Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 119/120 (1942)
Heft: 11

Artikel: Schraubenverbindungen - Stand der Technik
Autor: Martinaglia, L.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-52326

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

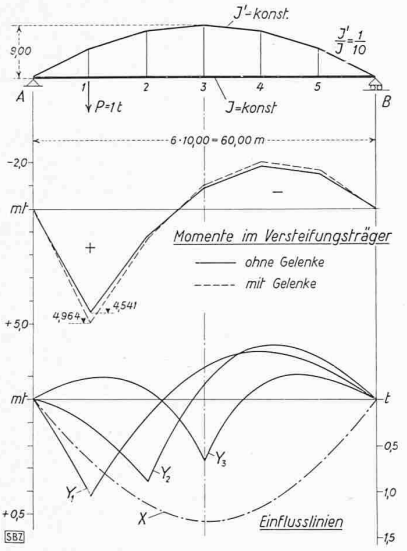


Abb. 3 veranschaulicht das Ergebnis der Rechnung; sie zeigt auch den Verlauf der Einflusslinien der statisch unbestimmten Grössen, die durch die Berechnung für $P = 1$ t in 2 und 3 erhalten wurden.

Abb. 3. Berechnungsbeispiel

Zahlenbeispiel. Der Stabbogen der Abb. 3 wird für eine Last $P = 1$ t, im Punkt 1 angreifend, untersucht. Die Verschiebungsgrössen sind in Tabelle 1 berechnet; hierbei wurde $J_c = J$ angenommen, also ist $i = 1$ und $i' = 10$.

Tabelle 1: Verschiebungsgrössen

	y	sec φ	A [1])	B [2])
A	0			$5{,}000 = -\mu\alpha_{Ax}$
1	5,00	1,1180	25,00	$28{,}000 = -\mu\alpha_{1x}$
2	8,00	1,0440	129,00	$46{,}000 = -\mu\alpha_{2x}$
3	9,00	1,0050	217,00	$52{,}000 = -\mu\alpha_{3x}$

$$\sum_A^B = 742{,}00$$

$$\mu\delta_x = 2 \cdot 742{,}00 = 1484{,}00 \text{ m}^2$$

(Forsetzung siehe rechts oben)

[1]) $A = y_{m-1}{}^2 + y_{m-1}\, y_m + y_m{}^2$

[2]) $B = y_{m-1} + 4\, y_m + y_{m+1}$

[3]) $C = 2\, M_{0\,m-1}\, y_{m-1} + M_{0\,m-1}\, y_m + M_{0\,m}\, y_{m-1} + 2\, M_{0\,m}\, y_m$

[4]) $D = M_{0\,m-1} + 4\, M_{0\,m} + M_{0\,m+1}$

	M_0	C [3])	D [4])
A	0		$8{,}333 = \mu\alpha_{A0}$
1	8,333	83,33	$40{,}000 = \mu\alpha_{10}$
2	6,667	290,00	$40{,}000 = \mu\alpha_{20}$
3	5,000	296,67	$30{,}000 = \mu\alpha_{30}$
4	3,333	213,33	$20{,}000 = \mu\alpha_{40}$
5	1,667	100,00	$10{,}000 = \mu\alpha_{50}$
B	0	16,67	$1{,}667 = \mu\alpha_{B0}$

$$\sum_A^B = 1000{,}00 \text{ m}^2\text{t} = -\mu\delta_0$$

$$\mu\alpha_{AA} = 2\,(1 + 11{,}180) = 24{,}360$$
$$\mu\alpha_{11} = 2\,(1 + 11{,}180 + 10{,}440 + 1) = 47{,}240$$
$$\mu\alpha_{22} = 2\,(1 + 10{,}440 + 10{,}050 + 1) = 44{,}980$$
$$\mu\alpha_{33} = 2\,(1 + 10{,}050 + 10{,}050 + 1) = 44{,}200$$

$$\mu\alpha_{A1} = 1 + 11{,}180 = 12{,}180$$
$$\mu\alpha_{12} = 1 + 10{,}440 = 11{,}440$$
$$\mu\alpha_{23} = 1 + 10{,}050 = 11{,}050$$

Nehmen wir als Näherungswert für X den Horizontalschub des gelenkigen Stabbogens

$$H = X_s = \frac{1000{,}00}{1484{,}00} = 0{,}67385 \text{ t}$$

so erhalten wir folgendes Gleichungssystem, wobei die L-Werte nach (4) berechnet sind, z. B.

$$\mu L_1 = 0{,}67385 \cdot (-28{,}000) + 40{,}000 = +21{,}132$$

Y_A	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_B	L
24,360	12,180						+ 4,964
12,180	47,240	11,440					+21,132
	11,440	44,980	11,050				+ 9,003
		11,050	44,200	11,050			— 5,040
			11,050	44,980	11,440		— 10,997
				11,440	47,240	12,180	— 8,868
					12,180	24,360	— 1,703

Die Lösungen sind aus der ersten Zeile der Tabelle 2 (unten) ersichtlich; aus ihnen lässt sich der verbesserte Wert von X gemäss (5) berechnen:

$$\overline{X} = -\frac{-1000{,}00 - 0{,}41}{1484{,}00} = 0{,}67413 \text{ t}$$

Eine Wiederholung der Rechnung mit $\overline{X}$ gibt die Lösungen der zweiten Zeile, und $\overline{\overline{X}} = 0{,}67415$ t. (X_s nach Gleichung (3) beträgt 0,67735 t).

