

2 Kolbenbolzen und Kolbenbolzensicherungen

2.1 Funktion des Kolbenbolzens

Der Kolbenbolzen ist das Verbindungsglied zwischen Kolben und Pleuelstange. Durch die oszillierende Bewegung des Kolbens und die Überlagerung von Gas- und Massenträgheitskräften ist er hohen Belastungen wechselnder Richtung ausgesetzt. **Bild 2.1** zeigt die Kolbenbolzenbelastung für einen Ottomotor bei Nennleistung. An den Lagerstellen des Kolbenbolzens, in der Kolbennabe und dem kleinen Pleuelauge muss die Drehbewegung der Pleuelstange zum Kolben ausgeglichen werden. Aufgrund der geringen Relativbewegungen liegen hier ungünstige Schmiervverhältnisse vor.

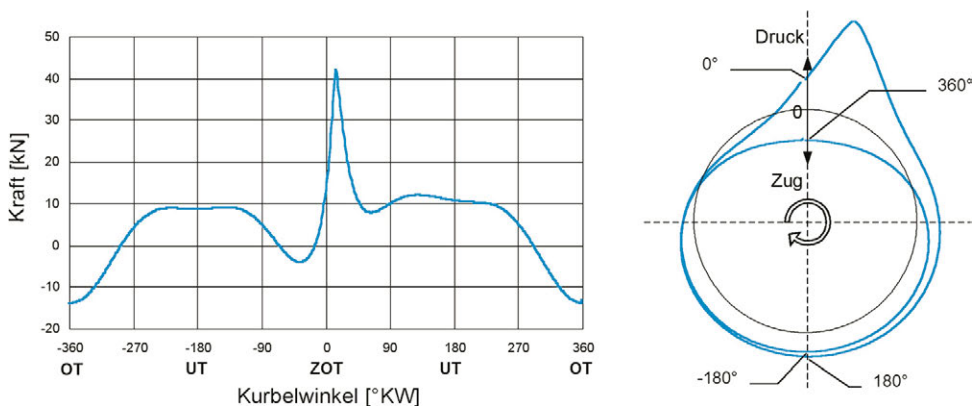


Bild 2.1: Kolbenbolzenbelastung

Bei Kolben für Pkw-Ottomotoren mit moderater spezifischer Leistung können die Kolbenbolzen durch Schrumpfspannungen im kleinen Pleuelauge fixiert werden (Klemmpleuel) (**Bild 2.2d**). Diese Konstruktion ermöglicht Einsparungen durch den Wegfall der Kolbenbolzensicherungen und der Lagerbuchse im kleinen Pleuelauge und erleichtert die automatische Montage von Kolben, Kolbenbolzen und Pleuelstange bei der Großserienfertigung von Motoren.

In hoch beanspruchten Ottomotoren und in Dieselmotoren wird der Kolbenbolzen im kleinen Pleuelauge „schwimmend“ gelagert (**Bild 2.2a – c**). Er muss dabei mit Kolbenbolzensicherungen gegen seitliches Auswandern im Kolben gesichert werden (siehe Abschnitt 2.8).

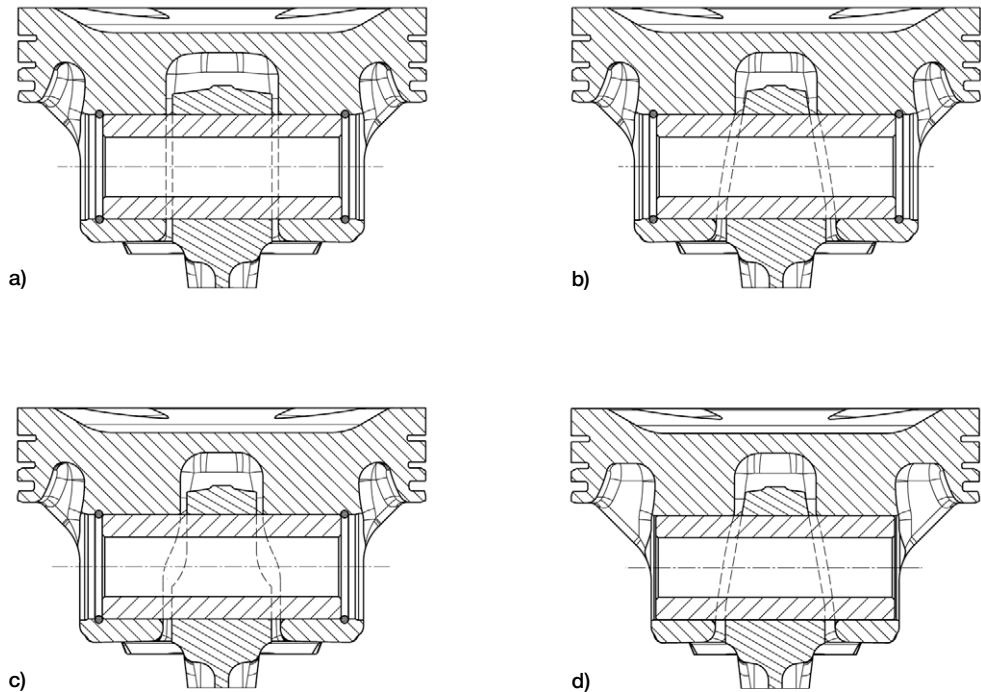


Bild 2.2: a) Schwimmende Lagerung mit Parallelabstützung, b) Schwimmende Lagerung mit Trapezabstützung, c) Schwimmende Lagerung mit Stufenabstützung, d) Klemmpleuel

Häufig wird bei Großkolben das Kühlöl durch die Pleuelstange über den Kolbenbolzen, der mit speziellen Ölleitsystemen versehen ist, zur Kolbennabe geleitet, siehe **Bilder 2.12 – 2.15**.

2.2 Anforderungen

2.2.1 Allgemein

Kolbenbolzen müssen folgenden Anforderungen genügen:

- ausreichende Festigkeit und Zähigkeit, um die Belastungen ohne Schaden zu ertragen,
- hohe Oberflächenhärte, um ein günstiges Verschleißverhalten zu erreichen,
- hohe Oberflächengüte und Formgenauigkeit für optimale Anpassung an die Gleitpartner Kolben und Pleuelstange,

- geringes Gewicht, um die Massenkräfte klein zu halten,
- die Steifigkeit ist auf die Kolbenkonstruktion abzustimmen, um Überbeanspruchungen am Kolben zu vermeiden.

Trotz dieser sich manchmal widersprechenden Anforderungen muss die Kolbenbolzenherstellung möglichst einfach und damit wirtschaftlich sein.

2.2.2 Festigkeit

Unter der Wirkung der Gas- und Massenkräfte ergeben sich Druck- bzw. Pressungsbelastungen der Kolbenbolzenoberfläche, deren Verteilung durch die von den einwirkenden Kräften hervorgerufenen Verformungen von Kolbennabenbohrungen, Kolbenbolzen und kleinem Pleuelauge bestimmt werden (siehe Abschnitt 2.4.3). Infolge dieser Druckverteilung wird der Kolbenbolzen auf Biegen, Ovalisieren und Abscheren beansprucht. Hinzu kommt noch eine Torsionsbelastung infolge der Pleuelschwenkbewegung. Sie bleibt wegen ihres geringen Anteils an der Gesamtbelastung unberücksichtigt. Demgegenüber besteht nun die Forderung, dass der Kolbenbolzen möglichst steif und leicht sein sollte.

Bild 2.3 zeigt die Spannungsverteilung am Kolbenbolzen bei Ovalisierung und verschiedenen Gefügezuständen an der Oberfläche.

Die Ovalisierung des Kolbenbolzens hat die in **Bild 2.3a** gezeigte Spannungsverteilung zur Folge. Die für die Dauerfestigkeit kritischen maximalen Zugspannungen liegen dabei innen an der Oberfläche der Bohrung. An der Innenbohrung aufgetragene Druckeigenspannungen können diesen Zugspannungen entgegenwirken, wodurch die Dauerfestigkeit des Kolben-

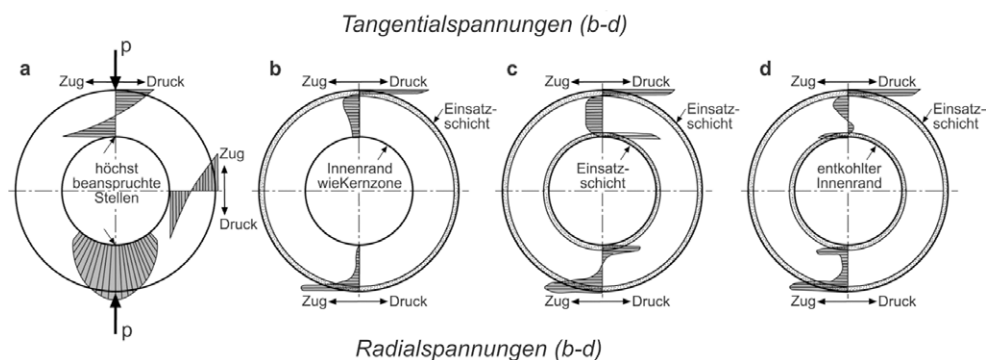


Bild 2.3: Spannungsverteilung am Kolbenbolzen

a) Wirkung bei Abplattung, b) ohne Inneneinsatz, c) mit Inneneinsatz, d) bei Randentkohlung in der Bohrung

bolzens günstig beeinflusst wird. Analog verhält es sich für den Außendurchmesser, welcher hauptsächlich durch die Biegung beansprucht wird.

