Der Maschinenbau

Redtenbacher, Ferdinand

Mannheim, 1863

Der gewöhnliche Schwungkugelregulator

urn:nbn:de:bsz:31-270981

vorbringen. In dem Dampfüberströmungsrohr wird jederzeit in der Nähe der Maschine eine Drehklappe (Dampfklappe) angebracht, die im normalen Bewegungszustand der Maschine eine solche Stellung erhält, dass an ihrem Umfange für den Uebergang des Dampfes nur ein kleiner Theil des ganzen Querschnittes des Rohres übrig bleibt, was zur Folge hat, dass im Normalzustand der Bewegung die Spannung des Dampfes im Kessel beträchtlich, z. B. um $\frac{1}{4}$ oder $\frac{1}{3}$ und selbst um die Hälfte höher ausfällt, als im Cylinder. Dies hat den Zweck, dass, wenn auch nicht dauernd, aber doch für einige Zeit die Kraft der Maschine bedeutend verstärkt oder geschwächt werden kann, denn wenn man die Klappe plötzlich so dreht, dass die Ueberströmungsöffnung grösser wird, tritt plötzlich im Dampfcylinder eine höhere Spannung ein und wird folglich der Gang der Maschine vorübergehend beschleunigt, dreht man dagegen die Klappe nach entgegengesetzter Richtung, so dass die Uebergangsöffnung noch kleiner wird als sie es im Normalzustand der Bewegung ist, so nimmt vorübergehend die Spannung des Dampfes im Cylinder ab und eben so auch die Kraft der Maschine. Dadurch kann die Bewegung der Maschine regulirt werden, wenn die Widerstände der zu betreibenden Maschinen veränderlich sind. Bei Schiffsmaschinen und Lokomotiven geschieht die Verstellung der Dampfklappe durch die Hand des Maschinenführers, bei Fabrikmaschinen dagegen in der Regel durch den sogenannten Schwungkugelregulator, mit dessen Theorie wir uns nun beschäftigen werden.

Der gewöhnliche Schwungkugelregulator. Tafel XXIX., Fig. 1 stellt eine einfache Anordnung eines Schwungkugelregulators zur Regulirung der Bewegung einer Fabrikdampfmaschine vermittelst einer Dampfklappe dar. a ist das Rohrstück des Dampfrohres, welches die Klappe b enthält, c ein Hebel, welcher an der Drehungsaxe der Klappe befestigt ist und vermittelst welchem ihre Verstellung bewirkt wird. Die übrigen Theile der Figur zeigen die Einrichtung des Schwungkugelregulators. G ist dessen vertikale Axe, dieselbe steht durch eine Rädertransmission mit der Schwungradswelle so in Verbindung, dass das Verhältniss der Winkelgeschwindigkeit der Schwungradswelle und der Regulatoraxe constant bleibt. Dreht sich das Schwungrad gleichförmig, so ist dies auch bei der Regulatoraxe der Fall, nimmt die Geschwindigkeit des Schwungrades zu oder ab, so wird die Regulatoraxe im ersteren Falle beschleunigt, im letzteren verzögert. d ist eine mit der Axe G befestigte Hülse, an welcher die Pendelstangen $e\ e_1$ so eingehängt sind, dass sie sich mit der Axe drehen müssen, dass sie sich aber mit grösster Leichtigkeit der Axe G nähern oder von derselben entfernen können. $f\ f_1$ sind zwei mit den Pendelstangen verbundene kugelförmige Massen, $g\ g_1$ sind zwei Stängelchen, welche oben mit den Pendelstangen, unten mit einer längs der Axe G verschiebbaren Hülse h zusammengegliedert sind. Wir nehmen an, dass $A\ B\ C\ C_1$ ein Rhombus, dass also $B\ C = C\ A = A\ C_1 = C_1\ B$ ist. Die Hülse h hat unten einen Hals i, in welchen das gabelförmige Ende des Hebels c eingreift. Hat das Schwungrad seine normale Geschwindigkeit, so nehmen die Pendelstangen eine Stellung an, bei welcher das Gewicht der Kugeln mit der Centrifugalkraft derselben in's Gleichgewicht tritt, und gleichzeitig wird dann die Klappe in diejenige Stellung gebracht, welche sie im normalen Beharrungszustand der Maschine einnehmen soll. Wird die Geschwindigkeit des Schwungrades grösser oder kleiner als die normale, so bewegen sich die Kugeln im ersteren Falle auseinander, im letzteren gegeneinander, was zur Folge hat, dass die Hülse h im ersteren Falle aufwärts, im letzteren abwärts geschoben und der Hebel c so gedreht wird, dass die Dampfklappe im ersteren Falle mehr zu, im letzteren Falle mehr aufgedreht wird, wie es zur Regulirung der Bewegung erforderlich ist.

