

Schraubverbindungen im Maschinenbau

1 Grundsätzliches

1.1 Einflussgrößen bei Schraubverbindungen

Die Funktionserfüllung einer Schraubverbindung wird ausser durch ihre Dimension bestimmt durch:

- Mechanische Größen (Zugfestigkeit, Streckgrenze, Dehnung, Reibzahl)
- Betriebsbedingungen (statisch, dynamisch, Wechselbeanspruchung)
- Umgebungseinflüsse (Temperatur, Korrosion, Erschütterungen)
- Montageart (Vorspannung, Anziehverfahren, Anziehmoment)

Die richtige Schraubenwahl ist somit von grosser Bedeutung für den Funktionserhalt.

1.2 Spannungs-Dehnungs-Diagramm

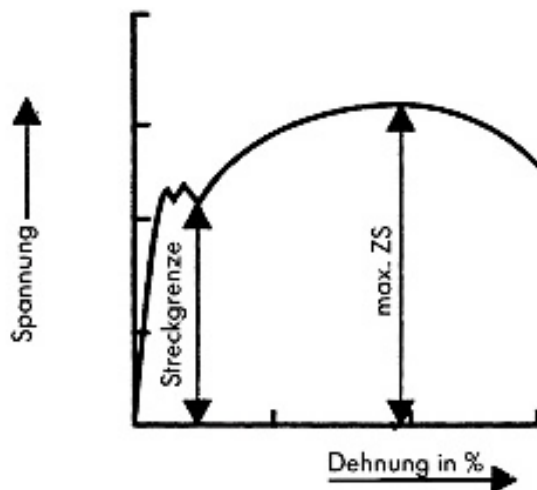


Abb. 1-1
Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Beim Anziehen einer Schraube steigt ihre innere Spannung zunächst steil an (Hookesche Gerade). Mit wenig Dehnung wird eine große Spannung erreicht, die Spannung steigt nicht weiter, sondern sinkt sogar noch ein oder zweimal. Hier ist bereits die **Streckgrenze R_e** erreicht.

Zieht man die Schraube weiter an, so gelangt man vom elastischen in den plastischen Bereich. Die Spannung erreicht dort irgendwann ihren Maximalwert resp. die **Zugfestigkeit R_m** .

Bei noch weiterem Anziehen sinkt die Spannung und es kommt zum **Dehnungsbruch**.

1) Die (untere) **Streckgrenze** ist ein Parameter für die spezifische Zugspannung, bis zu welcher sich ein Werkstoff elastisch verhält und keine plastische Verformung aufweist.

- Wird ein Werkstoff bis zur unteren Streckgrenze belastet, so verformt er sich elastisch. Sobald die Zugkraft aufhört, nimmt er seine ursprüngliche Form wieder ein.
- Wird ein Werkstoff bis zur oberen Streckgrenze belastet, so verformt er sich bleibend (d.h. plastisch) um 0,2 %.
- Wird er darüber hinaus belastet, verformt er sich weiterhin plastisch. Er behält seine neue Form auch dann, wenn die Zugkraft nicht länger auf ihn einwirkt.

2) Die **Zugfestigkeit** ist ein Parameter für die maximale Zugspannung eines Werkstückes im

plastischen Bereich des Spannungs-Dehnungs-Diagrammes.

3) Wird der Werkstoff bis zur **Bruchgrenze** belastet, so kommt es unweigerlich zum Dehnungsbruch.

2 Vergütete Stahlschrauben

2.1 Werkstoffe für Stahlschrauben

Für viele Anwendungen genügen oberflächenbehandelte und vergütete Schrauben. Im einfachsten Anwendungsfall sind es brünierte oder geschwärmte Schrauben aus Kohlenstoffstahl. Höherwertige Schrauben aus legiertem Vergütungsstahl enthalten Zusätze von Chrom, Nickel, Molybdän oder Vanadium.

