

2 Kolben-Gestaltungsrichtlinien

Aufgrund der Betriebsanforderungen gängiger Verbrennungskraftmaschinen (Zweitakt-, Viertakt-, Otto- und Dieselmotor) sind in der Regel Aluminium-Silizium-Legierungen die zweckmäßigsten Kolbenwerkstoffe. Großkolben und Nkw-Kolben bzw. deren Köpfe oder Oberteile werden jedoch häufig aus Stahl hergestellt.

2.1 Begriffe und Hauptabmessungen

Funktionsbereiche beim Kolben sind der Kolbenboden, die Ringpartie mit dem Feuersteg, die Kolbennabe und der Kolbenschaft, **Bild 2.1**. Zusätzliche Funktionselemente, Kühlkanal und Ringträger kennzeichnen die Kolbenbauart. Zur Baugruppe Kolben zählen auch noch die Kolbenringe, der Kolbenbolzen und – je nach Auslegung – die Bolzensicherungen.

Um die Massen möglichst gering zu halten, ist eine sorgfältige konstruktive Auslegung der Kolben notwendig, verbunden mit einer guten Kolbenkühlung. Wichtige Abmessungen und übliche Werte zeigen **Bild 2.2** und **Tabelle 2.1**.

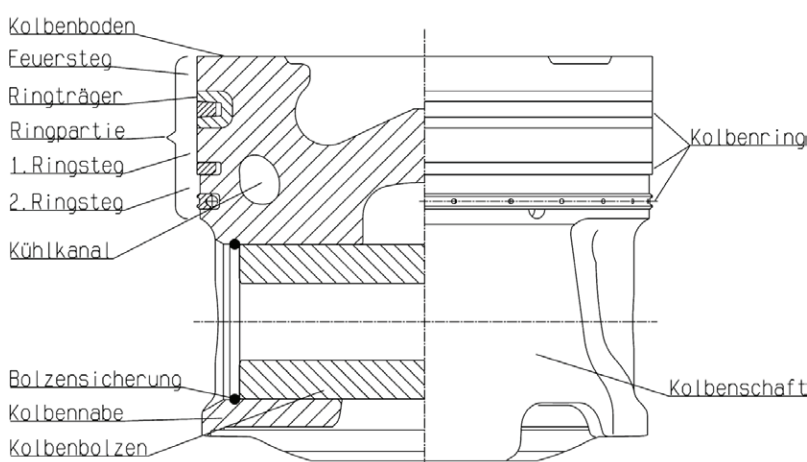


Bild 2.1: Wichtige Begriffe am Kolben

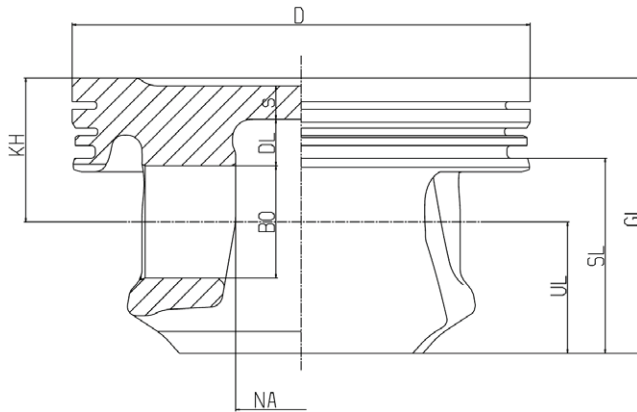


Bild 2.2:
Wichtige Abmessungen am Kolben

- BO: Nabenbohrungs-Ø, (Kolbenbolzen-Ø)
- KH: Kompressionshöhe
- NA: Nabenabstand
- D: Kolben-Ø
- s: Bodendicke
- DL: Dehnlänge
- SL: Schaftlänge
- GL: Gesamtlänge
- UL: Untere Länge

Tabelle 2.1: Hauptabmessungen von Leichtmetallkolben

	Ottomotoren		Dieselmotoren*
	Zweitakt	Viertakt (Pkw)	Viertakt (Pkw)
Durchmesser D [mm]	30 – 70	65 – 105	65 – 95
Gesamtlänge GL/D	0,8 – 1,0	0,6 – 0,7	0,8 – 0,95
Kompressionshöhe KH/D	0,4 – 0,55	0,30 – 0,45	0,5 – 0,6
Bolzendurchmesser BO/D	0,20 – 0,25	0,20 – 0,26	0,3 – 0,4
Höhe Feuersteg [mm]	2,5 – 3,5	2 – 8	6 – 12
Höhe 1. Ringsteg St/D*	0,045 – 0,06	0,040 – 0,055	0,055 – 0,1
Nuthöhe für 1. Kolbenring [mm]	1,2 u. 1,5	1,0 – 1,75	1,75 – 3,5
Schaftlänge SL/D	0,55 – 0,7	0,4 – 0,5	0,5 – 0,65
Nabenabstand NA/D	0,25 – 0,35	0,20 – 0,35	0,25 – 0,35
Bodendicke s/D bzw. s/D _{Mu,max} **	0,055 – 0,07	0,06 – 0,10	0,14 – 0,23