Suchen wir zunächst die der normalen Bewegung des Schwungrades entsprechende Gleichgewichtsposition der Schwungkugeln zu bestimmen. Nennen wir:

ω die der normalen Geschwindigkeit des Schwungrades entsprechende Winkelgeschwindigkeit der Regulatoraxe,

n die der Winkelgeschwindigkeit ω entsprechende Anzahl der Umdrehungen in einer Minute,

G das Gewicht einer Schwungkugel,

$A\ D = A\ D_1 = l$ die Länge eines Pendelarmes,

$A\ C = C\ B = B\ C_1 = C_1\ A = a$ die Länge einer Rhombusseite,

$\widehat{D\ A\ B} = \alpha$ den Winkel, welcher der Normalbewegung entspricht, d. h. den Winkel, welcher derjenigen Stellung eines Pendelarmes entspricht, bei welcher ein Gleichgewichtszustand eintritt, wenn die Winkelgeschwindigkeit ω ist.

Tragen wir bei D das Gewicht der Kugel und die Centrifugalkraft als Linien $D\ H$ und $D\ E$ auf und konstruiren das Rechteck $D\ E\ F\ H$, so muss für den Gleichgewichtszustand die Richtung der Resultirenden $D\ F$ in die Verlängerung von $A\ D$ fallen, muss demnach $\widehat{F\ D\ H} = \alpha$ sein. Man hat daher:

$$D E = D H \tang \alpha \quad \ldots \ldots \quad (1)$$

Es ist aber $DH = G$, $DE = \frac{G}{g}\omega^2 l \sin\alpha$, demnach wird:

$$\frac{G}{g}\omega^2 l \sin\alpha = G \operatorname{tang}\alpha = G\frac{\sin\alpha}{\cos\alpha} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Wenn α nicht gleich Null ist, wird dieser Gleichung entsprochen durch

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l\cos\alpha}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Es ist aber auch $\omega = \frac{2\pi}{60}n$, $n = \frac{60}{2\pi}\omega$, daher auch:

$$n = \frac{60}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l\cos\alpha}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Diese Ausdrücke (3) und (4) dienen zur Anordnung des Räderwerkes, welches die Schwungradsaxe mit der Regulatoraxe zu verbinden hat. Wenn man nämlich die Pendellänge l und den Winkel α annimmt, der bei normaler Geschwindigkeit eintreten soll, so bestimmt (3) und (4) die entsprechende Geschwindigkeit der Regulatoraxe, und die Räderübersetzung ist nun so anzuordnen, dass die Regulatoraxe in einer Minute so viel Umdrehungen macht, als der Werth von n beträgt, wenn das Schwungrad seine Normalgeschwindigkeit hat.

Nehmen wir nun an, dass, nachdem die Normalgeschwindigkeit und die entsprechende Normalstellung des Regulators längere Zeit vorhanden war, eine Aenderung in der Geschwindigkeit des Schwungrades eintrete, so dass die Winkelgeschwindigkeit der Regulatoraxe ω_1 und die entsprechende Umdrehungszahl pro 1 Minute n_1 wird und dass $n_1 > n$ sei.

Wenn in dem ganzen Mechanismus keine Reibungswiderstände vorkämen, müssten die Kugeln auseinander zu gehen anfangen, so wie die Geschwindigkeit der Bewegung grösser als ω zu werden anfängt; weil aber Reibungswiderstände vorhanden sind, fangen die Kugeln erst dann an weiter auseinander zu gehen, wenn die Centrifugalkraft so gross geworden ist, dass sie nicht nur das Gewicht der Kugeln, sondern auch die Reibungswiderstände des Mechanismus zu bewältigen vermag. Angenommen dies sei der Fall, wenn die Winkelgeschwindigkeit ω_1 eingetreten ist, so bestimmt $\omega_1 - \omega$ die Empfindlichkeit des Regulators, denn er fängt erst dann zu wirken an, wenn sich die Winkelgeschwindigkeit um $\omega_1 - \omega$ ändert.

Nennen wir, Tafel XXIX., Fig 2, F den Reibungswiderstand des Apparates, indem wir unter F die Kraft verstehen, mit welcher an der Hülse h gezogen werden muss, damit eine Stellungsänderung der beweglichen Theile eintritt. In diesem neuen Bewegungszustand ist also die Centrifugalkraft der Kugeln mit ihren Gewichten und mit dem Widerstand F im Gleichgewicht, beträgt aber der Winkel C A B ebenfalls den Werth α. Wenn die Bewegung der Hülse eintreten soll, muss in jedem der Zugstängelchen C B und C_1 B ein gewisser Zug X eintreten, und es ist offenbar $2 X \cos \alpha = F$ oder

$$X = \frac{F}{2 \cos \alpha} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Dieser Zug wirkt bei C nach der Richtung C B auf den Pendelarm ein und es muss nun die Centrifugalkraft $\mathfrak{G}$ mit dem Gewicht G und dem Zug X im Gleichgewicht sein, wozu erforderlich ist, dass das statische Moment von $\mathfrak{G}$ gleich ist der Summe der statischen Momente von G und von X. Alle Momente bezogen auf den Punkt A als Drehungspunkt des Hebels A C D. Fällt man von A aus auf die Verlängerung von B C das Perpendikel A J, so ist $\overline{AJ} = \overline{AC} \cos \widehat{JAC}$ oder wegen $\overline{AC} = a$ und $\widehat{JAC} = \frac{\pi}{2} - 2\alpha$

$$\overline{AJ} = a \cos\left(\frac{\pi}{2} - 2\alpha\right) = a \sin 2\alpha = 2 a \sin \alpha \cos \alpha$$