Die mit dem Einsatzhärten bzw. Nitrieren der Kolbenbolzen verbundene Kohlenstoff- bzw. Stickstoffaufnahme der Oberflächenschicht hat eine Volumenvergrößerung und damit Druckeigenstressungen in der Schicht zur Folge. Die Wirkung auf den Eigenspannungszustand des Kolbenbolzens zeigen die **Bilder 2.3b – d**. Die Praxis bestätigt, dass dadurch die Dauerfestigkeit wesentlich erhöht wird.

Eine Randentkohlung der Bohrungsoberfläche (**Bild 2.4**), welche zu Zugeigenstressungen führt (**Bild 2.3d**), ist ausgesprochen schädlich für die Dauerfestigkeit des Kolbenbolzens. Härterisse, Schlackenzeilen und tiefe Bearbeitungsriefen in der Bohrung setzen die Dauerfestigkeit ebenfalls stark herab.

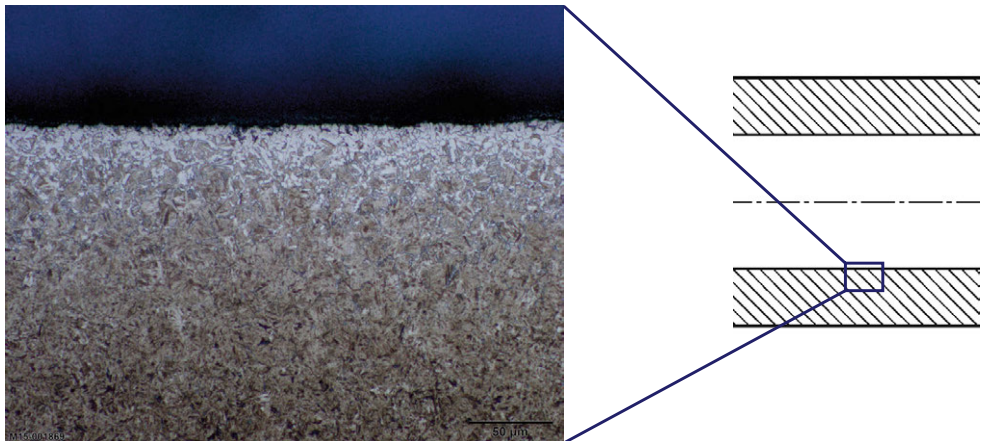
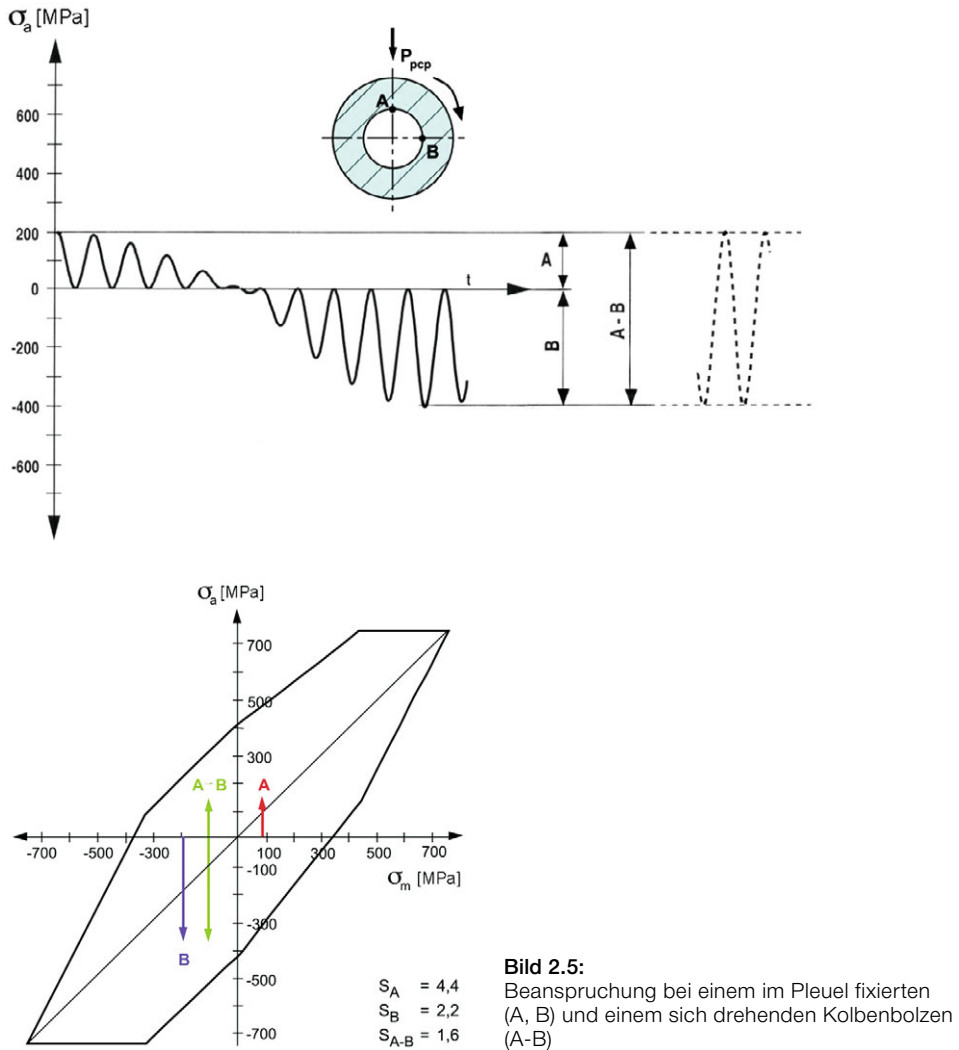


Bild 2.4: Randentkohlung an der Bohrung des Kolbenbolzens

Schwimmend gelagerte Kolbenbolzen können sich drehen. Das bedeutet, dass sich hoch belastete Positionen des Kolbenbolzens in weniger belastete oder zug- in druckbelastete Positionen oder umgekehrt bewegen. Daraus ergibt sich eine wechselnde Belastung des Kolbenbolzens. Aus diesen Spannungsamplituden resultiert im Gegensatz zu im Pleuel fixierten, d. h. sich nicht drehenden Kolbenbolzen eine höhere Belastung des Bauteils. **Bild 2.5** zeigt die Unterschiede zwischen einem fixierten und einem sich drehenden Kolbenbolzen anhand der Spannungsamplituden auf.

Die Bewertung der Bolzenbelastung erfolgt mithilfe eines Dauerfestigkeitsschaubildes, z. B. nach Smith. Ein solches Dauerfestigkeitsschaubild muss für jeden eingesetzten Werkstoff ermittelt werden. Seine Grenzlinien entsprechen dem Sicherheitsbeiwert $S = 1$. Der zulässige

**Bild 2.5:**

Beanspruchung bei einem im Pleuel fixierten (A, B) und einem sich drehenden Kolbenbolzen (A-B)

Mindestsicherheitsbeiwert wird entsprechend den Anforderungen und zu erwartenden Belastungen für den jeweiligen Einsatzbereich, z.B. Pkw, Nkw, Rennsport, festgelegt.

Das Spiel zwischen Kolbenbolzen und Kolbennabe bzw. Pleuelauge ist so zu wählen, dass es nicht zu Reibern an den Kontaktstellen zum Kolben und der Pleuelstange kommen kann. Besonders im betriebswarmen Zustand ist wegen der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der eingesetzten Werkstoffe auf die Spielgebung zu achten.

Um Nabenrisse zu vermeiden, dürfen Grenzen der temperaturabhängigen Werkstoff- und Belastungskenngrößen wie z.B. die Flächenpressung in der Nabe nicht überschritten werden.

2.2.3 Deformation

Es besteht nun die Forderung, dass der Kolbenbolzen bei ausreichender Steifigkeit und Festigkeit leicht sein sollte. Die Steifigkeit bezüglich der Durchbiegung lässt sich etwa mit der vierten Potenz der Durchmesserergrößerung stark erhöhen. Zudem verändert sich die Durchbiegung etwa mit der dritten Potenz der Stützweite des Kolbenbolzens, d.h. mit dem Kolbennabenabstand. Eine Verkleinerung dieses Wertes wirkt sich daher ebenfalls stark mindernd auf die Durchbiegung und damit steifigkeitserhöhend aus. Lässt sich dabei ein kürzerer Kolbenbolzen einsetzen, so ist noch eine Massenreduzierung möglich.