Tabelle 1 Werkstoffe für Maschinenschrauben		
Festigkeitsklasse	Werkstoff	Kohlenstoffgehalt [%]
8.8	Kohlenstoffstahl vergütet	0,25 – 0,55
	Kohlenstoffstahl vergütet, mit Zusätzen (Bor, Mangan, Chrom)	0,15 – 0,40
9.8	Kohlenstoffstahl vergütet	0,25 – 0,55
	Kohlenstoffstahl vergütet, mit Zusätzen (Bor, Mangan, Chrom)	0,15 – 0,35
10.9	Kohlenstoffstahl vergütet	0,25 – 0,55
	Kohlenstoffstahl vergütet mit Zusätzen (Bor, Mangan, Chrom)	0,15 – 0,35
	Legierter Stahl, vergütet mit Zusätzen (Chrom, Nickel, Molybdän oder Vanadium)	0,20 – 0,55
12.9	Legierter Stahl, vergütet mit Zusätzen (Chrom, Nickel, Molybdän oder Vanadium)	0,20 – 0,50

2.2 Kennzeichnung von vergüteten Stahlschrauben

Sechskant- und Inbusschrauben mit Nenndurchmesser ≥ 5 mm sind auf ihrem Kopf gekennzeichnet mit dem **Herstellerkurzzeichen** und der **Festigkeitsklasse**. Aus der Festigkeitsklasse einer Schraube lässt sich deren Zugfestigkeit und Streckgrenze ermitteln. Als Bezeichnung dienen zwei durch einen Punkt getrennte Zahlen.

Tabelle 2 Festigkeitsklassen von vergüteten Stahlschrauben										
Festigkeitsklasse	3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	9.8	10.9	12.9
Zugfestigkeit [N/mm ²]	300	400	400	500	500	600	800	900	1'000	1'200
Streckgrenze [N/mm ²]	180	240	320	300	400	480	640	720	900	1'080

Beispiel: **FS 8.8** Schraube mit Festigkeitsklasse 8.8 (Zugfestigkeit 800 N/mm², Streckgrenze 640

N/mm²)

a) Die erste Zahl entspricht $1/100$ der Zugfestigkeit R_m .

Zugfestigkeit [N/mm²] = 1. Zahl x 100

b) Die zweite Zahl wird zur Bestimmung der Streckgrenze R_e benötigt; dazu werden beide Zahlen miteinander multipliziert (1. Zahl x 2. Zahl = 0.1 R_e)

Streckgrenze [N/mm²] = 1. Zahl x 2. Zahl x 10

Muttern für Schraubverbindungen für volle Belastbarkeit werden durch eine einzelne Zahl gekennzeichnet (entsprechend der 1. Zahl bei hochfesten Schrauben).



Abb. 2-1
Maschinenschraube
mit Kennzeichnung

Berechnungsbeispiel Schraube

Gegeben sei eine Schraube für den Stahlbau (Abb. 3-1). mit der Festigkeitsklasse **10.9**. Gesucht sind Zugfestigkeit und Streckgrenze.

Zugfestigkeit R_m :

$$1. \text{ Zahl} = 10 = R_m : 100 \rightarrow R_m = 10 \cdot 100 = \mathbf{1'000} \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Streckgrenze R_e :

$$1. \text{ Zahl} \times 2. \text{ Zahl} = 10 \cdot 9 = R_e : 10 \rightarrow R_e = 90 \cdot 10 = \mathbf{900} \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Für industrielle Schraubverbindungen werden standardmässig Schrauben der Klasse **8.8** verwendet, für vorspannbare Schraubverbindungen im Metallbau auch solche der Klasse **10.9**.

Für sichere Verbindungen unter Wechselbelastung oder bei Kalt- und Warmwechsel werden sog. Dehnschrauben verwendet. Sie lassen sich nur mit stetigem Drehmoment sicher festziehen und benötigen zu ihrer Montage den Einsatz eines Drehmomentschlüssels.