* Werte bei Dieselmotoren gelten für Ringträgerkolben; ** Diesel

2.1.1 Bodenformen und Bodendicke

Der Kolbenboden bildet einen Teil des Brennraums. Kolben für Ottomotoren können flach, erhaben oder vertieft sein. Bei Kolben für Dieselmotoren ist meist die Brennraummulde im Kolbenboden angeordnet. Die Geometrie des Kolbenbodens wird auch von der Anzahl und Lage der Ventile beeinflusst, **Bild 2.3**. Der maximale Gasdruck und die abzuführende Wärmemenge bestimmen die Stärke des Kolbenbodens (Bodendicke). Der Kolbenboden bzw. beim Dieselmotoren der Muldenrand ist die thermisch höchstbeanspruchte Partie eines Kolbens.

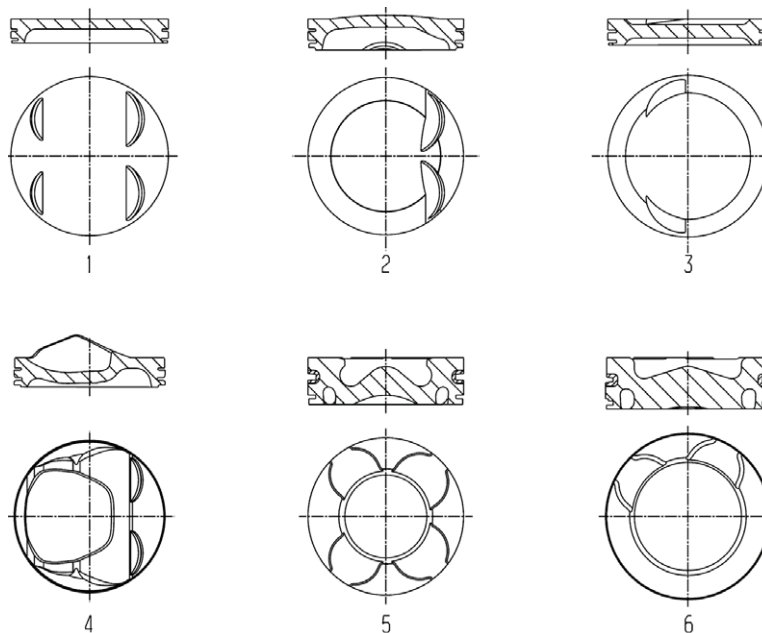


Bild 2.3: Beispiele von Pleuellagenformen verschiedener Pleellen für Otto- und Dieselmotoren (1 bis 3 für Viertakt-Ottomotoren mit Saugrohreinspritzung, 4 für Viertakt-Ottomotoren mit Direkteinspritzung, 5 bis 6 für Viertakt-Dieselmotoren mit Direkteinspritzung)

Die in **Tabelle 2.1** angegebenen Werte für die Bodendicke s gelten allgemein für Pleellen mit ebenen und mit konvex oder konkav gewölbten Böden.

2.1.2 Kompressionshöhe

Die Kompressionshöhe ist der Abstand zwischen der Mitte des Pleellenbolzens und der Pleellagenoberkante. Ziel ist eine möglichst kleine Kompressionshöhe, um die Pleellenmasse und die Pleellenhöhe des Motors so gering wie möglich zu halten. Die Anzahl und Höhe der Pleellenringe, die notwendigen Ringstege, der Pleellenbolzendurchmesser und die Pleellagenhöhe ergeben aber eine Mindest-Kompressionshöhe, die nicht unterschritten werden kann. Bei Pleellen für Dieselmotoren sind neben der Muldentiefe im Allgemeinen der Pleellagenradius und die erforderliche Mindestbodendicke unter der Mulde für die Kompressionshöhe bestimmend.

Die Reduzierung der Kompressionshöhe hat auch Nachteile. Bei hohen Leistungen und Gasdrücken sind höhere Temperaturen in der Pleellenbohrung und höhere Beanspruchungen am Pleellenboden die Folge der geringen Kompressionshöhe. Risse in der Pleellenbohrung oder am Pleellenboden sind dann nicht auszuschließen. Dementsprechend ist bei Pleellen für Dieselmotoren eine große Pleellenlänge günstig für die Belastbarkeit des Pleellenrands.