Eine Erhöhung der Steifigkeit bezüglich der Ovalisierung kann nur mit größerer Wandstärke erzielt werden und erhöht damit immer die Masse. Die Steifigkeit des Kolbenbolzens hat einen deutlichen Einfluss auf die Beanspruchung der Kolbennaben, der Abstützung und des Muldenrandes, wie **Bild 2.6** zeigt.

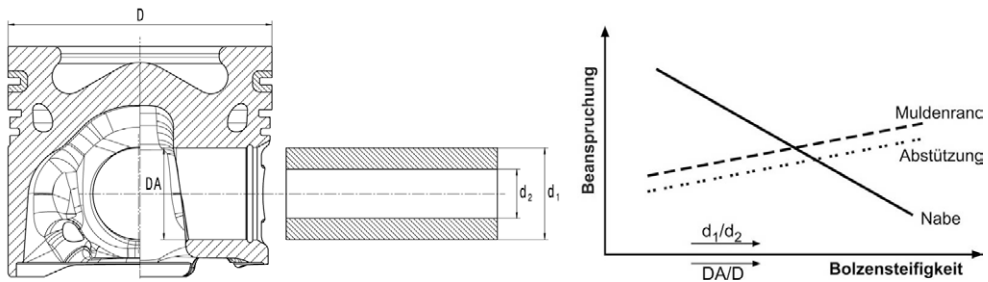


Bild 2.6: Abhängigkeit der Kolbenbeanspruchung von der Kolbenbolzensteifigkeit

Die Anfälligkeit des Kolbens gegen Nabenrisse ist in **Bild 2.7** in Abhängigkeit von der Kolbenbolzengeometrie als Ergebnis von Motorversuchen dargestellt. Wegen der höheren Zünddrücke erfordern Dieselmotoren im Vergleich zu Ottomotoren steifere Kolbenbolzen. Die Begrenzung der maximal zulässigen Flächenpressung in den Kolbennaben verlangt zudem größere Bolzendurchmesser. Trotzdem kann es z.B. durch hohe Zünddrücke bei aufgeladenen Motoren zu Überbelastungen der Kolbennaben kommen.

Falls hier die kolbenseitig möglichen Konstruktionsmaßnahmen zur Herabsetzung der kritischen Spannungen im Bereich der Kolbennaben z.B. durch Vergrößerung des Kolbenbolzenaußendurchmessers, Verkleinerung des Nabenabstandes usw. ausgeschöpft sind, kann durch den Einsatz von Formbohrungen in der Kolbennabe oder Profilbolzen (**Bild 2.11**) eine Lösung gefunden werden. Diese entlasten durch eine weichere Anpassung von Kolbenbolzen und Nabe deutlich die Spannungen in der Kolbennabe. Dabei wird der Durchmesser der Naben-

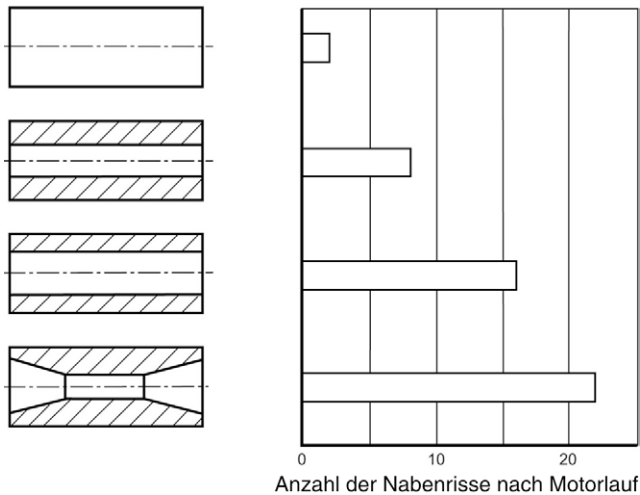


Bild 2.7:
Nabenfestigkeit in Abhängigkeit
von der Pleuelbolzengeometrie

bohrung im Bereich der Innen oder Außenkanten entsprechend der Belastung geringfügig zurückgenommen. Für einen weichen Übergang muss gesorgt werden.

2.2.4 Schmierung, Ölversorgung

Es liegt eine mechanische Beanspruchung der Gleitpartner durch Gas- und Massenkräfte vor. Die instationären Belastungen verursachen eine wechselnde Pressung an den Gleitflächen, sodass Mischreibungszustände auftreten können. Um den Verschleiß gering zu halten, ist das im Kurbelraum vorhandene Spritzöl nicht immer ausreichend. Der Aufbau des Schmierfilms muss dann mit konstruktiven Maßnahmen unterstützt werden. Im kleinen Pleuelauge erfolgt dies bei großen Kolben mit einer Spritzölauführung oder einer Druckölversorgung durch die Pleuelstange. Öltaschen als Reservoir sind ebenfalls möglich. In der Pleuelnabe werden Taschen, Ölritzen u.a. realisiert.

2.2.5 Verschleiß

Mischreibungszustände sind nicht unter allen Betriebsbedingungen vermeidbar. Daher muss der Kontakt zwischen Pleuelbolzen und Pleuelauge einerseits und der Bohrung in der Pleuelnabe andererseits auch ausreichende Notlaufeigenschaften haben und verschleißfest sein. Mit einer hohen Oberflächengüte und auch -härte am Pleuelbolzen kann dies auf einfache Weise erreicht werden. Pleuelbolzen werden deshalb einsatz- oder nitriergehärtet.

Werden besonders hohe Ansprüche an die Oberfläche gestellt, wie es z. B. im Rennsport der Fall ist oder wird ein buxsenloses Pleuel verwendet, so können die Gleiteigenschaften (Reibung, Verschleißwiderstand) durch eine zusätzliche PVD- oder DLC-Beschichtung (Physical Vapour Deposition, PVD; Diamond Like Carbon, DLC) wesentlich verbessert werden. Derartige Beschichtungen ermöglichen höchste Flächenpressungen und mindern die Reibung.

2.2.6 Gewicht

Durch die Reduzierung der Kolbenbolzenmasse lässt sich die gesamte oszillierende Masse reduzieren. Der Anteil des Kolbenbolzens an der oszillierenden Masse kann zwischen 10 und 30 % betragen.

2.3 Kolbenbolzenbauarten

Bei den meisten Anwendungen hat sich der rohrförmige bzw. zylindrische Kolbenbolzen (**Bild 2.8**) als Standardkonstruktion durchgesetzt. Forderungen in Bezug auf einfache Geometrie und wirtschaftliche Herstellung werden durch ihn in optimaler Weise erfüllt.

Um die Massenkräfte der hin- und hergehenden (oszillierenden) Triebwerkteile zu verringern, können die mechanisch weniger belasteten Enden der Kolbenbolzenbohrung zur Gewichteinsparung konisch ausgeführt werden (**Bild 2.9**).

Eine weitere Kolbenbolzenvariante, die besonders für hoch belastete Dieselmotoren zur Anwendung kommt, ist der Innenform-Kolbenbolzen (**Bild 2.10**). Dabei wird die Wanddicke des Kolbenbolzens gezielt im Pleuelbereich verstärkt, während die Kolbenbolzenenden durch die konische Ausführung zur Massenreduzierung beitragen.

Bei kritischen Spannungen in der Kolbennabe und wenn die kolbenseitigen Konstruktionsmöglichkeiten ausgeschöpft sind, kann der Kolbenbolzen mit profilierter Außenform eine Lösung sein (**Bild 2.11**). Bei diesen Kolbenbolzen sind im Bereich der Auflagen der Bohrungs-Innenkanten der Kolbennaben die Außenmantelflächen durch Einstechschleifen geringfügig zurückgenommen (ca. 20 bis 40 μm). Wichtig ist, dass die Übergänge vom Einstich zu den zylindrischen Bereichen sanft verlaufen.

