

Für einen optimalen Ladungswechsel hat jede der Flächen I bis V gemäß Bild 7.6 ihre Bedeutung. Für eine schnelle Druckabsenkung beim Auslaß der Abgase ist nicht der Zeitpunkt AÖ allein maßgebend, sondern die Fläche I. Die Fläche II muß möglichst groß sein, da davon die Größe des Druckes p_r (Bild 7.1) abhängt. Die Fläche III während der gleichzeitigen Öffnung von Einlaß- und Auslaßventil bewirkt eine Ausspülung der Restgase. Die Überschneidung darf bei Dieselmotoren groß gewählt werden, da nur mit reiner Luft gespült wird. Bei Vergasermotoren bleibt die Überschneidung zur Vermeidung von Kraftstoffspülverlusten klein. Fläche IV soll wieder möglichst groß sein, da davon die Größe p_a des Ansaugdruckes (Bild 7.1) abhängt. Die Größe der Fläche V und der Zeitpunkt ES beeinflussen die Motorencharakteristik stark. Die unterschiedlichen Steuerdiagramme für den sportlichen Motorradmotor und den Gebrauchs-PKW-Motor gemäß Bild 7.6 führen zu unterschiedlichen Drehmoment- und Leistungscharakteristiken beider Motoren (Bild 7.7). Bei modernen Hochleistungs-PKW-Motoren der gehobenen Fahrzeugklassen versucht man deshalb, durch veränderliche Steuerungsdiagramme [7.52] [7.53] [7.54] [7.55] die Vorteile des höheren Drehmoments bei niedrigen Motordrehzahlen [7.61] des Gebrauchs-PKW-Motors mit dem höheren Moment des sportlichen Motors bei großen Drehzahlen zu kombinieren (Bild 7.7/1).

7.2.5. Kinematik

Aus der gewählten Bauart der Ventilsteuerung, die vom Einsatzzweck und von den damit verbundenen notwendigen Größen, wie Drehzahlbereich, erforderliche Steuerzeiten und Zeitquerschnitte bzw. Steuerwinkel und Winkelquerschnitte, abhängt, ergibt sich die Anordnung der Steuerungsteile im Motor. Antriebsnocken und Ventile sind in jeder Steuerung enthalten; Stößel, Stößelstangen und Kipphebel können vorhanden sein. Beim Vorhandensein von Kipphebeln und Schleppebeln sind die kinematischen Größen Ventilhub h_v und Stößelhub s , Ventilgeschwindigkeit v_v und Stößelgeschwindigkeit v , Ventilbeschleunigung a_v und Stößelbeschleunigung a durch einfache geometrische Beziehungen miteinander verknüpft. Dazu

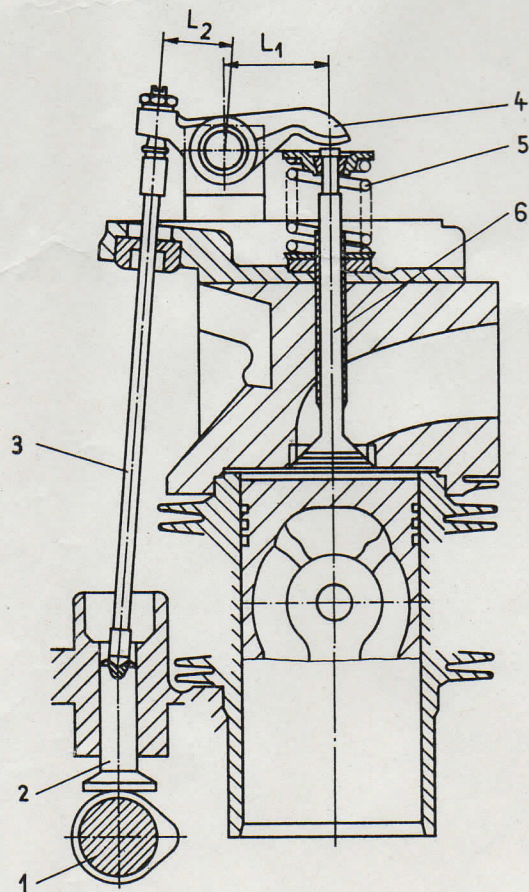


Bild 7.8. Anordnung der Steuerungsteile eines schnell-laufenden IFA-MC-Dieselmotors [7.10]

