \cdot \omega_m^2 \cdot \delta_s \tag{715}$$

In dem Falle, daß die Schwungmasse im wesentlichen in einem durch Arme mit der auf der Welle verkeilten Nabe verbundenen Kranze verwirklicht ist, wie es für die meisten Schwungräder der Kolbenmaschinen zutrifft (Speichenschwungräder), darf an Stelle des Trägheitshalbmessers R_s der Schwerpunktabstand des Kranzquerschnittes von der Drehachse gesetzt und auf ihn auch die Geschwindigkeit v_m bezogen, d. h. durch v_k ersetzt werden. Damit wird:

$$A_s = M \cdot v_k^2 \cdot \delta_s \tag{716}$$

Bei Scheibenschwungrädern muß man dagegen auf das Trägheitsmoment J zurückgehen.

Der Ungleichförmigkeitsgrad, Zusammenstellung 165, hängt von dem Zweck, dem die Maschine dient, ab; beispielweise kann man sich an Pumpen, Gebläsen und Schneidwerken mit größeren Ungleichförmigkeitsgraden und leichteren Schwungrädern begnügen als beim Antrieb von Stromerzeugern.

Zusammenstellung 165. Ungleichförmigkeitsgrad δ_s der Schwungräder von Kolbenmaschinen.

Pumpmaschinen, Gebläse und Schneidwerke	1 : 15 . . . 1 : 30,
Werkstattbetriebsmaschinen	1 : 30 . . . 1 : 40,
Antriebsmaschinen von Webereien und Papierfabriken	1 : 40,
Antriebsmaschinen von Mühlen	1 : 50,
Spinnereimaschinen für niedrige Garnnummern	1 : 60,
Spinnereimaschinen für hohe Garnnummern	1 : 100,
Gleichstromerzeuger	1 : 100 . . . 1 : 200
Stromerzeuger für Lichtbetrieb ohne Akkumulatoren	1 : 150,
Drehstromerzeuger	1 : 300.

Von der nach Formel (716) nötigen Masse des Schwungrades $M = \frac{A_s}{v_k^2 \cdot \delta_s}$ brauchen

im Kranz in Rücksicht auf die Mitwirkung der Arme nur etwa $\frac{9}{10}$ verwirklicht zu werden. Daraus ergibt sich das Kranzgewicht:

$$G_k = 0,9 M \cdot g = 8,83 \frac{A_s}{v_k^2 \cdot \delta_s} \quad (717)$$

und der Kranzquerschnitt F_k auf Grund der Guldinschen Regel bei einem Einheitsgewicht γ des gewöhnlich verwandten Gußeisens von $7,25 \text{ kg/dm}^3$ aus $G_k = \frac{2 \pi R_s \cdot F_k \cdot \gamma}{10}$:

$$F_k = \frac{10 G_k}{2 \pi \cdot 7,25 \cdot R_s} = 0,22 \frac{G_k}{R_s} \text{ in cm}^2, \quad (718)$$

wenn R_s in Meter eingeführt wird.

Stahlguß verlangt mit $7,85 \text{ kg/dm}^3$ Einheitsgewicht:

$$F_k = 0,203 \frac{G_k}{R_s} \text{ cm}^2. \quad (719)$$

Das Gewicht des ganzen Rades G_s liegt zwischen $1,15 G_k$ bei gedrungener und $1,5 G_k$ bei leichter Ausbildung.

Vielfach pflegt das Arbeitsvermögen durch das Schwungmoment GD^2 gekennzeichnet zu werden. Dabei ist D der Trägheitsdurchmesser oder an Speichenschwungrädern genügend genau der mittlere Schwungringdurchmesser in Meter und G das auf D bezogene Gewicht in Kilogramm, das längs eines Kreises vom Durchmesser D verteilt, die gleiche Wirkung wie das ganze Rad hätte. Mit dem Arbeitsvermögen steht das Schwungmoment nach den Gleichungen (713) und (714) in der Beziehung:

$$A_s = \frac{GD^2(n_2^2 - n_1^2)}{g \cdot 4 \cdot 182,4} = \frac{GD^2(n_2^2 - n_1^2)}{7160} \quad (720)$$

und

$$A_s = \frac{GD^2(n_2 + n_1)(n_2 - n_1)}{7160} = \frac{GD^2 \cdot n^2 \cdot \delta_s}{3580}. \quad (721)$$

Auf das Kranzgewicht bezogen wird mit $G = \frac{G_k}{0,9}$

$$A_s = \frac{G_k \cdot D^2 \cdot n^2 \cdot \delta_s}{3320}. \quad (722)$$

Zwischen dem Trägheitsmoment J und dem Schwungmoment GD^2 gilt:

$$GD^2 = 4g \cdot J = 39,2 J, \quad (723)$$

weil GD^2 auch als $\int dG \cdot d^2$ und $J = \int dM \cdot r^2$ gedeutet werden können, wenn d und r die Durch- bzw. Halbmesser sind, die zu dM und dG gehören, so daß $GD^2 = \int dG \cdot d^2 = \int g \cdot dM \cdot 4r^2 = 4g \cdot J$ wird.