Bei gekühlten Kolben, insbesondere bei Großkolben, wird häufig das Kühlöl von der Pleuelstange über den Kolbenbolzen zum Kolben geleitet. Kolbenbolzen für ölgekühlte Kolben

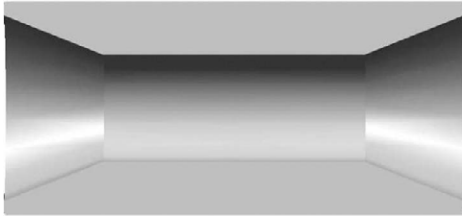


Bild 2.8: Kolbenbolzen mit zylindrischer Bohrung

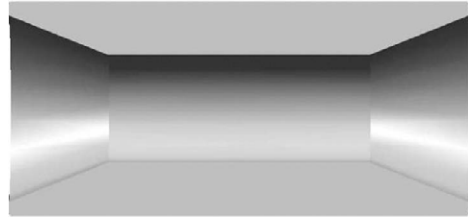


Bild 2.9: Kolbenbolzen mit Innenkonen

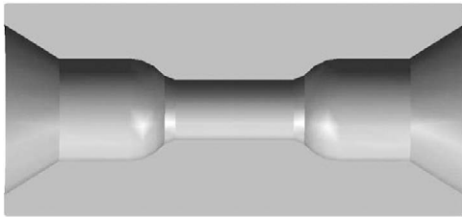


Bild 2.10: Kolbenbolzen mit profilierter Innenform

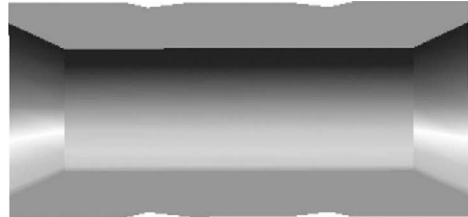


Bild 2.11: Kolbenbolzen mit Außenform (Formbolzen)

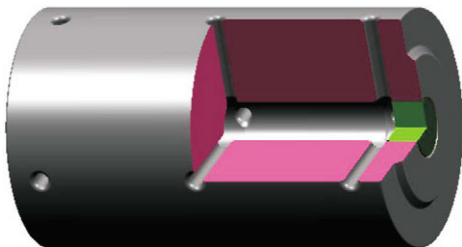


Bild 2.12: Kolbenbolzen mit Ölbohrungen und Verschlußstopfen (eingeschmupft)

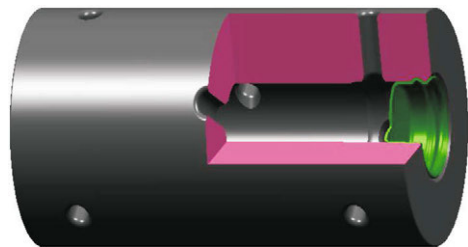


Bild 2.13: Kolbenbolzen mit Ölbohrungen und Verschlußdeckel (eingewalzt)

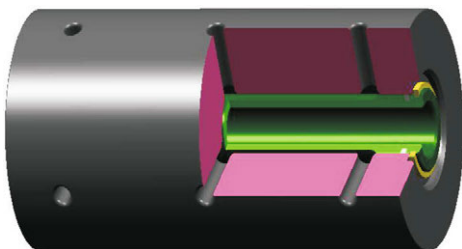


Bild 2.14: Kolbenbolzen mit Ölbohrungen und Ölleitrohr



Bild 2.15: Kolbenbolzen mit Ölbohrungen und Verschlußschrauben

lassen verschiedene Ausführungsmöglichkeiten zu (**Bilder 2.12 – 2.15**). Der unter allen Bedingungen sichere stirnseitige Verschluss der Kolbenbolzen ist für die Kühlölversorgung des Kolbens und damit für die Betriebssicherheit des Motors von entscheidender Bedeutung. Sowohl in der Herstellung als auch im späteren Betrieb hat sich besonders der Kolbenbolzen mit eingeschrumpften Stopfen bewährt (**Bild 2.12**).

2.4 Auslegung

2.4.1 Dimensionierung

Kolbenbolzen werden für die Belastung durch Gas- und Massenkräfte, Kontaktpressung und Verformung ausgelegt. Darüber hinaus muss für einen einwandfreien Betrieb, d.h. für einen geräuscharmen Lauf der Kolben und zur Minimierung des Verschleißes, das Lagerspiel zwischen Kolbenbolzen und den Kolbennaben sowie dem kleinen Pleuelauge festgelegt werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bei unterschiedlicher Wärmeausdehnung des Systems Kolben – Kolbenbolzen – Pleuelstange bei warmem Motor die Laufspiele größer und bei kalter Temperatur kleiner als die Einbauspiele sind. Die Temperaturabhängigkeit des Lagerspiels zwischen Kolbenbolzen und kleinem Pleuelauge bleibt in der Regel unberücksichtigt.

Für die Auslegung des kleinsten relativen Lagerspiels in Aluminiumkolben (**Tabelle 2.1**) ist bei Ottomotoren zu unterscheiden, ob es sich um eine „schwimmende“ Bolzenlagerung oder einen im kleinen Pleuelauge eingeschrumpften Kolbenbolzen handelt. Die schwimmende Lagerung

Tabelle 2.1: Kleinstes relatives Einbauspiel zwischen Kolbenbolzen und Kolben bzw. Pleueln für Otto- und Dieselmotoren, ohne Rennsportmotoren

Anwendung		Kolbenwerkstoff	Kolbenbolzen-Lagerung	Relatives Lagerspiel ¹⁾	
				Kolbennabe	Pleuelauge
Ottomotoren	Pkw	Al	Mit Schrumpfpleuel	> 0,4 ‰	< –1,0 ‰ (Überdeckung)
	Pkw	Al	Schwimmend	> 0,2 ‰	> 0,4 ‰
Dieselmotoren	Pkw	Al	Schwimmend	> 0,2 ‰	> 0,6 ‰
	Nkw	Al	Schwimmend	> 0,2 ‰	> 1,0 ‰
	Nkw	St	Schwimmend	> 1,0 ‰	> 1,0 ‰
Großmotoren		St/Al	Schwimmend	> 0,15 ‰	> 1,0 ‰
		St/St	Schwimmend	> 0,5 ‰	> 1,0 ‰

1) bezogen auf den Außendurchmesser des Kolbenbolzens

des Kolbenbolzens ist die Standardausführung und die in den Kolbennaben spezifisch am höchsten belastbare Variante. Bei der Schrumpfleuelausführung sitzt der Kolbenbolzen mit Überdeckung im kleinen Pleuelauge.

Vor- und Nachteile von Klemmpleueln und schwimmender Lagerung der Kolbenbolzen im Pleuel sind in **Tabelle 4.2** dargestellt.

Für die Dimensionierung des Kolbenbolzens sind die Kolben- und Pleuelgeometrie sowie der höchste Druck im Arbeitstakt zu berücksichtigen. Je nach Anwendung ergeben sich hieraus Abmessungen entsprechend **Tabelle 2.2**.

Tabelle 2.2: Typische Hauptabmessungen von Kolbenbolzen

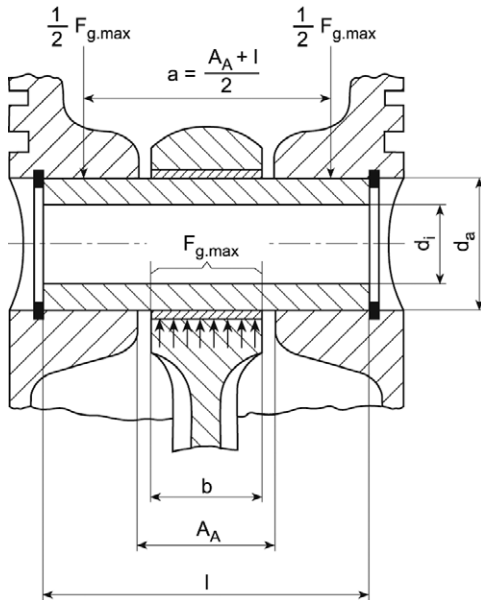
D : Kolbendurchmesser, d_1 : Außendurchmesser Kolbenbolzen, d_2 : Innendurchmesser Kolbenbolzen, l : Kolbenbolzenlänge

Anwendung		Kolben	Kolbenbolzen		
		D [mm]	D_1/D	D_2/d_1	l/D
Ottomotoren	2-Takt	35 – 70	0,20 – 0,30	0,40 – 0,73	0,65 – 0,80
	Pkw	65 – 100	0,20 – 0,30	0,47 – 0,60	0,60 – 0,75
Dieselmotoren	Pkw	65 – 95	0,30 – 0,40	0,43 – 0,53	0,65 – 0,80
	Nkw-Al	100 – 160	0,40 – 0,45	0,40 – 0,47	0,78 – 0,82
	Nkw-St			0,31 – 0,47	0,60 – 0,85
Großmotoren		< 250	0,30 – 0,45	0,34 – 0,56	0,70 – 0,86
		> 250	0,35 – 0,45	0,38 – 0,45	0,65 – 0,86

2.4.2 Berechnung

Eine analytische Berechnung der transienten Verformungen und Spannungen am Kolbenbolzen ist auch mit sehr großem Aufwand kaum exakt durchzuführen, da u. a. gleichzeitig zu berücksichtigen sind:

- funktionsbedingt stark unterschiedliche Querschnitte und damit Steifigkeit am Kolben,
- Wirkung der Kolbentemperatur auf Kolbenverformungen und auf die Kolbensteifigkeit (E-Modul),
- Wirkung der Kolbenbolzendeformation,
- unterschiedlicher E-Modul von Kolbenwerkstoff und Kolbenbolzenwerkstoff,
- unterschiedliche Widerstandsmomente der Kolbenbolzenquerschnitte (z.B. konischer Kolbenbolzen),
- Schmierfilmbildung.