2.1.3 Feuersteg

In der Kolbenringzone wird der Abstand zwischen der Kolbenbodenkante und der Oberflanke der 1. Kolbenringnut als Feuersteg bezeichnet. Seine Dimensionen sind ein Kompromiss aus folgenden Forderungen: Auf der einen Seite geringe Kolbenmassen und ein minimales Totvolumen zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der Abgasemissionen; auf der anderen Seite benötigt der 1. Kolbenring, ein Kompressionsring, einen seiner Funktion noch zuträglichen Temperaturbereich. Dieser hängt wiederum stark vom Verbrennungsverfahren, dem Werkstoff und der Geometrie des 1. Kolbenringes und seiner Kolbenringnut sowie von der Lage des Wassermantels am Zylinder ab.

Bei Ottomotoren beträgt die Feuersteghöhe 4 bis 10 % des Kolbendurchmessers mit weiter fallender Tendenz, um die durch Spalte hervorgerufenen Kohlenwasserstoff-Emissionen weiter zu reduzieren.

Bei Pkw-Dieselmotoren mit Direkteinspritzung beträgt dieser Wert zwischen 8 und 15 % des Kolbendurchmessers.

Bei Nkw-Dieselmotoren mit direkter Einspritzung sind es 8 bis 13 % des Kolbendurchmessers für Aluminiumkolben und 6 bis 10 % für Stahlkolben.

2.1.4 Ringnuten und Ringstege

Die Kolbenringzone besteht im Allgemeinen aus drei Ringnuten zur Aufnahme der Kolbenringe. Die Kolbenringe dichten den Brennraum ab und steuern den Schmierölverbrauch. Ihre Oberfläche muss deshalb von höchster Qualität sein. Mangelhafte Dichtheit führt zum Durchblasen der Verbrennungsgase in das Kurbelgehäuse, zum Aufheizen der durch den heißen Gasstrom beaufschlagten Oberflächen und zu Zerstörungen des sehr wichtigen Ölfilms auf den Laufflächen der Gleit- und Dichtpartner. Der Kolbenring darf, wenn er bündig zum Kolbenaußendurchmesser in die Nut gedrückt wird, nicht am Nutgrund-Durchmesser des Kolbens anstoßen. Er benötigt also ein radiales Spiel.

Die heutigen Schmieröle lassen in Kolben von Ottomotoren Nuttemperaturen von mehr als 200 °C und in Kolben von Dieselmotoren von bis zu 280 °C zu, ohne dass es zum Feststecken der Kolbenringe durch Rückstandsbildung in der 1. Kolbenringnut kommt.

Bei Kolben für Dieselmotoren, die wesentlich höhere Verbrennungsdrücke als Ottomotoren entwickeln, wird die 1. Kolbenringnut durch Eingießen eines Ringträgers erheblich verschleißresistenter. Ringträger bestehen meist aus Niresist, einem austenitischen Gusseisen, dessen

Wärmeausdehnung in etwa der von Aluminium entspricht. Der Ringträger geht durch das bekannte Alfin-Verbundgussverfahren eine haltbare metallische Verbindung mit dem Kolben ein. Dieses Verfahren ermöglicht auch einen besseren Wärmeübergang.

Als Ringsteg wird der Teil der Ringpartie eines Kolbens bezeichnet, der sich zwischen zwei Kolbenringnuten befindet. Vor allem der 1. Ringsteg, der stark durch den Gasdruck belastet wird, muss ausreichend dimensioniert sein, um Ringstegbrüche zu vermeiden. Seine Höhe hängt vom maximalen Gasdruck des Motors und der Stegtemperatur ab. Bei Kolben für Ottomotoren beträgt die Ringsteghöhe 4 bis 6 %, für aufgeladene Pkw-Dieselmotoren 5,5 bis 10 % und bei Nutzfahrzeug-Kolben etwa 10 % des Kolbendurchmessers. Der 2. bzw. die übrigen Ringstege können durch die geringere Druckbeaufschlagung geringer dimensioniert werden.

2.1.5 Gesamtlänge

Die Gesamtlänge GL des Kolbens, bezogen auf den Kolbendurchmesser, ist von der Kompressionshöhe und der Führungslänge am Schaft abhängig. Vor allem bei kleineren schnell laufenden Motoren wird im Sinne einer geringen Kolbenmasse die Gesamtlänge möglichst gering gehalten.

2.1.6 Nabenbohrung

2.1.6.1 Rauheit

Der einwandfreie Zustand des Gleitsystems Nabenbohrung/Kolbenbolzen gewährleistet einen sicheren Motorbetrieb. Zu geringe Rauheit kann, besonders beim Start, zu Nabenbohrungsfressern führen. In der Nabenbohrung wird deshalb, je nach Bohrungsdurchmesser, eine Rauheit von $R_a = 0,63$ bis $1,0 \mu\text{m}$ angestrebt. Kolben mit nur im Kolben beweglichem Kolbenbolzen (Schrumpfpleuel) haben meist etwas größere Rauheitswerte, um die Ölhaltung, besonders bei ungünstigen Laufbedingungen, zu erhöhen.