1 Nockenwelle; 2 Pilzstößel; 3 Stößelstange; 4 Kipphebel;
5 Ventalfeder; 6 Ventil

wird als Übersetzungsverhältnis des Kipphebels i definiert (vgl. Bild 7.8):

$$i = \frac{L_1}{L_2} = \frac{\text{Abstand Ventilachse zum Kipphebeldrehpunkt}}{\text{Abstand Stößelachse zum Kipphebeldrehpunkt}} \quad (7.18)$$

Für die weiteren Größen gilt

$$h_v = i \cdot s \quad (7.19)$$

$$v_v = i \cdot v \quad (7.20)$$

$$a_v = i \cdot a \quad (7.21)$$

$$i = 1,0 \dots 1,3 \text{ für Kipphebel}$$

$$i = 1,2 \dots 1,6 \text{ für Schlepphebel}$$

Beim Direktantrieb des Ventils über eine obenliegende Nockenwelle und zwischengeschaltete Tassenstößel sind die kinematischen Größen s und h_v , v und v_v , a und a_v für Stößel und Ventil identisch.

Zum Erreichen des erforderlichen Öffnungsverlaufes besteht die Nocken-anlaufbahn, d. h. die Nockenflanke, aus charakteristischen Teilstücken (vgl. Bild 7.9). Die Nockenbahn erhebt sich über den Grundkreis R_0 , beginnend mit einem Vornocken oder der sog. Rampe. Zum sicheren Schließen des Ventils muß in der Kraftübertragung des Ventiltriebes stets ein Spiel vorhanden sein. Nach Überwindung des Ventilspieles entsteht ein Stoß, der proportional der Hubgeschwindigkeit v im Moment des Kraftschlusses zwischen Stößel und Nocken ist. Je kleiner das Ventilspiel ist, desto geringer sind die Stöße und die Geräusche vom Ventiltrieb. Das Ventilspiel wird deshalb nur wenige zehntel Millimeter gewählt. Der Vornocken hält diese Geschwindigkeit klein (vgl. Bild 7.10). Das Ventilspiel ist in Abhängigkeit von der Motortemperatur, dem Verschleißzustand und von elastischen Verformungen veränderlich. Der maximale Vornockenhub muß etwas größer sein als das größte Spiel, damit der Stoß bis zum Einsetzen der nachfolgenden Nockenflanke abklingt. Während des Vornockendrehwinkels Φ_0 wird der Stößel um den Betrag $s_{0\max}$ angehoben. Der Vornocken ist im Bild 7.9 ein Kreisbogen mit dem Radius ρ_0 um M_0 . Dem Vornocken schließt sich die Anlauf-flanke des Nockens an, während der der Stößel stark beschleunigt wird. Deshalb wird sie auch Beschleunigungsflanke genannt. Es folgt die Nockenspitze, während der der Stößel verzögert wird, deshalb auch Verzögerungsflanke genannt. Ihr folgt analog zur Anlauf-flanke die Ablauf-(Beschleunigungs)-Flanke und zum Hubende wieder der Vornocken.

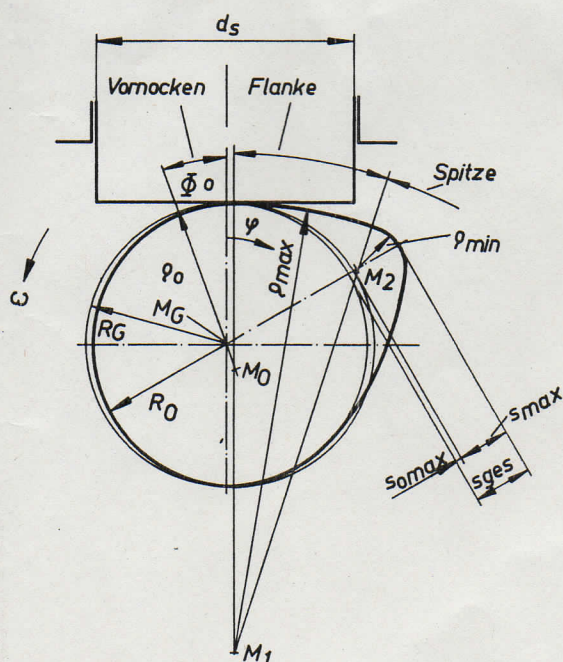


Bild 7.9. Bezeichnungen am Nockentrieb

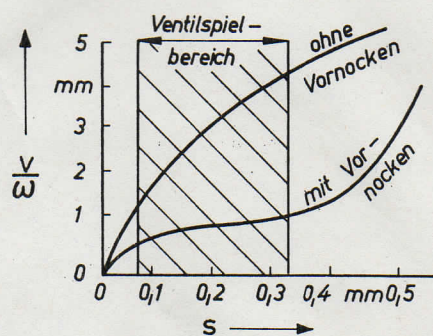


Bild 7.10. Wirkung des Vornockens

winkel bis zum maximalen Ventilhub beträgt $\varphi = \Phi_g$ (Öffnungswinkel). Es ergibt sich aus dem gesamten Einlaß- bzw. Auslaßsteuerwinkel α_E bzw. α_A des Motors