Tabelle 2: Momente im Stabbogen

Y_A	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_B	
+0,0066	−0,4207	−0,1171	+0,0973	+0,1841	+0,1436	−0,0019	mt
+0,0066	−0,4206	−0,1169	+0,0975	+0,1843	+0,1437	−0,0019	mt

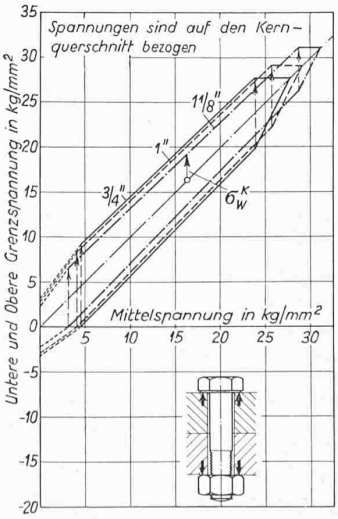
Schraubenverbindungen — Stand der Technik

Von Dipl. Ing. L. MARTINAGLIA, Winterthur, Ingenieur der Zentralstelle für Gestaltfestigkeitsfragen bei Gebr. Sulzer A.-G.

(Schluss von Seite 112)

5 Werkstoff und Herstellung. Festigkeitswerte

51 *Durch spanabnehmende Verfahren aus Normalstählen hergestellte Schrauben.* Die bis heute durchgeführten Dauerversuche an geschnittenen Mutterschrauben aus normalen Schraubenstählen sind in dem Dauerfestigkeitsschaubild (Abbildung 34) zusammengefasst. Man erkennt aus diesem Schaubild die schon erwähnte, für alle Schraubenverbindungen gültige grundsätzliche Tatsache, dass für die Dauerhaltbarkeit einer wechselnd belasteten Schraube nicht die absolute Höhe der Beanspruchung (= Vorspannung + Anteil der Betriebskraft) massgebend ist, sondern allein die Differenz zwischen der auftretenden kleinsten und grössten Beanspruchung in der Schraube. Der ertragbare Spannungsausschlag σ_W^K ist praktisch über den ganzen nutzbaren Vorspannungsbereich gleich gross; die Höhe der Vorspannung übt nur einen geringen Einfluss auf die Grösse von σ_K^W aus. Bei geringerer oder fehlender Vorspannung nimmt allerdings der ertragbare Spannungsausschlag wesentlich ab. Der Einfluss des Schraubendurchmessers geht ebenfalls aus dem angeführten Schaubild hervor. Mit zunehmender Grösse scheint bei geschnittenen Schrauben die Zugdauerhaltbarkeit nach der Kurve Abb. 35 abzufallen; kleinere Schrauben zeigen grössere Dauerhaltbarkeiten. Versuche an grösseren Schrauben fehlen; ebenso konnte kein eindeutiger Einfluss der Gewindefeinheit auf den ertragbaren Spannungsausschlag nachgewiesen werden.



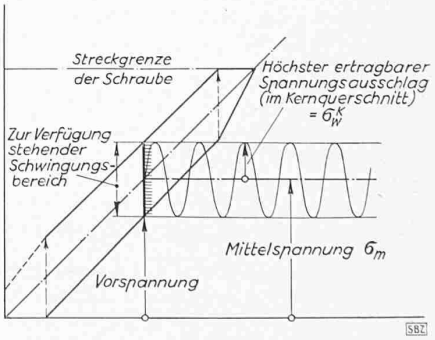


Abbildung 34. Dauerfestigkeits-Schaubild einiger Normschrauben mit Whitworthgewinde

Festigkeitswerte. Der von normalen, aus dem Vollen geschnittenen, gefrästen oder geschliffenen[3]) Mutterschrauben dauernd ertragbare Spannungsausschlag schwankt etwa innerhalb der Grenzen $\sigma_W^K = \pm 3$ bis 4 kg/mm². Stiftschrauben (Kopfschrauben) sind durch den besseren Kraftfluss im Gewinde (siehe Abschnitt 36) bedeutend dauerfester als die Mutterschraube (Durchsteckschraube). Sitzt die Stiftschraube ausserdem in Gusseisen, so bringt die durch die Nachgiebigkeit des Gusses (kleinerer E-Modul!) kleinere Steifigkeit der Gewindegänge eine bessere Verteilung der zu übertragenden Kraft und damit eine weitere Steigerung. Die Zugdauerhaltbarkeiten für eine aus normalem Werkstoff geschnittene Stiftschraube mit gut gerundetem Uebergang vom Kopf zum Schaft bewegen sich innerhalb folgender Grenzen: Stiftschraube in Stahl $\pm$ 6 bis 7 kg/mm², in Gusseisen $\pm$ 7 bis 8 kg/mm².

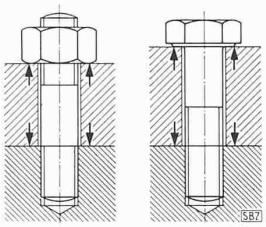


Abb. 36. Bolzen und Stiftschraube

Zur Beachtung: Der übliche Bolzen ist keine Stiftschraube (Abb. 36), sein schwächster Punkt ist die Verbindung Bolzen - Mutter. Für diese Stelle gelten die unter Mutterschraube gegebenen Festigkeitswerte.

52 *Durch spanabnehmende Verfahren aus hochfesten oder legierten Stählen hergestellte Schrauben.* Bei Schrauben, die in üblicher Güte und normaler Gewindeform durch Schneiden, Fräsen oder Schleifen aus dem Vollen hergestellt werden, kann durch Anwendung eines Werkstoffes von höherer Zugfestigkeit und damit höherer Wechselfestigkeit (am glatten, polierten Prüfstab) nur eine geringe Steigerung der Zugwechselhaltbarkeit erreicht werden. Mit zunehmender Zugfestigkeit steigt auch die Kerbempfindlichkeit der Stähle in starkem Masse. Der mit hochfesten Stählen bei glatten, ungekerbten Bauteilen erzielte Gewinn an Wechselfestigkeit geht bei gekerbten Konstruktionselementen durch die stärkere Kerbempfindlichkeit wieder weitgehend verloren.