Oft sind noch weitere Detailmaßnahmen erforderlich, um die Schmierung unter allen Betriebsbedingungen sicherzustellen. Unter anderem tragen Öltaschen (Slots) oder umlaufende Ölrielen zu einer verbesserten Schmierung in der Nabenbohrung bei.

2.1.6.2 Einbauspil

Das Spiel des Kolbenbolzens in den Kolbennaben ist für einen ruhigen Lauf und geringen Verschleiß der Lagerstellen wichtig. Da die Werkstoffe des Kolbens und des Kolbenbolzens eine

unterschiedliche Wärmeausdehnung haben, sind bei warmem Motor die Laufspiele größer als die Einbauspiele bei kaltem Motor. Für diese Differenz gilt näherungsweise:

$$\text{Spielvergrößerung} = 0,001 \times \text{Bolzendurchmesser [mm]}$$

Die Spielvergrößerung bei einem Kolbenbolzen von 30 mm Durchmesser beträgt demnach etwa 30 µm.

Früher waren häufig sehr enge Spiele üblich, sodass der Kolbenbolzen nur in den vorgewärmten Kolben eingeschoben werden konnte. Heute ist das Spiel durchweg größer, der Kolbenbolzen wird in die Nabenbohrung bei Raumtemperatur eingeschoben. Auf diese Weise werden Deformationen des Schafts durch Schrumpfspannungen und gegebenenfalls ein Festfressen des Kolbenbolzens im Kolben beim Start bei tiefen Temperaturen vermieden.

Bei der Auslegung des Mindestspiels, **Tabelle 2.2**, ist für Ottomotoren zu unterscheiden, ob es sich um eine schwimmende Bolzenlagerung oder einen im kleinen Pleuelauge eingeschrumpften Kolbenbolzen handelt. Die schwimmende Bolzenlagerung ist die Standardausführung und die in den Kolbennaben spezifisch am höchsten belastbare Variante.

Beim Schrumpfpleuel sitzt der Kolbenbolzen mit Überdeckung im kleinen Pleuelauge. Das erleichtert die automatische Montage von Kolben, Kolbenbolzen und Pleuelstange, da keine besonderen Kolbenbolzensicherungen notwendig sind. Die Schrumpfpleuel-Ausführung ist für moderne Dieselmotoren und für Ottomotoren mit Turboaufladung ungeeignet.

Tabelle 2.2: Mindestbolzenspiel für Ottomotoren [mm] – nicht für Motoren für den Rennsport geeignet

Schwimmende Lagerung des Kolbenbolzens	Schrumpfsitz Kolbenbolzen
0,002 – 0,005	0,006 – 0,012

2.1.6.3 Toleranzen

Für die Paarung von Kolbenbolzen und Kolben gelten ähnliche Gesichtspunkte wie bei Kolben und Zylinder. Um die Montage zu erleichtern, wird – begünstigt durch kleinere Fertigungstoleranzen bei Nabenbohrungen und bei Kolbenbolzen – meistens nur eine Maßgruppe verwendet. Die Toleranz bei Kolbenbolzen beträgt je nach Bolzendurchmesser 4 bis 8 µm. Die Nabenbohrungstoleranz ist um jeweils etwa 1 µm größer.

2.1.6.4 Desachsierung

Die Kinematik des Kurbeltriebs eines Hubkolbenmotors führt während eines Arbeitszyklus zu mehrfachem Anlagewechsel des Kolbens an der Zylinderwand. Der Gasdruck drückt nach

dem oberen Totpunkt eine Schaftseite des Kolbens an die Zylinderwand. Diese Zone wird als Druckseite bezeichnet, die ihr gegenüberliegende Schaftseite als Gegendruckseite.

Ein Versatz der Kolbenbolzenachse zur Kolbenlängsachse (Desachsierung) bewirkt ein geändertes Anlageverhalten des Kolbens beim Seitenwechsel und beeinflusst die Seitenkräfte und Aufschlagimpulse entscheidend. Durch Berechnung der Kolbenbewegung lassen sich die Lage und Größe des Versatzes zur Kolbenlängsachse optimieren und so das Kolbenlaufgeräusch und die Kavitationsgefahr an der Zylinderlaufbuchse erheblich vermindern.

2.1.7 Kolbenschaft

Der Kolbenschaft als unterer Teil des Kolbens führt den Kolben im Zylinder. Diese Aufgabe kann er nur bei geeignetem Spiel zum Zylinder erfüllen. Durch eine ausreichende Schaftlänge und enge Führung bleibt das Kolbenkippen beim Anlagewechsel des Kolbens von der einen zur gegenüberliegenden Zylinderwand gering.

