

**Matthias Stadler**

# **Triebwerksdynamik und Konstruktionselemente des Verbrennungsmotors**



*Diplomica Verlag*

Matthias Stadler

**Triebwerksdynamik und Konstruktionselemente des Verbrennungsmotors**

ISBN: 978-3-8366-3831-9

Herstellung: Diplomica® Verlag GmbH, Hamburg, 2010

---

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden und der Verlag, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

© Diplomica Verlag GmbH

<http://www.diplomica-verlag.de>, Hamburg 2010

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>BEGRIFFSERKLÄRUNG.....</b>	<b>8</b>
2.1	TRIEBWERKSDYNAMIK .....	8
2.2	KONSTRUKTIONSELEMENTE DES VERBRENNUNGSMOTORS .....	9
<b>3</b>	<b>TRIEBWERKSDYNAMIK.....</b>	<b>9</b>
3.1	KINEMATIK DES HUBKOLBENMOTORS.....	10
3.1.1	<i>Kolbenweg und Brennraumvolumen .....</i>	<i>10</i>
3.1.2	<i>Kolbegeschwindigkeit .....</i>	<i>13</i>
3.1.3	<i>Kolbenbeschleunigung .....</i>	<i>13</i>
3.1.4	<i>Geschränkter /desachsierter Kurbeltrieb .....</i>	<i>14</i>
3.2	KRÄFTE UND MOMENTE IM TRIEBWERK.....	16
3.2.1	<i>Gaskräfte .....</i>	<i>16</i>
3.2.2	<i>Massenkräfte .....</i>	<i>20</i>
3.3	MASSENAUSGLEICH .....	24
3.3.1	<i>Einzylinder-Triebwerk .....</i>	<i>26</i>
3.3.2	<i>Mehrzylindermotoren .....</i>	<i>27</i>
3.4	UNGLEICHFÖRMIGKEITSGRAD UND DREHMOMENTAUSGLEICH .....	30
<b>4</b>	<b>KONSTRUKTIONSELEMENTE DES VERBRENNUNGSMOTORS.....</b>	<b>34</b>
4.1	KOLBEN .....	35
4.1.1	<i>Kolbenringe.....</i>	<i>51</i>
4.1.2	<i>Kolbenbolzen .....</i>	<i>57</i>
4.2	PLEUELSTANGE .....	60
4.3	KURBELWELLE.....	66
4.4	KURBELGEHÄUSE .....	74
4.5	ZYLINDERROHR .....	80
4.6	ZYLINDERKOPF UND ZYLINDERKOPFDICHTUNG .....	85
4.7	ZYLINDERKOPFDICHTUNG .....	93
4.8	VENTILTRIEB .....	96
4.8.1	<i>Ventil.....</i>	<i>103</i>
4.8.2	<i>Nockenwelle.....</i>	<i>109</i>
4.8.3	<i>Variabler Ventiltrieb .....</i>	<i>117</i>
4.9	LAGERUNG IN VERBRENNUNGSMOTOREN .....	126
<b>I</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>141</b>
<b>II</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>143</b>



## Formelzeichen

$a$	Beschleunigung
$A_K$	Kolbenfläche
$b$	Hebelarm Kippmoment
$c_m$	mittlere Geschwindigkeit
$c_u$	Umfangsgeschwindigkeit eines sich einstellenden Wirbels
$D$	Zylinderdurchmesser
$d_K$	Durchmesser des Kolben
$E$	Energie
$F$	Kraft
$F_{1,2}$	Massenkräfte 1. und 2. Ordnung
$f$	Frequenz
$f_\alpha$	Hubfunktion
$f', f''$	1. und 2. Ableitung der Hubfunktion nach $\alpha$
$F_{+1,-1}; F_{+2,-2}$	Betrag der Kraftvektoren 1. und 2. Ordnung
$F_G$	Gaskraft am Kolben
$F_{I,II}$	harmonische Wechselkräfte 1. und 2. Ordnung
$F_M$	Massenkraft
$F_N$	Normalkraft/ Nockenkraft
$F_R$	resultierende Kraft, Radialkraft
$F_{red}$	reduzierte Federkraft
$F_S$	Pleuelstangenkraft
$F_T$	Drehkraft, Tangentialkraft
$J$	polares Massenträgheitsmoment
$l$	Pleuellänge/ Schwerpunktabstände
$LG_1, LG_2$	Kraft auf Motorlagerung infolge Gaskraft
$LM_1, LM_2$	Kraft auf Motorlagerung infolge Massenkraft
$M_d$	Drehmoment
$M_{1,2}$	Gesamtmoment 1. und 2. Ordnung
$m$	Masse
$m_S$	Masse im Schwerpunkt
$n$	Drehzahl
$p$	statischer Druck, Gasdruck
$P_i$	abgegebene Motorleistung