53 *Werkstoffwahl für geschnittene Schrauben.* Für die Wahl eines Werkstoffes für wechselbeanspruchte Schrauben ist demnach nicht seine am glatten Probestab ermittelte Dauerfestigkeit massgebend. Wichtiger sind die Kerbempfindlichkeit und die Streckgrenze des Werkstoffes. Hohe Streckgrenze gestattet die Anwendung einer nützlichen hohen Vorspannung und verringert die Gefahr des Abwürgens kleinerer Schrauben.

Die Anwendung von hochfesten und legierten Stählen hat bei Schrauben nur einen Sinn:

1. Wenn relativ kleine Schrauben (unter 20 mm ∅ bzw. $^3/_4$'') aus konstruktiven (Gefahr der Zwangsverformung) oder Festigkeitsgründen (hochbelastete Schrauben) grosse Dehnlängen haben müssen. Dann besteht die Gefahr, dass der Dehnschaft beim Anziehen mit dem normalisierten Schlüssel abgewürgt wird. Die höhere Streckgrenze schafft hier Sicherheit.
2. Wenn Schrauben grösserer Abmessungen aus Betriebsgründen eine sehr hohe Vorspannung erhalten müssen.
3. Wenn die Schraubenverbindung warmfest sein muss.

Werden aus einem der drei genannten Gründe Spezialstähle gewählt, so ist zu beachten:

1. Man verwende «weiche» Spezialstähle mit grosser Dehnung und Einschnürung ohne im Verhältnis zur Zerreissfestigkeit zu hoher Streckgrenze. Solche Stähle sind wenig kerbempfindlich.
2. Man vermeide hochlegierte Vergütungsstähle, sie sind sehr kerbempfindlich, ein Festigkeitsgewinn lässt sich nicht erreichen. Ausserdem wird bei Durchmessern über 1'' die Durchvergütung schon sehr ungleichmässig.
3. Warmbehandlung (Vergüten, Härten) nach Gewindeherstellung ist schädlich (Aufrauhen der Oberfläche, Zunderhaut, Randentkohlung), die Zugwechselhaltbarkeit wird dadurch erniedrigt.

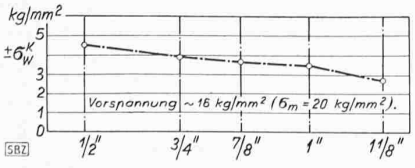


Abb. 35. Abfall der Dauerfestigkeit mit zunehmender Schraubengrösse bei normalem Whitworthgewinde

[3]) Geschnittene Schrauben zeigen im allgemeinen eine etwas höhere Zugwechselhaltbarkeit als geschliffene. Die Schneidbacken rufen eine gewisse plastische Verformung im Gewindegrund hervor, wirken also — allerdings in bedeutend geringerem Masse — wie das festigkeitsteigernde Oberflächendrücken (Rollen des Gewindegrundes).

Eine Ausnahme bildet das Nitrieren, das beträchtliche Steigerungen der Zugwechselhaltbarkeit zur Folge hat. Nitrieren von Gewinden bedingt aber besondere konstruktive und herstellungstechnische Massnahmen, um volle Erfolge zu verbürgen. Allgemein ist zu sagen: Die besten Werkstoffe für die Herstellung von spanabnehmend erzeugten Schrauben sind die unlegierten Weichstähle. Sie besitzen ausreichend hohe Festigkeitseigenschaften (Streckgrenze $\sigma_S \approx 28$ kg/mm², Zerreissfestigkeit $\sigma_B = 45$ bis 55 kg/mm²) zeigen grosse Dehnung ($\delta_{10\,min} = 20\,\%$) und Einschnürung, sind kerbschlagzähe und wenig kerbempfindlich. Die Eigenschaften von Weichstahl reichen für praktisch alle Fälle der Schraubenverbindungen des normalen Maschinenbaues aus.

54 *Spezialverfahren.* Verschiedene Schraubenhersteller bringen Spezialschrauben auf den Markt, bei denen durch bestimmte Formgebungs- und hochentwickelte Vergütungsverfahren Dauerfestigkeitswerte erreicht werden, die jene von geschnittenen Schrauben um das Doppelte und mehr übertreffen. Diese Schrauben haben sich in Kürze bedeutende Anwendungsgebiete erobert, besonders im Leichtbau sind sie heute schon als unentbehrlich anzusprechen. Der Konstrukteur kann mit diesen Schrauben leichter und damit wirtschaftlicher bauen, da die Schraubengrösse die Ausmasse aller Flanschen, Bunde, Verstärkungen u. ä. Formelemente zur Aufnahme von Gewindelöchern beeinflusst. Ausserdem sind diese hochfesten Schrauben durch ihre hochliegende Streckgrenze weitgehend gegen Abwürgen geschützt. Neben sorgfältiger Werkstoffauswahl und Vergütung wird die Festigkeitssteigerung hauptsächlich durch die Herstellung des Gewindes erreicht. Die Gewinde werden kalt gerollt, d. h. durch Eindrücken profilierter Gewindewalzen im kalten Zustand erzeugt. Bei kleineren Schrauben wird die Gewindeform *vollständig* durch Kaltwalzen erzielt, wobei im allgemeinen die Zugwechselhaltbarkeit solcher Schrauben nicht sehr wesentlich über jener geschnittener Schrauben liegt.