Bei Kolben für Dieselmotoren dominierte früher der Glattschaftkolben mit seinem geschlossenen, nur im Bereich der Kolbenbolzenbohrungen unterbrochenen Schaft. Diese Bauart wird heute teilweise noch bei Kolben für Zweitakt-Ottomotoren angewendet. Aluminium-Dieselskolben sind für Nkw-Motoren teilweise noch in Glattschaft-Bauweise mit nur geringfügiger Zurücksetzung im Bereich der Kolbennabe ausgeführt, im Pkw-Bereich grundsätzlich als Fensterkolben.

Vielseitig sind die Ausführungen der Kolbenschaften bei Kolben für Ottomotoren, **Bild 2.4**. Um die Massenkräfte gering zu halten, haben sie nur noch verhältnismäßig schmale Schaftflächen, was zum Kastenkolben, z. T. mit unterschiedlich breiten Laufflächen (Asymdukt-Kolben) und/oder mit schrägen Kastenwänden (u. a. EVOTEC®-Kolben) führte.

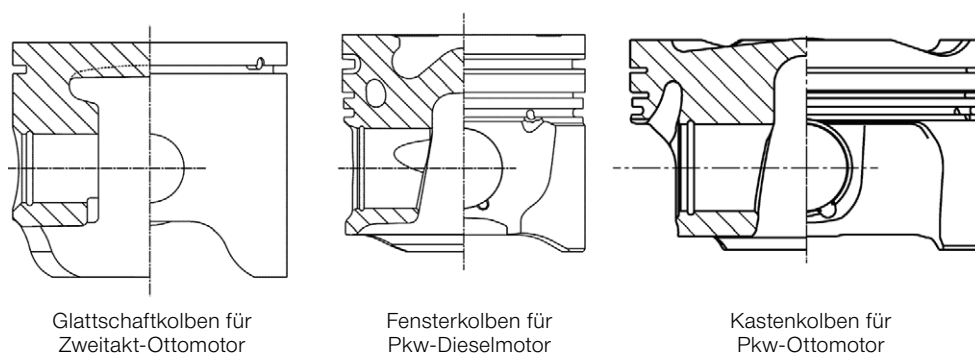


Bild 2.4: Schaftformen

Der Kolbenschaft muss in Bezug auf seine Festigkeit einige Anforderungen erfüllen. Einerseits soll er die Seitenkräfte ohne große Verformungen aufnehmen, andererseits soll er sich elastisch den Verformungen des Zylinders anpassen. Der Kolbenboden biegt sich unter Temperatur- und Zünddruckbelastung durch und verformt den Kolbenschaft in Druck- und Gegendruckrichtung oval. Das vergrößert den Durchmesser in Richtung des Kolbenbolzens und verkleinert ihn in Druck-Gegendruck-Richtung. Bleibender Schafteinfall durch plastische Verformung sollte jedoch vermieden werden. Abhilfemaßnahmen bei gefährdeten Kolben sind u. a. größere Wandstärken, ovale Kolbeninnenformen oder kleine Umfangslängen des Kolbenschafts.

Das untere Ende des Kolbenschafts sollte möglichst nicht oder nur wenig aus dem Zylinder austauchen (Unterkante Nabenbohrung). Das Austauchen muss bei der Gestaltung der Kolbenform entsprechend berücksichtigt werden.

2.2 Kolbenform

2.2.1 Kolbenspiel

Der Kolben dehnt und verformt sich unter Einwirkung der Gastemperaturen und Kräfte, insbesondere der Gaskraft. Diese Formänderung gilt es bei der konstruktiven Gestaltung des Kolbens miteinzubeziehen, um einen klemmfreien Lauf bei Betriebstemperatur zu gewährleisten. Dazu wird der Kolben im Kaltzustand mit einem Spiel eingebaut, das die zu erwartende Verformung und die Kolbensekundärbewegung berücksichtigt. Außerdem erhält er eine vom idealen Kreiszyylinder abweichende Form, die als „Kolbenform“ (auch „Kolbenfeinkontur“) bezeichnet wird.

Das lokale Spiel im Kaltzustand setzt sich aus der Differenz der Durchmesser von Zylinder und dem als Kreiszyylinder gedachten Kolben (dem Einbauspiel) zusammen sowie aus der Abweichung des Kolbens von dieser Kreiszyylinderform. Die Kolbenform weicht in axialer Richtung (Konizität, Balligkeit) und in Umfangsrichtung (Ovalität) von der idealen Kreiszyylinderform ab.

2.2.2 Ovalität

Üblicherweise haben Kolben in Kolbenbolzenrichtung einen geringfügig kleineren Durchmesser als in Druck-Gegendruck-Richtung. Die Differenz ist die (diametrale) Ovalität, **Bild 2.5**.