Spannung durch Ovalisierung

$$\sigma_A = \frac{3F_{g,max} (d_a + d_i)}{4l(d_a - d_i)^2}$$

Spannung durch Biegung

$$\sigma_B = \frac{8F_{g,max} a d_a}{\pi(d_a^4 - d_i^4)}$$

Gesamtspannung

$$\sigma_{ges} = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2}$$

Bild 2.16:
Belastungsschema eines Pleuelbolzens
(Schlafke-Auslegung)

Mit vereinfachten Lastannahmen können Berechnungen durchgeführt werden, die zusammen mit Erfahrungswerten eine Beurteilung der Betriebsbedingungen zulassen. Unter den Annahmen einer Flächenlast im Pleuelauge und punktförmigen Einzellasten in den Pleuellagerbohrungen im Pleuel stellte Schlafke bereits 1940 ein brauchbares Rechenverfahren auf (**Bild 2.16**).

Neben den Verformungen auf Biegung und Ovalisierung wird aus der Biegespannung σ_B und aus der Spannung durch Ovalisierung σ_A die „Gesamtspannung“ ermittelt.

Die Beurteilung erfolgt auf Basis von Erfahrungswerten für Gesamtspannung und Deformation. Die mittlere Pleuellagerpleuelnabe drückt dabei die durch die Pleuellagerfestigkeit vorgegebenen Grenzwerte nicht übersteigen.

2.4.3 Finite-Elemente-Berechnung

Wie bei anderen Bauteilen hat sich auch bei Pleuelbolzen die Bauteilauslegung mit Finite-Elemente-Berechnungsmethoden (FE) durchgesetzt. Dabei muss der EHD-Kontakt (elasto-hydrodynamischer Kontakt) unter Berücksichtigung der Deformationen und der Pleuellagerpleuelnabe berechnet werden. Diese Berechnung ist rechenintensiv, da die Deformationen aus der Temperatur-, Gas- und Pleuellagerpleuelnabe von Pleuel und Pleuellagerpleuelnabe berücksichtigt werden müssen.

Für Variantenberechnungen wurden die die Beanspruchung bestimmenden Randbedingungen des EHD-Kontakts am Kolbenbolzen standardisiert und ein vereinfachtes 3-D-FE-Berechnungsverfahren abgeleitet.

Das MAHLE Programm MPOT verwendet für die Lasteinleitung eine Druckverteilung in der Pleuelstange und in der Pleuellager. Diese Druckverteilung wurde für Pleuellager mithilfe einer 3-D-FE-Berechnung bestimmt und liegt als standardisierte elasto-hydrodynamische Schmierfilm-Druckverteilung dem Programm zugrunde. Es wurden für alle anwendbaren Abstützungsfälle Druckprofile berechnet und integriert. **Bild 2.17** zeigt als Beispiel eine Druckverteilung für die Parallelabstützung. Mithilfe des Zünddrucks und der geometrischen Daten (Kolbendurchmesser, Pleuellager-, Pleuellager- und Pleuellagergeometrien) wird das entsprechende Profil auf die neuen Daten abgebildet und eine automatische Netzgenerierung für ein Pleuellagerquartier durchgeführt. Die Ergebnisse liegen bereits nach wenigen Minuten Rechenzeit vor (siehe **Bilder 2.18 – 2.20**).

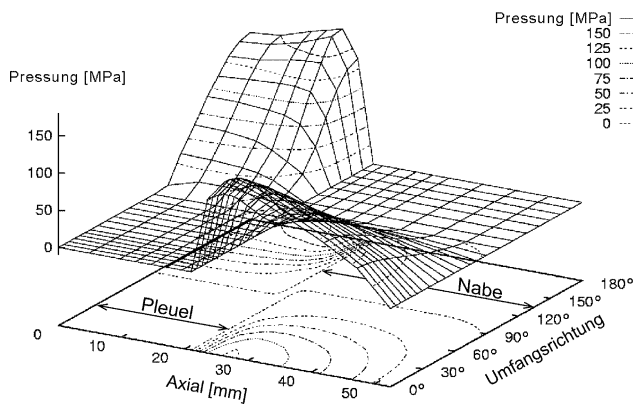


Bild 2.17:
Druckverteilung bei Parallelabstützung eines Pleuellagers

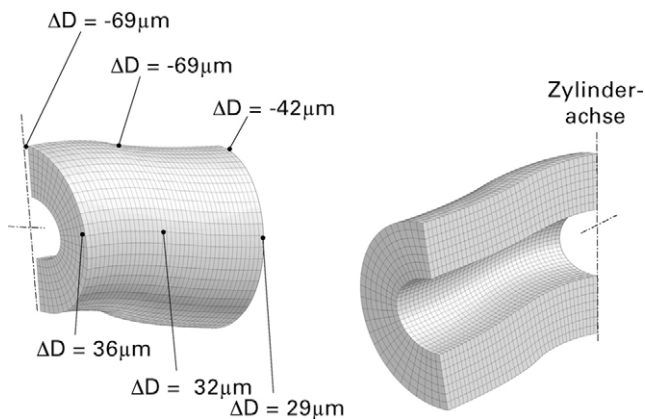


Bild 2.18:
Mit MPOT berechnete Deformation des Pleuellagers (Großmotor)

Das MAHLE Programm MPOT ermöglicht die vereinfachte Auslegung von Kolbenbolzen für Pkw- und Nkw-Aluminiumkolben mit zylindrischer Kolbenbolzenform und Innenbohrung mit Konus an der Kolbenbolzenstirnseite. Als Abstützungsgeometrien sind Parallel-, Trapez- und Stufenabstützung anwendbar.

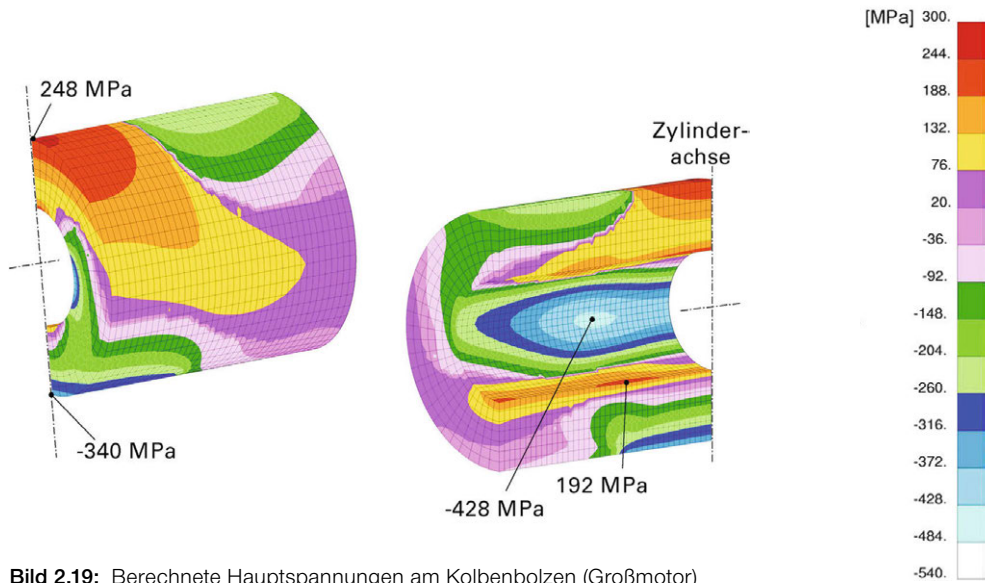


Bild 2.19: Berechnete Hauptspannungen am Kolbenbolzen (Großmotor)

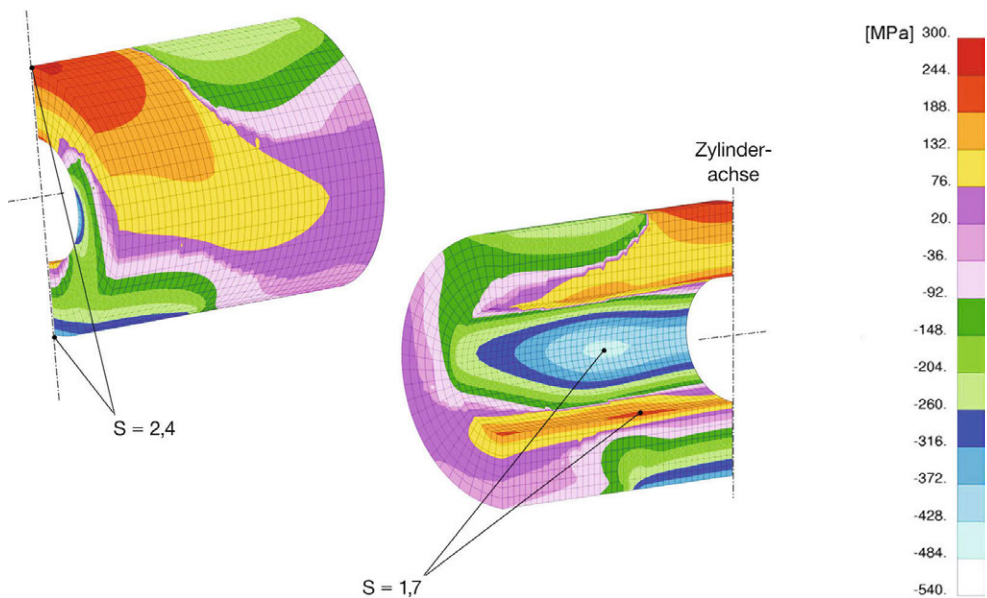


Bild 2.20: Sicherheitsfaktoren an verschiedenen Stellen des Kolbenbolzens (Großmotor)

Die Bewertung der berechneten Spannungen (**Bild 2.19**) wird mit einem integrierten Zusatzprogramm automatisch für die üblichen Kolbenbolzenwerkstoffe durchgeführt und die Sicherheitsfaktoren ausgegeben (**Bild 2.20**).