Bei grösseren Schrauben kann man durch blosses Nachrollen des Gewindegrundes (Oberflächendrücken) der durch Schneiden, Schleifen oder Fräsen erzeugten Gewinde ausserordentliche Steigerungen der Zugwechselhaltbarkeit erreichen. Besonders erfolgreich arbeitet man, indem man das vorgeschliffene oder geschnittene Gewinde nur am Gewindegrund nachrollt. Ist man bei unsauberer Vorbearbeitung dazu gezwungen, das ganze Gewindeprofil nachzurollen, so besteht die Gefahr, dass der am höchsten beanspruchte Gewindegrund nicht gleichmässig von der Drückrolle erfasst wird.

Neben der Glättung der Oberfläche und Verdichtung der Oberflächenschicht wird der Hauptteil des Festigkeitsgewinnes den bleibenden Druckeigenspannungen zuzuschreiben sein, die durch die plastische Verformung der Oberflächenschicht entstehen (Abb. 37). Nachgedrückte Gewinde eignen sich deshalb besonders auch für Schrauben, die hohe Biegewechselspannungen ertragen müssen.

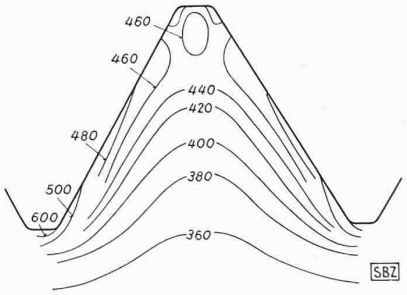


Abb. 37. Härteverteilung in einem kaltgerollten Gewinde

Wärmebehandlung nach dem Rollen ist schädlich weil das vom Rollen herrührende Druck-Eigenspannungssystem verschwindet.

Das Nachrollen von Schrauben — besonders auch der grösseren — dürfte auch für den normalen Maschinenbau Bedeutung gewinnen, wenn genügende Erfahrungen vorliegen, da es sich um ein wirkungsvolles und relativ einfaches Verfahren handelt. Mit richtig nachgedrückten, darum hochfesten Schraubenverbindungen wird man Raum und Gewicht sparen können.

Bei hochfesten Massenschrauben kann durch das Aufstauchen des Kopfes ein ununterbrochener Faserverlauf erreicht werden, sodass auch der Kopfübergang erhöhte Festigkeit besitzt.

55 *In Leichtmetall sitzende Schrauben.* Mit ihrem Gewinde in Leichtmetall sitzende Schrauben verlangen besondere konstruktive Vorsicht; die bei Stahl und Guss seit Jahrzehnten bewährten Einschraublängen lassen sich nicht ohne Gefahr übertragen. Bei Leichtmetallen haben sich Einschraublängen von 1,5 bis 2 · d bewährt; bei gegossenen Leichtmetallen geht man nicht unter 2 · d. Besondere Sorgfalt ist den Sacklöchern für Stiftschrauben oder Bolzen zu schenken (Abb. 38).

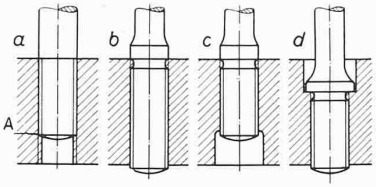


Abb. 38. Gewindelöcher in Leichtmetall
a Uebliche ungünstige Ausführung. A = Dauerbruch.
b Beseitigung der Dauerbruchgefahr durch übernormale Länge des Gewindes, Dehnschaft.
c Normale Gewindelänge, Bolzengewinde übergreifend. Teuer oder bei Unzugänglichkeit undurchführbar.
d Durchgehende Schraube mit normaler Gewindelänge, Bund und vergrösserte Dehnlänge. Weitgehende Entlastung der Schraube von Biegebeanspruchung. Beste Ausführung

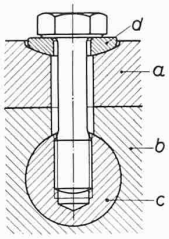


Abb. 39. Ausführungsform für eine häufig zu lösende Stiftschraube bei Leichtmetallteilen.
a Leichtmetall.
b Leichtmetall-Gussteil.
c Eingegossener Stahlzylinder.
d Grosse Unterlagsplatte

Verschiedentlich (hauptsächlich im Flugmotorenbau) werden die Schwierigkeiten mit den Sacklöchern für Bolzen umgangen, indem das im Leichtmetall sitzende Bolzengewinde grösser als das mutterseitige ausgebildet wird. Dies ist bei Flanschverbindungen ohne Gewichtsvermehrung möglich, da die Flanschbreite meist allein von den Mutterdimensionen abhängt.

In Leichtmetall sitzende Stiftschrauben, die öfters gelöst werden müssen, sind zu vermeiden, weil sie mit der Zeit lose werden. Sie sind am besten gegen Mutterschrauben auszuwechseln; lässt sich das Einschrauben in Leichtmetall nicht vermeiden, so kann man sich durch Eingiessen oder Einpressen von Stahlbüchsen helfen (Abb. 39).

6 Zusammenbau. Vorspannung und Vorspannhaltung

Eine lockere Schraube erträgt nur einen Teil des Spannungsausschlages, der von einer genügend vorgespannten Schraube bei Wechselbelastung ohne Bruchgefahr ertragen wird (Abb. 40).

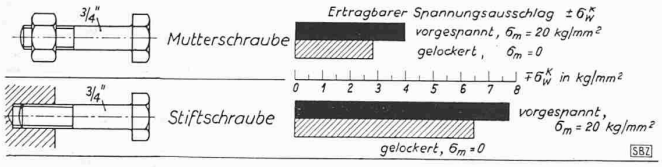


Abb. 40. Zugwechselhaltbarkeit von vorgespannten und lockeren Schraubenverbindungen. Dauerprüfung ohne Zwischenschaltung verspannter Teile, also ohne die in der Wirklichkeit auftretende Schlagbeanspruchung, die die Werte für die lockere Schraube verschlechtern würde

Erhält eine Schraubenverbindung keine oder nur eine ungenügende Vorspannung, oder verliert sie diese während des Betriebes, so wird sie bei wechselnder oder bei schlagartiger Beanspruchung bald zu Bruch gehen.