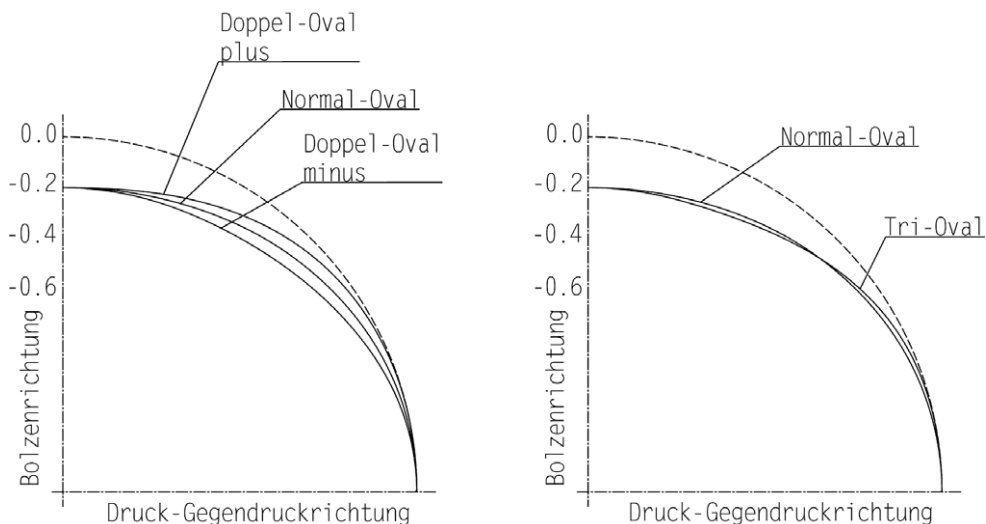


Bild 2.5: Ovalität und Überlagerung, Doppel-Oval (links), Tri-Oval (rechts)

Die ovale Formgebung von Kopf und Schaft bietet viele Auslegungsmöglichkeiten. Durch die Schaftovalität wird in Richtung der Kolbenbolzenachse Raum für die Wärmeausdehnung geschaffen. Zur Erzeugung eines gleichmäßigen, ausreichend breiten Tragbildes kann die Ovalität variiert werden. Üblicherweise beträgt sie (diametral) 0,3 bis 0,8 % des Kolbendurchmessers.

Neben der Normal-Ovalität sind auch Ovalitäten mit Überlagerungen möglich, sogenannte Doppel- bzw. Tri-Ovalitäten. Bei Doppel-Ovalität in Form von positiver (Doppel-Oval plus) bzw. negativer (Doppel-Oval minus) Überlagerung ist der örtliche Kolbendurchmesser größer bzw. kleiner als bei Normal-Ovalität, **Bild 2.5 links**. Die positive Überlagerung verbreitert, die negative verschmälert im Vergleich zur Normal-Ovalität das Tragbild. Tri-Ovalität in Form von positiver Überlagerung verbreitert das Tragbild, das aufgrund eines ab etwa 35° zur Druck-Gegendruck-Richtung deutlich abnehmenden örtlichen Kolbendurchmessers begrenzt wird, **Bild 2.5 rechts**.

Die sich in Druck- und Gegendruckrichtung ergebenden Laufflächen sollten nicht zu schmal sein, damit die spezifischen Pressungen zwischen Kolben und Zylinder niedrig bleiben. Um harten Tragstellen und Fressgefahr vorzubeugen, sollte sich die tragende Fläche allerdings auch nicht bis zu den Kastenwänden ausdehnen. **Bild 1.7** in Kapitel 1.2.4 zeigt die tragende Fläche bei einer günstigen Kolbenform.

Weitere Möglichkeiten zur Optimierung der Kolbenform bieten in Druck- und in Gegendruckrichtung unterschiedliche Ovalitäten sowie Ringpartieversätze und sogenannte Korrekturen.

2.2.3 Schaft- und Ringpartieeinzug

Am oberen und am unteren Schaftende wird der Kolben etwas eingezogen, um die Ausbildung des tragenden Schmierölkeils zu begünstigen.

Der stärkere Einzug im Bereich der Kolbenringpartie trägt zum einen der starken Wärme- dehnung aufgrund hoher Temperaturen in diesem Bereich und der Verformung durch die Gaskraft Rechnung. Zum anderen verhindert er, dass die Kolbenringpartie aufgrund der Kol- bensekundärbewegung am Zylinder anschlägt. Vor allem bei den geräuschsensiblen Ottomo- toren sollte es keine Kontakte zwischen Kolbenringpartie und Zylinder geben.

All diese Gesichtspunkte verlangen für die verschiedenen Kolbenbauarten optimierte Bear- beitungsförmungen der Mantelfläche. Die endgültige Kolbengestalt ist nur durch umfangreiche Simulation und Motorenversuche abzusichern. **Bild 2.6** zeigt ein Detail aus einer Kolbenform- zeichnung.