2.4.4 Maß- und Formtoleranzen, Norm

Die Bezeichnungen am Kolbenbolzen entsprechend der Kolbenbolzennorm ISO 18669 sind in **Bild 2.21** gezeigt.

Die Kolbenbolzennorm DIN 73126 wurde international überarbeitet und als ISO 18669-1 und 18669-2 veröffentlicht. Im Teil 1, den „General Specifications“, sind die Bezeichnungen, Kolbenbolzentypen, Abmessungen und Toleranzen sowie Werkstoffe, Wärmebehandlung und Qualitätsmerkmale aufgeführt. Teil 2 befasst sich mit den Mess- und Prüfmethoden.

MAHLE Kolbenbolzen werden in Anlehnung an die Norm ISO 18669 ausgelegt, gefertigt und eingesetzt.

In den **Tabellen 2.3 – 2.6** sind die wichtigen in der Norm aufgeführten Auslegungskriterien Kernhärte, Einhärtungstiefen, Oberflächenhärte, Volumenstabilität sowie die Rauheit angegeben.

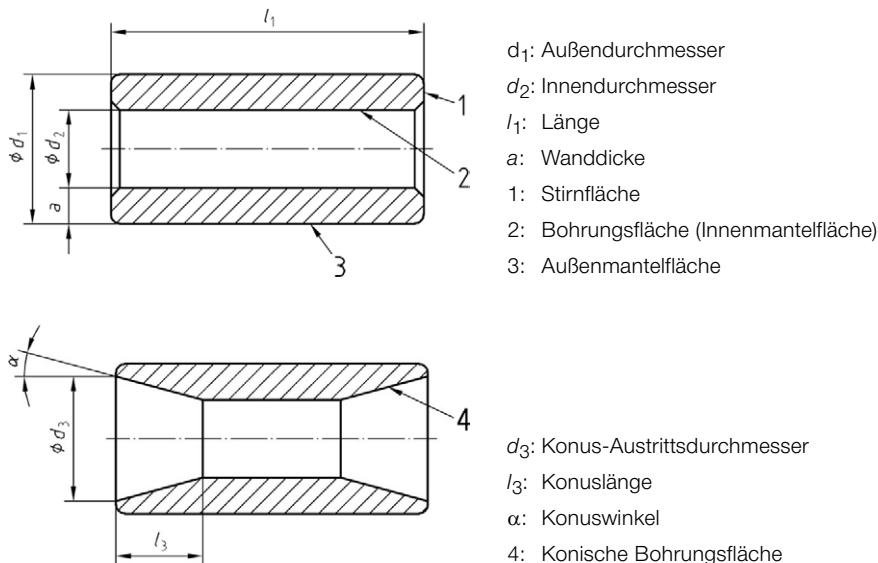


Bild 2.21: Bezeichnungen am Kolbenbolzen

Tabelle 2.3: Kernhärte (Kernfestigkeit)

Wanddicke a [mm]	Kernhärte HV 30 und (Kernfestigkeit R_m [MPa]) ¹⁾		
	Klasse L	Klasse M	Klasse N
1,5 – 2	310 – 515 (1.000 – 1.650)	310 – 470 (1000 – 1.500)	310 – 470 (1.000 – 1.500)
> 2 – 5	280 – 485 (900 – 1.575)		
> 5 – 10	270 – 470 (850 – 1.500)		
> 10 – 15	250 – 470 (800 – 1.500)		
> 15 – 25			
> 25	235 – 470 (750 – 1.500)	250 – 435 (800 – 1.400)	

¹⁾ Die Kernfestigkeitswerte (R_m) sind nur als Bezug angegeben und werden durch Umrechnung mit Faktor 3,2 aus der Kernhärte HV bestimmt.

Tabelle 2.4: Härtetiefen, Maße in mm

Wanddicke <i>a</i>	Einsatzhärtetiefe					Nitrierhärtetiefe	
	Außen		Innen min.	Außen und innen zusammen		Außen min.	Innen min.
	Min.	Code X		Max.	Code X		
1,5 – < 2	–	0,4	0,1	0,65 · <i>a</i>	0,80 · <i>a</i>	0,3	0,2
2 – 3	0,3	0,5	0,1	0,65 · <i>a</i>	0,80 · <i>a</i>		
> 3 – 5	0,4	0,6	0,2	0,50 · <i>a</i>	0,65 · <i>a</i>		
> 5 – 15	0,6	–	0,4	0,35 · <i>a</i>	–		
> 15	0,8	–	0,6	0,35 · <i>a</i>	–		

Anmerkung 1: Für die Bestimmung der Einsatzhärtetiefe beträgt die Grenzhärte Hs 550 HV.
Anmerkung 2: Für Kolbenbolzen mit eingeschränkter Volumenänderung, Kennzeichen V, beträgt die Grenzhärte Hs 500 HV.
Anmerkung 3: Code X: gültig für Kolbenbolzen in Verwendung mit Nadellagerung im Pleuelauge.

Tabelle 2.5: Oberflächenhärte für Kolbenbolzen der Klasse 1

Härte-Messmethode	Oberflächenhärte		
	Einsatzstahl		Nitrierstahl
	Uneingeschränkte Volumenänderung	Eingeschränkte Volumenänderung Kurzzeichen: V	
Vickers HV 10	675 min.	635 min.	690 min.
Rockwell HRC ¹⁾	59 min.	57 min.	–
Rockwell HRA ²⁾	80,7 min.	79,6 min.	–

¹⁾ Einsatzhärtetiefe min. 0,7 mm, ²⁾ Einsatzhärtetiefe 0,4 mm – 0,9 mm

Tabelle 2.6: Volumenänderung nach Wärmebeständigkeitstest, Maße in mm

Prüfbedingungen	Außendurch- messer d_1	Max. Maßzunahme Δd_1	
		Einsatzstahl	
		Uneingeschränkte Volumenänderung	Eingeschränkte Volumenänderung Kurzzeichen: V
Nach 4 h Bei 180 °C	≤ 50	+ 0,006	0
	> 50 – ≤ 60	+ 0,008	0
	> 60 – 100	+ 0,012	0
Nach 4 h Bei 220 °C	≤ 50	–	+ 0,006
	> 50 – ≤ 60	–	+ 0,008
	> 60 – 100	–	+ 0,012

2.5 Werkstoffe

MAHLE Kolbenbolzen werden aus hochwertigen Einsatz- oder Nitrierstählen hergestellt. Das Einsatz- oder Nitrierhärten ergibt bei guter Zähigkeit im Kern hohe Oberflächenhärten mit gutem Verschleißverhalten. Dabei zeichnen sich Kolbenbolzen aus Nitrierstahl durch ihren sehr guten Verschleißwiderstand besonders aus. Durch die Anreicherung der Randzonen mit Kohlenstoff bzw. Stickstoff wird eine Volumenzunahme erreicht, die zu Druckspannungen in den Kolbenbolzenrandschichten führt. Wie schon erwähnt, wirken sich diese Druckeigenspannungen an der Oberfläche positiv auf die Dauerfestigkeit des Kolbenbolzens aus. Werkstoff- oder Gefügefehler wie Randentkohlung, Zementitnetz, fehlende Einsatzhärtung der

Innenbohrung, Härte- und Schleifrisse oder offene Schlackenzeilen sind in diesen Randzonen besonders kritisch.

Kolbenbolzen aus Einsatzstahl haben das Problem mangelnder Volumenstabilität, d.h. mit steigender Oberflächenhärte (erhöhtem Restaustenitgehalt) wird auch der Kolbenbolzen-durchmesser bei Temperaturbeanspruchung bleibend „wachsen“ (**Tabelle 2.6**).

Tabelle 2.7 zeigt die MAHLE Kolbenbolzenwerkstoffe in ihrer Zusammensetzung, ihren physikalischen Eigenschaften und Anwendungsgebieten.

Tabelle 2.7: MAHLE Kolbenbolzenwerkstoffe

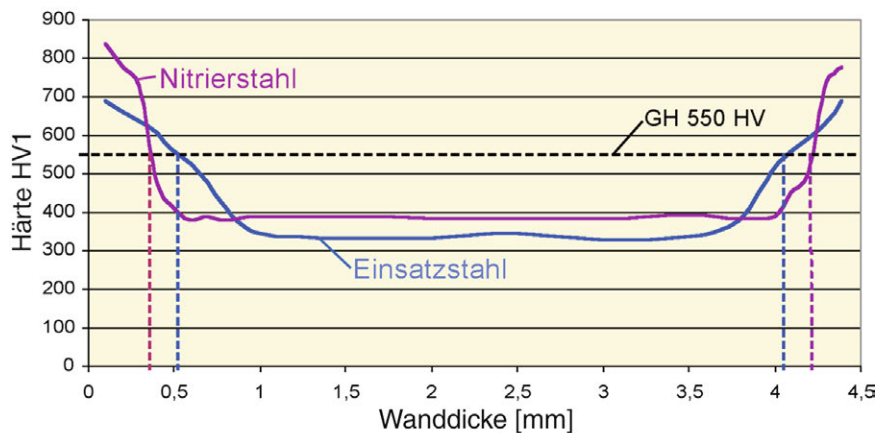
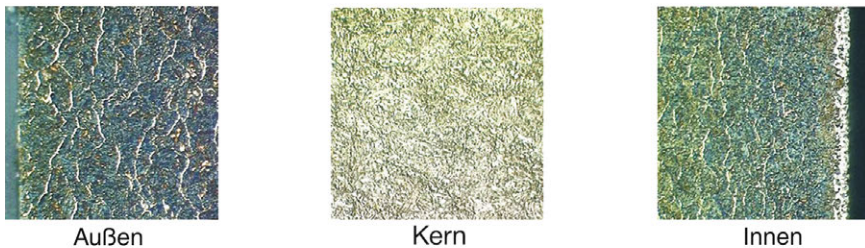
Chemische Zusammensetzung in Gew. %	Einsatzstähle			Nitrierstahl
	17Cr3	16MnCr5	17CrNi6	31CrMoV9
	SAE 5115 (Klasse L) ¹⁾	(Klasse M) ¹⁾		(Klasse N) ¹⁾
C	0,13 – 0,20	0,14 – 0,19	0,14 – 0,20	0,27 – 0,34
Si	0,15 – 0,40	0,15 – 0,40	0,40 max.	0,40 max.
Mn	0,60 – 0,90	1,00 – 1,30	0,50 – 0,90	0,40 – 0,70
P	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,025
S	≤ 0,040	≤ 0,035	≤ 0,035	≤ 0,035
Cr	0,70 – 1,00	0,80 – 1,10	1,40 – 1,70	2,30 – 2,70
Ni			1,40 – 1,70	
Mo				0,15 – 0,25
V				0,10 – 0,20
E-Modul [MPa]	210.000	210.000	210.000	214.000
Wärmeausdehnung ²⁾ [10 ⁻⁶ 1/K] 20–200 °C	13,1	13,1	12,8	13,0
Wärmeleitfähigkeit ²⁾ λ [W/m*K]	36	36	37	39
Dichte [g/cm ³]	7,82	7,84	7,84	7,83
Poisson-Zahl μ	0,27	0,27	0,27	0,27
Anwendung	Otto- und Pkw-Dieselmotoren	Hoch belastete Pkw-Motoren sowie Nkw- und mittelschnelllaufende Dieselmotoren	Großmotoren	Hoch belastete Otto- und Dieselmotoren

¹⁾ entspricht ISO 18669-1

²⁾ ermittelt an getrennt hergestellten Proben mit gleicher Härte (ca. 300 HV)

Für hoch beanspruchte Renn- und Sportmotoren sowie für alle Großkolbenbolzen werden die Stähle in ESU-Qualität (Elektro-Schlacke-Umschmelzverfahren) verwendet. Die ESU-Stähle zeichnen sich durch einen sehr hohen Reinheitsgrad, niedrigen Schwefelgehalt und große Gleichmäßigkeit im Gefüge aus. Im **Bild 2.22** sind typische Härteverläufe über den Kolbenbolzenquerschnitt mit zugehörigem Gefüge außen, im Kern und an der Bohrung von einsatzgehärteten und nitrierten Kolbenbolzen gezeigt.

Nitrierstahl:



Einsatzstahl:

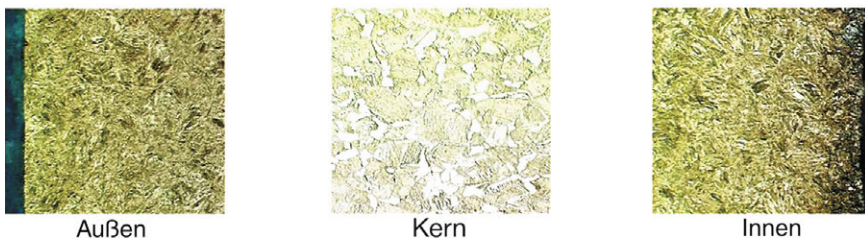


Bild 2.22: Typischer Härteverlauf und Gefüge von Kolbenbolzen einsatzgehärtet und nitriert

2.6 Beschichtung

Für einen reibungsarmen und sicheren Betrieb der Kolbenbolzenlagerung werden verschiedene amorphe, wasserstoffhaltige DLC-Beschichtungen (a-C:H) eingesetzt. Die Beschichtungen sind im Schichtaufbau und der Schichthärte an die mit dem Kolbenbolzen in Kontakt stehenden Werkstoffe und Kontaktbelastungen angepasst. Unterschieden wird nach dem Schichtaufbau zwischen den drei Schichttypen Mono-, Dual- und Triple-Layer (**Bild 2.23**). Die Gesamtschichtdicken liegen zwischen 2 und 3,5 µm. Die Schichten mit hoher Härte werden für Laufpartner, die aus abrasiv wirkenden Werkstoffen wie beispielsweise der Aluminiumkolbenlegierung bestehen oder bei hohen Flächenpressungen eingesetzt.

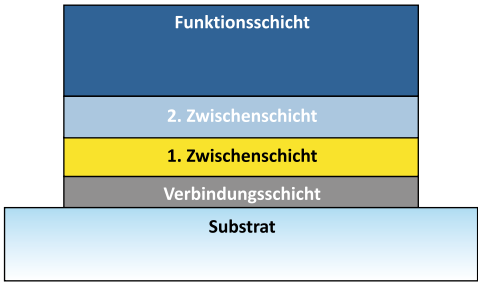


Bild 2.23:
DLC-Schichtaufbau am Beispiel des Triple-Layers

Tabelle 2.8: MAHLE Kolbenbolzenbeschichtungen

MAHLE Kolbenbolzen- beschichtung	Schichttyp	Schichtaufbau	Eindringhärte HIT [GPa]	Schichteigenschaft
MPC-101	Mono-Layer	a-C:H	20	hohe Verschleißfestigkeit
MPC-102			24	
MPC-201	Dual-Layer	CrN, a-C:H	20	hohe Schichtfestigkeit
MPC-202			24	
MPC-203		a-C:H:W, a-C:H	20	
MPC-204			24	
MPC-301	Triple-Layer	CrN, CrC, a-C:H	20	hohe Verschleißfestigkeit und sehr hohe Schicht- festigkeit
MPC-302			24	

2.7 Bauteilprüfung

Kolbenbolzenprüfstand

Häufig werden Kolbenbolzen auf servo-hydraulischen Prüfmaschinen und Resonanzpulsern geprüft. Eine Simulation der Drehbewegung des Kolbenbolzens ist dabei normalerweise nicht vorgesehen. Wie bereits angeführt, lässt sich damit die Beanspruchung des schwimmend gelagerten Kolbenbolzens nicht ausreichend genau nachprüfen. Schwimmend gelagerte Kolbenbolzen werden deshalb auf einer speziellen Vorrichtung, dem Kolbenbolzenprüfstand geprüft (**Bild 2.24**). Mit diesem Prüfaufbau kann die Wechselbeanspruchung bei sich drehendem Kolbenbolzen unter Biegung und Ovalisierung nachgebildet werden.

Die Prüflast wird statisch aufgebracht und ist stufenlos bis zur Maximallast regelbar.

Der Kolbenbolzen wird unter Last mit konstanter Drehzahl gedreht. Die Übertragung der Drehbewegung auf den Kolbenbolzen erfolgt indirekt ohne Momenteneinleitung durch den Antrieb der Nabenlagerung. Die Kolbenbolzenaufnahme ist eine Nachbildung in der Geometrie der realen Kolbennaben und des kleinen Pleuelauges.

