

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Definition und Kennzeichnung	9
2 Leistungskennwerte von ultrahochfesten Schrauben	11
2.1 Zugversuch	11
2.2 Mechanische Kennwerte bei Raumtemperatur	17
2.2.1 Zugfestigkeit R_m	20
2.2.2 Dehngrenze und Dehngrenzverhältnis	22
2.2.3 Duktilitätskennwerte (Bruchdehnung A_5 und Brucheinschnürung Z)	23
2.2.4 Prüfkraft und Prüfkraftversuch	25
2.3 Kennwerte bei erhöhter Temperatur	26
2.3.1 Zugfestigkeitskennwerte R_m bei mäßig erhöhten Temperaturen bis 300 °C	26
2.3.2 Zugfestigkeitskennwerte R_m bei erhöhten Temperaturen >300 °C	29
2.3.3 Vorspannkraftverlust von ultrahochfesten Schraubverbindungen bei erhöhten Temperaturen (Relaxationsverhalten)	30
2.4 Kennwerte bei erniedrigter Temperatur	32
2.4.1 Kerbschlagbiegeversuch	32
2.4.2 Axial-Schlagzugversuch	35
2.5 Dauerschwingfestigkeit	36
2.6 Härte	37
3 Montageverhalten	39
3.1 Anzugsverhalten	39
3.2 Mindestklemmkräfte ultrahochfester Schrauben im Erstanzug	46
3.2.1 Mindestklemmkraft bei streckgrenzbezogenem Anzug	46
3.2.1.1 Metrisches Regelgewinde	46
3.2.1.2 Metrisches Feingewinde	47
3.2.1.3 MJ-Regelgewinde	48
3.2.1.4 MJ-Feingewinde	49
3.2.2 Mindestklemmkraft bei überelastischem Anzug	49
3.2.2.1 Metrisches Regelgewinde	49
3.2.2.2 Metrisches Feingewinde	50
3.2.2.3 MJ-Regelgewinde	51
3.2.2.4 MJ-Feingewinde	52
3.3 Konstruktive Randbedingungen	52
3.3.1 Kopfauflage	52
3.3.2 Muttergewinde	54
4 Verhalten gegenüber wasserstoffinduziertem Sprödbbruch	57
4.1 Wasserstoffinduzierter Sprödbbruch	57
4.2 Prüfmethode zur Wasserstoffversprödung	60

4.2.1	Langsamzugversuch mit Ex-situ-Wasserstoffbeladung	62
4.2.2	In-situ-Beladung und Step-Load-Test	66
5	Wärmebehandlungsverfahren, Werkstoffe, Gefüge	69
5.1	Wärmebehandlung	69
5.1.1	Martensit-Umwandlung	70
5.1.2	Bainit-Umwandlung	70
5.2	Werkstoffauswahl	75
5.3	Gefügebeschreibung ultrahochfester <i>KXtreme</i> -Schrauben	76
6	Oberflächenschutzsysteme für ultrahochfeste Schrauben	81
6.1	Phosphatschichten	82
6.2	Zinklamellenschichten	82
6.3	ZnNi-Schichten	83
7	Anwendungsvorteile durch ultrahochfeste Schrauben	85
7.1	Erhöhung der Klemmkraft	86
7.2	Reduzierung der Schraubenabmessung bei konstanter Klemmkraft	86
8	Alternative Werkstoffkonzepte für ultrahochfeste Schrauben	91
8.1	Ultrahochfeste Schrauben auf Basis martensitisch vergüteter Stähle	91
8.1.1	Beispiel 1: 1%-Cr-Stahl mit hohem Mo-Gehalt [17; 55]	92
8.1.2	Beispiel 2: 1%-Cr-Stahl mit hohem Mo-Gehalt MB14, MB16 [57]	92
8.1.3	Beispiel 3: Luftfahrtwerkstoff 300M / AMS 6257	93
8.1.4	Beispiel 4: 5%-Cr-Stahl – Werkstoff 1.7784.6 (X41CrMoV5 11)	93
8.2	Ausscheidungshärtende Stähle (Maraging-Stähle)	94
8.3	Zusammenfassung und Ausblick	95
	Begriffe und Abkürzungen	97
	Formelzeichen und Einheiten	101
	Quellenverzeichnis	105
	Stichwortverzeichnis	109

1 Definition und Kennzeichnung

Die Bezeichnung «ultrahochfest» kann in Abgrenzung zur Definition der hochfesten Schrauben, die in der internationalen Norm DIN EN ISO 898-1 [4] festgelegt ist, erfolgen. In dieser Norm weist die höchste Festigkeitsklasse eine Mindestzugfestigkeit von 1220 MPa bzw. einen Härtebereich von 385 HV bis 435 HV auf. Die Bezeichnungssystematik der hochfesten Schrauben nach DIN EN ISO 898-1 [4] besteht in der Angabe von zwei bzw. drei Zahlen, die durch einen Punkt getrennt sind. Die Zahl vor dem Punkt entspricht einem hundertsten Teil der Mindestzugfestigkeit (s. Abschnitt 2.1.1), während die Zahl nach dem Punkt das Zehnfache des Mindestdehngrenzverhältnisses (s. Abschnitt 2.1.2) kennzeichnet. Das Mindestdehngrenzverhältnis wird mit einer ganzzahligen einstelligen Zahl angegeben, so dass das reale Dehngrenzverhältnis des Schraubenwerkstoffes durchaus deutlich darüber liegen kann. So bedeutet die Angabe der Festigkeitsklasse 12.9 eine nominale Mindestzugfestigkeit von 1200 MPa und ein Dehngrenzverhältnis größer 0,9.