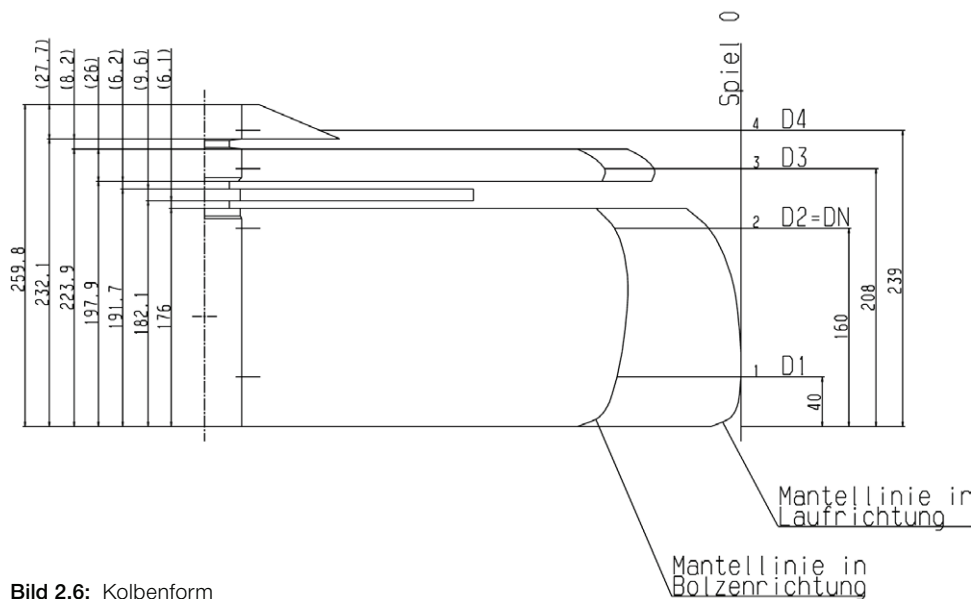


Bild 2.6: Kolbenform

2.2.4 Maß- und Formtoleranzen

Der Kolbendurchmesser wird üblicherweise an einer von mindestens drei Messebenen abso- lut bestimmt. Diese Bezugsmessebene wird mit DN bezeichnet. Sie liegt bevorzugt an der Stelle mit dem engsten Spiel zwischen Kolben und Zylinder ($DN = D1$) oder in einem formsta-

bilien Bereich ($DN = D2$). Die Maßtoleranz beträgt abhängig vom Kolbendurchmesser (diametral) 8 bis 18 μm .

Die Kolbenaußenkontur wird durch NC-gesteuertes Feindreihen gefertigt. Durch die Elastizität des Kolbens ergibt sich ein trichterförmiges Toleranzband, wie in **Bild 2.7** schematisch dargestellt. Die Abweichungen von der Sollform werden als Formtoleranzen bezeichnet. Die Formtoleranzen der Durchmesser $D1$, $D2$, $D3$ und $D4$ betragen bei Kolben für Pkw- und Nkw-Motoren im Schaftbereich (diametral) etwa 7 μm bezogen auf DN und im Ringpartiebereich (diametral) 10 bis 15 μm . Es gilt das Prinzip der Gleitskala. Entsprechend dem Ist-Durchmesser in der Klassifizierungsebene verschiebt sich das Toleranzband für die Formtoleranzen.