61 *Vorspannungsverlust im Betrieb.* Die Tatsache, dass eine angezogene Schraube ihre Vorspannung im Betrieb teilweise oder ganz verliert, ist schon längst bekannt. Heute liegen nun Messungen vor, die zeigen, in welcher Weise die Vorspannung bei betriebsgemässer, schwingender Beanspruchung abnimmt (Abb. 41). Diese Versuche haben auch die wahre Ursache des natürlichen Vorspannungsverlustes ergeben. Schon innert der

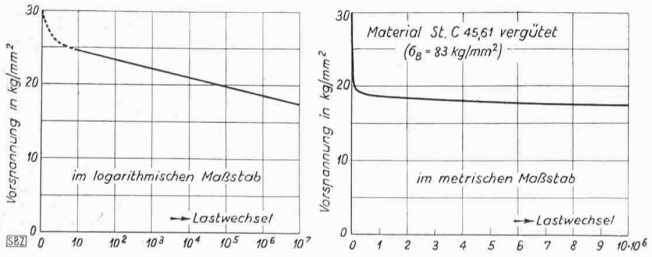


Abb. 41. Abnahme der Vorspannung einer Schraube Grösse M 12 bei schwingender Beanspruchung in der Höhe von 90 % ihrer Dauerhaltbarkeit

ersten zehn Lastspiele nach dem Anziehen verliert die Schraube einen erheblichen Teil ihrer Anfangsvorspannung; bei einer Normalschraube sinkt sie nach 100 000 Lastwechseln schon auf ungefähr 65 % ihres Anfangswertes, um dann unter normalen Verhältnissen nur noch langsam abzunehmen.

62 *Ursachen des Vorspannungsverlustes.* Das Absinken der Vorspannung im Betrieb ist auf die plastische Verformung der Spitzen des Oberflächengebirges (Oberflächenrauhigkeiten) aller im Eingriff stehenden Flächen der Schraubenverbindung zurückzuführen. Geschnittene Gewinde der üblichen Herstellungsgüte zeigen Oberflächenrauhigkeiten mit grössten Höhenunterschieden von 20 bis 40 μ (Abb. 42). Diese Oberflächenrauhigkeiten beeinträchtigen die Lehrenhaltigkeit des Gewindes keineswegs; sie sind für geschnittene Schrauben normal. Beim Anziehen und dann

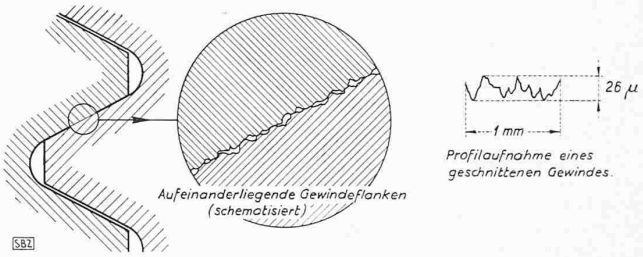
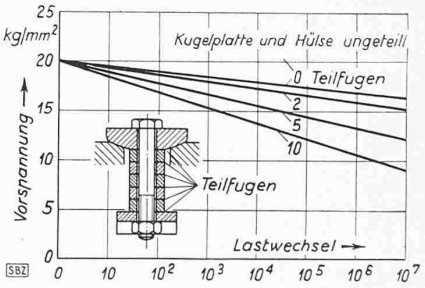


Abb. 42. Oberflächenrauhigkeiten von geschnittenen Gewinden

beim Auftreten der Betriebsbeanspruchung werden die stark belasteten feineren Spitzen des Oberflächengebirges plastisch verformt, die Schraube «setzt sich». Aber nicht nur in den Gewindeflanken, sondern bei allen durch das Anziehen zusammengespannten Flächen der Schraubenverbindung tritt die plastische Verformung der Oberflächenrauhigkeiten auf. Durch die Wechselbeanspruchung werden die Rauhigkeiten aller zusammengespannten Flächen zusammengerüttelt und eingeebnet, zuerst rasch, später an Schnelligkeit ständig abnehmend, ohne dass der Vorgang je zum Stillstand kommt.

63 *Einfluss der Teilfugenzahl.* Es ist darum ohne Zweifel, dass der Vorspannungsabfall umso stärker sein wird, je grösser die Anzahl der Trennfugen ist, die die zusammengepressten Teile der Schraubenverbindung besitzt. Versuche bestätigen dies; je mehr Teilfugen eine Schraubenverbindung aufweist, umsomehr Oberflächengebirge stehen im Eingriff, und umso grösser wird damit der Vorspannungsabfall werden (Abb. 43).

Abb. 43. Einfluss der Teilfugenzahl auf die Vorspannungsabnahme bei gleicher Schlagbeanspruchung (90 % der ertragbaren Dauerschlagarbeit). Bei schlagartiger Beanspruchung stellt sich sofort ein geradliniger Verlauf der Vorspannungskurve ein, während bei schwingender Beanspruchung zuerst ein stärkerer Abfall eintritt



Verbindungen mit vielen Trennungen sind notwendigerweise gegenüber völligem oder teilweisem Vorspannungsverlust bedeutend gefährdeter. Daraus ergeben sich zwei Folgerungen: Erstens ist die Anzahl der Teilfugen möglichst zu beschränken, also sind unnötige Trennungen zu vermeiden. Besondere Beachtung ist den Beilagenpaketen zwischen Maschinenelementen zu schenken, die gegeneinander einstellbar sein müssen; die Anzahl der Beilagen soll auf die unumgänglich notwendige Anzahl beschränkt werden. Zweitens ist bei hochbelasteten oder betriebswichtigen Verbindungen der Oberflächenbearbeitung umso grössere Sorgfalt zuzuwenden, je grösser die Zahl der zusammengespannten Teile ist.