2.3 Oberflächenveredelung von Stahlschrauben

Blanke Stahlschrauben neigen an der Luft zum „Rosten“. Ohne Oberflächenbehandlung (Veredelung) wäre die Lebensdauer somit in vielen Fällen beeinträchtigt. Als Schutzverfahren bieten sich metallische, anorganische oder organische Überzüge an.

1) **Metallische Überzüge** werden vielfach auf galvanischem Wege als schützende Schicht aus Zink aufgetragen. Verzinkung mit anschliessender Blau-Passivierung ist Standard.

Für „wetterfeste“ Schrauben eignet sich die im Schmelztauchverfahren erfolgende Feuerverzinkung.

Für spezielle Anwendungen wird das Werkstück plattiert, d.h. mit einer Schicht eines edleren Metalles überzogen. Mögliche Verbindungen sind z. B. Kupfer auf Stahl und Silber auf Messing.

Weitere galvanische Beschichtungsverfahren für Werkstücke aus Stahl sind Vernickeln, Verchromen und Verkupfern.

Beim **galvanischen Verzinken** wird das Material in einen Zinkelektrolyten eingetaucht. Die Schichtdicke verhält sich proportional zur Stärke und Dauer des Stromflusses und beträgt 3 - 8 μm .

Beim **Feuerverzinken** wird das Objekt in ein heisses Zinkbad (Temperatur ca. 450 °C) eingetaucht. Es gibt zwei Varianten:

- a) Stückverzinken ermöglicht Schichtdicken von 50 - 150 μm .
- b) Bandverzinken (Sendzimir-Verfahren) ergibt Schichten von 5 - 40 μm .

Passivieren (Chromatieren) folgt unmittelbar an das Verzinken durch kurzes Eintauchen in Chromsäurelösungen. Die Chromatierung erhöht den Korrosionsschutz und verhindert ein Anlaufen und Verfärben der Zinkschicht. Der Fachmann unterscheidet zwischen Blau-, Gelb-, Oliv- und Schwarz-Chromatierung.

2) **Anorganische Überzüge** wie Oxidschichtung (Brünierung, Schwärzung) und Phosphatierung bieten in trockener Raumluft einen hinreichend guten Korrosionsschutz. Manchmal wird Zink oder Aluminium aufgesprüht. Korrosionsfest erweisen sich nur eingebrannte Zink-Aluminium-Lamellen (Handelsbezeichnungen Dacromet, Delta Tone, Termosil).

Beim **Brünieren** wird ein meist eisenhaltiges Werkstück in Essigsäure oder Natronlauge eingetaucht; dadurch bildet sich eine schwarze Oxidschicht von 1 bis 2 μm aus Fe_2O_3 (Edelrost). Der Korrosionsschutz ist gering, lässt sich aber durch beölen oder befetten steigern.

Beim **Schwärzen** wird das Werkstück mit Leinöl bestrichen und über einer dunkelroten Glut erhitzt. Bei genügender hoher Temperatur brennt das Öl rauchend ab. Als Alternative eignet sich das Abschrecken in altem Motorenöl.

Beim **Phosphatieren** bildet sich auf der Werkstückoberfläche – abhängig vom gewählten Verfahren – eine schwerlösliche Schicht aus Eisen-, Zink- oder Manganphosphat.

3) **Organische Überzüge** benutzen Gummi, Kunststoff, Lacke und Farbstoffe als Beschichtungen. Die Gefahr der Wasserstoffversprödung besteht nicht, solange keine Beizung vorgenommen wird.

Das **Beizen** dient der Entfernung einer dünnen Schicht aus einer metallischen Oberfläche mittels geeigneter Säuregemische. Leichtere bei einer Wärmebehandlung sich bildende Verzunderungen lassen sich so entfernen. Zum Beizen nichtrostender Stähle wird meist eine Kombination aus Salpeter- und Flußsäure verwendet, um die durch Schweissung entstandenen Anlauffarben zu eliminieren.