Das Moment von X ist demnach $X \overline{AJ} = \frac{F}{2 \cos \alpha} 2 a \sin \alpha \cos \alpha = a F \sin \alpha$. Der Werth von $\mathfrak{G}$ ist: $\mathfrak{G} = \frac{G}{g} \omega_1^2 l \sin \alpha$. Das Moment von $\mathfrak{G}$ wird demnach $\frac{G}{g} \omega_1^2 l \sin \alpha \, l \cos \alpha$. Das Moment von G ist endlich $G l \sin \alpha$. Für den Gleichgewichtszustand erhält man also:

$$\frac{G}{g} \omega_1^2 l \sin \alpha \, l \cos \alpha = a F \sin \alpha + G l \sin \alpha$$

oder weil α nicht gleich Null ist:

$$\frac{G}{g} \omega_1^2 l \cos \alpha = \frac{a}{l} F + G \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6)$$

Aus der Gleichung (2) folgt aber

$$\frac{G}{g} \omega^2 l \cos \alpha = G \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

Durch Division dieser Gleichungen (6) und (7) erhält man einen Ausdruck, aus welchem sich ergibt:

$$G = F \frac{\frac{a}{l}}{\left(\frac{\omega_1}{\omega}\right)^2 - 1} = F \frac{\frac{a}{l}}{\left(\frac{n_1}{n}\right)^2 - 1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (8)$$

Dieser Ausdruck bestimmt das Gewicht, das einer Kugel gegeben werden muss, wenn die regulirende Wirkung des Apparates beginnen soll, wenn die Winkelgeschwindigkeit um $\omega_1 - \omega$ über den normalen Werth gewachsen ist.

Es hat nun das Ansehen, wie wenn durch die Gleichungen (4) und (8) alles gegeben wäre, was für eine richtige Anordnung des Regulators nothwendig ist. Allein so ist es nicht; ein auf diese Weise angelegter Regulator wird seiner Bedingung nicht immer entsprechen, denn dazu ist erforderlich, dass die Kugeln bei jeder Stellung des Pendels ihre Stellung gegen die Axe nicht mehr ändern, wenn in irgend einem Augenblick der Bewegung die normale Geschwindigkeit der Axe des Regulators wiederum eintritt. Es müsste also jedesmal, wenn diese normale Geschwindigkeit eintritt, der Winkel $C\,A\,B = \alpha$ sein und müssten gleichzeitig die Kugeln keine relative Geschwindigkeit gegen die Axe besitzen, was nicht der Fall sein wird, weil die Kugeln zu pendeln anfangen, wenn sie ihre Normalstellung verlassen haben.

Der parabolische Regulator Der Ingenieur *Frank* hat den sinnreichen Gedanken ausgesprochen, dass man den Mechanismus so einrichten soll, dass sich die Kugeln nicht in einem Kreise, sondern in einer gewissen krummen Linie bewegen, die die Eigenschaft besitzt, dass in jeder Stellung der Kugeln ein Gleichgewichtszustand statt findet, wenn die Normalgeschwindigkeit eintritt. Wir wollen diese krumme Linie zu bestimmen suchen. $D\,M\,N$ sei diese Kurve, die die Eigenschaft besitzen soll, dass die Richtung der Resultirenden aus G und $\mathfrak{G}$ mit der Normalen $D\,L$ in jeder Lage der Kugeln zusammenfällt, wenn die Normalgeschwindigkeit eintritt.

Nennen wir, Tafel XXIX., Fig. 3, $O\,K = x$, $D\,K = y$, die Coordinaten des Mittelpunktes der Kugeln oder des Punktes D der Kurve. Für das Gleichgewicht ist: $G = \mathfrak{G} \tang \widehat{E\,D\,F}$, es ist aber $\mathfrak{G} = \frac{G}{g}\,\omega^2\,y$, $\tang \widehat{E\,D\,F} = \frac{d\,y}{d\,x}$, demnach:

$$G = \frac{G}{g}\,\omega^2\,y\,\frac{d\,y}{d\,x}$$

aus dieser Gleichung folgt:

$$y^2 = \frac{2\,g}{\omega^2}\,x \quad \ldots \ldots \ldots \quad (9)$$

Die krumme Linie ist demnach eine Parabel und deshalb hat man einen solchen Regulator einen parabolischen genannt. Allein so sinnreich der Vorschlag des Ingenieurs Frank ist, ein richtig