$$2\Phi_g = \frac{\alpha_{E,A}}{2}. \quad (7.27)$$

Die Berechnung des Stößelhubes erfolgt durch Differenzbildung der vom Nockendrehwinkel φ abhängigen Strecken in Hubrichtung und konstanter konstruktiver Größen. Als Hilfsveränderliche muß der Winkel ψ zwischen der Stößelhubrichtung und dem jeweiligen Radiusstrahl von M_1 nach M_3 eingeführt werden. Der Winkel ψ erreicht bei $\varphi = \Phi_1$ sein Maximum und wird dann wieder kleiner. Damit ergibt sich der Stößelhub im Bereich der Beschleunigungsflanke:

Für $0 \leq \varphi \leq \Phi_1$

$$s = (\varrho_{\max} + r) \cos \psi - (l_1 \cdot \cos \varphi) - (R_G - r) \quad (7.28)$$

$$l_1 = \overline{M_G M_1} \quad (7.29)$$

$$R_G = \varrho_{\max} - l_1 \quad (7.30)$$

$$s = l_1(1 - \cos \varphi) - (\varrho_{\max} + r)(1 - \cos \psi). \quad (7.31)$$

Durch Anwendung des Sinussatzes im Dreieck $M_G M_1 M_3$ wird ψ eliminiert:

$$\frac{l_1}{\varrho_{\max} + r} = \frac{\sin \psi}{\sin (180^\circ - \varphi)} \quad (7.32)$$

$$\sin (180^\circ - \varphi) = \sin \varphi. \quad (7.33)$$

Gesucht wird jedoch

$$\cos \psi = \sqrt{1 - \sin^2 \psi}. \quad (7.34)$$

Daraus ergibt sich die Endgleichung für den Stößelhub:

$$s = l_1(1 - \cos \varphi) - (\varrho_{\max} + r) \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{l_1}{\varrho_{\max} + r} \right)^2 \sin^2 \varphi} \right]. \quad (7.35)$$

Die Stößelgeschwindigkeit erhält man durch Bildung der Ableitung

$$v = \omega \cdot \frac{ds}{d\varphi} \quad (7.23)$$

$$v = \omega \cdot l_1 \cdot \sin \varphi \left[1 - \frac{\frac{l_1}{\varrho_{\max} + r} \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{l_1}{\varrho_{\max} + r} \right)^2 \sin^2 \varphi}} \right]. \quad (7.36)$$

Die Stößelbeschleunigung wird wiederum durch Ableitung der Geschwindigkeit nach φ gefunden:

$$a = \omega \cdot \frac{dv}{d\varphi} \quad (7.25)$$

$$a = \omega^2 \cdot l_1 \left\{ \cos \varphi - \frac{l_1}{\varrho_{\max} + r} \cdot \frac{\cos 2\varphi + \left(\frac{l_1}{\varrho_{\max} + r} \right)^2 \cdot \sin^4 \varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{l_1}{\varrho_{\max} + r} \right)^2 \cdot \sin^2 \varphi}} \right\}. \quad (7.37)$$

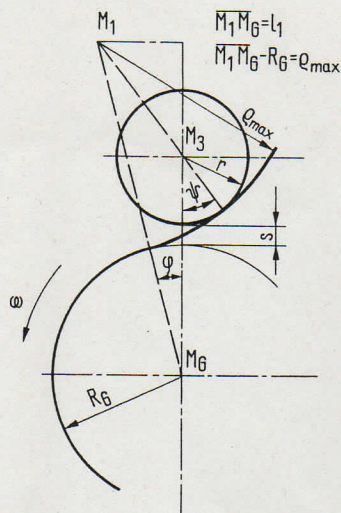


Bild 7.12. Kreisbogennocken mit Stößelrolle und hohler (konkaver) Anlaufflanke

Handelt es sich um einen Kreisbogennocken mit konkaver Anlaufflanke, dann liegt der Mittelpunkt M_1 des Radius $q_{\max}$ der Beschleunigungsflanke oberhalb der Stößelrolle (Bild 7.12). Der Stößelhub s wird ebenfalls wieder durch Differenzbildung von Strecken in Hubrichtung berechnet:

$$s = l_1 \cdot \cos \varphi - (q_{\max} - r) \cos \varphi - R_G - r \quad (7.38)$$

$$R_G = l_1 - q_{\max} \quad (7.39)$$

$$s = -l_1(1 - \cos \varphi) + (q_{\max} - r)(1 - \cos \psi) \quad (7.40)$$

$$s = -l_1(1 - \cos \varphi) + (q_{\max} - r) \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{l_1}{q_{\max} - r} \right)^2 \sin^2 \varphi} \right]. \quad (7.41)$$

$$v = \omega \cdot l_1 \cdot \sin \varphi \left[\frac{\frac{l_1}{q_{\max} - r} \cdot \cos \varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{l_1}{q_{\max} - r} \right)^2 \sin^2 \varphi}} - 1 \right]. \quad (7.42)$$

und die Stößelbeschleunigung

$$a = \omega^2 \cdot l_1 \cdot \left\{ \frac{l_1}{q_{\max} - r} \cdot \frac{\cos 2\varphi + \left(\frac{l_1}{q_{\max} - r} \right)^2 \cdot \sin^4 \varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{l_1}{q_{\max} - r} \right)^2 \cdot \sin^2 \varphi}} - \cos \varphi \right\}. \quad (7.43)$$

Für $\Phi_1 \leq \varphi \leq \Phi_g$

Im Bereich der Nockenspitze erhält man durch analoge Vorgehensweise im Dreieck $M_G M_3 M_2$ den Stößelhub

$$s = \overline{M_G M_3} - R_G - r \quad (7.44)$$

$$\overline{M_G M_3} = l_2 \cdot \cos (\Phi_g - \varphi) + (q_{\min} + r) \cdot \cos \psi \quad (7.45)$$

$$l_2 = \overline{M_G M_2}$$

$$s = l_2 \cdot \cos (\Phi_g - \varphi) + (q_{\min} + r) \cos \psi - (R_G + r). \quad (7.46)$$

Auch hier wird wieder mit dem Sinussatz der Winkel φ eliminiert. Für den Stößelhub erhält man dann

$$s = l_2 \cdot \cos(\Phi_g - \varphi) + (\varrho_{\min} + r) \sqrt{1 - \left(\frac{l_2}{\varrho_{\min} + r}\right)^2 \sin^2(\Phi_g - \varphi)} - (R_G + r). \quad (7.47)$$

Durch Ableitung von s nach φ erhält man die Stößelgeschwindigkeit

$$v = \omega \cdot l_2 \cdot \sin(\Phi_g - \varphi) \left[1 + \frac{\frac{l_2}{\varrho_{\min} + r} \cos(\Phi_g - \varphi)}{\sqrt{1 - \left(\frac{l_2}{\varrho_{\min} + r}\right)^2 \sin^2(\Phi_g - \varphi)}} \right]. \quad (7.48)$$

Durch Ableitung von v nach φ ergibt sich die Stößelbeschleunigung

$$a = -\omega^2 \cdot l_2 \times \left\{ \cos(\Phi_g - \varphi) + \frac{l_2}{\varrho_{\min} + r} \cdot \frac{\cos 2(\Phi_g - \varphi) + \left(\frac{l_2}{\varrho_{\min} + r}\right)^2 \sin^4(\Phi_g - \varphi)}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{l_2}{\varrho_{\min} + r}\right)^2 \sin^2(\Phi_g - \varphi)\right]^3}} \right\}. \quad (7.49)$$

Zu beachten ist das negative Vorzeichen, das der Nockenspitze auch zur Bezeichnung Verzögerungsflanke verhilft.

7.2.5.2. Tangentenocken

Beim Tangentenocken wird der Radius der Anlaufflanke unendlich. Das vereinfacht die Gleichungen für die kinematischen Größen. Die Betrachtung erfolgt wieder in Hubrichtung (Bild 7.13):

$$s = \overline{M_G M_3} - R_G - r \quad (7.50)$$

$$\overline{M_G M_3} = \overline{M_3 B} / \cos \varphi = (R_G + r) / \cos \varphi. \quad (7.51)$$

Daraus folgt der Stößelhub

$$s = (R_G + r) \left(\frac{1}{\cos \varphi} - 1 \right). \quad (7.52)$$

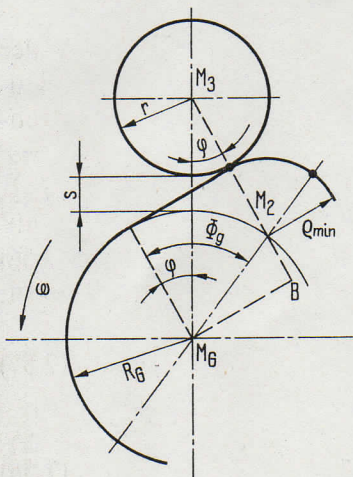


Bild 7.13. Tangentenocken

und die Stößelbeschleunigung

$$a = \omega^2 \cdot l_1 \cdot \cos \varphi \quad (7.59)$$

berechnet.