Die Dehnschraube besitzt auch inbezug auf die Vorspannhaltung einen bemerkenswerten Vorsprung gegenüber der Starrschraube. Setzt man bei gleichen zusammengespannten Teilen einer Starrschraube eine Dehnschraube gegenüber und nimmt man für beide Fälle die gleiche Setzung $\Delta\delta$ an, so wird die Dehnschraube die kleinere Vorspannungsabnahme erfahren, wie aus dem Kraft-

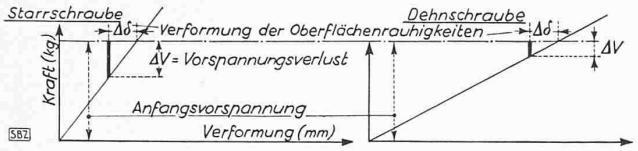


Abb. 44. Einfluss der Starrheit der Schraube auf den Vorspannungsverlust bei gleichen Oberflächenrauhigkeiten

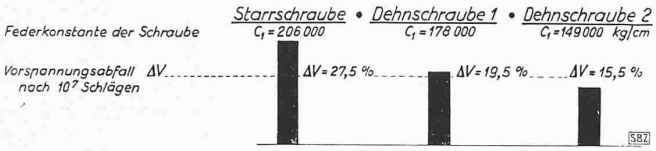


Abb. 45. Einfluss der Starrheit der Schraube auf den Vorspannungsverlust bei gleicher Schlagbeanspruchung in der Höhe von 90 % der ertragbaren Dauerschlagarbeit bei Starrschraubenverbindung

Verformungsschaubild klar hervorgeht (Abb. 44). Dieses Verhalten lässt sich auch versuchsmässig nachweisen (Abb. 45). Bei Verminderung der Schraubensteifigkeit werden, wie aus dem früher Gesagten hervorgeht, die in der Schraube entstehenden Spannungsausschläge kleiner, sodass auch die Vorspannungsabnahme durch die Betriebswirkung kleiner werden muss.

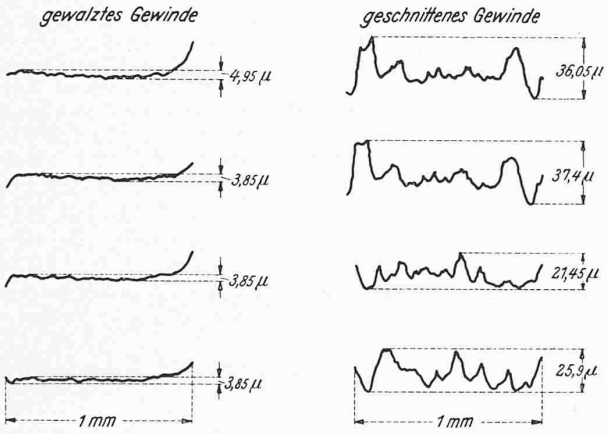


Abb. 46. Oberflächenrauhigkeiten von gewalzten und von geschnittenen Gewinden

64 *Einfluss der Herstellungsart.* Gerollte (mit Drückrollen kaltgewalzte) Gewinde besitzen erheblich glattere Gewindeflanken. Ihr Oberflächengebirge (Abb. 46) weist normalerweise grösste Höhenunterschiede von 3 bis 6 μ auf, gegenüber 20 bis 40 μ bei geschnittenen Gewinden. Die Grösse und das verformbare Volumen der Oberflächenrauhigkeiten ist darum bei gerollten Schrauben bedeutend geringer, der Vorspannungsabfall wird deshalb ebenso kleiner sein. Dies bestätigen Versuche (Abbildung 47). Damit zeigt sich die durch Rollen erzeugte Schraube in den vier Hauptforderungen der geschnittenen Schraube überlegen: Sie ist 1. zugdauerhaltbarer, 2. weniger biegeempfindlich, 3. besitzt sie eine höhere Streckgrenze und ist darum ohne Gefahr des Abwürgens höher vorzuspannen, 4. hält sie die Vorspannung besser.

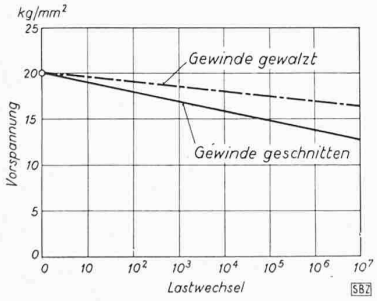


Abb. 47. Einfluss der Gewindeherstellung auf den Verlauf des Vorspannungsverlustes bei gleich hoch schlagbeanspruchten Schraubenverbindungen

65 *Höhe der Vorspannung.* Der Vorspannungsverlust ist in starkem Masse von der Grösse der Anfangsvorspannung abhängig (Abb. 48). Der Abfall ist bei gleicher Wechselbeanspruchung im Betrieb verhältnismässig umso kleiner, je höher die Anfangsvorspannung ist. Eine ungenügend vorgespannte Schraube (z. B. Vorspannung $\sigma_V = 10$ kg/mm²) verliert im obigen Versuchsbeispiel schon nach 100 000 Lastwechseln — bei einer Frequenz von 1500/min — schon nach ungefähr einer Betriebstunde die Hälfte ihrer Vorspannung und ist dann dauerbruchgefährdet. Bei einer um das Doppelte vorgespannten Schraube ($\sigma_V = 20$ kg pro mm²) wird die gleiche Vorspannungsabnahme erst nach einer ungefähr 100 mal längeren Zeit erreicht; nachher sinkt diese nicht wesentlich weiter und niemals unter den Wert, bei dem die Schraube der Dauerbruchgefahr ausgesetzt ist.