Wasserstoffversprödung durch Einlagerung von Wasserstoff im Metallgitter bewirkt eine Zunahme der Sprödigkeit und führt zu Rissbildung. Um Wasserstoff aus Stählen auszuschcheiden, werden diese einer mehrstündigen Wärmebehandlung (Tempern) unterzogen.

Die Beschaffenheit der Oberflächenveredelung wird mit einer zusätzlichen Angabe deklariert. Die Kurzbezeichnung **A2F** auf einer Schraube der Festigkeitsklasse 8.8 bspw. bedeutet, dass es sich um eine verzinkte Schraube (A) mit bläulicher Farbgebung (F) handelt, deren Schichtdicke 5 μm (2) beträgt.

Tabelle 2
Kennzeichnungssystem oberflächenveredelter Schrauben

1) Überzugsmaterial			
A	=	Zn	= Zink
B	=	Cd	= Cadmium
C	=	Cu	= Kupfer
D	=	CuZn	= Messing
E	=	Ni	= Nickel
F	=	NiCr	= Nickel-Chrom
G	=	CuNi	= Kupfer-Nickel
H	=	CuNiCr	= Kupfer-Nickel-Chr.
J	=	Sn	= Zinn

2) Schichtdicke (galv. Zn)			
1	=	3 µm	
2	=	5 µm	(2 + 3) handelsüblich
3	=	8 µm	(3 + 5)
4	=	12 µm	(4 + 8)
5	=	15 µm	(5 + 10)
6	=	20 µm	(8 + 12)
tzn		40 µm	Feuerverzinkt

3) Aussehen bei Passivierung / Chromatierung

	Glanzgrad	Verfahrensgruppe	Farbe
A =		A	farblos
B =	mt	B	bläulich
C =		C*	gelblich*
D =	(matt)	D*	oliv*
E =		A	farblos
F =	bk	B	bläulich
G =		C*	gelblich*
H =	(blank)	D*	oliv*
J =		A	farblos
K =	gl	B	bläulich
L =		C*	gelblich*
M =	(glänzend)	D*	oliv*
P/U =	beliebig	wie B, C oder D	ohne Chromatg.
R =	mt (matt)	F/Bk	schwarz*
S =	bk (blank)	F/Bk	
T =	gl (glänz.)	F/Bk	

3 Nichtrostende und korrosionsbeständige Schrauben

Die handelsübliche Qualität von Stahlschrauben im Durchmesserbereich M 5 bis M 24 und mit Längen bis zum 8-fachem Gewinde-Nenndurchmesser ist:

- **A2-70** für nichtrostende Schrauben
- **A4-70** für säurebeständige Schrauben

Grössere oder längere Schrauben besitzen handelsüblich die Festigkeitsklasse 50.

3.1 Werkstoffe für INOX-Schrauben

Für Anwendungen in der Lebensmittel- und Getränkeindustrie, in der chemischen und pharmazeutischen Industrie oder für Anlagen und Apparate, die permanent einer wässrigen Umgebung, Laugen oder säurehaltigen Medien ausgesetzt sind, müssen nichtrostende oder säurebeständige Stahlsorten eingesetzt werden. Zu korrosionsbeständigen Schrauben verarbeitet werden austenitische, martensitische und ferritische Stähle.

Als Empfehlung gilt: Schrauben vom Typ A2 (1.4301) für Innenanwendungen und Binnenklima (saubere Umgebungsluft). Schrauben A4 (1.4401) für Industrieumgebung und Küstenklima (salz- oder schwefelhaltige Medien). Im Offshore-Bereich oder in chlorhaltiger Umgebung kommen stickstoffberuhigte und molybdänlegierte CrNi-Schrauben zum Einsatz, darunter die Sorten X2CrNiMoN17-13-5 (1.4439) und X2CrNiMoN22-5-3 (1.4462).