Bei dem beschriebenen Verfahren werden die Kurven der Massenkräfte unter der Voraussetzung ermittelt, daß die Winkelgeschwindigkeit des Rades ω stets gleich sei. Das ist tatsächlich nicht zutreffend, da ω zunimmt, wenn die Überschubarbeit im Schwungrade aufgespeichert wird, dagegen sinkt, wenn das Rad diese Arbeit wieder hergibt. Diesen Fehler vermeidet Wittenbauer bei der Berechnung der Schwungräder mit Hilfe des Massenwuchtdiagrammes [XXVIII, 1], auf das näher einzugehen aber zu weit führen würde. Der beim gewöhnlichen Verfahren entstehende Fehler ist naturgemäß um so kleiner, je geringer der Ungleichförmigkeitsgrad δ_s ist und macht sich praktisch höchstens bei sehr niedrigen Drehzahlen geltend, bei denen manche Gebläse- und Pumpmaschinen noch laufen müssen, darf dagegen in den übrigen Fällen meist vernachlässigt werden.

Bei der Bemessung der Schwungräder sind noch folgende Punkte zu beachten: der Ungleichförmigkeitsgrad muß kleiner sein als die Empfindlichkeit des Reglers, um das

Zucken des letzteren während der einzelnen Arbeitsspiele zu vermeiden. Ferner dürfen die Eigenschwingungszahlen des Rades samt der Welle, wenn mehrere Maschinen im Parallelbetrieb auf Drehstromnetze arbeiten, nicht mit den Impulszahlen der Drehkraftlinien ($n, 2n, 3n \dots$) übereinstimmen, weil sonst die Maschinen bei eintretender Resonanz außer Takt fallen können [XXVIII, 2]. Manchmal wird bei parallel laufenden Wechselstrommaschinen verlangt, daß die Winkelabweichung bestimmte Grenzen nicht überschreite, damit die durch die verschiedene Stellung der Ankerwicklungen gegenüber den Magnetpolen bedingten Störungen nicht zu groß werden [XXVIII, 3].

2. Berechnung von Schwungrädern ohne Aufzeichnung der Drehkraftlinie.

Ohne Aufzeichnung der Drehkraftlinie lassen sich Schwungräder von Kolbenmaschinen angenähert dadurch berechnen, daß der aufzuspeichernde Arbeitsüberschuß A_s bei Maschinen gleicher Art in einem bestimmten Verhältnis zur mittleren Arbeit während eines Spieles steht. Die letztere beträgt, wenn N die Leistung der Maschine in Pferdestärken, n die Drehzahl in der Minute ist: an doppelt wirkenden Dampfmaschinen, bei denen sich das Spiel nach jedem Hub wiederholt, $60 \cdot 75 \cdot N/2n$, an Zweitaktverbrennungs- und einfach wirkenden Dampfmaschinen, bei denen sich das Spiel nach jeder Umdrehung wiederholt, $60 \cdot 75 \cdot N/n$, an Viertaktmaschinen, an denen sich das Spiel nach je zwei Umdrehungen wiederholt, $2 \cdot 60 \cdot 75 N/n$.

A_s kann also allgemein durch $c_0 \cdot N/n$ ausgedrückt werden, wobei c_0 in erster Linie von der Art der Maschine, außerdem aber noch von der Wirkung der hin und hergehenden Massen abhängt. Grundsätzlich läßt sich der zweite Einfluß an Abb. 1065 erkennen, wo der vom Schwungrad aufzunehmende Arbeitsüberschuß annähernd um die Beschleunigungsarbeit verkleinert wird, weil die Überdrucklinie ziemlich genau durch den Nullpunkt der Massenkraftlinie geht.

In Formel (717) eingeführt, folgt aus:

$$G_k = \frac{8,83 \cdot c_0 \cdot N}{v_k^2 \cdot \delta_s \cdot n} \text{ mit } 8,83 c_0 = c$$

das Kranzgewicht:

$$G_k = \frac{c \cdot N}{n \cdot v_k^2 \cdot \delta_s} \quad (724)$$

und das Schwungmoment:

$$GD^2 = \frac{365 \cdot c \cdot N}{n^3 \cdot \delta_s} \quad (725)$$

Die Angaben über c in Zusammenstellung 166 sind, soweit sie sich auf Dampfmaschinen beziehen, dem Buch von Tolle, Regelung von Kraftmaschinen, soweit sie Verbrennungsmaschinen betreffen, unter Umrechnung auf Formel (724) einem Aufsätze von Güldner [XXVIII, 4] entnommen. $\frac{P_b}{P}$ ist das Verhältnis

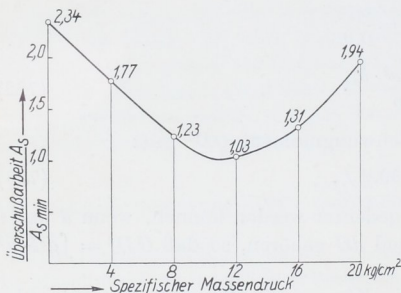


Abb. 2185. Schwungradarbeit in Abhängigkeit vom Massendruck bei einem bestimmten Ungleichförmigkeitsgrad nach Langer.

des größten Beschleunigungsdruckes zum größten Kolbenüberdruck. An kleineren und mittleren Verbrennungsmaschinen können die Massenkräfte wegen der hohen Zünddrucke praktisch vernachlässigt werden, wie Abb. 2184 zeigt, wo die ausgezogene Drehkraftlinie, welche die Massenwirkung berücksichtigt, fast denselben Arbeitsüberschuß liefert wie die gestrichelte, bei welcher die Massenkräfte vernachlässigt sind. An Großgasmaschinen haben dagegen die Massen nach Untersuchungen von Langer [XXVIII, 5] erheblichen Einfluß auf die Gleichförmigkeit des Ganges und führen nach Abb. 2185 zu einem ausgeprägten Kleinstwert der Überschubarbeit, wenn der Massendruck 11 kg bezogen auf 1 cm² der Kolbenfläche beträgt.