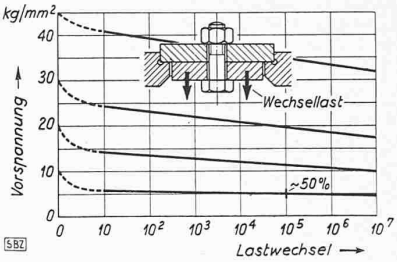


Abb. 48. Einfluss der Anfangsvorspannung auf den Vorspannungsverlust. Schwingende Zugbeanspruchung in der Höhe

66 *Zweckmässige Vorspannung.* Neben der Grösse des Spannungsausschlages besitzt die Höhe der Vorspannung den grössten Einfluss auf die Dauerhaltbarkeit einer wechselbelasteten Schraube. Die Frage nach der Höhe der zweckmässigsten Vorspannung lässt sich aus theoretischen Ueberlegungen nicht beantworten; aus Erfahrung, Versuchen und Betriebsbeobachtungen jedoch hat es sich bewährt, die Schrauben mit 60 % der Streckgrenze des Schraubenmaterials vorzuspannen. Einer Schraube aus Weichstahl mit einer Streckgrenze $\sigma_S = 28$ kg/mm² wird man eine Vorspannung $\sigma_V = 0{,}6 \cdot 28 = 17$ kg/mm² erteilen. Diese Vorspannung ist nicht übertrieben hoch, sondern gerade günstig. Es ist diejenige Vorspannung, die, wie Kontrollmessungen ergeben haben, ein geübter Monteur einer Schraube gefühlsmässig richtig erteilt.

67 *Vorspannvorrichtungen. Messen der Vorspannung.* Als man die ausserordentliche Wichtigkeit der Vorspannung für die Dauerhaltbarkeit der Schraubenverbindung erkannte, wurden Mittel gesucht, um im Montagebetrieb vom stark streuenden Gefühl der Betriebsleute unabhängig zu sein.

Messschlüssel, die die Grösse der aufgewendeten Handkraft anzeigen oder Grenzkraftschlüssel, die das Ueberschreiten eines bestimmten Drehmomentes nicht gestatten, schalten das Gefühl völlig aus. Dies kann auch selbsttätig durch Elektroschrauber oder, besonders für sehr grosse Schraubenverbindungen, durch hydraulische Vorspanneinrichtungen geschehen (Abb. 49). Man erreicht mit diesen Vorspannpressen ein gleichmässiges Anziehen wichtiger Mehrschraubenverbindungen (z. B. Ankerschrauben an Grossdieselmotoren und Transformatoren), ausserdem sind solcherart vorgespannte Verbindungen frei von der sonst mit dem Schlüssel in die Schraube eingeleiteten Verdrehbeanspruchung und können daher höher belastet werden.

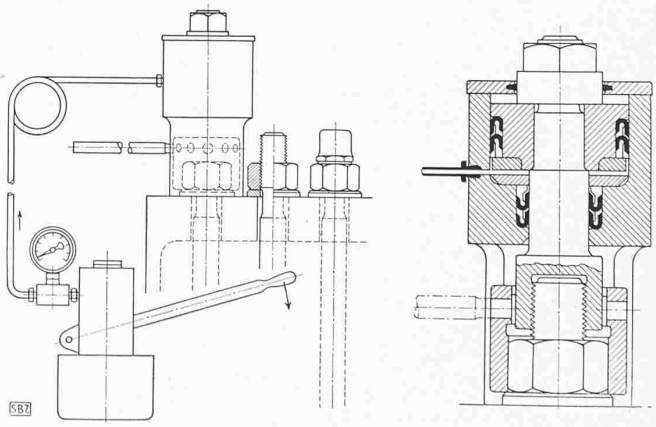


Abb. 49. Hydraulische Vorspanneinrichtung (Vorspannpresse). Durch Oeldruck wird der Anker angezogen, worauf die Mutter leicht bis zum Aufsitzen nachgeschraubt wird. Darauf wird entlastet

Durch Ueberprüfen der Schaftverlängerung kann man die Grösse der mit normalen Mitteln erteilten Vorspannung messen. Die Schraube wird wie üblich mit dem Schlüssel solange angezogen, bis die Messeinrichtung die auf der Zeichnung vorgeschriebene Verlängerung des Schaftes anzeigt (Abb. 50, Seite 126).