Die Kolbenbolzenbelastung, die Kolbenbolzendurchbiegung, die Lagertemperaturen und die Absenkung der Pleuelstange werden überwacht. Die Anlage schaltet ab, wenn sich aufgrund eines Kolbenbolzenrisses die Pleuelposition ändert.

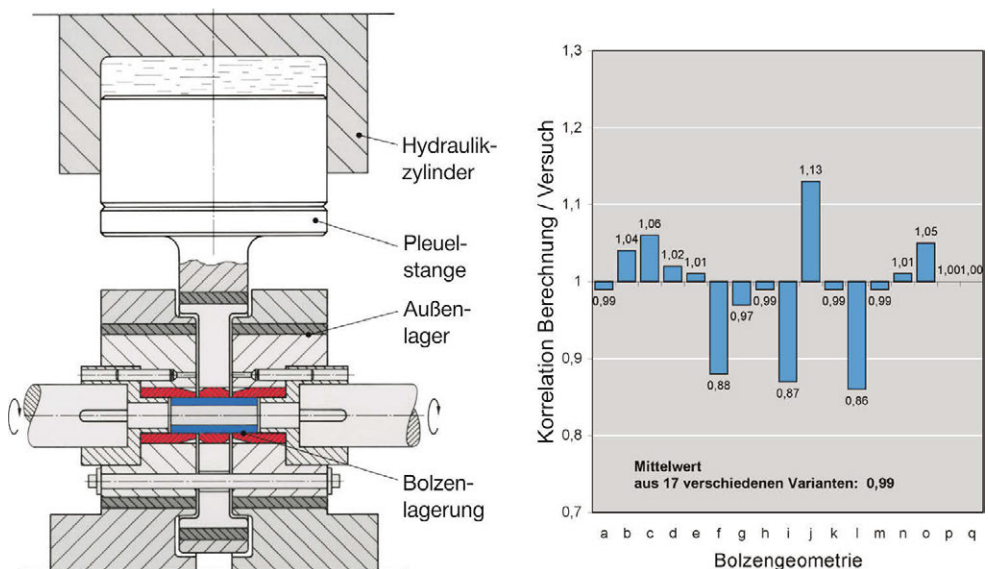


Bild 2.24: Pkw-Kolbenbolzenprüfstand, Korrelation zwischen Berechnung und Versuch

2.8 Kolbenbolzensicherungen

Wird der Kolbenbolzen nicht durch eine Schrumpfung im Pleuellauge gehalten, so muss er gegen seitliches Auswandern aus der Kolbennabe und Anlaufen an der Zylinderwand gesichert werden. Diese Sicherung erfolgt bei Klein- und Pkw-Motoren fast ausschließlich durch außen spannende Sicherungsringe aus Rund- oder Flachdraht, die in entsprechende Nuten in der Kolbennabe außen eingesetzt werden. Sicherungsringe aus Rund- und Flachdraht (auch Sprengringe genannt) werden aus patentiert gezogenem Federstahldraht (DIN EN 10270-1) oder ölschlussvergütetem Federstahldraht (DIN EN 10270-2) hergestellt. **Bild 2.25** zeigt einen typischen Runddrahtsprengring, wie er in Pkw-Motoren eingesetzt wird.

Zur Erleichterung der Montage können die Stoßenden der Sprengringe hakenförmig eingezogen werden (**Bild 2.26**).

Die Haken führen jedoch zu einer Erhöhung der Masse an den Ringenden und folglich zu einer niedrigeren Motordrehzahl bis zum Abheben der Sprengringe aus der Sicherungsnut im Kolben. Durch die niedrigere Ablösedrehzahl bei Sprengringen mit Haken finden diese Sicherungsringe fast nur in Dieselmotoren Anwendung.

Bei hoch drehenden Motoren kann die Lage des Sprengringstoßes durch einen nach außen gebogenen Haken in der Nut so fixiert werden, dass die Stoßöffnung in Hubrichtung orientiert ist und der Ring sich nicht in der Nut drehen kann. Das Beispiel in **Bild 2.27** zeigt Typ und Lage des Ringstoßes, geeignet für höchste Ablösedrehzahlen.

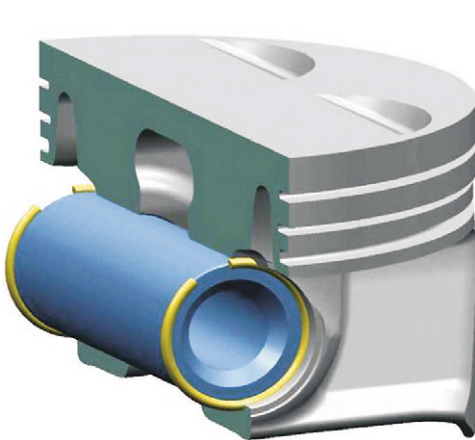


Bild 2.25: Pkw-Kolben mit Runddrahtspreng-ring Form C nach DIN 73130

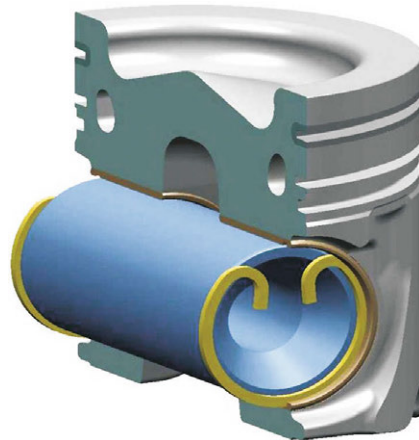


Bild 2.26: Dieselpolben mit Nabenbuchse und Flachdrahtsprengring

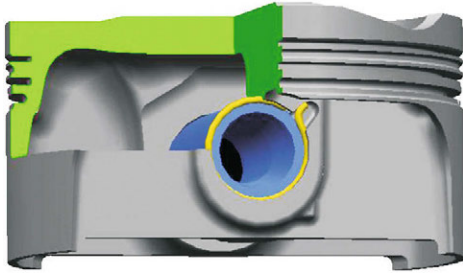


Bild 2.27:
Sprengring mit Haken nach außen für höchste
Ablösedrehzahlen

Für große Kolbenbolzendurchmesser werden exzentrisch gestanzte Sicherungsringe nach DIN 472 und zunehmend Ringe aus Flachdraht mit Haken eingesetzt, siehe **Bilder 2.28a – c**. Sogenannte Ovalringe kommen bei Großkolben mit langen Kolbenbolzen zur Anwendung.

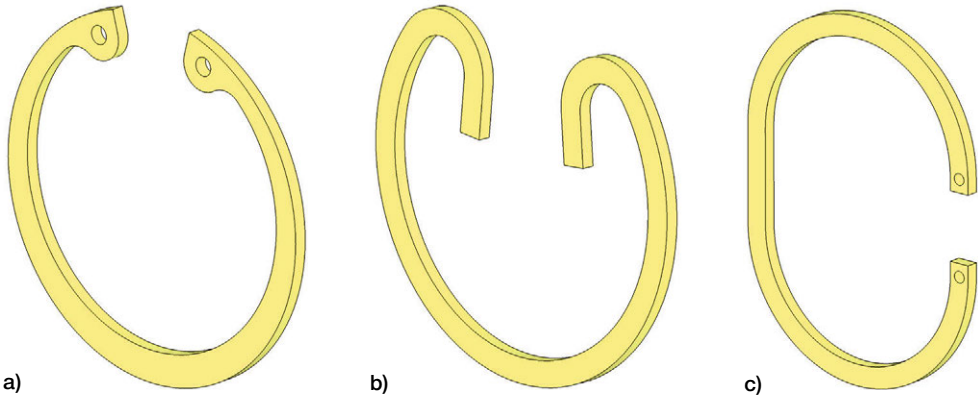


Bild 2.28: Sicherungsringe für große Kolbenbolzen:
a) Seegerring nach DIN 472, b) Flachdrahttring, c) Ovalring

Darüber hinaus können auch innenspannende Sicherungsringe nach DIN 471 verwendet werden. Diese Sicherungen werden in Nuten am Kolbenbolzenende montiert. Der Kolbenbolzen muss dann länger ausgeführt werden und ist daher gegenüber einem Design mit außenspannenden Sicherungsringen schwerer. Kolbenseitig entfällt die Sicherungsringnut in der Nabenbohrung. Die Herstellung der Nut am Kolbenbolzen ist aufwendig und mit höheren Kosten verbunden, weshalb dieser Form der Kolbenbolzensicherung nur noch sehr selten zur Anwendung kommt.

Zylinderkomponenten

Eigenschaften, Anwendungen, Werkstoffe

(Hrsg.)

2015, X, 141 S. 126 Abb., 63 Abb. in Farbe., Hardcover

ISBN: 978-3-658-09545-1