Bei diesem häufig verwendeten Nocken soll der Einfluß des Vornockens bzw. der Rampe mit betrachtet werden. Die Rampe führt zu kleinen Aufsetzgeschwindigkeiten des Stößels auf den Nocken und damit kleinem Stoß nach Überwindung des Ventilspieles. Das Ventilspiel 0,1 bis 0,3 mm ist erforderlich, um Längenänderungen im Ventiltrieb relativ zu den Motorhäuseteilen (Block, Zylinderkopf) bei betriebswarmem Motor auszugleichen. Dieses Spiel darf niemals kleiner null werden, da dann das Ventil nicht mehr vollständig schließt. Liegen die geschlossenen Ventile richtig an ihrem Sitz an, dann erfolgt eine bessere Wärmeabgabe an den Ventilsitz. Schließt das Ventil nicht richtig, kommt es zur Ventilüberhitzung, zur Zerstörung insbesondere der Auslaßventile und zu Ventilschaftabrissen.

Die maximal möglichen Werte der kinematischen Größen für die Rampe können sich mit einem Spiel gleich null bei dem Nockendrehwinkel Φ_0 ergeben (vgl. Bild 7.9).

Es gilt:

$$s_{0\max} = l_0 \cdot (1 - \cos \Phi_0) \quad (7.60)$$

$$l_0 = \overline{M_0 M_G} = \varrho_0 - R_0 \quad (7.61)$$

$$v_{0\max} = \omega \cdot l_0 \cdot \sin \Phi_0 \quad (7.62)$$

$$a_{0\max} = \omega^2 \cdot l_0 \cdot \cos \Phi_0. \quad (7.63)$$

Damit werden die kinematischen Größen auf der Beschleunigungsflanke bei vollem Ventilspiel

$$s = \varrho_{\max} - R_G - l_1 \cdot \cos \varphi - l_0 \cdot \cos (\varphi + \Phi_0). \quad (7.64)$$

Die Strecke l_1 beträgt bei Berücksichtigung der Rampe

$$l_1 = \overline{M_0 M_1} = \varrho_{\max} - \varrho_0 \quad (7.65)$$

$$v = \omega[l_1 \cdot \sin \varphi + l_0 \cdot \sin (\varphi + \Phi_0)] \quad (7.66)$$

$$a = \omega^2[l_1 \cdot \cos \varphi + l_0 \cdot \cos (\varphi + \Phi_0)]. \quad (7.67)$$

Für $\Phi_1 \leq \varphi \leq \Phi_g$

Für die Nockenspitze erhält man den Stößelhub aus (vgl. Bild 7.14)

$$s = l_2 \cdot \cos (\Phi_g - \varphi) + \varrho_{\min} - R_G \quad (7.68)$$

$$l_2 = \overline{M_G M_2},$$

die Stößelgeschwindigkeit

$$v = \omega \cdot l_2 \cdot \sin (\Phi_g - \varphi) \quad (7.69)$$

und die Stößelbeschleunigung

$$a = -\omega^2 \cdot l_2 \cdot \cos (\Phi_g - \varphi) \quad (7.70)$$

erhält man wiederum durch Ableitung von s und v nach φ .

Vergleicht man verschiedene Nocken unter der Voraussetzung gleichen maximalen Ventilhubes $s_{\max}$, gleichen gesamten Öffnungswinkels $2\Phi_g$ und gleichen Grundkreisradius, ergeben sich Vorteile für den harmonischen Nocken (Bild 7.15). Setzt man die Fülligkeit der Nockenhubkurve

$$A_D = \int_{\varphi=0}^{\varphi=\varphi_{\max}} s \, d\varphi \quad (7.71)$$

für den harmonischen Nocken $A_D \cong 100\%$, so verringert sich diese beim betrachteten Tangentenocken auf $A_D = 90,5\%$, beim unsymmetrischen Kreisbogenocken mit hohler