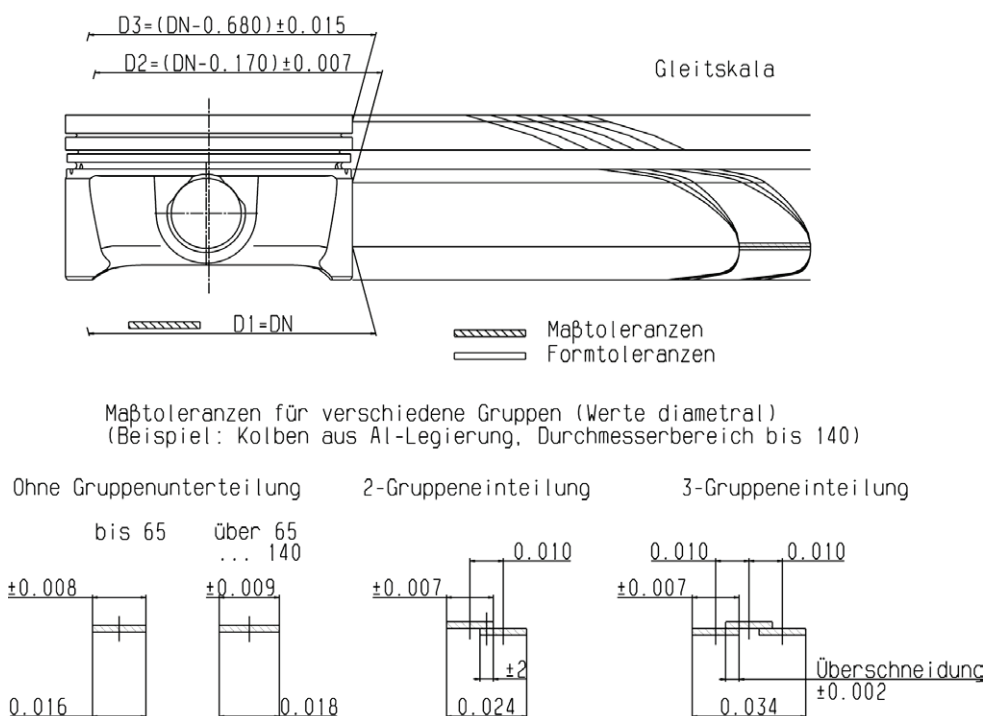


Bild 2.7: Kolbenform, Maß- und Formtoleranzen

2.2.5 Einbauspiel

Das Einbauspiel ist die Differenz zwischen Zylinderdurchmesser und größtem Kolbendurchmesser $D1$. Für geringe Reibleistungswerte darf das Einbauspiel einerseits nicht zu klein gewählt werden. Andererseits darf es nicht zu groß sein, damit bei allen Betriebszuständen

ein gleichmäßig ruhiger Lauf erreicht wird. Aufgrund der unterschiedlichen Wärmedehnungen sind diese Ziele bei der Kombination von Aluminiumkolben und Graugusszylinder am schwersten zu erreichen. Früher wurden häufig eingegossene Stahlstreifen zur Reduzierung der Wärmeausdehnung eingesetzt. **Tabelle 2.3** gibt eine Übersicht über die (diametralen) Spiele am Schaft verschiedener Kolbenbauarten.

Mit zunehmender Betriebstemperatur verringert sich das Einbauspiel. Ursachen dafür sind die im Vergleich zum Zylinder stärkere Erwärmung des Kolbens und ggf. die unterschiedliche Wärmeausdehnung der Werkstoffe von Kolben und Zylinder. In betriebswarmem Zustand läuft der Kolben mit Überdeckung im Zylinder. Aufgrund der Ovalität beschränkt sich die Überdeckung auf den sich elastisch anpassenden Bereich des Schafts.

Tabelle 2.3: Übliche Einbauspiele von Leichtmetallkolben [% vom Nenndurchmesser]

	Ottomotoren		Dieselmotoren	
	Zweitakt	Viertakt (Pkw)	Viertakt (Pkw)	
Werkstoff Motorblock	Al-Legierung	Al-Legierung	Grauguss	Grauguss
Einbauspiel	0,6 – 1,3	0,2 – 0,6	0,4 – 0,8	0,6 – 0,9
Spiel am oberen Schaftende	1,4 – 4,0*	1,2 – 1,8	1,7 – 2,4	1,9 – 2,4

* Nur bei 1-Ring-Ausführung und Hochleistungsmotoren (Schaftende nahe Feuersteg)

2.2.6 Maßgruppen

Eine Maßgruppe für Kolben und Zylinder erleichtert die Logistik in der Großserienfertigung. Hat die Wirtschaftlichkeit der Produktion oberste Priorität, ergeben sich zwangsläufig geringfügig breitere Bänder für die Maßtoleranzen als bei der Einteilung in mehrere Gruppen, z. B. (diametral) 18 µm im Vergleich zu (diametral) 14 µm bei der 2-Gruppeneinteilung, **Bild 2.7**.

Bei Mehrklasseneinteilungen von Kolben bis 140 mm Durchmesser sind an den Grenzen der Gruppen Überschneidungszonen von 2 µm erforderlich. Die Kolben in den Überschneidungszonen können beliebig der jeweils größeren oder kleineren Maßgruppe zugeordnet werden. Dadurch ist gewährleistet, dass für jede Maßgruppe die gewünschte Stückzahl lieferbar ist.

2.2.7 Schaftoberfläche

Neben der Schaftform hat auch die Oberfläche der Schaftlauffläche einen großen Einfluss auf das Gleitverhalten des Kolbens. Zu geringe Rauheiten beeinträchtigen das Einlaufen des Kolbens, zu große Rauheiten erhöhen die reibungsbedingten Leistungsverluste. Durch Diamantfeindrehen gezielt erzeugte Schaft Rauheitsprofile mit Rauheitswerten von $R_a = 1,5$ bis $5 \mu\text{m}$ ($R_z = 6$ bis $20 \mu\text{m}$) führen zu günstigen Ergebnissen (vgl. Kapitel 1.2.4).

Dünne metallische Schichten von Zinn ($0,8$ bis $1,3 \mu\text{m}$) oder Kunstharz-Graphitschichten (10 bis $40 \mu\text{m}$) verbessern zusätzlich die Notlaufeigenschaften, besonders beim kritischen Einlaufvorgang oder beim Motorstart unter ungünstigen Bedingungen, etwa beim Kaltstart.