$p_{me}$	effektiver Mitteldruck
$r$	Kurbelradius
$r_S$	Schwerpunkt Abstand rotierende Masse
$S$	Schwerpunkt
$s_\alpha$	Kolbenweg ab OT
$\dot{s}_\alpha$	Kolbengeschwindigkeit
$\ddot{s}_\alpha$	Kolbenbeschleunigung
$t$	Zeit
$V_\alpha$	Brennraumvolumen
$V_C$	Kompressionsvolumen
$W$	Arbeit
$z$	Zylinderzahl
$\alpha, \alpha_{KW}$	Kurbelwinkel
$\beta$	Pleuelstangenwinkel
$\delta$	Ungleichförmigkeitsgrad
$\eta_m$	mechanischer Wirkungsgrad
$\lambda_a$	Luftaufwand
$\lambda_s$	Liefergrad/ Schubstangenverhältnis
$\pi$	Kreiszahl
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit

## Abkürzungen

A	Auslass(ventil)
AGR	Abgasrückführung
Aö	Auslass öffnet
As	Auslass schließt
ATL	Abgasturbolader
CAD	Computer gestütztes Konstruieren
CFD	rechnergestützte Strömungssimulation
CR	Common Rail
CZ	Cetanzahl
E	Einlass(ventil)
EB	Einspritzbeginn
ED	Einspritzdauer
EE	Einspritzende
Eö	Einlass öffnet
Es	Einlass schließt
EURO	Stufe der europäischen Abgasvorschriften
EW	Exzenterwinkel
HE	Haupteinspritzung
MOZ	Motor-Oktan-Zahl
n	nach
NE	Nacheinspritzung
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NKW	Nutzfahrzeug
OEM	Originalausrüstungshersteller
OT	oberer Totpunkt
OZ	Oktanzahl
ROZ	Research-Oktan-Zahl
SAE	Society of Automotive Engineers
UT	unterer Totpunkt
v	vor
VE	Voreinspritzung
°KW	Grad Kurbelwellenwinkel
$\varepsilon$	Verdichtungsverhältnis



## **1 Einleitung**

Das automobiler Kraftfahrzeug ist seit mehr als 100 Jahren der Inbegriff für Mobilität und Freiheit des Menschen. Rückblickend kann die Ent- und Weiterentwicklung des Kraftfahrzeugs als Schlüsseltechnologie des 20. Jahrhunderts bezeichnet werden. Große Entfernungen verloren ihren Schrecken, die Welt rückt näher zusammen.

Dem Verbrennungsmotor, als Herzstück des Kraftfahrzeugs, verdanken wir den Segen der mobilen Gesellschaft.

Durch den Siegeszug des Automobils, quer durch alle Länder und gesellschaftliche Schichten, resultieren bis heute jedoch ungelöste Probleme auf den Feldern der Kraftstoffversorgung und des Schadstoffausstoßes.

Die knapper werdenden Ölressourcen zwingen den Verbrennungsmotor zu extremer Sparsamkeit, um auch in Zukunft Zugpferd unserer Volkswirtschaft bleiben zu können. Auch auf dem Gebiet des Schadstoffausstoßes herrscht aktuell großes Entwicklungspotenzial vor. Die Diskussionen um Feinstaub und CO<sub>2</sub>-Emission nehmen kein Ende.

Die Europäische Union reagierte jüngst mit neuen EU-Grenzwerten für Automobile auf die Anforderungen bezüglich des Umweltschutzes.

Alle OEM's haben sich aufgemacht dem Verbrennungsmotor zu neuer Sparsamkeit zu verhelfen und entwickeln diesen in schnellen Schritten weiter.

An der Universität Stuttgart, als wichtige Ausbildungsschmiede des deutschen Ingenieursnachwuchses reagierte man auf Weiterentwicklungen in diesen Bereichen und überarbeitet auf Grund dessen das Vorlesungsskript Verbrennungsmotoren grundlegend um den Studenten die neuesten Methoden und Entwicklungsschwerpunkte anschaulich zu vermitteln.