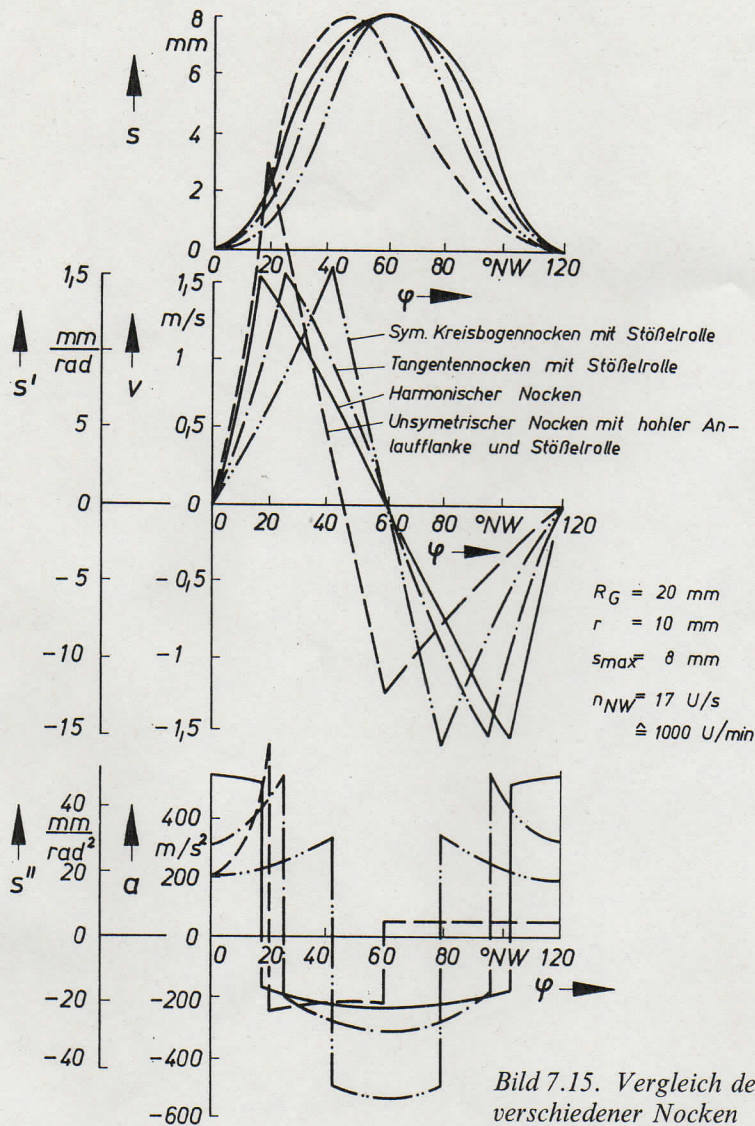


Bild 7.15. Vergleich der kinematischen Größen verschiedener Nocken

Anlauf flanken auf $A_D = 85\%$ und beim symmetrischen Kreisbogennocken mit Rollenstößel auf $A_D = 74,5\%$. Eine große Fläche A_D ergibt auch den größten Zeit- bzw. Winkelquerschnitt.

Beim Tangentennocken ergeben sich zusätzlich große negative Beschleunigungen, die zur Anwendung starker Ventildfedern zwingen. Charakteristisch sind die Beschleunigungsspitzen bei Nocken mit Rollenstößeln. Diese Nockentriebe werden heute hauptsächlich bei Dieseleinspritzpumpen angewendet. Um die Stößelgeschwindigkeit $\dot{s}$ und die Stößelbeschleunigung $\ddot{s}$ unabhängig von der Motordrehzahl und zur Charakterisierung des Nockens zu verwenden, werden bezogene Geschwindigkeiten s' und Beschleunigungen s'' angegeben:

$$s' = v/\omega \quad (7.72)$$

$$s'' = a/\omega^2 \quad (7.73)$$

Bei allen bisher betrachteten Nocken gibt es in den Hubwendepunkten Stellen mit sprunghafter Beschleunigungsänderung. Man spricht dann von einem unendlich großen Ruck. Als Ruck $\ddot{s}$ wird die erste Ableitung der Beschleunigung a nach der Zeit t definiert:

$$\ddot{s} = \frac{d^3 s}{dt^3} = \frac{da}{dt} = \omega \cdot \frac{da}{d\varphi} \quad (7.74)$$

Zur Kennzeichnung des Nockens wird der bezogene Ruck

$$s''' = \ddot{s} / \omega^3 \quad (7.75)$$

verwendet.

