

# Hochbeanspruchte Schraubenverbindungen

F. Meyer<sup>1</sup>

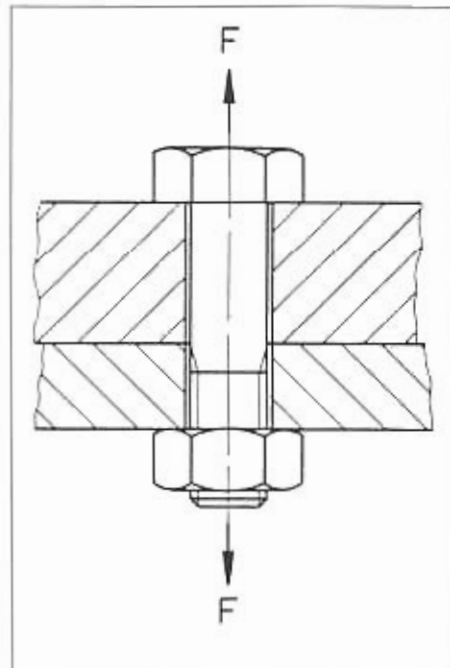
Als Schraubenverbindung wird eine lösbare Verbindung von 2 oder mehreren Teilen durch eine oder mehrere Schrauben bezeichnet. Die Schrauben sind so zu bemessen, dass das entstandene Verbundteil die zugeordnete Funktion erfüllt und den auftretenden Kräften standhält. Die nachfolgenden Ausführungen basieren auf den VDI-Richtlinien über systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen VDI 2230 und diversen Veröffentlichungen. Formelzeichen und Begriffe sind in einem Kasten festgehalten.

## 1. Verspannungsdreieck

Das klassische Verspannungsdreieck geht von linearen Verformungskennlinien für spannende und verspannte Teile aus. Die Längenänderung eines Bauteils errechnet sich im elastischen Verformungsbereich nach dem Hookschen Gesetz. Anhand des Sonderfalls der zentrisch verschraubten Verbindung kann deren Kraft-Verformungsverhalten besonders anschaulich abgeleitet werden (Bild 1). Wird eine Schraube auf eine bestimmte Vorspannkraft  $F_M$  angezogen, dann dehnt sie sich um den Betrag  $f_{SM}$ . Die verspannten Platten drücken sich dabei um einen Betrag  $f_{PM}$  zusammen (Bild 2).

Wird die Montagevorspannkraft  $F_M$  als absolute Grösse aufgetragen, dann entsteht das sog. Verspannungsdreieck (Bild 3).

Wirkt nun eine externe Betriebskraft  $F_A$  auf die verspannte Verbindung ein, so wird die Schraube entlang ihrer Kennli-



**Bild 1**  
Schraubenverbindung mit axial und zentrisch angreifender Zugkraft.

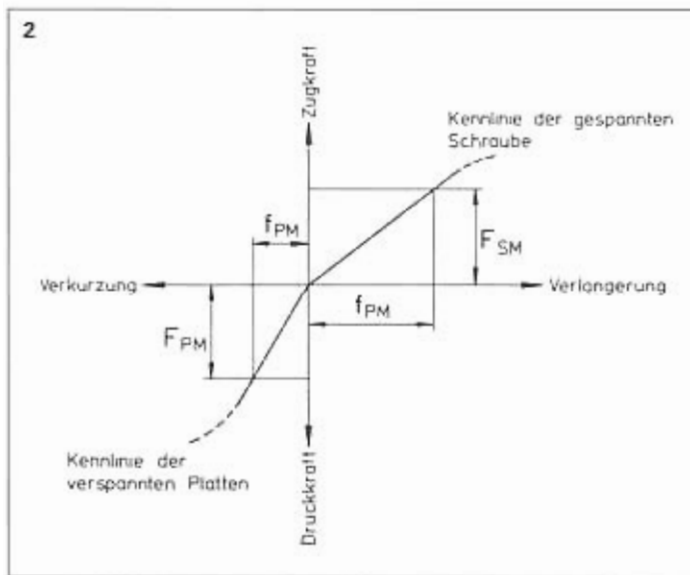
nie weiter hinaus verlängert. Gleichzeitig wird durch diese Verlängerung der Schraube die Verspannung der Platten teilweise rückgängig gemacht. Die Schraube wird durch die Betriebskraft  $F_A$  zusätzlich um den Betrag  $F_{SA}$  auf  $F_M + F_{SA}$  belastet. Die Platten werden um den Betrag  $F_{PA}$  auf die Restklemmkraft  $F_{KR}$  entlastet.

Zum Bestimmen der Dauerschwingbeanspruchung der Schraube muss ebenfalls vom Zusatzbetrag  $F_{SA}$  ausgegangen werden. Dies wird in Bild 4 durch die Sinuslinie angedeutet.

## 2. Lockern

Für den Verlust der Klemmkraft gibt es 2 Ursachen. Der Begriff «Lösen» wird ersetzt durch die beiden Begriffe «Lockern» und «Losedrehen». Als Lockern bezeichnet man den Vorspannkraftverlust infolge Setzens oder anderer bleibender Längenänderungen. Als Setzen bezeichnet man das Einebnen der Oberflächenrauigkeiten in der Verbindung. Der Setzbetrag ist abhängig von der Grösse der Rauigkeit und der Anzahl Trennflü-

<sup>1</sup> Masch. Ing. HTL Sektion Technische Studien, Abt. Unfallverhütung, Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (SÜVA), CH-6002 Luzern.



**Bild 2**  
Kraft-Verformungskennlinien für Schrauben und Platten im Montagefall.

**Bild 3**  
Verspannungsdreieck.

**Bild 4**  
Verspannungsdreieck für Zugkraft nach Bild 1.

**Bild 5**  
Zusammenhang zwischen Setzbetrag und Vorspannungsabfall.

gen. Wie der Setzbetrag  $f_z$  und die Vorspannkraft Abfall  $F_z$  zusammenhängen, zeigt Bild 5.

Viel gefährlicher als dieses normale Einbiegen der Rauigkeiten sind plastische Deformationen, die durch Überschreiten der kritischen Flächenpressung unter dem Schraubenkopf oder der Mutter auftreten können.

Wenn zum Übertragen eines Reibschlusses eine bestimmte Klemmkraft erforderlich ist, muss die Restvorspannkraft  $F_{KRL}$ , die sich nach dem Setzen einstellt, der Rechnung zugrunde gelegt werden (Bild 6).

Beim Verwenden von starren Schrauben und starren Platten ergibt sich ein grosser Vorspannkraftabfall und eine mittlere Schraubenbeanspruchung durch  $F_{SA}$  (Bild 7).

Die Sicherheit gegen Lockern kann dadurch wesentlich verbessert werden, dass die verspannten Teile elastischer ausgeführt werden. Bild 8 zeigt, dass bei gleichem Setzbetrag wie in Bild 7 wohl der Vorspannkraftabfall durch die elastisch verspannten Teile wesentlich geringer, die dynamische Beanspruchung der Schraube jedoch erheblich grösser wird. Durch den Einsatz elastischer Schrauben bei starren verspannten Teilen wird sowohl der Vorspannkraftabfall wie auch die dynamische Beanspruchung der

Schraube gering gehalten (Bild 9). Als elastische Schrauben werden solche bezeichnet, bei denen ein günstiges Klemmlängenverhältnis (Klemmlänge/Schraubendurchmesser) besteht. Als Faustregel gilt:

$$5 < l_k/d < 15.$$

Die bisherige Betrachtungsweise einer zentrisch verspannten und zentrisch belasteten Schraubenverbindung ist konstruktiv selten möglich. Meistens wird die Wirkungslinie der Betriebskraft  $F_A$  nicht in der Schraubenachse liegen und die Schraubenachse selbst wird nicht mit der Schwerpunktschwerachse der verspannten Teile zusammenfallen. Das Verspannungsdreieck für exzentrische Belastungen ändert seine Form entsprechend Bild 10. Die Kennlinie der verspannten Teile verläuft nur bis zur Abhebegrenze linear. Bei exzentrischer Belastung kann man durch hohe Vorspannkraft dem Abheben so entgegenwirken, dass die Betriebskraft nur im linearen Teil der Federkennlinie wirkt.

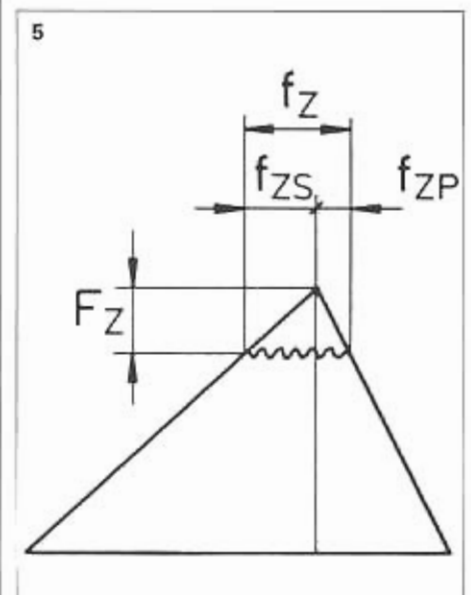
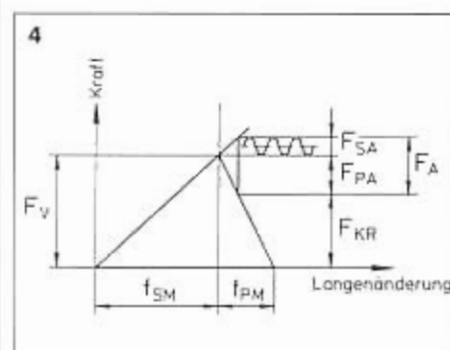
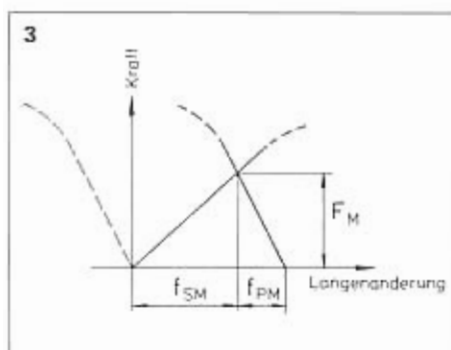
Durch die Wahl einer hochfesten Schraube werden noch keine hohen Vorspannkraft erreicht. Die Schrauben müssen mit geeigneten Werkzeugen so angezogen werden, dass die der Rechnung zu Grunde gelegten Annahmen eingehalten werden und die entsprechenden

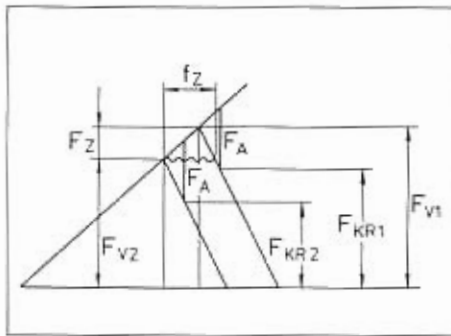
Drehmomente auch wirklich aufgebracht werden können.

Ein Lockern der Schrauben lässt sich durch eine der folgenden Massnahmen verhindern: Schrauben mit grosser Nachgiebigkeit wählen, z. B. mit Klemmlängenverhältnis  $l_k/d$  grösser als 5 oder mit Dehnbarkeit; Setzbeträge klein halten, z. B. durch Vermindern der Trennfugenanzahl oder durch Beachten der kritischen Flächenpressung; hohe Vorspannkraft aufbringen, z. B. durch Verwenden hochfester Schrauben oder durch kontrolliert drehmomentgesteuertes bzw. streckgrenzgesteuertes Anziehen.

### 3. Losdrehen

Losdrehvorgänge an Schrauben führen neben dem Dauerbruch der Schraube am häufigsten zum Versagen einer dynamisch belasteten Verbindung. Im Zustand der Ruhe sind alle gängigen Befestigungselemente selbsthemmend. Der





**Bild 6**  
Änderung der Vorspannkraft  $F_V$  und der Klemmkraft  $F_{KR}$  durch Setzen.

Steigungswinkel eines Gewindes ist im allgemeinen nicht grösser als  $3^\circ$  und der Reibungswinkel – auch bei bester Schmierung – nicht kleiner als  $6^\circ$ , so dass eine Schraubenverbindung unter statischen Betriebskräften sich nicht selbsttätig losdrehen kann.

Das Losdrehmoment  $M_L$  einer Schraube errechnet sich nach der Formel:

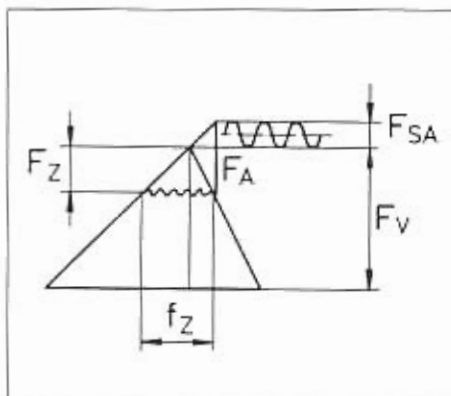
$$M_L = F_V \left[ \frac{d_2}{2} \tan(-\varphi + 1,155 \mu_c) + \frac{D_{km}}{2} \mu_k \right]$$

oder für gleiche Reibungszahlen im Gewinde unter dem Kopf:

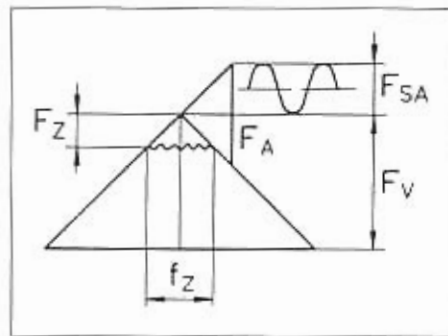
$$M_L = F_V \left[ -0,16 P + \mu \left( 0,58 d_2 + \frac{D_{km}}{2} \right) \right]$$

Die Schraubenverbindung kann sich nur dann selbsttätig lösen, wenn  $M_L \leq 0$  wird. Dies kann nur geschehen, wenn die Reibungszahl  $\mu$  gegen Null strebt.

Versuche haben gezeigt, dass rein axial belastete Verbindungen sich nur dann selbsttätig lösen können, wenn die Vorspannung verlorengeht.



**Bild 7**  
Grosser Vorspannkraftabfall infolge Setzens – mittlere dynamische Beanspruchung der Schraube.



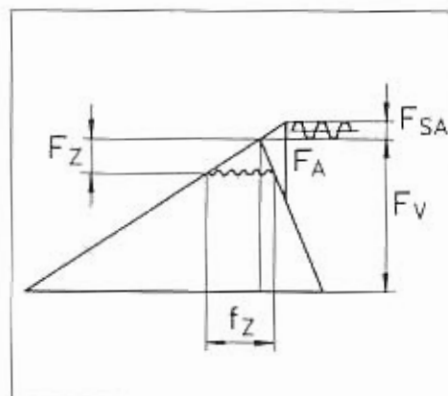
**Bild 8**  
Kleiner Vorspannkraftabfall infolge Setzens – grosse dynamische Beanspruchung der Schraube.

Anders sieht es dagegen mit senkrecht zur Schraubenachse belasteten Verbindungen aus. Es wurde nachgewiesen, dass sich unter bestimmten Voraussetzungen eine Schraubenverbindung auch unter voller Vorspannkraft losdrehen kann. Wird nämlich unter dynamischer Beanspruchung senkrecht zur Schraubenachse der Reibschluss durchbrochen und kommt es zu kleinen Relativbewegungen zwischen den verspannten Teilen, so wird die Verbindung scheinbar reibungsfrei. Aus der zuvor aufgeführten Formel errechnet sich für  $\mu = 0$  ein inneres Losdrehmoment von der Grösse

$$M_L = -0,16 P F_V$$

Zusammenfassend lassen sich folgende Massnahmen gegen Losdrehen nennen:

*Hohe Vorspannkraft aufbringen, z. B. durch Verwenden hochfester Schrauben oder durch kontrolliert drehmomentgesteuertes bzw. streckgrenzgesteuertes Anziehen; geeignete Sicherungselemente verwenden, welche in der Lage sind, beim Auftreten von Relativbewegungen das innere Losdrehmoment aufzunehmen.*



**Bild 9**  
Kleiner Vorspannkraftabfall infolge Setzens – kleine dynamische Beanspruchung der Schraube.

## 4. Wirksamkeit einer Schraubensicherung

Welches Sicherungselement ist in der Lage, das auftretende innere Losdrehmoment sicher aufzunehmen?

Damit man sich für das optimale Sicherungselement für den jeweiligen Anwendungsfall entscheiden kann, muss ein allgemein anerkanntes Kriterium für die Wirksamkeit der verschiedenartigen selbstsichernden Verbindungselemente vorliegen. In den letzten Jahren hat sich ein Prüfverfahren bewährt, mit dem es möglich ist, die Wirksamkeit der verschiedenen Sicherungselemente zu erproben und ihre Anwendungsgrenzen zu ermitteln. Es wird eine Relativbewegung erzwungen, indem das Oberteil von einem motorischen Antrieb parallel zum Unterteil verschoben wird. Während des Vibrationsversuchs wird die Vorspannkraft  $F_V$  über die Anzahl der Lastwechsel mit einem X-Y-Koordinaten-Schreiber aufgezeichnet. Anhand dieser Losdrehkurven wurde eine qualitative Einteilung der Sicherungen in Gruppen vorgenommen. In den folgenden Bildern werden einige typische Losdrehkurven von verschiedenen Sicherungselementen gezeigt.

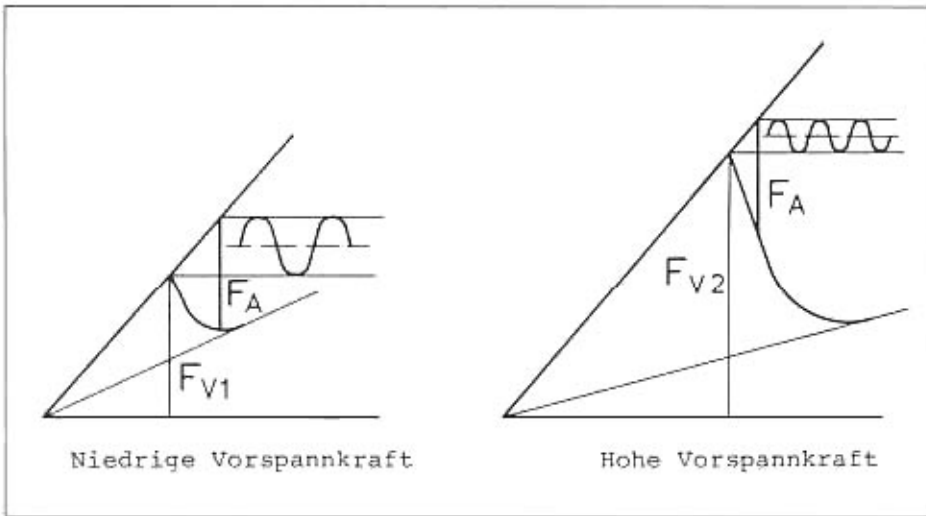
Zur Verdeutlichung der Vorgänge sind ausserdem die Losdrehwinkel über die Anzahl der Lastwechsel (gestrichelte Kurven) aufgezeichnet. Die Beispiele stammen aus der Arbeit von *Junker* und *Strelow*.

### 4.1 Ungesicherte Schraube

Aus Vergleichsgründen wurde zunächst eine ungesicherte Sechskantschraube geprüft (Bild 11). Die Vorspannkraft war bereits nach ca. 130 Lastwechseln auf Null abgefallen. Dabei hatte sich die Schraube um ca.  $80^\circ$  gedreht.

### 4.2 Federring

Sechskantschrauben wurden einmal mit einem Federring DIN 127 A (mit Beisskanten, Kurve a) und einmal mit einem Federring 128 B (glatt, Kurve b) geprüft (Bild 12). Die Beisskanten des Federrings nach DIN 127 A verzögerten ein wenig den Losdrehvorgang im untern Bereich. Nach ca. 700 Lastwechseln und einer Drehung von  $155^\circ$  war die Verbindung jedoch völlig gelöst. Der gewölbte Federring nach DIN 128 B begünstigte sogar das Rutschen unter dem Schraubenkopf durch seine glatte, gehärtete Oberfläche. Diese Verbindung war schon nach 115 Lastwechseln und einer Drehung von  $135^\circ$  auf Null abgefallen.



**Bild 10**  
Verspannungsdreieck bei exzentrischem Kraftangriff.

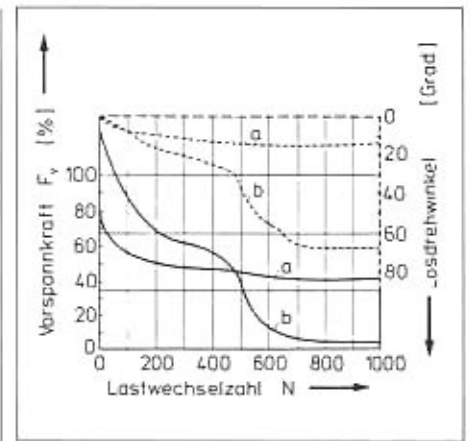
**4.3 Kronenmutter**

Aus den Losdrehkurven von 2 Kronenmuttern DIN 935 mit Splint DIN 94 erkennt man die Problematik der Sicherung mit Kronenmuttern (Bild 13). Im 1. Fall (Kurve a) stimmt die Richtung des Kronenmutter Schlitzes mit jener des Splintlochs bei ca. 80% der gewünschten Vorspannkraft überein. Die Mutter drehte sich bis zur Anlage des Splints um 15° los. Die Schraube verlor dabei ca. 50% ihrer Vorspannkraft, verharrte dann aber in dieser Stellung. Die Vorspannkraft betrug letztlich nur ca. 40% der Sollvorspannkraft. Ein Weiterdrehen bis zum nächsten Kronenmutter Schlitz steigerte im 2. Fall (Kurve b) die Vorspannkraft auf 125% der Sollvorspannkraft. Die Schraube wurde überstreckt.

In diesem Fall war das innere Losdrehmoment so gross, dass der Formschluss durch Abscheren des Splints zerstört wurde. Die Vorspannkraft ging nach insgesamt knapp 70° Verdrehung fast völlig verloren.

**4.4 Sicherungsblech**

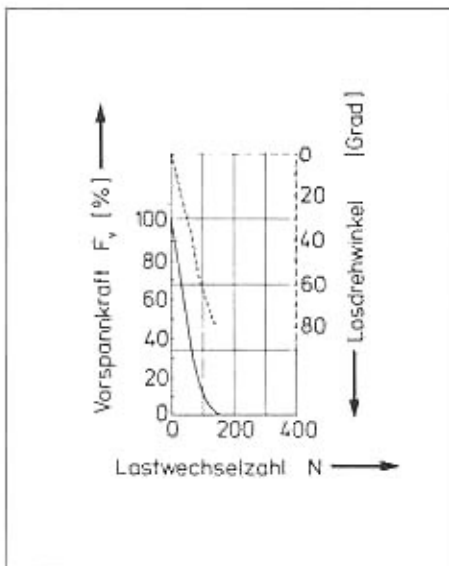
Ähnliche Verhältnisse findet man bei Sicherungsblechen (Bild 14). Die Sechskantschrauben wurden einmal mit einem Sicherungsblech nach DIN 93 gesichert, bei dem nur eine Seite aufgebogen war. Die Kurve a zeigt, dass sich die Schraube zunächst um ca. 40° drehte, bis die Ecke des Schraubenkopfs satt zur Anlage mit der aufgebogenen Seite des Blechs zu liegen kam. Dabei fiel die Vorspannkraft bereits um ca. 65% ab. Unter dem innern



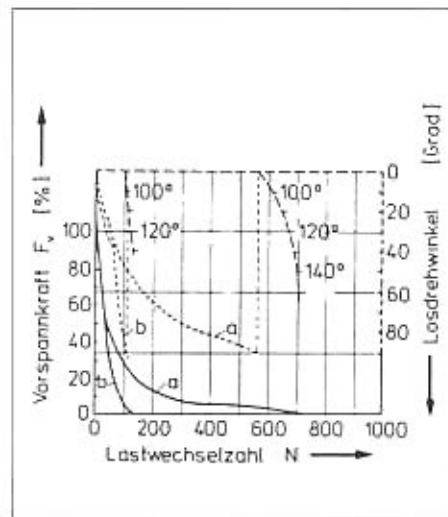
**Bild 13**  
Losdrehkurven von Zylinderschrauben M 10 x 30, gesichert mit Kronenmuttern und Splinten DIN 94 in 2 verschiedenen Stellungen.

Losdrehmoment bog die Ecke des Sechskantkopfs dann das Sicherungsblech so weit auf, dass sich der Kopf drehen konnte. Die Schraube drehte sich um 64°, während die Vorspannkraft auf 6% abfiel.

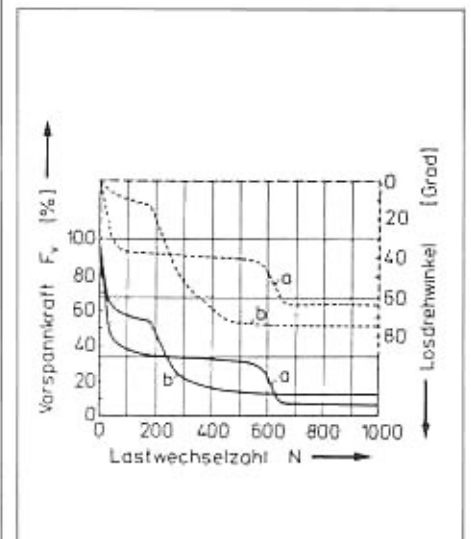
In einem 2. Versuch (Kurve b) waren 2 Seiten des Blechs aufgebogen. Die Schraube drehte sich zunächst wieder so weit, ca. 12°, bis es zur satten Anlage zwischen Schraubenkopf und den beiden aufgebogenen Seiten kam, und verlor dabei ca. 45% ihrer Vorspannkraft. Während nun die aufgebogenen Seiten des Sicherungsblechs in der Lage waren, dem innern Losdrehmoment zu widerstehen, wurde das in die Sicherungsbohrung eingesetzte untere Ende des Sicherungsblechs abgesichert. So konnte sich die



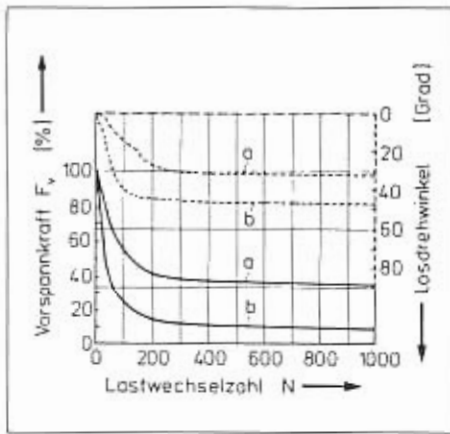
**Bild 11**  
Losdrehkurve einer ungesicherten Sechskantschraube M 10 x 30 DIN 933-8.8.



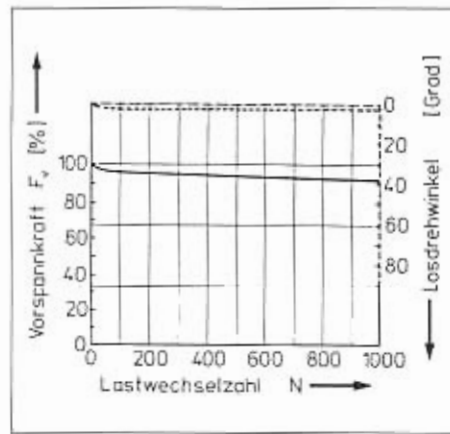
**Bild 12**  
Losdrehkurven von Sechskantschrauben M 10 x 30, gesichert mit Federringen DIN 127 A (Kurve a) und DIN 128 B (Kurve b).



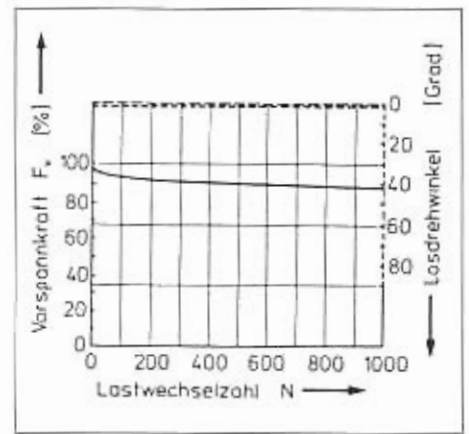
**Bild 14**  
Losdrehkurven von Sechskantschrauben M 10 x 30, gesichert mit Sicherungsblechen, einseitig (Kurve a) und 2seitig (Kurve b) aufgebogen.



**Bild 15**  
Losdrehkurven von Zylinderschrauben M 10 x 30, gesichert mit Ganzmetallsicherungsmutter (Kurve a) und Sicherungsmutter mit Polyamidring (Kurve b).



**Bild 16**  
Losdrehkurve einer Sperrzahnschraube M 10 x 30.



**Bild 17**  
Losdrehkurve einer Zylinderschraube M 10 x 30, gesichert mit mikroverkapseltem Kleber.

Schraube um insgesamt 75° verdrehen und die Vorspannkraft auf ca. 10% abfallen. An dieser Stelle verhakte sich das Sicherungsblech zufällig noch einmal.

**4.5 Ganzmetallsicherungsmutter und Sicherungsmutter mit Polyamidring**  
Eine Ganzmetallsicherungsmutter (Bild 15), deren konisch verjüngte Kragenpartie an 3 Punkten nach innen verformt ist (Kurve a), und eine Sicherungsmutter mit Polyamideinsatz nach DIN 985 (Kurve b) wurde untersucht. Beide Muttern drehten sich sehr schnell um 31° und 46°. Bei Restvorspannkraften von 35% und 10% stellte sich ein Gleichgewicht zwischen dem innern Losdrehmoment und dem Klemmoment ein, und der Losdrehvorgang kam zum Stillstand.

**4.6 Sperrzahnschraube**  
Eine durchvergütete Sperrzahnschraube 12.9 wurde untersucht. Wie Bild 16 zeigt, drehte sich diese Schraube nicht. Die Vorspannkraft fiel unter dieser extremen Beanspruchung insgesamt nur um ca. 10% durch Setzen ab.

**4.7 Schraube mit mikroverkapseltem Klebstoff**  
Eine mit mikroverkapseltem Klebstoff vorbehandelte Sechskantschraube wurde untersucht (Bild 17). Der Kleber war in kleinen Kapseln in eine Schicht auf dem Schraubengewinde eingebettet. Die Kapseln brachen beim Eindrehen der Schraube und gaben den Kleber frei. Nach 24 h Aushärtezeit wurde mit dem Versuch begonnen. Die Schraube verdrehte sich nicht und konnte ebenfalls das innere Losdrehmoment aufnehmen.

Die Vorspannung fiel durch Setzen um ca. 10% ab.

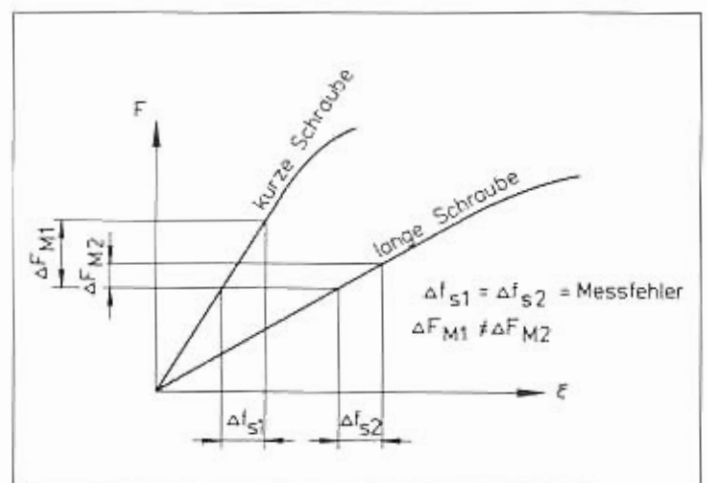
**5. Wirksamkeit und Anwendungsgrenzen**

Nachstehend wird auf die Wirksamkeit und auf die Anwendungsgrenzen der verschiedenen Sicherungselemente kurz eingegangen.

**5.1 Mitverspannte federnde Elemente**  
Dazu gehören Federringe, Fächerscheiben, Feder- oder Zahnscheiben, Tellerfedern, Spannscheiben usw. Diese Elemente verhindern weder Relativbewegungen im Gewinde oder unter Kopf, noch können sie das innere Losdrehmoment blockieren, welches entsteht, wenn durch Relativbewegungen die Schraube

Gruppe	Beispiel	Sicherungseigenschaft							
		Vorspannungserhaltung	gegen Verlieren	abhängig von dem Gegenmaterial	abhängig von der Temperatur (bis ca 120°C)	Verletzung der Oberfläche	Wiederverwendbarkeit	Montagekosten	Preis
Mitverspannte federnde Elemente		4-5	4-5	3-5	1-2	3-5	2-4	1-4	1-4
formschlussige		3-4	2-4	1-2	1-2	1-2	3-5	4-5	3-5
klemmende		3-4	1-2	1-2	2-5	1-2	2-4	2-3	3-4
sperrende (verzahnt)		1-2	1-2	3-5	1-2	2-5	3-4	1-2	1-3
klebende		1-2	1-2	1-2	4-5	1-2	4-5	1-4	1-4

**Bild 18**  
Daten zur Auswahl von Sicherungselementen.



**Bild 19**  
Auswirkung auf den Messfehler bei kurzen und bei langen Schrauben.

in Umfangsrichtung reibungsfrei wird. Manche begünstigen sogar das Rutschen unter dem Schraubenkopf durch ihre glatte, gehärtete Oberfläche. Sie liefern nur dann begrenzte Sicherungswirkung, wenn sie sich in der verspannten Fläche verhaken oder verschweissen, was jedoch nur völlig unkontrollierbar vorkommt. Werden dennoch mitverspannte federnde Elemente in Verbindungen eingebaut, in denen Relativbewegungen auftreten können, so werden diese Verbindungen oft zusätzlich gefährdet statt gesichert. Unübersehbar Folgeschäden können auftreten. Auch bei rein axialer Beanspruchung ist der Einsatz dieser Elemente sehr begrenzt, da die Federkräfte in der Regel nicht einmal die übliche Vorspannkraft von Schrauben der Güte 8,8 erreichen.

*Regel: Das Verwenden mitverspannter federnder Elemente kann in der Regel nicht als wirksame Sicherung gegen Losdrehvorgänge unter wechselnden Querschichtungen angesehen werden.*

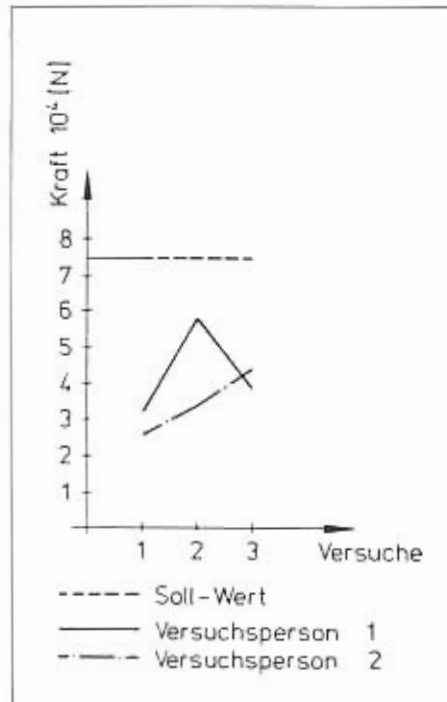
### 5.2. Formschlüssige Sicherungselemente

Es sind dies Kronenmuttern, Sicherungsbleche, Sicherungsdrähte usw. Formschlüssige Sicherungselemente können das innere Losdrehmoment blockieren, wenn der Splint, der Draht oder das Blech zum Anliegen kommen. Dies geschieht aber erst, nachdem die Schraube durch Losdrehen das Spiel in diesen Elementen aufgezehrt hat. Dabei kann insbesondere bei kurzen Schrauben ein wesentlicher Verlust an Vorspannkraft eingetreten sein. Bei einigen Elementen dieser Art genügt das innere Losdrehmoment, um den Formschluss zu zerstören.

*Regel: Formschlüssige Elemente sollten nur dort eingesetzt werden, wo Schraubenverbindungen der Festigkeitsklassen unterhalb 6,9 überwiegend senkrecht zur Schraubenachse beansprucht werden. Sie halten in der Regel eine Restvorspannkraft aufrecht und sichern die Verbindung gegen Verlieren der Einzelteile und eventuelle Folgeschäden.*

### 5.3 Klemmende Sicherungselemente

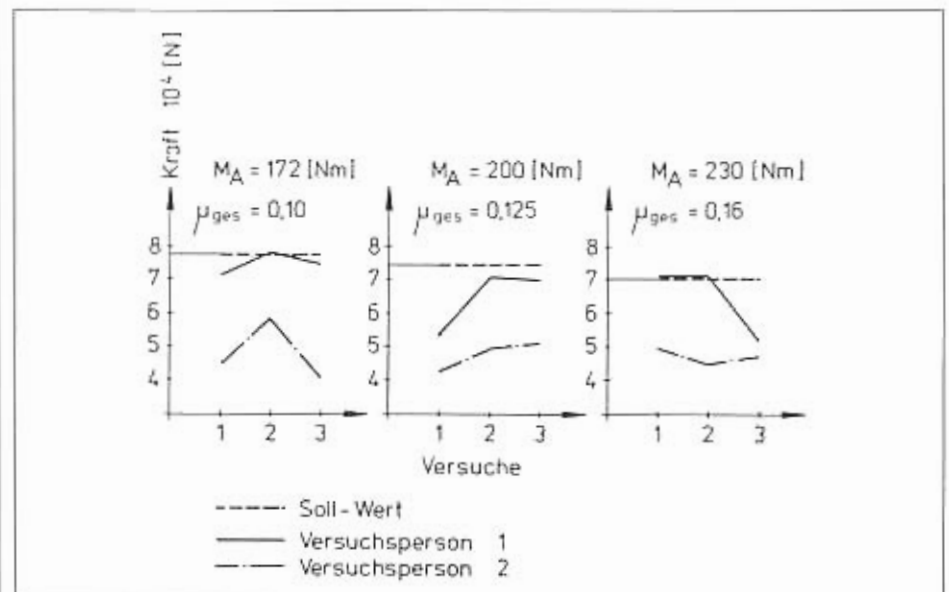
Von klemmenden Elementen existiert wohl das grösste Angebot auf dem Markt. In die Gruppe gehören Ganzmetall-Sicherungsmuttern, Muttern mit Polyamideinlagen, kunststoffbeschichtete Schrauben, gewindeförmende Schrauben usw. Sie üben einen zusätzlichen axialen oder radialen Druck auf die Gewindeflanken aus und bewirken dadurch ein zusätzliches Klemmmoment. Durch die federnde Eigenschaft der Elemente bleibt dieses Klemmmoment auch bei Relativbe-



**Bild 20**  
Minimal- und Maximalwerte.

wegungen z. T. erhalten und wirkt so dem entstehenden inneren Losdrehmoment entgegen. Das Klemmmoment darf aber nicht beliebig hoch gewählt werden, da es sonst schon beim Einschrauben zum Fressen und dabei zu Gewindebeschädigungen kommen kann.

*Regel: Klemmende Elemente sind überall dort zu empfehlen, wo es bei quer belasteten Verbindungen primär darum geht, dass eine gewisse Restvorspannkraft erhalten bleibt und die Verbindung gegen Auseinanderfallen gesichert werden soll.*



**Bild 21**  
Gegenüberstellung der tatsächlich erzielten und der theoretischen Vorspannkraft für vorgegebene Anzughmomente in Funktion der  $\mu$ -Werte.

### 5.4 Sperrende Sicherungselemente

Es existieren verschiedene Typen von Sperrzahnschrauben mit unterschiedlichen Zahnformen, Zähnezahlen und verschiedenen Kombinationen der Zahnform mit ebenen Auflageflächen. Sie alle haben hervorragende Sicherungseigenschaften, wenn die Zähne in der Lage sind, sich in das Gegenmaterial einzugraben. Sie vermögen meist, das bei Vibration entstehende innere Losdrehmoment zu blockieren und so die volle Vorspannkraft aufrechtzuerhalten. Wenn aber der verspannte Werkstoff die Härte der Schraube erreicht, ist ein Verzahnen nicht mehr möglich und die Sicherungselemente verlieren ihre Wirkung.

*Regel: Sperrzahnschrauben sind überall dort zu empfehlen, wo hoch verspannte kurze Schraubenverbindungen überwiegend senkrecht zur Schraubenachse beansprucht werden.*

### 5.5 Klebende Sicherungselemente

Es handelt sich um unter Luftabschluss aushärtende Flüssigkeitskunststoffe oder um mikroverkapselte Klebstoffe. Nach Aushärtung der Klebstoffe – was mindestens 24 h dauert – entsteht im Gewinde ein Quasiformschluss. Der Quasiformschluss verhindert Relativbewegungen, so dass kein inneres Losdrehmoment entsteht. Da der Einsatz von Flüssigkeitskunststoffen sehr aufwendig ist, boten sich in den letzten Jahren als Ersatz hierfür mikroverkapselte Kleber als Schraubensicherung an. Der Kleber ist in kleinen Kapseln auf dem Schraubengewinde eingebettet. Die Kapseln bersten beim Eindrehen der Schraube und geben den Kleber frei.

Fortsetzung von Seite 36

*Grundregel: Klebende Sicherungselemente sind dort zu empfehlen, wo hoch vorgespannte kurze Schraubenverbindungen senkrecht zur Achse beansprucht werden und insbesondere dort, wo gehärtete Oberflächen den Einsatz von Sperrzahn-schrauben nicht erlauben.*

### 5.6 Zusammenstellung

Die auf dem Markt befindlichen Sicherungselemente lassen sich ihrer Funktion nach in 5 Gruppen zusammenfassen (Bild 18). Die Sicherungswirkung wird beurteilt nach Vorspannungserhaltung, Verliersicherheit, Abhängigkeit vom Gegenwerkstoff und von der Temperatur. Als weitere Einflussfaktoren sind die Verletzung der Oberfläche, die Wiederverwendbarkeit, die Montage, die Kosten und der Preis bewertet. Innerhalb der einzelnen Gruppen kann die Bewertung sehr stark schwanken, was von Fall zu Fall untersucht werden muss.

## 6. Anziehen von Schraubenverbindungen

Das Anziehverfahren beeinflusst die erforderliche Abmessung der Schraube, weil zusätzlich zur Axialkraft ein Drehmoment von der Schraube aufgenommen werden muss. Besonders stark ist jedoch der Einfluss, der von der Schwankung der Vorspannkraft bei verschiedenen Anziehverfahren ausgeht.

Wenn z. B. für eine Schraubenverbindung mit einer bestimmten Belastung die Schraubenabmessung M 10 genügt, falls die Schraube nach dem drehwinkelgesteuerten Anziehverfahren angezogen wird, müsste unter Beibehaltung derselben Festigkeitsklasse der Schraube die Abmessung M 18 gewählt werden, wenn die Schraube motorisch mit einem Drehschlagschrauber angezogen werden soll. Das Anziehverfahren muss sorgfältig ausgewählt werden.

*Es muss dafür gesorgt werden, dass das der Berechnung zugrundegelegte Anziehverfahren bei der Montage auch angewendet wird.*

### 6.1 Beanspruchung der Schraube beim Anziehen

Beim Anziehen wird die Schraube durch die Vorspannkraft  $F_M$  auf Zug und durch das im Gewinde wirkende Moment  $M_{GA}$  zusätzlich auf Torsion beansprucht. Massgebend für die Berechnung ist die zusammengesetzte Beanspruchung  $\sigma_{tot}$ ,

Aus den Gesetzen der Mechanik für die schiefe Ebene lässt sich herleiten:

$$M_{GA} = F_M \frac{d_2}{2} \tan(\varphi + \varrho')$$

Bei den normalerweise kleinen Winkeln  $\varphi$  und  $\varrho'$  kann man schreiben:

$$M_{GA} = F_M \frac{d_2}{2} \left( \frac{P}{\pi d_2} + 1,155 \mu_G \right)$$

### 6.2 Streuung der Montagevorspannkraft beim Anziehen

Durch den Anziehungsfaktor  $\alpha_A = F_{max}/F_{min}$  wird der Fehler der beim Anziehen erzielten Vorspannkraft gegenüber der geforderten Mindestvorspannkraft berücksichtigt.

#### 6.2.1 Drehmomentgesteuertes Anziehen

Unter drehmomentgesteuertem Anziehen versteht man im allgemeinen das Anziehen mit anzeigenden oder signalgebenden Drehmomentschlüsseln.

Im Prinzip fällt jedoch auch das motorische Anziehen mit Drehschraubern unter diesen Oberbegriff, da ein Druckluftdrehschrauber ein messbares und einstellbares Moment abgibt.

Das Gesamtanziehmoment setzt sich aus dem Gewindecanziehmoment und dem Kopf- bzw. Mutterreibungsmoment zusammen:

$$M_A = M_{GA} + M_K$$

Für Gewinde mit einem Flankenwinkel von  $\alpha = 60^\circ$  ergibt sich folgende Gleichung:

$$M_A = F_M \left( 0,16 P + \mu_G 0,58 d_2 + \frac{D_{km}}{2} \mu_K \right)$$

Bei einer vorschriftsgerechten Montage soll beim drehmomentgesteuerten Anziehen  $\sigma_{tot}$  der Betrag von  $0,9 \sigma_{0,2}$  nicht überschritten werden.

Beim drehmomentgesteuerten Anziehen mit Drehmomentschlüssel setzt sich der Gesamtfehler aus folgenden Teilfehlern zusammen:

Fehler bei der Abschätzung der Reibungszahl. Mit der geschätzten Reibungszahl wird das max. Anziehdrehmoment  $M_A$  bestimmt; Streuung der Reibungszahl innerhalb eines Schraubenlozes und eines Bauteilloses einschliesslich der Massabweichungen, welche die Reibradien beeinflussen; Ungenauigkeit der Anziehwerkzeuge einschliesslich Bedienungs- und Ablesefehler. Der Schätzfehler für die Reibungszahl kann dadurch eingengt werden, dass das Sollanziehdrehmoment durch Verlängerungsmessung an der Schraube bestimmt wird.

#### 6.2.2 Streckgrenzgesteuerte Anziehverfahren

Streckgrenzgesteuerte Anziehverfahren beruhen darauf, dass bei Erreichen der Streckgrenze des Schraubenwerkstoffs das Anziehdrehmoment nicht mehr linear mit dem Drehwinkel zunimmt. Dieses Prinzip ist bei den derzeit entwickelten Schraubern folgendermassen verwirklicht: Ein Druckluftdrehschrauber mit einer elektronischen Steuereinheit zieht zunächst die Verbindung bis zu einem «Fügemoment» an, um alle Trennflächen satt zur Anlage zu bringen. Von diesem Punkt beginnend, wird der jeweilige Differenzenquotient errechnet und gespeichert. Sobald bei Erreichen der Streckgrenze des Schraubenwerkstoffs dieser Differenzenquotient auf einen fest eingestellten Wert fällt, wird über Schnellverschlussventile der Drehschrauber abgeschaltet. Auf diese Weise wird die erzielte Vorspannkraft bei der Montage eines Schrauben- und Bauteilloses weitgehend unabhängig von den Reibungseinflüssen beeinflusst und lediglich durch die Streuung der Streckgrenze des Schraubenwerkstoffs in einem Los bestimmt. Ein Anziehungsfaktor  $\alpha_A$  wird für dieses Verfahren nicht benötigt, da die Schrauben nach  $F_{Mmin}$  dimensioniert werden.

#### 6.2.3 Impulsgesteuertes Anziehen (Schlagschrauber)

Drehschlagschrauber übertragen die Energie durch Impuls; ein abgegebenes Drehmoment ist darum kaum messbar. Die Einstellung von Drehschlagschraubern muss, wie bei Drehschraubern, am Verschraubungsteil vorgenommen werden – genauer durch Verlängerungsmessung an der Schraube, weniger genau durch Nachziehmoment. Die Anziehungsfaktoren sind so hoch, dass dieses Anziehverfahren für hochbeanspruchte Schraubverbindungen nicht empfohlen werden kann.

Ein kontrolliertes Anziehen von hochbeanspruchten Schraubenverbindungen mittels Schlagschlüssel und Verschlaghammer (Schlegel) ist unmöglich. Die körperliche Konstitution, Verfassung, die Arbeitsstellung sowie die sehr schnell eintretende Müdigkeit beeinflussen den Anziehvorgang dermassen, dass eine Konstanz völlig ausgeschlossen ist.

#### 6.2.4 Anziehen mit Verlängerungsmessung

Die elastischen Längenänderungen der Schrauben im angezogenen Zustand können zur Bestimmung der wirksamen Vorspannkraft benutzt werden. Die Längenänderung einer Durchsteck-

Schraubenverbindung lässt sich aufgrund der konstruktiv gegebenen Abmessungen der Schraubenverbindung direkt in Vorspannkraft umrechnen. Die Genauigkeit des Verfahrens hängt von der Messung dieser Längenänderung ab. Bei kleinen Klemmlängen oder sehr starren Schraubenverbindungen sind die Längenänderungen jedoch klein und die Messungen nur ungenau ausführbar. Das Verfahren wird in dem Mass genauer, je grösser die tatsächlichen Längenänderungen durch grosse Klemmlängen sind.

Das Messverfahren zur Bestimmung der Schraubendehnung hat den Nachteil, dass es nur an Durchsteckschraubenverbindungen mit ausreichender Zugänglichkeit angewandt werden kann und dass die Schrauben einzeln mit genauesten Messwerkzeugen nachgemessen werden müssen.

Das hydraulische Anziehen von Schrauben basiert auf dieser Grundlage. Hierbei wird der Schraubenbolzen an seinem freien, über die Mutter hinausstehenden Ende gefasst und gegenüber den zu verspannenden Teilen auf Zug belastet. Dadurch hebt sich die Mutter von den verspannten Teilen ab und kann durch Drehen zur Auflage gebracht werden. Beim Entlasten verbleibt eine definierte Vorspannkraft im Schraubenbolzen. Nachteilig ist, dass die Schraube über die spätere Vorspannkraft hinaus belastet werden muss, da das Zurückfedern der verspannten Teile einen Verlust an Montageklemmkraft bedingt. Je nach den Abmessungsverhältnissen von Schraube und verspannten Teilen ergeben sich unterschiedliche Grössen der Vorspannkraft. Sie müssen experimentell ermittelt werden.

## 7. Praktische Versuche

Hochfeste Schrauben haben in der Sicherheitstechnik eine sehr grosse Bedeutung. So werden hochfeste Schrauben für Verbindungen in Baggern, Autokranen und Turmdrehkränen verwendet. Ebenso werden die einzelnen Mastelemente von Turmdrehkränen meistens mit hochfesten Schrauben verbunden. Verschiedene kleinere und z.T. grosse, schwere Unglücksfälle, die einem Versagen von Schraubenverbindungen zuzuschreiben sind, haben viele Anwender von hochfesten Schrauben aufgerüttelt.

Anlässlich von Weiterbildungskursen mit Kranmonteuren und Werkhofchefs sowie Reparatur- und Unterhaltspersonal für Baumaschinen wurde auf das Thema Schrauben eingegangen. Bei der

theoretischen Ausführung konnte festgestellt werden, dass die Teilnehmer, obwohl praktisch alle mit abgeschlossener einschlägiger Berufslehre, die theoretischen Zusammenhänge nicht erfassen können.

Die praktischen Übungen sorgten bei den Teilnehmern für Überraschungen. Insbesondere konnte ihnen ihre Selbstüberschätzung in bezug auf das «richtige Gefühl» für das Anziehen von Schrauben mit Gabelschlüssel bewiesen werden.

### 7.1 Versuchsaufbau

In einen Schraubstock wurden Vierkant-Hülsen mit einer Ausfräsung für den Kopf einer Sechskantschraube M 16 8.8 eingespannt. Zum Anziehen der Mutter benötigte man somit keinen Gegen Schlüssel.

Die Schraube wurde auf beiden Seiten mit einer Zentrierbohrung versehen. Ein Messbügel, an dessen einer Seite ein zugespitzter fester Anschlag und auf der Gegenseite eine Messuhr mit Hundertstel-Teilung angebracht war, erlaubte die Verlängerung der Schraube auf einfache und schnelle Art zu messen. Es wurde eine 250 mm lange Schraube gewählt, um die Auswirkungen zum Bestimmen der Schraubenvorspannkraft infolge von Messfehlern geringzuhalten (Bild 19).

Mit den geometrischen Abmessungen der Schraube wurde für eine Verlängerung von 0,01 [mm] die dazu nötige Kraft errechnet. Die elastische Nachgiebigkeit des Kopfs und der Mutter wurde berücksichtigt. Für die verwendete Sechskantschraube M 16 mit einer Schaftlänge von 204 [mm] und einem Gewindeteil von 22 [mm] ergibt sich für eine Verlängerung von 0,01 [mm] eine Kraft von 1700 [N].

### 7.2 Versuchsdurchführung

An 3 Arbeitsplätzen standen den Teilnehmern nebst einem Schraubstock Ringschlüssel und Drehmomentschlüssel, Maschinenöl und 3 Vierkant-Hülsen sowie 3 Schrauben mit Mutter und Unterlagscheiben zur Verfügung.

In einem 1. Durchgang musste mit dem Ringschlüssel die Mutter nach «Gefühl» auf 75 000 [N] angezogen werden. Insgesamt wurde diese Übung von jedem Teilnehmer 3mal durchgeführt. Nach jedem Durchgang wurde die Schraubenverlängerung gemessen und anschliessend die Mutter wieder gelöst und der Vorgang wiederholt. In einer 2. Übung mussten die Schrauben wiederum vorgespannt werden, diesmal jedoch mit dem Drehmomentschlüssel. Vorgegeben wurden 3 verschiedene Reibfaktoren und die entsprechenden Anzugdrehmomente. Dieser Versuch wurde 6mal durchgeführt.

Nach den ersten 3 Versuchen musste ein anderes Anzugdrehmoment gewählt werden. Der Schmierzustand musste von den Teilnehmern selbst bestimmt werden.

### 7.3 Versuchsergebnisse

Nachfolgend wird auf Fehlerbetrachtungen und Normalverteilung bewusst verzichtet. Es werden nur einzelne interessante Werte betrachtet.

#### 7.3.1 Ergebnisse mit dem Ringschlüssel

Die Selbstüberschätzung einzelner Teilnehmer wurde sehr deutlich bewiesen. So konnten Werte zwischen 25 500 [N] als Minimum bis 57 800 [N] als Maximum gemessen werden (Bild 20). Es lässt sich erkennen, dass die erreichten Werte aus den 3 Versuchen sehr stark streuen.

#### 7.3.2 Ergebnisse mit dem Drehmomentschlüssel

Rund jeder 3. Teilnehmer war nicht in der Lage, die angegebenen Reibwerte richtig zu interpretieren. So nahmen verschiedene Teilnehmer den kleinsten Reibwert und das entsprechend kleine Anzugmoment für trockene Verhältnisse an. Andere wiederum meinten, das höchste Anzugmoment und der dazugehörige hohe Reibwert gelte für die geölte Schraube. Die von je 2 Teilnehmern erzielten Vorspannkraft für ein bestimmtes Anzugmoment sind in Bild 21 dargestellt.

Die Formel für das Gesamtanzugmoment kann auch wie folgt geschrieben werden:

$$M_A = F_M \frac{p}{2\pi} + F_M \frac{d_2}{2} 1,155 \mu_G + F_M \frac{D_a^3 - D_i^3}{3(D_a^2 - D_i^2)} \mu_K$$

Gewin- desteig- moment	Gewinde- reihmoment	Kopfauf- lage- reihmoment
------------------------------	------------------------	---------------------------------

Der Term für das Kopfauflagereihmoment entspricht hier etwas mehr den theoretischen Erkenntnissen. Die in Tabellenwerken errechneten Werte basieren meistens auf diesem Ausdruck.

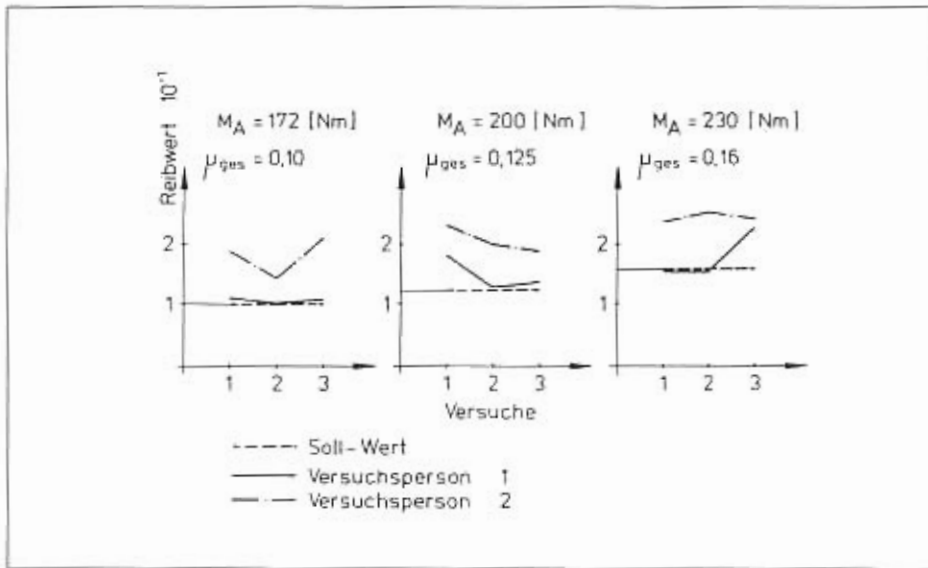
Setzt man den Reibwert für das Gewinde gleich dem Wert für die Kopfaufgabe, so wird

$$\mu_G = \mu_K = \mu_{\text{ges}}$$

In diesem Falle lässt sich bei bekanntem Anzugmoment und bekannter Vorspannkraft der effektiv vorhandene Reibwert leicht berechnen:

$$\mu = \frac{M_A - \frac{1}{\pi} F_M}{\frac{d_2}{2} - \frac{D_a^3 - D_i^3}{3(D_a^2 - D_i^2)}}$$





**Bild 22**  
Darstellung der Soll- mit den Ist- und  $\mu$ -Werten für verschiedene Anzugdrehmomente.

Für eine Schraube M 16 betragen die Daten:

- $P = 2 \text{ [mm]}$
- $d_2 = 14,701 \text{ [mm]}$
- $d_k = 23,16 \text{ [mm]}$
- $D_i = 17,5 \text{ [mm]}$

Setzt man diese Werte und die Vorspannkraft und Anzugdrehmomente aus Bild 21 in die Formel ein, erhält man die in Bild 22 dargestellten Reibwerte.

**7.4 Diskussion der Versuchsergebnisse**

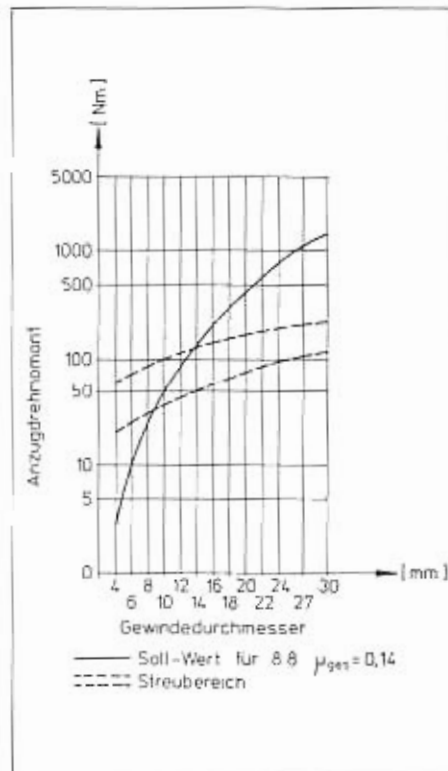
**7.4.1 Ringschlüssel**

Wie aus Bild 20 ersichtlich, ist es nicht möglich, Schrauben mittels Ringschlüssel mit «Gefühl» und «Erfahrung» auf eine vorgegebene Vorspannkraft anzuziehen. Die Schlüssellänge, die Kondition des Monteurs, seine Bequemlichkeit und noch weitere Einflussfaktoren spielen eine grosse Rolle. Zu beurteilen, ob die Schraube tatsächlich eine genügende Vorspannkraft aufweist, ist nicht möglich. Aus Untersuchungen weiss man, dass vor allem dickere Schraubenverbindungen höherer Festigkeitsklassen nicht genügend angezogen werden können (Bild 23).

Wichtige Schraubenverbindungen lassen sich von Hand nicht auf eine zu gewährleistende Vorspannkraft anziehen. Das gleiche kann gesagt werden für grosse Schraubenverbindungen, welche oft mit Ringschlagschlüssel und Vorschlaghammer angezogen werden.

**7.4.2 Drehmomentschlüssel**

Die Erfahrungen mit dem Drehmomentschlüssel zeigen, dass Angaben über Anzugmomente in Funktion der Reibfaktoren sinnlos sind. Die Monteure sind nicht in der Lage, die Angaben richtig zu interpretieren. Aus den 3 folgenden Angaben, wie sie in Betriebsanleitungen für das Anziehen von hochfesten Schrauben zu fin-



**Bild 23**  
Streuung der beim Handanziehverfahren mit Ringschlüssel erreichten Anzugdrehmomente im Vergleich zu den Sollwerten.

den sind, lassen sich für eine Vorspannkraft von 75000 [N] für eine M-16-8.8-Schraube folgende Reibwerte errechnen:

Schraube M 16 8.8	Minimal	Nominal	Maximal
Anziehmoment [Nm]	170	215	260
Reibfaktor	0,104	0,136	0,168

Angaben wie minimal, nominal, maximal sind ebenso sinnlos, da sie keinen Hinweis auf den Schmierzustand der Schraube und der Auflageflächen geben.

Für den Praktiker sind Angaben aus seiner täglichen Arbeitswelt zu verwenden. Es sind Angaben, wie Schrauben trocken, geölt oder mit molybdändisulfidhaltigem Fett geschmiert, zu verwenden. Das sind Grössen, welche der Monteur beurteilen kann.

**8. Kontrolle der Schraubenverbindung**

Damit eine hochbeanspruchte Schraubenverbindung ihre Funktion richtig erfüllen kann, muss Gewähr bestehen, dass die aufgebrachten Vorspannkraft während des Betriebs erhalten bleiben. Weil sich das Material setzt, muss die Schraubenverbindung erstmals 2-8 Wochen nach der Inbetriebnahme der Verbindung kontrolliert werden. Dabei sind sämtliche Schrauben mit dem Drehmomentschlüssel oder mit einer Spannvorrichtung zu überprüfen.

Periodische Kontrollen an seit längerer Zeit in Betrieb stehenden Verbindungen sind je nach Einsatzart nach 1000 und 2000 Betriebsstunden durchzuführen.

Bevor mit der Kontrolle begonnen wird, ist die Verbindung von einer allfällig wirkenden Betriebskraft möglichst gut zu entlasten. Bei Rotationsverbindungen, wie sie in Kugeldrehkränzen von Baggern und Kranen vorkommen, sind die Schraubenverbindungen durch Kompensationsgewichte an der Maschine zu entlasten. Die nötigen Angaben sind allenfalls beim Hersteller zu erfragen. Die Schraubenverbindung ist auch auf mechanische Beschädigung oder Rost zu kontrollieren. Gegebenenfalls sind die Schrauben zu ersetzen.

**8.1 Kontrolle mit Drehmomentschlüssel**

Für die Kontrolle empfiehlt es sich, wie folgt vorzugehen: Markieren der Position der Mutter zur Schraube; Lösen der Mutter; Anziehen der Mutter mit 80% des vorgegebenen Spannmoments.

Es können sich dann 2 Fälle ergeben.

## 1. Fall

Die Mutter lässt sich drehen, bis die darauf angebrachte Markierung die Markierung auf der Schraube erreicht bzw. diese überschreitet. In diesem Fall sind Schraube und Mutter zu ersetzen.

## 2. Fall

Die Mutter lässt sich nicht so weit drehen, dass die Markierung auf der Mutter jenseits der Schraube erreicht. Jetzt ist die Mutter mit 100% des vorgesehenen Spannungsmoments anzuziehen.

## 8.2 Kontrolle mit Spannvorrichtung

Für die Kontrolle empfiehlt es sich, wie folgt vorzugehen: Schraube mit 80% der Vorspannkraft belasten; kontrollieren, ob sich die Mutter drehen lässt.

Es können sich dann zwei Fälle ergeben.

## 1. Fall

Die Mutter lässt sich drehen. In diesem Fall sind Schraube und Mutter zu ersetzen.

## 2. Fall:

Die Mutter lässt sich nicht drehen. Die Schraube wird mit 100% der Vorspannkraft belastet. Wenn nötig, ist die Mutter bis auf die Auflage nachzuziehen.

## 9. Wiederverwendbarkeit der Schraube

Hochfeste Schrauben, welche mit dem angegebenen Anzugsdrehmoment belastet worden sind, können auch bei weiteren Montagen wieder verwendet werden. Es ist darauf zu achten, dass das Gewinde und die Kopfaufgabe frei von Beschädigungen und frei von Rostansätzen sind. Bei der Wiederverwendung gebrauchter Schrauben ist zu kontrollieren, ob die vom Hersteller verlangte Schraubenqualität tatsächlich vorliegt. Ebenso muss kontrolliert werden, ob Schraubenkopf und Mutter plan aufliegen, so dass Gewähr besteht, dass die Schraube keine zusätzliche Biegekräfte aufnehmen muss. Die Angaben des Herstellers müssen zur Verfügung stehen und eingehalten werden. *Mit der Kontrolle hochbeanspruchter Schraubenverbindungen dürfen nur verantwortungsbewusste Leute mit ausreichender Ausbildung und Erfahrung beauftragt werden.* ■

## Literatur

Richtlinie VDI 2230: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen. Köln und Berlin, Beuth-Verlag GmbH, 1977.

Schrauben-Vademecum; *Ilgner, K. H. und Blane, D.*: Veröffentlichung der Bauer- und Schaurte Kärcher GmbH.

*Junker, G. und Strelow, D.*: Untersuchungen über die Mechanik des selbsttätigen Lösen und die zweckmäßige Sicherung von Schraubenverbindungen, *Draht-Welt* 52 (1966), H. 2, 3 und 5.

*Strelow, D.*: Wann welche Schraubensicherung? *VDI-Z* (1979), Nr. 12-Juni.

$D_a$	Aussendurchmesser der Kopf- oder Mutterauflage	$M_{GA}$	Im Gewinde wirksamer Teil des Anziehdrehmomentes
$D_i$	Lochdurchmesser der verspannten Teile	$M_K$	Reibungsmoment in der Kopfaufgabe
$D_{km}$	Wirksamer Durchmesser für das Reibungsmoment in der Schraubenkopf- oder Mutterauflage	$M_L$	Losdrehmoment
$F$	Kraft, allgemein	$P$	Steigung des Gewindes
$F_A$	Axiale Betriebskraft	$\delta$	Gewindeaussendurchmesser
$F_{KR}$	Restklemmkraft in der Trennfuge allgemein	$d_2$	Flankendurchmesser des Gewindes
$F_{KR1}$	Klemmkraft in der Trennfuge nach der Montage	$f_{PM}$	Verkürzung der verspannten Teile durch $F_M$
$F_{KR2}$	Klemmkraft in der Trennfuge bei Entlastung durch $F_{PA}$ und Setzen im Betrieb	$f_{SM}$	Verlängerung der Schraube durch $F_M$
$F_M$	Montagevorspannkraft	$f_Z$	Plastische Verformung durch Setzen, Setzbetrag
$F_{SM}$	Montagevorspannkraft auf die Schraube	$f_{ZF}$	Plastische Verformung durch Setzen der verspannten Teile
$F_{PM}$	Montagevorspannkraft auf die verspannten Teile	$f_{ZS}$	Plastische Verformung durch Setzen der Schraube
$F_{Mmax}$	Montagevorspannkraft, für die eine Schraube ausgelegt werden muss, damit trotz Ungenauigkeit des Anziehverfahrens und zu erwartender Setzbeträge im Betrieb die erforderliche Klemmkraft in der Verbindung erzeugt wird und erhalten bleibt	$l_K$	Klemmlänge
$F_{Mmin}$	Kleinste Montagevorspannkraft, die sich bei $F_{Mmax}$ infolge Ungenauigkeit des Anziehverfahrens einstellt	$\alpha$	Flankenwinkel des Gewindes
$F_{PA}$	Anteil der Axialkraft, der die verspannten Teile entlastet	$\alpha_A$	Anziehfaktor $F_{Mmax}/F_{Mmin}$
$F_{SA}$	Anteil der Axialkraft $F_A$ , der die Schraube zusätzlich belastet	$\mu_G$	Reibungszahl im Gewinde
$F_V$	Vorspannkraft, allgemein	$\mu_{ges}$	Mittlere Reibungszahl für Gewinde und Kopfaufgabe
$F_{V1}$	Vorspannkraft vor dem Setzen	$\mu_K$	Reibungszahl für Kopfaufgabe
$F_{V2}$	Vorspannkraft nach dem Setzen	$\rho'$	Reibungswinkel für das Gewinde mit Flankenwinkel $\alpha = 60^\circ$ , $\arctan 1,155 \mu_G$
$F_Z$	Vorspannkraftverlust infolge Setzens im Betrieb	$\sigma_{red}$	Reduzierte Spannung, Vergleichsspannung
$M_A$	Anziehdrehmoment für die Montage	$\varphi$	Steigungswinkel des Gewindes $\arctan \frac{P}{\pi d_2}$
		$\sigma_{0,2}$	Streckgrenze, 0,2%-Dehngrenze des Schraubenwerkstoffes