Diese Arbeit soll es ermöglichen, das Vorlesungsmanuskript um neue Erkenntnisse zu erweitern und darüber hinaus bereits bestehende Kapitel alternativ auszudrücken.

## 2 Begriffserklärung

### 2.1 Triebwerksdynamik

Die Triebwerksdynamik gliedert sich in die Unterkapitel

- Kinematik des Hubkolbenmotors,
- Kräfte und Momente im Triebwerk,
- Massenausgleich und
- Ungleichförmigkeitsgrad/ Drehmomentausgleich.

Die Dynamik (von griechisch dynamis= Kraft) ist das Teilgebiet der Mechanik, das sich mit der Wirkung von Kräften befasst. Die Dynamik wird in der Technischen Mechanik weiter untergliedert in die Statik, die sich mit dem Kräftegleichgewicht an unbeschleunigten Körpern befasst, und die Kinetik, die den Zusammenhang zwischen Bewegungen und Kräften erfasst. In der Physik wird unter Dynamik die Beschreibung der Bewegung von Körpern unter Einfluss von Kräften verstanden, im allgemeinen Sinn auch das Zeitverhalten eines Systems und die zu seiner Beschreibung verwendeten Bewegungsgleichungen.

Die Kinematik (von griechisch kinema= Bewegung) ist die Lehre der Bewegung von Punkten und Körpern im Raum, beschrieben durch die Größen Weg  $s$  (Änderung der Ortskoordinate), Geschwindigkeit  $\dot{s}$  und Beschleunigung  $\ddot{s}$ , ohne die Ursachen einer Bewegung (Kräfte) zu betrachten. Die Kinematik beinhaltet Begriffe zur mathematischen Beschreibung der Bewegung durch Bewegungsgleichungen. Dynamische Ursachen wie *Masse* oder *Kraft* spielen in der Kinematik keine Rolle.

Der Massenausgleich beschreibt den Ausgleich von Kräften und Momenten, die durch die Bewegung des Kurbeltriebes hervorgerufen werden.

Der Ungleichförmigkeitsgrad beschreibt die Drehzahlschwankung bei periodischen Bewegungen. Er drückt die Schwankung der Winkelgeschwindigkeit des Antriebes während eines Arbeitszyklus aus.

## 2.2 Konstruktionselemente des Verbrennungsmotors

Der Begriff Konstruktionselement ist ein Fachbegriff, der funktionsmäßig nicht mehr weiter zerlegbare Bestandteile einer Maschinenkonstruktion beschreibt. Im Verbrennungsmotorenbau werden darunter innere Bauteile des Verbrennungsmotors, ohne Anbauteile verstanden.

## 3 Triebwerksdynamik

Verbrennungsmotoren sind Kolbenmaschinen, die je nach Ausbildung des Brennraums, der Kolbengeometrie und der damit einhergehenden Kolbenbewegung in Hub- und Rotationskolbenmotoren unterteilt werden.

Heute werden Verbrennungsmotoren fast ausschließlich als Hubkolbenmotoren mit Tauchkolbenbauweise ausgeführt. Abb. 3.1 zeigt verschiedene Ausführungen des Hubkolbenmotors.

Das Triebwerk besteht aus Kolben, Pleuelstange (Schubstange) und Kurbelwelle. [11]

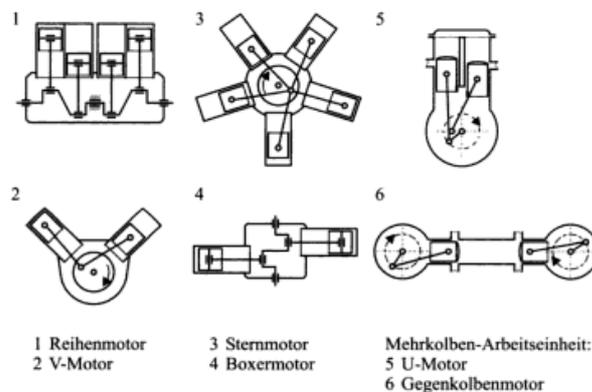


Abb. 3.1: Bauarten des Hubkolbenmotors [11]

**Kolben:** Der Kolben führt eine oszillierende Bewegung aus, die eine ungleichförmige, also beschleunigte und verzögerte ist.