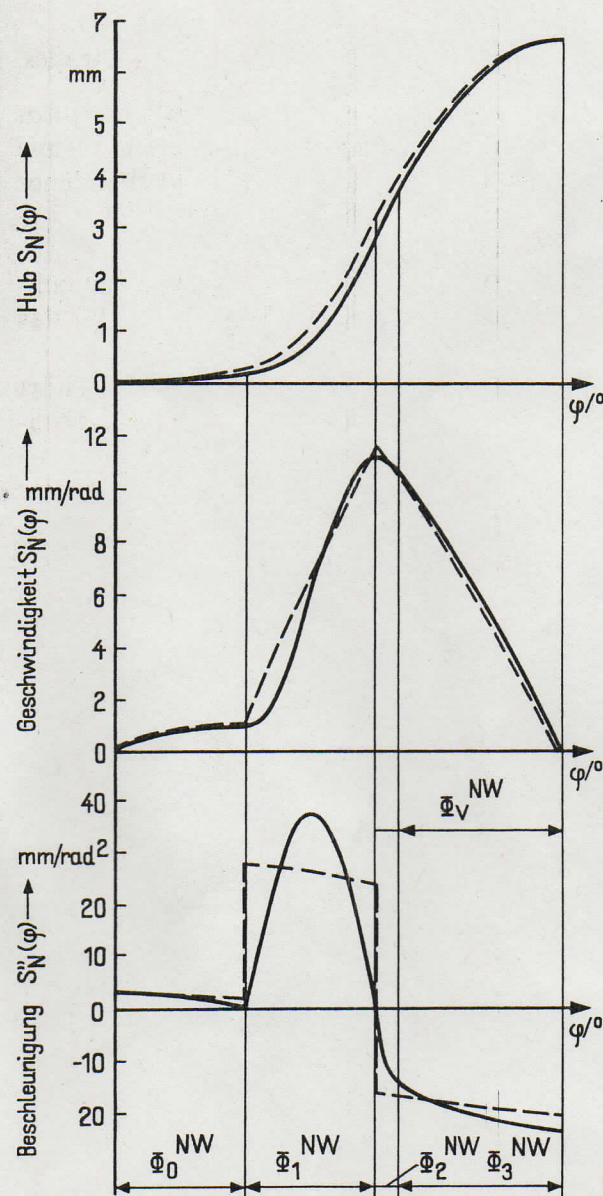


Bild 7.16. Vergleich der kinematischen Größen harmonischer Nocken – ruckarmer Nocken, nach Kurz [7.10]

--- harmonischer Nockentrieb
— ruckarmer Nockentrieb

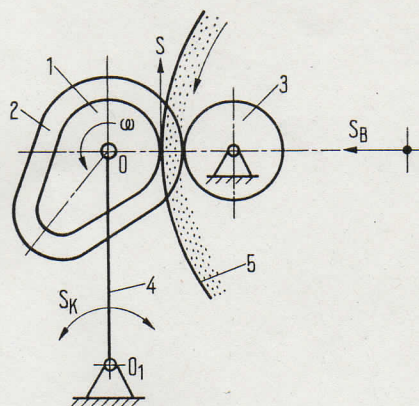


Bild 7.17. Kopierschleifen von Nockenwellen [7.11]

1 zu schleifender Nocken; 2 Kopiermodell; 3 Rolle; 4 Support; 5 Schleifscheibe; O_1 Supportschwenkpunkt; s Weg der Werkzeugbewegung; s_k Weg der Supportbewegung; s_B Vorschub; ω Winkelgeschwindigkeit der Nockenwelle

Der Ruck führt zu elastischen Verformungen in den Steuerungsteilen, die die Größen bei statischer Betrachtung überschreiten. Da bei allen Kreisbogennocken ein unendlich großer Ruck auftritt, wird immer mehr zu ruckarmen Nocken für Gaswechselsteuerungen übergegangen.

7.2.5.4. Ruckarmer Nocken

Es gibt verschiedene ruckarme Nocken, insbesondere bezüglich der Form des Vornockens [7.10]. Bewährt hat sich der ruckarme Nocken nach Kurz [7.9]. Bild 7.16 zeigt die kinematischen Größen eines „Kurz“-Nockens im Vergleich zum harmonischen Nocken.