1) Austenitische Stahlsorten (A)¹

- Nichtrostend (A2)
- nichtrostend und säurebeständig (A4)
- im Auslieferungszustand unmagnetisch
- Schweissbar, kaltumformbar

Bei nicht stabilisierten Stählen (A2, A4) ist der niedrige C-Gehalt relevant, weil sonst Chromkarbid entsteht (besonders bei erhöhten Temperaturen), wodurch die Korrosionsbeständigkeit vermindert wird. Bei stabilisierten Stählen (A3, A5) binden die Elemente Titan, Niob oder Tantal den Kohlenstoff, so dass in vollem Umfang Chromoxid (welches für die Bildung der schützenden Passivschicht verantwortlich ist) erzeugt wird. Die restlichen Stähle A3, A5 bzw. die Low-Carbon-Sorten A2L, A4L sind empfohlen, wenn Gefahr einer interkristallinen Korrosion besteht.

2) Martensitische Stahlsorten (C)

- begrenzte Korrosionsbeständigkeit
- ferromagnetisch
- hohe Härte
- hohe Festigkeit
- bedingt schweisbar

¹ Die A-Qualitäten werden umgangssprachlich noch immer mit den von KRUPP geprägten Werksbezeichnungen V2A und V4A benannt.

3) Ferritische Stahlsorten (F)

- nichtrostend
- korrosionsbeständig in chlorhaltiger Umgebung
- ferromagnetisch
- nicht härtbar
- bedingt schweisbar

4) Ferritisch-Austenitische Stahlsorten (FA)

Sog. Duplex-Stähle (z.B. 1.4462 oder 1.4362), welche die Vorteile von A4 und F1 verbinden.

- bessere Festigkeit als austenitische Stähle
- grössere Beständigkeit gegen Loch- und Risskorrosion als A4

3.2 Kennzeichnung von INOX-Schrauben

Für Schrauben aus nichtrostendem Stahl werden Qualität und Festigkeitsklasse auf dem Schraubenkopf angegeben. Die Kennzeichnung besteht aus zwei Teilen, die durch einen Bindestrich getrennt sind. Der alphanumerische Teil zeigt Stahlgruppe und Stahlsorte, der numerische Teil die Festigkeitsklasse an. Ferner findet sich das Herstellerkurzzeichen (z.B. SFS).

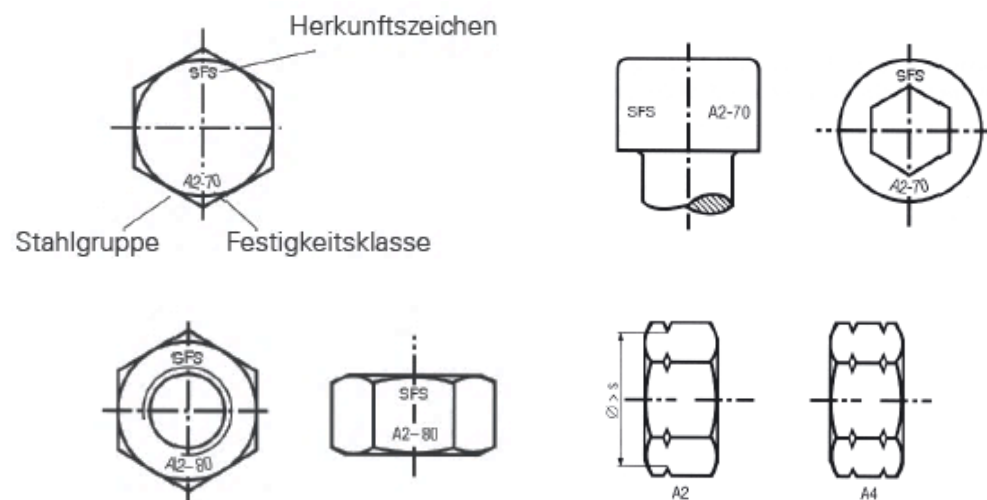


Abb. 3-1

Kennzeichnung von nichtrostenden und säurebeständigen Schrauben und Muttern

Bedeutung der Kennzeichnung nach nach EN ISO 3506:

- ▶ **Stahlgruppe** → **A** (austenitisch) **C** (martensitisch) **F** (ferritisch)
- ▶ **Sorten** → **1 bis 5**
- ▶ **Festigkeitsklasse** → **50** (weich) **70** (kaltverfestigt) **80** (hochfest)
die Zahl entspricht $\frac{1}{10}$ der Mindestzugfestigkeit

Beispiel 1: **NBN A2-70** Inox-Schraube aus nichtrostendem und kaltverfestigtem austenitischem Stahl (Zugfestigkeit 700 N/mm²).

Beispiel 2: **SFS C4-80** Inox-Schraube aus nichtrostendem und vergütetem martensitischem Stahl (Zugfestigkeit 800 N/mm²).

Tabelle 3 Nichtrostende und säurebeständige Verbindungselemente ²						
Stahlgruppe	Sorte	Eigenschaften	Festigkeit			
Austenitisch	A1 1.4305 1.4300	CrNi-Stähle für die spanende Bearbeitung; Infolge des hohen Schwefelgehaltes reduzierte Korrosionsbeständigkeit und bedingt Schweißbarkeit	50	weich		
	A2 1.4301 1.4303	CrNi-Stähle für für Innenanwendungen ohne Säuren oder chlorhaltige Medien				
	A3 1.4541 1.4550	Stabilisierte Stähle mit Eigenschaften wie A2			70	kaltverfestigt
	A4 1.4401 1.4435	Säurebeständige CrNiMo-Stähle für die Chemische Industrie, Zellstoffindustrie, Off-shore-Anlagen usw.			80	hochfest
	A5 1.4571 1.4580	Stabilisierte Stähle mit Eigenschaften wie A4				
Martensitisch	C1 1.4006 1.4021	Begrenzte Korrosionsbeständigkeit	50	Weich		
	C3 1.4057	Bessere Korrosionsbeständigkeit als C1	70 110	Vergütet		
	C4 1.4104	Für spanende Bearbeitung; ansonsten wie C1	80	Vergütet		
			50	Weich		
			70	Vergütet		
Ferritisch	F1 1.4016 1.4113	In chlorhaltige Umgebung	45	weich		
			60	kaltverfestigt		

² SFS unimarket, *Technische Information INOX-Befestigungstechnik* (Broschüre).

3.3 Festigkeitsklasse und Dehngrenze

A1-, A2-, A4-**50** hat eine Dehngrenze welche etwa der Festigkeitsklasse **3.6** entspricht.

A2-, A4-**70** hat eine Dehngrenze welche etwa der Festigkeitsklasse **6.8** entspricht.

A2-, A4-**80** hat eine Dehngrenze welche etwa der Festigkeitsklasse **8.8** entspricht.

Tabelle 4 Festigkeitsklassen von Inox-Schrauben							
Werkstoff- gruppe	Stahl- gruppe	Festigkeits- klasse	Durchmesser- bereich	Schrauben			Muttern
				Zug- festigkeit R_m ¹⁾ N/mm ² min.	0,2%- Dehngrenze $R_{p0,2}$ ¹⁾ N/mm ² min.	Verlängerung nach dem Bruch A_L ²⁾ min.	Prüf- spannung S_p N/mm ²
Austenitisch	A1, A2 und A4	50	≤ M39	500	210	0,6 <i>d</i>	500
		70	≤ M24	700	450	0,4 <i>d</i>	700
		80	≤ M24	800	600	0,3 <i>d</i>	800

Literaturverzeichnis

- Tabellenbuch Metall (Europa-Lehrmittel)
- Rolof/Matek, Maschinenelemente (Vieweg + Teubner)
- <http://www.schrauben-lexikon.de/>
- <http://www.konstruktionsatlas.de/>