**Pleuelstange:** Die Pleuelstange, auch kurz Pleuel genannt, führt eine kombinierte Bewegung aus (oszillierend und rotierend). Sie dient der Verbindung von Kolben und Kurbelwelle.

**Kurbelwelle:** Die Kurbelwelle rotiert mit konstanter Geschwindigkeit, führt also eine rotierende Bewegung aus. [1]



erhält man für den Kolbenweg die Beziehung:

$$s_{\alpha} = r \cdot \left( 1 + \frac{l}{r} - \cos \alpha - \frac{l}{r} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l}\right)^2 \cdot \sin^2 \alpha} \right)$$

$$s_{\alpha} = r \cdot \left[ (1 - \cos \alpha) + \frac{1}{\lambda_s} \left( 1 - \sqrt{1 - \lambda_s^2 \cdot \sin^2 \alpha} \right) \right] \quad (3-1)$$

bzw.

$$s_{\alpha} = r \cdot f(\alpha) \quad \text{mit} \quad f(\alpha) \quad - \text{Hubfunktion. [10]}$$

Das Schubstangenverhältnis  $\lambda_s$  liegt bei Motoren üblicherweise im Bereich von 0,23 bis 0,33. Mit steigendem Verhältnis erhöhen sich die Seitenkräfte auf den Kolben, mit sinkendem Verhältnis steigt die Bauhöhe des Motors. Mit der Formel für den Kolbenweg lässt sich schwierig rechnen, vor allem dann, wenn die Kolbengeschwindigkeit oder die Kolbenbeschleunigung zu ermitteln ist. Meistens kann vereinfachend eine Näherungsformel benutzt werden, in der der Wurzelausdruck nach einer Potenzreihe entwickelt wird: [15]

$$\sqrt{1 - \lambda_s^2 \cdot \sin^2 \alpha} = 1 - \frac{1}{2} \cdot \lambda_s^2 \cdot \sin^2 \alpha - \frac{1}{8} \cdot \lambda_s^4 \cdot \sin^4 \alpha - \frac{1}{16} \cdot \lambda_s^6 \cdot \sin^6 \alpha - \dots$$

Durch die kleinen Werte von  $\lambda_s$  kann bereits das 3. Glied vernachlässigt werden, so dass:

$$\sqrt{1 - \lambda_s^2 \cdot \sin^2 \alpha} \approx 1 - \frac{1}{2} \cdot \lambda_s^2 \cdot \sin^2 \alpha$$

gesetzt werden kann.

Die entsprechende Näherungsformel für den Kolbenweg lautet:

$$s_{\alpha} \approx r \cdot \left[ (1 - \cos \alpha) + \frac{1}{\lambda_s} \cdot \frac{1}{2} \cdot \lambda_s^2 \cdot \sin^2 \alpha \right]$$

Mit der Beziehung:

$$\sin^2 \alpha = \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos 2\alpha)$$

ergibt sich dann für den Kolbenweg  $s_\alpha$ :

$$s_\alpha \approx r \cdot \left[ 1 - \cos \alpha + \frac{\lambda_S}{4} (1 - \cos 2\alpha) \right] \quad (3-2)$$

Für das augenblickliche Brennraumvolumen  $V_\alpha$  folgt:

$$V_\alpha = V_c + A_K \cdot s_\alpha$$

mit

$$V_c = \frac{V_h}{\varepsilon - 1} \quad - \text{Kompressionsvolumen}$$

$$A_K = \frac{\pi \cdot d_K^2}{4} \quad - \text{Kolbenfläche}$$

Damit ergibt sich:

$$V_\alpha \approx V_c + A_K \cdot r \cdot \left[ 1 - \cos \alpha + \frac{\lambda_S}{4} \cdot (1 - \cos 2\alpha) \right] \quad (3-3)$$

Abb. 3.3 zeigt den relativierten Verlauf der Werte des Kolbenweges als Funktion des Kurbelwinkels für  $\lambda_S = 0,3$ . Zur Verdeutlichung des Einflusses der Pleuellänge (kann nicht beliebig lang gewählt werden) ist der Kurvenverlauf für  $\lambda_S = 0$  zusätzlich eingezeichnet. [10]