Er besteht aus folgenden Abschnitten:

- 0) Rampe
Der Vornocken wird im Nockendrehwinkelbereich Φ_0 durch eine Viertelperiode einer Sinuslinie gebildet.
- 1) Beschleunigungsflanke
Der Nockenhub wird im Drehwinkelbereich Φ_1 durch eine halbe Periode einer schiefen Sinuslinie gebildet.
- 2) Verzögerungsflanke/Abschnitt Φ_2
Im Bereich des Verzögerungsbeginns folgt der Stößelhub der Viertelperiode einer schiefen Sinuslinie.

3) Verzögerungsflanke/Abschnitt Φ_3

In einem großen Bereich der Nockenspitze folgt der Stößelhub einem Polynom 4. Grades.

Moderne ruckarme Nocken werden mit Hilfe von EDV-Anlagen berechnet. Es existiert dazu das Berechnungsprogramm „NKU“ an der TU Magdeburg. Ein Programmablaufplan für die Auslegung der gesamten Ventilsteuerung mit Hilfe der EDV — einschließlich vorhandener Rechenprogramme — wird von *Häntzsch* in [7.7] angegeben. Als Beispiel zeigt Abschn. 7.6. ein EDV-Programm zur Berechnung eines „Kurz“-Nockens.

Die Nockenherstellung erfolgt auf Kopierschleifmaschinen [7.11]. Die Ausgabe des Lochstreifens zur Steuerung der numerisch gesteuerten Nockenschleifmaschine ist ebenfalls für das Rechenprogramm [7.49] möglich.

Im Bild 7.17 ist das Kopierschleifen von Nockenwellen schematisch dargestellt. Es gehört zu den Aufgaben des Konstrukteurs, den Meisternocken für das Kopiermodell mit zu berechnen. Die Kontrolle fertiger Nocken erfolgt auf einer Nockenmeßmaschine [7.12].

Die Bezeichnung der Nocken erfolgt nach [7.43]. Der ruckarme Nocken wird durch vier Größen gekennzeichnet. Ein Beispiel soll das verdeutlichen:

Nocken	20	—	60	—	0,04	—	3,14	nach [7.43]
Vornocken-								
winkel Φ_0								
in °NW								
Hauptnocken-								
winkel Φ_g								
in °NW								
Absolutes Beschleunigungs-								
verhältnis $s''_{\max}/s''_{\min}$								
Stößelverhältnis								
$s_{0\max}/s_{\max}$								
(vgl. Bild 7.9)								

7.2.6. Berechnung

Nachdem die kinematischen Größen des Ventiltriebes, d. h. Stößelhub s , Ventilhub h_v , Stößelgeschwindigkeit v , Ventilgeschwindigkeit v_v , Stößelbeschleunigung a und Ventilbeschleunigung a_v , gemäß Abschnitt 7.2.5. ermittelt und in Tabellen- bzw. Diagrammform vorliegen, erfolgt eine Aufzeichnung der Ventilhubkurven relativ zum Kolbenweg (Bild 7.18) im Bereich des oberen Totpunktes (OT). Dabei dürfen sich die Hubkurven für Auslaß- h_{vAV} und Einlaßventil h_{vEV} und die Kolbenhubkurve s_K nicht berühren oder gar überschneiden. Das würde zur Zerstörung des Kolbens und der Ventile führen. Bei Halbkugelbrennräumen mit

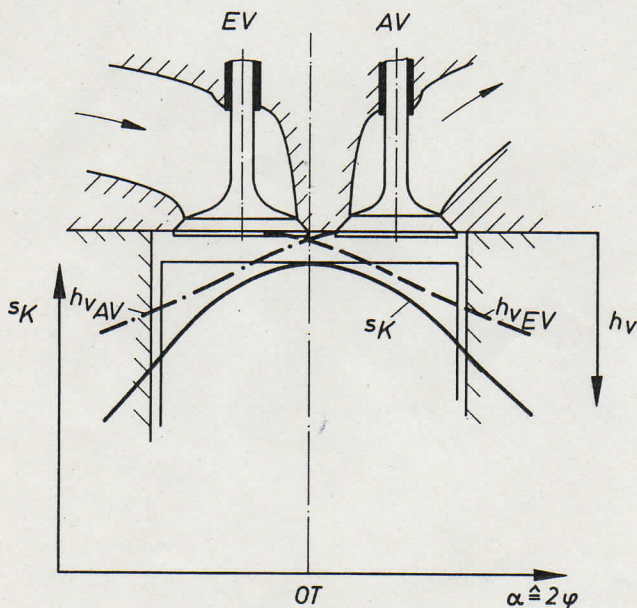


Bild 7.18. Ventilhub und Kolbenweg