Abb. 2. Hauszeichen, Stukkaturen von S. Höscheler

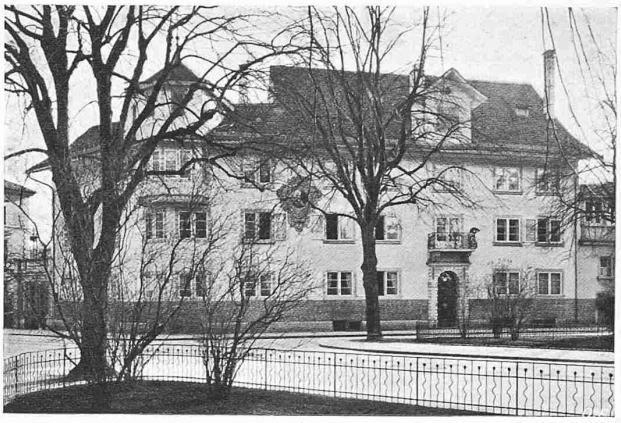


Abb. 1. Der Grosse Pelikan am Pelikanplatz in Zürich, erbaut um 1675

Das Haus zum Grossen Pelikan in Zürich

Geschäftssitz der Firma Locher & Cie., Zürich

Umgebaut 1930/31 durch Arch. ROBERT HÜRLIMANN, Zürich

Um die Mitte des 17. Jahrhunderts, als Zürich den Bau einer neuen Stadtbefestigung mit Eifer betrieb, entstand auch der erste «Bebauungsplan», der eben das Gebiet am Talacker betraf. Entsprechend den Bestimmungen dieses Planes erwarb der Seiden-Fabrikant Jacob Christoph Ziegler ein Grundstück am heutigen Pelikanplatz und liess 1675 darauf ein Haus erbauen für den Betrieb der Firma, die er vor kurzem mit seinem Vater zusammen gegründet hatte. Sein Bruder Leonhard, der auch der Firma angehörte, erstellte bald darauf das lange, niedere Gebäude, das heute «Zum kleinen Pelikan» genannt wird, und schon 1683 vergrösserte Jacob Christoph sein Haus um einen Anbau am Tal-

7 Mehrschraubenverbindungen

71 *Einfluss der Schraubenzahl.* Wie neuere Versuche gezeigt haben, wird die Schwingungsfestigkeit einer Schraubenverbindung höher, wenn man bei gleicher Einspannlänge (z. B. gleicher Flanschdicke) die Anzahl der Schrauben steigert (Abb. 51).

Durch Erhöhung der Schraubenzahl lässt sich bei gleicher Vorspannung der ertragbare Spannungsausschlag erhöhen. Dies lässt sich auf folgende Einflüsse zurückführen:

1. Bei gleicher Einspannlänge wird durch Verwendung dünner Schrauben infolge der Verkleinerung der Federkonstanten die im Betrieb hervorgerufene zusätzliche Wechsellast P_Z (siehe Abschnitt 21) geringer, der auftretende Spannungsausschlag wird kleiner und die Dauerhaltbarkeit der Verbindung darum grösser.
2. Der ertragbare Wechselspannungsausschlag ist bei kleineren Schraubendurchmessern höher als bei grösseren (siehe Abschnitt 44).
3. Die Aufteilung in viele Kraftangriffstellen bringt eine gleichmässigere Kraftverteilung in der Gesamtverbindung mit sich. Bei aussermittig angreifenden Kräften (durch die Betriebsbeanspruchungen und Zwangsverformungen) kommt es zu einer gleichmässigeren Lastverteilung auf die einzelnen Schrauben, wie zu einer Minderung der Spannungsspitzen an den gefährdeten Stellen der verspannten Teile durch bessere Kraftverteilung.
4. Bei zusätzlicher Biegebeanspruchung ist die dünnere Schraube im Vorteil (s. Abschnitt 23).

Ausserdem lässt sich bei Verwendung dünner Schrauben eine Schraubenverbindung leichter halten, da das Schraubengewicht sinkt und die von der Muttergrösse bestimmten Flanschdimensionen kleiner gehalten werden können.

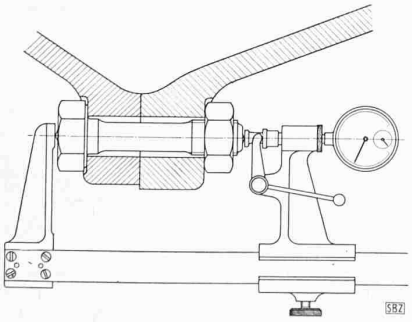
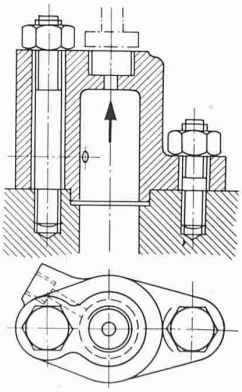


Abb. 50. Messgerät zum Bestimmen der Vorspannung



Falsch: Beim Auftreten der Betriebskraft muss die kürzere Schraube infolge ihrer geringeren Dehnlänge einen grössern Anteil der gesamten Kraft aufnehmen als die längere Schraube.

Ausserdem: Da die aufgenommene Kraft in der längeren Schraube kleiner ist und sie sich mehr dehnt, wird auch der Verformungszustand nicht gleichmässig sein. Auftreten von zusätzlichen Biegebeanspruchungen in den Schrauben und in den zusammengespannten Teilen sind die Folge.

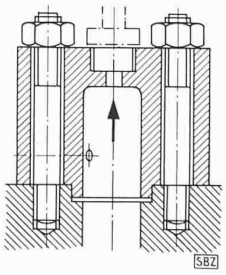


Abb. 52. Mehrschraubenverbindungen.

Richtig: Eine Verbindung stets mit gleich langen Schrauben ausrüsten — dies ist schon aus wirtschaftlichen Gründen gegeben.

Gleich lange Schrauben werden in einer symmetrischen Verbindung gleich hoch belastet und erlauben darum den Verbindungsteilen eine gleichmässige Verformung beim Vorspannen und beim Auftreten der Betriebslasten

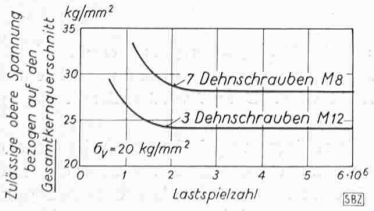


Abb. 51. Dauerhaltbarkeiten von Mehrschraubenverbindungen

72 *Länge der Schrauben.* Die alte Regel, dass bei Mehrschrauben-Verbindungen jeweils nur eine Schraubengrösse anzuwenden ist — sowohl im Gewindedurchmesser als auch in der Länge — wird oft missachtet. Die Beachtung dieser Forderung ist bei wechselnder oder schlagartiger Beanspruchung unbedingt erforderlich (Abb. 52).