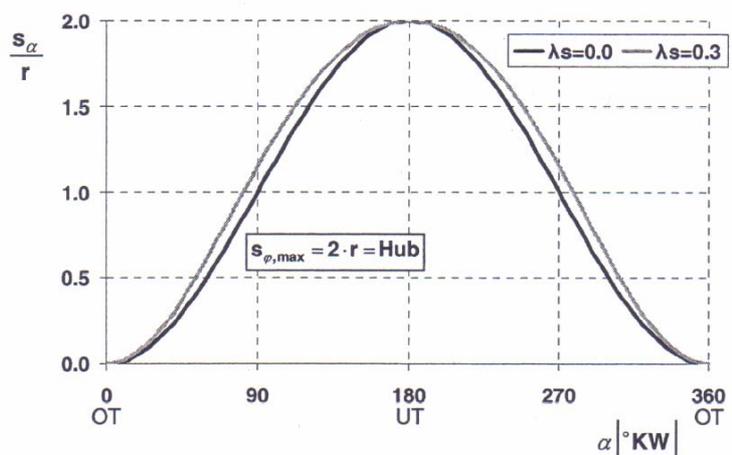


Abb. 3.3: Relativer Verlauf des Kolbenweges [10]

### 3.1.2 Kolbengeschwindigkeit

Die Kolbengeschwindigkeit ergibt sich aus der zeitlichen Differenziation des Kolbenweges:

$$\dot{s}_\alpha = \frac{ds_\alpha}{dt} = \frac{ds_\alpha}{d\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dt}$$

Mit der vereinfachenden Annahme, dass die Winkelgeschwindigkeit  $\omega = \text{const.}$  ist, folgt:

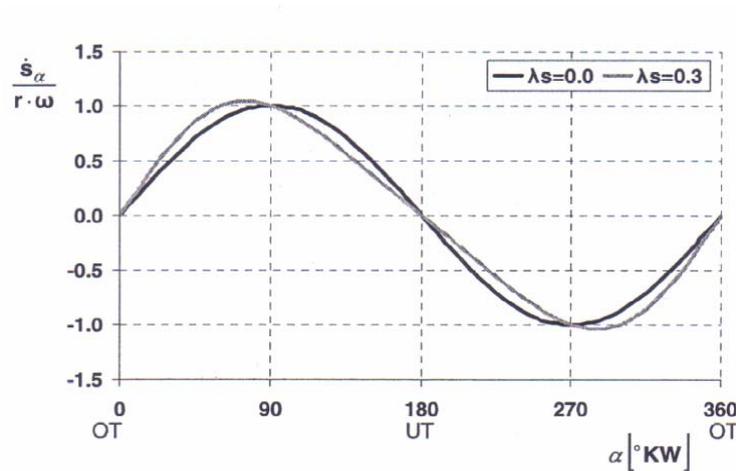


Abb. 3.4: Relativer Verlauf der Kolbengeschwindigkeit. [10]

$$\frac{d\alpha}{dt} = \omega = 2 \cdot \pi \cdot n$$

und durch Differenziation der Näherungsformel für  $s_\alpha$  die Kolbengeschwindigkeit:

$$\dot{s}_\alpha = \omega \cdot \frac{ds_\alpha}{d\alpha} \approx \omega \cdot r \cdot \left( \sin \alpha + \frac{\lambda_s}{2} \cdot \sin 2\alpha \right) \quad (3-4)$$

Die Differenziation der exakten Formel wäre aufwendig und ergibt keine nennenswerte Abweichung. Abb. 3.4 zeigt den relativierten Verlauf der Kolbengeschwindigkeit als Funktion des Kurbelwinkels. Die Kolbengeschwindigkeit erreicht etwa in der Hälfte des Kolbenhubs ihr Maximum. [10]

### 3.1.3 Kolbenbeschleunigung

Analog zur Bestimmung der Kolbengeschwindigkeit erhält man für die Kolbenbeschleunigung  $\ddot{s}_\alpha$ :

$$\ddot{s}_\alpha = \frac{d^2s_\alpha}{d\alpha^2} \cdot \left( \frac{d\alpha}{dt} \right)^2 = \omega^2 \cdot \frac{ds_\alpha}{d\alpha} = \omega^2 \cdot \frac{d^2s_\alpha}{d\alpha^2}$$

und somit: