



Mitteilung aus den KAMAX-Werken

# Motorverschraubungen

*Dipl.-Ing. Hermann Köhler*  
*Dipl.-Ing. Siegfried Jende*

KAMAX Werke R. Kellermann GmbH & Co. KG  
Dr.-Rudolf-Kellermann-Str. 2  
D-35315 Homberg/Ohm

[h.koehler@kamax.de](mailto:h.koehler@kamax.de)  
<http://www.kamax.com>

**Veröffentlicht in Lexikon Motorentechnik, Der Verbrennungsmotor von A-Z,  
Vieweg & Sohn Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2004**

**Motorverschraubungen.** Ein moderner Grundmotor enthält zwischen 250 und 320 Schraubverbindungen, die mit 80 bis 160 verschiedenen Schraubentypen verschraubt werden. Die Anzahl der Schraubverbindungen ist in erster Linie abhängig von der Bauform, z.B. ob R4- oder V6-Motor und weniger abhängig vom Verbrennungsverfahren (Diesel- oder Ottomotor). In Japan entwickelte Motoren haben gegenüber den europäischen pro Motor ca. 15 % mehr Schraubverbindungen bei gleichzeitig geringerer Typenvielfalt. Die Schraubengröße wächst mit einem größer werdenden Hubraum.

In der Serienfertigung wurde bei allen europäischen Automobilherstellern seit Mitte der 80er Jahre im Endmontagebereich sehr stark automatisiert. Dazu war es erforderlich, die Schrauben zuführ- und montagegerecht zu konstruieren.

Beim Motorenbau handelt es sich um eine hochpräzise Komponentenfertigung, wobei die Fertigungstoleranzen der Basiswerkstücke (z.B. Zylinderblock und -kopf) sehr gering sind und die Positioniergenauigkeit der Betriebsmittel bzw. Roboter unter 0,5 mm liegt. Deshalb war die Motorenfertigung im Verhältnis zu anderen Fertigungseinheiten schon immer sehr stark automatisiert. Wird nur eine geringe Anzahl von Motorvarianten auf einer Fertigungsstraße hergestellt, ist eine Vollautomatisierung sinnvoll; bei einer größeren Variantenvielfalt nur eine Teilautomatisierung. Die Verbindungselemente werden im letzteren Fall von Hand zugeführt und lediglich das Festziehen dieser Verbindungen von einem Einfach- oder Mehrfachschräuber in einer automatischen Schraubstation vorgenommen – schon um das Reaktionsmoment abzufangen. Mit der Weiterentwicklung der Steuersysteme und der ergonomischen Bauweise werden verstärkt Handschräuber mit integrierter Elektronik (Drehmoment- und Drehwinkel-Messwertgeber) zur Überwachung oder Steuerung des Anziehvorganges eingesetzt. Dadurch werden die Investitions- und Wartungskosten der Montagelinie abgesenkt und die Flexibilität in Richtung „joint production systems“ erhöht.

Wichtig ist bei der Automatisierung die Verwendung qualitativ hochwertiger Schrauben. Werden Schrauben von unterschiedlichen Herstellern gemischt verbaut, gibt es erfahrungsgemäß Schwierigkeiten, wenn nicht von vornherein exakte Festlegungen im Hinblick auf Werkstoff, Streckgrenzverhältnis und Reibungskennwerten getroffen worden sind. Bei Lieferantenwechsel ist häufig ein erneutes Einfahren der Anlage erforderlich.

Bei der Wahl der Anzieh- und Montageverfahren ist zu bedenken, dass die Pkw-Motoren im Regelfall in großen Stückzahlen gefertigt werden; Nfz-Motoren teilweise in Kleinserien oder in Einzelfertigung.

## ~Anziehverfahren.

**~drehmomentgesteuertes Anziehen.** Der drehmomentgesteuerte Schraubenanzug wird in der Regel für untergeordnete Schraubfälle angewendet und nur in Einzelfällen für hochwertige Anwendungen (z.B. Riemenscheibenmontage) in automatisierten Montagestraßen (bei untergeordneten Schraubfällen muss keine genau definierte Mindestvorspannkraft aufgebracht werden). Er wird auch zukünftig seinen Bestand im Service-Bereich behalten. Die Problematik besteht darin, dass das Solldrehmoment so gewählt werden muss, dass die Vorspannkraft, also die Kraft, die in der Verbindung nach Abschluss der Montage vorhanden ist, auch in den ungünstigsten Fällen weder die Streckgrenze der Schraube überschreitet (niedrige Reibungszahl) und diese längt noch die minimal benötigte Vorspannkraft unterschritten wird (hohe Reibungszahl).

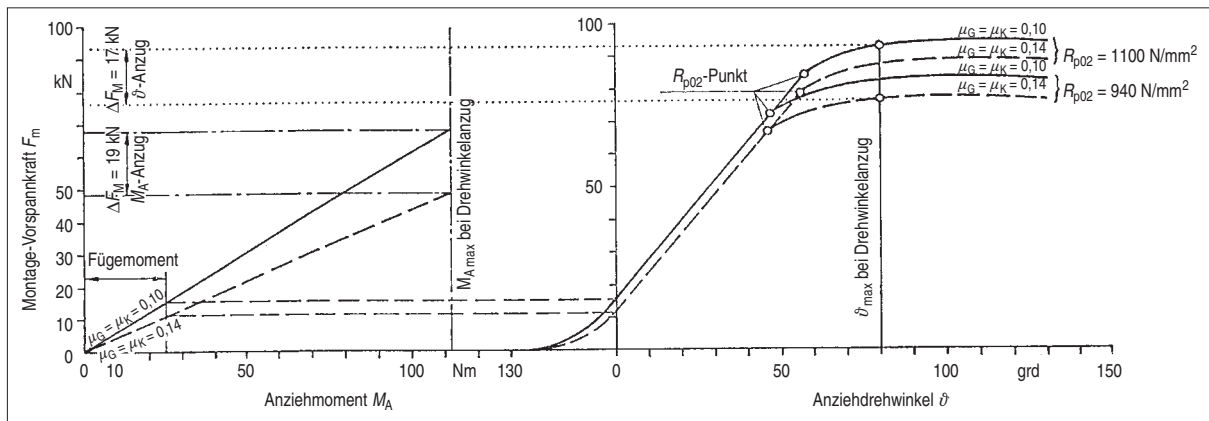
Die zwischen den Schraubenherstellern und der Automobilindustrie vereinbarten zu erwartenden Reibungszahlen liegen zwischen  $\mu_{\text{ges}} = 0,08$  bis 0,14. Sie sind Bestandteil des jeweiligen Qualitätsabkommens und können je Schraubenlos auf einem Reibwertprüfstand stichprobenartig überwacht werden.

Eine spezielle Form des Drehmomentanzuges ist in der Kombination mit dem so genannten „Nachknicken“ zu sehen, d.h. nach dem abgeschlossenen Schraubvorgang wird die Verbindung mit einem messenden Drehmomentschlüssel nachgezogen. Dies Verfahren wird in der Großserie an den verbleibenden Handmontageplätzen eingesetzt und in der Kleinserie bei allen kritischen Verbindungselementen. Bei der manuell durchgeführten Verschraubung wird mit einem drehmomentgesteuerten Druckluft-Schräuber bis zum vorgegebenen Moment angezogen und anschließend mit einem messenden Drehmomentschlüssel nachgeknickt und üblicherweise farbmarkiert. Das zum Beginn des Weiterdrehen erforderliche Drehmoment ist das Nachknickmoment (auch Nachziehmoment genannt). Das „Nachknicken“ erfolgt erfahrungsgemäß etwas über den Einstellwert des Knickschlüssels hinaus, so dass sich dadurch oft ein indirekt drehwinkelgesteuerter Anziehvorgang ergibt.

**~drehwinkelgesteuertes Anziehen.** Beim überelastischen Drehwinkelanzug bis über den Streckgrenzpunkt hinaus liegt die Vorspannkraft im Mittelwert 25–30 % höher als beim drehmomentgesteuerten Anziehen. Während beim drehmomentgesteuerten Anziehen die Vorspannkraft um ca. +/-25 % schwankt (praktisch im gleichen Maße wie die Reibung), beträgt die Vorspannkraftschwankung beim drehwinkel- und streckgrenzgesteuertem Anziehen hingegen nur ca. +/-10 %. Beim Drehwinkelanzug ist die Vorspannkraftstreuung im Wesentlichen lediglich im Bereich bis zum Fügoment reibungsabhängig.

Das Fügoment ist dabei das Moment, welches aufgebracht werden muss, bis durch Anziehen der Verbindung die Flächen aller Trennfugen durch elastische und plastische Verformung satt aufeinander liegen. Die Streuung ergibt sich hauptsächlich aus den unterschiedlichen Ist-Streckgrenzen der Schrauben, vorausgesetzt, die geforderte Wiederholgenauigkeit beim Anfahr-

ren der eingestellten Winkel wird erreicht. Dies ist bei den heutigen Impulsgebern der Fall. Darüber hinaus ist aus den Kurvenverläufen oberhalb des Streckgrenzpunktes erkennbar, dass eine Winkelstreuung nur einen untergeordneten Einfluss auf die Montagevorspannkraft hat, **Bild M230**. Zur Qualitätssicherung der Verbindung wird eine Drehmoment-Überwachung eingesetzt.



**Bild M230** Anziehkurven einer Schraube DIN EN ISO 4014 – M12 x 1,5 x 70–10.9 für den drehmoment- (links) und drehwinkel- und steckgrenzgesteuerten Anzug (rechts), mit Darstellung der Einflüsse von Gewinde- und Kopfreibung sowie der Schraubenfestigkeit.

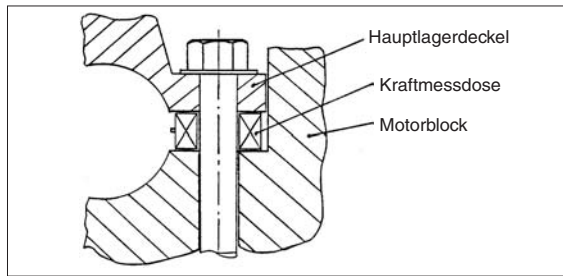
Ein weiterer Vorteil des überelastischen Drehwinkelverfahrens ist, dass die Bestimmung des Anziehdrehwinkels bei Schrauben über  $2 \times d$  Länge weitgehend unkritisch ist und selbst Toleranzen von 20 Grad verkraftet werden. Bei einer Schraube mit z.B. der Steigung  $P = 1,5 \text{ mm}$  bedeutet ein Weiterdrehen der Schraube über den Streckgrenzpunkt um 30 Grad eine plastische Längung von ca. 0,125 mm. Auf eine Klemmlänge von 60 mm bezogen, ist dies eine bleibende Verformung von 0,21 %. Dieser Wert ist unbedenklich. Heute werden Schrauben mehrfach überelastisch angezogen. Als Faustformel gilt, dass in diesen Fällen auf die Klemmlänge bezogen eine bleibende Dehnung von max. 1 % zulässig ist. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass durch das mehrmalige Anziehen die Kopfauflage und auch die tragenden Gewindegänge in Mitleidenschaft gezogen werden können und deshalb zum Fressen neigen. Ist dies der Fall, wird die erforderliche Vorspannkraft nicht mehr erreicht. Zusätzlich von Vorteil ist die Reproduzierbarkeit des Drehwinkelanzuges mit einfachem Anzugswerkzeug, so dass er gerne für den Erstanzug in der Linie und für den Servicebetrieb ausgewählt wird.

**~~streckgrenzgesteuertes Anziehverfahren.** Dieses Verfahren hat gegenüber dem drehwinkelgesteuerten Verfahren den Vorteil, dass immer die Ist-Streckgrenze der jeweils montierten Schraube angefahren wird. Die bleibende Dehnung der Schraube pro Anzug liegt je nach Sensibilität der Schraubensysteme zwischen 0,1 und 0,2 % und damit noch unterhalb der 0,2 %-

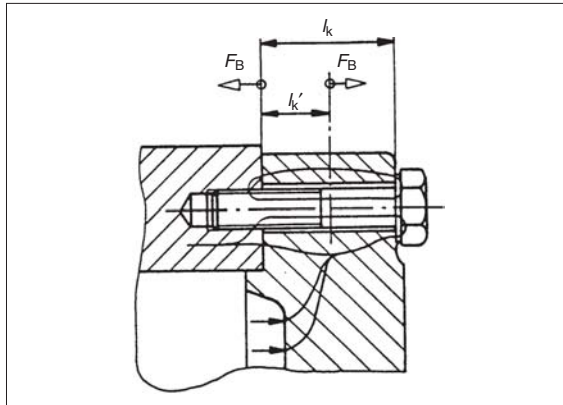
Dehngrenze. Eine unzulässig verbleibende Längung der Schraube über die 0,2 %-Dehngrenze hinaus ist kaum noch möglich. Gegenüber dem drehwinkelgesteuerten Verfahren liegt das mittlere Vorspannkraftniveau 47 % niedriger. Die Qualitätssicherung der Verbindung erfolgt durch die Überwachung des „grünen Fensters“. Das „grüne Fenster“ legt den Abschaltwinkel der Schraube im Streckgrenzbereich der Schraube fest, der über minimale und maximale Winkel- und Drehmomentvorgaben definiert ist.

**~Schraubverbindungen.** Am Motor sind im Allgemeinen 5 kritische Schraubstellen vorhanden, die im Folgenden erläutert werden. An dieser Stelle werden die Aggregatverschraubungen und Anflansungen bis auf das Verschrauben von Magnesiumbauteilen nicht weiter betrachtet. Hierbei werden größtenteils hochfeste Schrauben ab Durchmesserbereich M 6 eingesetzt, wobei es sich überwiegend um Norm- bzw. normähnliche Ausführungen handelt.

**~~Hauptlagerdeckelschraube.** Zur Verbindung der Hauptlagerdeckel für die Kurbelwellenlagerung mit dem Kurbelgehäuse dienen Hauptlagerdeckel-Schrauben. Davon werden in der Regel zwei für jeden Hauptlagerdeckel eingesetzt, die als Ganzgewinde-Bundschrauben, gegebenenfalls in Verbindung mit Unterlegscheiben, ausgeführt sind. Die Bilder **M231** und **M232** zeigen den Messaufbau zur Ermittlung der Vorspannkraft sowie den Kräftefluss im Bereich der Hauptlagerdeckelschraube.



**Bild M231** Kraftmessung an der Hauptlagerdeckelverschraubung



**Bild M232** Kräftefluss an der Hauptlagerdeckelverschraubung

Das wesentliche Problem bei der Auslegung dieser Schrauben ist in den meisten Fällen ein knapp bemessener Bauraum, der für den Schraubenkopf zur Verfügung steht. Das bedeutet, dass sehr präzise auf die Einhaltung der zulässigen Flächenpressung für die Unterkopfauf- lage und die Gegenlage zu achten ist. Jede Hauptlagerdeckelschraube wird zweimal montiert. Zuerst wenn die Lagerschalensitze spanend auf Passmaß gearbeitet werden; dann nach der Montage der Kurbelwelle und dem Aufsetzen der Lagerdeckel. Bei der zweiten Montage kann es zum Fressen im Gewinde kommen, wenn die Schraube im Kuppenbereich/Gewindeanfang Beschädigungen, z.B. Schlagstellen, aufweist. Dies ist insbesondere bei Alu-Innengewinden der Fall.

Vorbeugend wird dies in der Konstruktion durch eine optimale Kuppengestaltung und in der Fertigung durch möglichst niedrige Fallhöhen (max. 300 mm) vermieden. Die Fallhöhe ist dabei die Höhe, welche die noch unvergütete Schraube beim Verlassen der Maschine in den Auffangbehälter durchfällt. Unter Kuppengestaltung versteht man das Anfasen des Schraubenschaftanfangs vor dem Gewindewalzen, damit das Gewinde beim Aufwalzen nicht ausbricht.

Um die Steifigkeit des Kurbelgehäuses zu erhöhen, werden in Motoren immer häufiger so genannte Ladderframes eingesetzt. Sie stellen eine Verbindung zwischen einzelnen Hauptlagerdeckeln dar. Dadurch kann der untere Motorenbereich verwindungssteifer gestaltet werden.

Meist sind dabei die Lagerdeckel in den „Ladderframe“ („Bedplate“) aus Leichtmetall eingegossen. In diesem Falle wird mit der Hauptlagerdeckelschraube die komplette Einheit verschraubt.

Als Montageverfahren haben sich das streckgrenzgesteuerte oder das drehwinkelgesteuerte Verfahren durchgesetzt.

**~Pleuelschraube.** Bei der Pleuelverschraubung liegt der typische Fall einer dynamisch hochbeanspruchten Schraubenverbindung vor. Der Abmessungsbereich bei Pkw-Motoren geht von M 7 bis M 9, für Nfz-Motoren von M 12 x 1,25 über M 14 x 1,5 bis M 16 x 1,5, bei sehr großen Dieselmotoren, die in Baufahrzeugen oder im stationären Bereich eingesetzt werden, bis UNJF 5/8"-I 8 Gg und sogar UNJ 1 1/16"-I 6 Gg bzw. die entsprechende metrische Größe (UNJF und UNJ sind Bezeichnungen, die aus der in den Zollländern angewendeten Norm „Unified Screw Threads“ herrühren). Bei der Dimensionierung der richtigen Pleuelschraube wird auf den Vorgängermotor oder auf Motoren ähnlicher Bauart und Größe zurückgegriffen. Bei der Pleuellagergehäuseverschraubung ist die Betriebsbelastung für das Lagergehäuse durch die Gesetzmäßigkeiten des Kurbelgetriebes (Massen- und Gaskraft) bekannt.

Nicht bekannt sind zunächst die Betriebsbelastungen nach Größe, Richtung und Lage bezogen auf die Schraubenachse in der Trennfugenebene, die in die einzelne Schraubenverbindung eingeleitet werden, um die Verformungen und Beanspruchungen der Schraube zu ermitteln. In der Fachliteratur finden sich verschiedene analytische Verfahren, mit denen die Axialkraft  $F_A$ , die Querkraft  $F_Q$  (rechnerische Größe aus dem Reibwert in der Trennfuge) und der exzentrische Abstand  $a$  der Axialkraft von der Schraubenachse in Abhängigkeit von den Gestaltparametern des Pleuellagergehäuses errechnet werden können. Liegen diese Werte vor, ist es möglich, z.B. mit dem PC-Programm „KABOLT“ (Schraubenermittlung nach VDI 2230) die erforderliche Vorspannkraft zur Verhinderung des partiellen Abhebens und der Querschiebung der verspannten Teile und damit die entsprechende Gewindeabmessung und Festigkeitsklasse der Schraube zu ermitteln. Auf Grund der ermittelten Werte werden dann Vorgaben für den Schraubenanzug gegeben. Ist die rechnerische Auslegung der Pleuelverbindung abgeschlossen, wird durch Pulsertests am gesamten Pleuel die Dauerhaltbarkeit nachgewiesen. Anschließend werden durch Feldversuche die Berechnungs- und Laborergebnisse abgesichert. Die Berechnungsparameter einer Pleuelschraubenverbindung sind aus **Bild M233** ersichtlich. Das Beispiel betrifft einen 4-Zylinder-Ottomotor mit 1996 cm<sup>3</sup> Hubraum.



Jedes Pleuel wird nach dem Aufschneiden zwei mal montiert. Das erste Mal für das spanende Bearbeiten der Lagerschalensitze. Dabei muss die Montagevorspannkraft ähnlich groß sein, wie später im Einsatz, damit sich für das Pleuellagergehäuse auch ähnliche Verformungen ergeben. Aus diesem Grunde werden die Schrauben entweder über Drehmoment und Drehwinkel bis kurz unter die Streckgrenze angezogen oder direkt streckgrenzgesteuert verschraubt. Nach dieser Bearbeitung erfolgt eine Demontage (Einsetzen der Lagerschalen) und dann die Montage auf der Kurbelwelle. Hierbei wird ein drehwinkelgesteuertes Anziehverfahren, das die Schraube überelastisch verspannt, angewendet oder es kommt das streckgrenzgesteuerte Anziehen zum Einsatz. Entscheidet man sich für den Drehwinkelanzug, müssen vorab aufwändige Laborversuche durchgeführt werden, um Anzugsempfehlungen anzugeben. Beim streckgrenzgesteuerten Einsatz reicht es aus, über einige Anzugsversuche das so genannte „grüne Fenster“ zu definieren.

Gerade weil die Pleuelschraube, bedingt durch das Herstellverfahren des Pleuels, zweimal im Streckgrenzbereich montiert werden muss, stellt sich die Frage, welche Schrauben für den streckgrenzüberschreitenden Anzug besonders geeignet sind.

Bei der Dimensionierung von Schraubenverbindungen ist zu berücksichtigen, dass der Schraubenbolzen im Falle einer Überbeanspruchung durch statische Zugkräfte in seinem schwächsten Querschnitt brechen wird: Üblicherweise ist dies im freien belasteten Gewindeteil oder im Dehnstabsbereich der Fall. Bei den in jüngster Zeit entwickelten Vieltaillenschrauben liegt der Bruch ebenfalls im Taillbereich. Für den überelastischen Anzug sind insbesondere die in **Bild M234** gezeigten Pleuelschrauben verwendungsfähig.



**Bild M234** Pleuelschrauben für das überelastische Anziehen

Bei den Schrauben mit Schaft (ähnlich DIN EN 4014) sollten mindestens sechs freitragende Gewindegänge vorhanden sein, um die plastische Längung auf einen größeren Bereich zu

verteilen und somit die Gefahr einer vorzeitigen Einschnürung zu vermeiden. Das beste Anzugsverhalten im überelastischen Bereich zeigen Dehnstabschrauben bzw. Schrauben mit Gewinde bis unter den Kopf (ähnlich DIN EN 4017). Die gemessenen Nachgiebigkeiten ordnen die Vieltaillenschrauben zwischen der Dehnstabschraube und der Schraube mit Gewinde bis unter den Kopf ein.

Die Dauerhaltbarkeit von Schraubenverbindungen wird ausschließlich von der Höhe der örtlichen Spannungskonzentration bestimmt. In der Regel sollte für Schraubenwerkstoffe die Bruchfestigkeit des gekerbten zum glatten Stab größer als 1 sein, der Werkstoff also ausreichende Duktilität besitzen. Die dynamischen Zusatzkräfte, die bei dynamisch aufgebrachtten Betriebskräften von der Schraube über die Montage-Vorspannkraft hinaus aufgenommen werden müssen, werden bei exzentrisch beanspruchten Verbindungen umso geringer, je höher das Vorspannkraft-Niveau ist. Auch dies spricht für ein überelastisches Anzugsverfahren.

~~**Riemenscheibenschraube.** Die Riemenscheibe wird mit einer Zentralschraube befestigt. Während früher mit der Riemenscheibe nur die Lichtmaschine betrieben wurde, werden heute zusätzliche Aggregate mit Leistung versorgt, z.B. die Klimaanlage. Auf die Kurbelwelle wird oft neben der Riemenscheibe auch ein Zahnrad für den Ölpumpenantrieb und evtl. der Schwingungsdämpfer verschraubt. Die Riemenscheibe wird über ihre Innenbohrung auf den Kurbelzapfen aufgesetzt. Der große Bohrungsdurchmesser der Riemenscheibe macht es erforderlich, dass durch eine große Scheibe oder durch einen großen Bunddurchmesser eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Schraube und Riemenscheibe geschaffen wird. Oft ist eine Schraube M 12 mit einem Scheiben- bzw. Bunddurchmesser bis 38 mm (z.B. Ottomotor) oder eine Schraube M 18 mit einem Bunddurchmesser bis 65 mm (z.B. 2,5 Ltr. Dieselmotor) ausgestattet. Die Riemenscheibe wird auf den Kurbelzapfen separat aufgedrückt oder über die Schrauben mit einem vorher definierten Anziehdrehmoment auf die Kurbelwelle aufgezogen. Bei Nfz-Motoren geht man in der Regel bis zum Abmessungsbereich M 24 x 1,5 und setzt die Unterlegscheibe kurz vor der Montage auf. Bei großen Nfz-Motoren wird die Riemenscheibe auf den Schwingungsdämpfer aufgesetzt und über Durchgangsbohrungen direkt mit 6 bzw. 8 Schrauben bzw. Stehbolzen (z.B. M 10) mit der Kurbelwelle verschraubt.

Riemenscheibenschrauben wurden früher nur mit einem Drehmoment angezogen. Heute hat sich das Drehwinkelverfahren durchgesetzt. Der Anzug erfolgt über ein Fügoment, bis alle Trennfugen satt aufeinander liegen. Danach schließt sich ein Weiterdrehen an, das über eine Drehwinkelmessung gesteuert wird. Dabei kön-

nen extrem hohe Endanzugsmomente erreicht werden. Bei einer Schraube M 12 x 1,5–10,9 werden Momente bis zu 260 Nm erreicht, wobei das theoretisch errechnete Endmoment zwischen 120 und 150 Nm liegt. Die große Streuung des Endmomentes ergibt sich auf Grund der großen Kopfauflage, die bei kleinster Verkantung „Fressen“ hervorruft. Ein streckgrenzgesteuertes Verfahren kann bei Riemenscheibenschrauben nicht durchgeführt werden, wenn ein extrem großer Bunddurchmesser vorliegt, oder mehrere Teile miteinander verspannt werden, so dass sich daraus eine hohe Trennfugenanzahl zwischen den zu verspannenden Teilen ergibt. Diese ergeben auf Grund von Fertigungsungenauigkeiten und unvermeidbarer Verschmutzung ein höheres Setzverhalten bzw. eine so nachgiebige Verbindung, dass der Streckgrenzpunkt nicht über die Schraube, sondern unzulässigerweise auch über die Verbindung bestimmt werden kann.

**~~Schwungradschraube.** Bauseitig ist auf der Kurbelwelle ein relativ kleiner Teilkreis vorgegeben. In der Montage ist darauf zu achten, dass zwischen den Schrauben genügend Freiraum für die Anziehwerkzeuge liegt. Die Schrauben werden mit einer Mehrspindeleinheit gleichzeitig streckgrenzgesteuert angezogen. Dies auch, weil hier geringe Klemmlängen (z.B. 7 mm) vorliegen. Durch den geringen Abstand zwischen Kurbelzapfen und Schwungrad sind die Kopfhöhen kleiner als nach Norm. Um das erforderliche Drehmoment sicher aufzubringen, wird deshalb oft ein Außenzwölfkant- oder ein Außensechsrund-Angriff, ggf. auch ein Innenvielzahn-Schlüsselangriff, vorgesehen. Wenn eine Ölversorgung durch Kanäle in der Kurbelwelle gegeben ist, werden die Schrauben zur Abdichtung gegen Ölleckagen mit einem mikroverkapselten Dichtkleber oder mit einer Nylon-Rundumbeschichtung versehen.

Einige Motorenhersteller ziehen Schwungradschrauben noch drehmomentgesteuert an, die dann manuell „nachgeknickt“ werden.

Bei den in jüngster Zeit vermehrt zum Einsatz kommenden Zweimassenschwungrädern werden die Gesamt-Module dem Fahrzeughersteller komplett mit Schwungradschrauben angeliefert und dort als Einheit montiert. Die Schrauben werden dabei mit einem mehrspindeligen Schrauber durch Bohrungen in der Kupplungstellerfeder und der Kupplungsscheibe angezogen.

**~~Verschrauben in Magnesiumbauteilen.** Der seit Anfang der 1990er Jahren anhaltende Trend zum Leichtbau in der Automobilindustrie erfordert neben der Optimierung von Komponenten aus den bewährten Konstruktionswerkstoffen wie Stahl, Aluminium oder Kunststoff auch den Einsatz von alternativen Werkstoffen, wie zum Beispiel Magnesium. Der Vorteil von Magnesium ist die relative Steifigkeit bei sehr dünnwandigen

Ausführungen. Im Hinblick auf seine Dichte ist es dem Kunststoff vergleichbar.

Im Motorenbereich wird dieser Werkstoff nur bei Nebenaggregaten wie der Zylinderkopfhaube für gekapselte Motoren oder Luftfilteransaugstutzen angetroffen. Magnesium ersetzt hier Kunststoff. Im Motorblock selbst sind die thermischen Belastungen für die Gesamtverbindung zu hoch. So können Stahlschrauben in Magnesiumverbindungen auf Grund des Setz- und Relaxationsverhaltens lediglich bei Raumtemperatur eingesetzt werden. Im Motor-Aggregatebereich werden deshalb wärmebehandelte Aluminiumschrauben aus z.B.: AL 6056 in Verbindung mit der Magnesiumdruckgusslegierung AZ 91, AS 21 bis 120 °Celsius (Spitztemperatur: 150 °Celsius) eingesetzt. Beim Einsatz von Magnesiumbauteilen ist das Kontaktkorrosionsverhalten in Kombination mit Stahl- oder Aluminiumschrauben zu berücksichtigen.

**~~Zylinderkopfschraube.** Die Funktion von Zylinderkopfschrauben besteht darin, eine betriebssichere Verbindung des Gesamtsystems Zylinderkopf, Zylinderkopf-Dichtung und Kurbelgehäuse im Langzeitbetrieb unter Berücksichtigung der maximal möglichen Zündkräfte herzustellen. Ziel ist vor allem geringe, gleichmäßige Bauteilbeanspruchungen und Dichtheit gegen Verbrennungsgase, Schmiermittel und Kühlmittel zu erreichen.

Nachdem früher Zylinderkopfschrauben zum Ausgleich von Setzvorgängen bis zu zwei mal nachgezogen werden mussten, ist jetzt die nachzugsfreie Zylinderkopfverbindung Stand der Technik.

Dies wurde mit dem Einsatz von Dehnschaft- oder Gewindedehnschrauben mit hoher Elastizität, eingeeengten Toleranzen der Zugfestigkeit und des Reibungsverhaltens, mit setzarmen Zylinderkopf-Dichtungen (z.B. Ganzmetallabdichtungen) und einem Verschraubungsverfahren mit niedriger Streuung der Vorspannkraft möglich. Als Verschraubungsverfahren hat sich weitgehend das drehwinkelgesteuerte Verfahren in den überelastischen Bereich durchgesetzt. Die immer stärker forcierte Leichtbauweise mit daraus resultierender geringerer Bauteilsteifigkeit von Block und Zylinderkopf wird in der Regel durch eine Absenkung der maximalen Schraubenfestigkeit ausgeglichen. Die Einhaltung der minimal notwendigen Schraubenkraft kann dann nur über eine drastische Einschränkung der Toleranzen der Zugfestigkeit und der Reibungszahlen dargestellt werden. Bei der Auslegung der Zylinderkopf-Verschraubung müssen ggf. thermische Einflüsse Berücksichtigung finden. Es ist möglich, dass sich beim Anfahrprozess des Verbrennungsmotors die Zylinderkopfschrauben weniger stark erwärmen als die zu verspannenden Teile von Zylinderkopf und Kurbelgehäuse. Das kann zu einem erheblichen Anstieg der Vorspannkraft

führen, wenn für diese Bauelemente Werkstoffe mit höherem thermischen Ausdehnungskoeffizienten, wie z.B. Aluminium, Verwendung finden. Auch unter diesem Aspekt ist der Einsatz von Dehnschaft- oder Gewindedehnschrauben, **Bild M235**, von Vorteil, da auf Grund des geringeren Anstiegs der Feder-Kennlinie der Zuwachs der Schraubenbelastung deutlich geringer ausfällt.

Das thermische Ausdehnungsverhalten von Stahl unterscheidet sich deutlich von dem des Aluminium und Magnesium. Deshalb sehen die neuesten Entwicklungen Zylinderkopfschrauben aus austenitischem Werkstoff vor, dessen thermischer Ausdehnungskoeffizient dem von Aluminium/Magnesium ähnlicher ist.

Der immer stärker vorhandene Zwang zur Kostenreduzierung wurde für die Zylinderkopfschraube mit Optimierungen in zwei Bereichen umgesetzt:

- Einsatz von Gewindedehnschrauben als brauchbarer Kompromiss zwischen ausreichender Elastizität und reduzierten Fertigungskosten im Vergleich zu Dehnschaft-Schrauben mit einem deutlich aufwändigeren Fertigungsablauf.
- Ersatz des Unterleglements auch bei Aluminium-Zylinderköpfen durch seine Integration in den Schraubenkopf in Form einer Schraube mit Flanschkopf. Zur Vermeidung von Fresserscheinungen bei der Schraubenmontage, die mehrfach vorkommen kann, ist dazu aber ein hoher Kenntnisstand erforderlich zur Definition, Fertigungstechnik und Qualitätssicherung der Geometrie der Unterkopfauflage. Dies beinhaltet eine Oberflächenbehandlung mit extrem geringer Varianz der Reibungs-Kennwerte und exzellenter Haftung auf dem Grundmaterial, wie z.B. das Verfahren der quasiamorphen Dünnschichtphosphatierung.



**Bild M235** Dehnschaft- oder Gewindedehnschrauben für die Zylinderkopfverschraubung

*Literaturverzeichnis:* Jende, S.: *Robotergerichte Schrauben Hochfeste Verbindungselemente für flexible Automaten*, Techno TIP 12/84. Würzburg: Vogel-Buchverlag. – N. N.: *Industriewerkzeuge Montagewerkzeuge, Firmenkatalog 20002001 der Atlas Copco Tools GmbH*, Essen. – *Technische Spezifikation ISO/TS 16949: QM-Systeme: Besondere Anforderungen bei Anwendung von ISO 9001: 2000 für die Serien- und Ersatzteilproduktion in der Automobilindustrie*, VDA-QMC, 2002, Frankfurt. – Illgner, K. H.; Blume, D.: *Schraubenvademecum* Herausgeber: Textron Verbindungstechnik, 6. Aufl., 2001. – Lang, O. R.: *Triebwerke schnelllaufender Verbrennungsmotoren*. Konstruktionsbücher Nr. 22 Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 1966. – Grohe, H.: *Otto- und Dieselmotoren: Arbeitsweise, Aufbau u. Berechnung von Zweitakt- u. Viertakt-Verbrennungsmotoren*. Kamprath – Reihe kurz und bündig, Technik, 6. Aufl. Würzburg: Vogel-Buchverlag, 1982. – VDI: *Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen*. VDI-Richtlinie 2230 (1986) sowie (2002). – Jende, S.: *KABOLT ein Berechnungsprogramm für hochfeste Schraubenverbindungen, Beispiel: Die Pleuelschraube*. In: VDI-Z 132 (1990), Nr. 7, Juli, Seite 66/78, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH. – *PC-Bolt '98 (Schraubenberechnungsprogramm)*. Institut für Maschinenkonstruktion/Konstruktionstechnik, Technische Universität Berlin, 1998. – Kübler, K. H.; Turlach, G.; Jende, S.: *Schraubenbrevier*, 3. Aufl. 1990 (KAMAX-Werke Rudolf Kellermann GmbH & Co. KG, Osterode am Harz). – Scheiding, W.: *Verschrauben von Magnesium braucht mehr als Alltagswissen*. In: *Konstruktion und Engineering*, 04/01. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie. – Kübler, K. H.; Mages, W.: *Handbuch der hochfesten Schrauben*. Herausgeber: KAMAX-Werke, 1. Aufl. Essen: Verlag W. Girardet, 1986. – Engineer, S. J., Finkler, H., Gulden, H., Köhler, H., Sartorius, K.: *Stähle mit 1 % Chrom und Bor für hochfeste Schrauben, Stahl und Eisen 112 (1992) Heft 2 (Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf)*. – Köhler, H., Roth, G., Walper, E.: *Hochfeste Verbindungselemente aus alternativen Werkstoffen*, *Ingenieurwerkstoffe 4 (1992) Nr. 5*, S. 36/39 (VDI-Verlag, Düsseldorf). – Köhler, H.: *Hochfeste Verbindungselemente aus Dualphasen Stahl ohne vergütende Wärmebehandlung*. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift*, 100 (1998) Heft 10 (Vieweg Verlag, Wiesbaden). – Westphal, K.: *Keine Patentlösung in Sicht... Neue Cr6-freie Zinklamellensysteme für Verbindungselemente der Automobilindustrie*. In: *Metalloberfläche*, 56 Jg., Heft Mai 2002 (Hanser-Verlag, München). – Westphal, K.: *Verschraubung von Magnesiumkomponenten*. In: *Metall*, 56 Jg., Heft 1–2 2002 (Giesel-Verlag, Isernhagen). – Köhler, H., Westphal, K.: *Chromatfreie Korrosionsschutzsysteme für Verbindungselemente*, *Tagung Haus der Technik Korrosionsschutz am Automobil* Sept. 2003 (Essen).