DEFINITION

Hochfeste und ultrahochfeste Schrauben zeigen keine ausgeprägte Streckgrenze, so dass anstelle der Streckgrenze ersatzweise die Dehngrenze bei einer definierten plastischen Verlängerung herangezogen werden muss. In diesem Buch wird deshalb die Bezeichnung Dehngrenze bzw. Dehngrenzverhältnis verwendet.



Ultrahochfeste Schrauben setzen die Zugfestigkeit über die maximale Festigkeitsklasse der hochfesten Schrauben nach DIN EN ISO 898-1 nach oben hin fort. Für ultrahochfeste Schrauben existieren derzeit zwei Richtlinien, die VDA-Richtlinie VDA 235-205 [5] und die Richtlinie USCAR-IFI Guide UHSFG-1416U-2014 [6]. In diesen Richtlinien werden derzeit ultrahochfeste Schrauben mit einer Festigkeitsklasse bis 16.8U, d.h. mit einer Festigkeit von 1600 MPa bis 1770 MPa beschrieben.

Ultrahochfeste Schrauben und *KXtreme*-Schrauben nutzen dieselbe Bezeichnungssystematik wie hochfeste Schrauben nach DIN EN ISO 898-1 [4], jedoch wird zur Unterscheidung von martensitisch vergüteten Schrauben bei ultrahochfesten Schrauben mit bainitischem Gefüge den Zahlenangaben der Buchstabe «U» angehängt.

So bedeutet zum Beispiel die Kennzeichnung «16.8U» eine ultrahochfeste Schraube mit bainitischem Gefüge und einer Mindestzugfestigkeit von 1600 MPa und einem Dehngrenzverhältnis größer 0,8. Eine Schraube «14.9U» hat eine Mindestzugfestigkeit von 1400 MPa, ein Dehngrenzverhältnis größer 0,9 sowie ein bainitisches Gefüge.

In der Festigkeitsklasse 12.9 besteht eine Überschneidung konventionell mit martensitischem Vergütungsgefüge hergestellter hochfester Schrauben und Schrauben mit bainitischem Gefüge, die von KAMAX in dieser Festigkeitsklasse auch in der Festigkeitsklasse 12.8U und 12.9U hergestellt werden.

2 Leistungskennwerte von ultrahochfesten Schrauben

Die vorrangige funktionale Anforderung an eine Schraube besteht im Erzeugen und Aufrechterhalten einer Klemmkraft zur kraftschlüssigen Verbindung zweier oder mehrerer Teile über die gesamte Lebensdauer der Baugruppe.

MERKSATZ

Die maximal erreichbare Klemmkraft einer Schraube wird bestimmt durch:

- den am stärksten beanspruchten tragenden Querschnitt der Schraube im Gewinde bzw. im Schaft oder am Kopf,
- die Gewindesteigung und die Reibbedingungen im Gewinde sowie
- durch die Zugfestigkeit des Schraubenwerkstoffs.



In Analogie zu den hochfesten Schrauben nach DIN EN ISO 898-1 [4] gilt auch für ultrahochfeste Schrauben mit metrischem Gewinde das Konstruktionsprinzip, dass bei zügiger Belastung in axialer Richtung der Bruch im freien tragenden Gewinde stattfinden soll. Eine Ausnahme hiervon sind Dehnschaft-Schrauben, bei denen unter zügiger Belastung in axialer Richtung aufgrund des gegenüber dem Gewindequerschnitt dünner gestalteten Schaftdurchmessers der Bruch im Schaft stattfindet.

Die Festigkeit hochfester und ultrahochfester Schraubenwerkstoffe wird durch die mechanischen Werkstoffkennwerte Zugfestigkeit R_m und Dehngrenze $R_{p0,2}$ beschrieben. Da Schrauben im Gewindegrund und am Schaft-Kopf-Übergang konstruktionsbedingt eine Kerbgeometrie aufweisen, die im Kerbgrund zu einer lokalen Spannungsüberhöhung führt [1; 2], ist neben der Festigkeit des Schraubenwerkstoffs auch eine ausreichende plastische Verformungsfähigkeit bzw. Duktilität erforderlich. Diese ermöglicht durch eine begrenzte lokale Plastifizierung des Werkstoffs in den Kerben eine Begrenzung der Kerbspannungsüberhöhung und bietet so bei Überlastung der Schraubverbindung Sicherheit gegen unmittelbaren Bruch. Verformungslose Sprödbrüche sind bei Schrauben bzw. Schraubverbindungen insbesondere deshalb nicht erwünscht, weil Sprödbrüche spontan und ohne Vorwarnung eintreten, bevor ggfs. Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können. Die Werkstoffkennwerte, die häufig zur Beschreibung der Duktilität eines Schraubenwerkstoffs herangezogen werden, sind die Bruchdehnung A_5 , die Brucheinschnürung Z sowie die plastische Dehnung bei Erreichen der Höchstzugkraft A_g , die für Schraubenwerkstoffe i.d.R. der prozentualen plastischen Dehnung ohne Einschnürung (Gleichmaßdehnung) A_{wn} entspricht [13] (s. Abschnitt 2.1).

2.1 Zugversuch

Die genannten mechanischen Werkstoffkennwerte R_m , $R_{p0,2}$, A_5 und Z zur Beschreibung eines Werkstoffzustandes werden im Zugversuch nach DIN EN ISO 6892-1 [13] bzw. nach DIN EN 898-1 [4] ermittelt. Aufgrund der zentralen Bedeutung des Zugversuchs und der daraus abgeleiteten Werkstoffkenngrößen werden diese Kenngrößen nachstehend im Detail beschrieben.

Beim Zugversuch wird die axiale Zugkraft bei einer kontinuierlich steigenden Verlängerung bis zum Bruch des Prüfteils gemessen und in einem Kraft-Verlängerungs-Diagramm dargestellt.

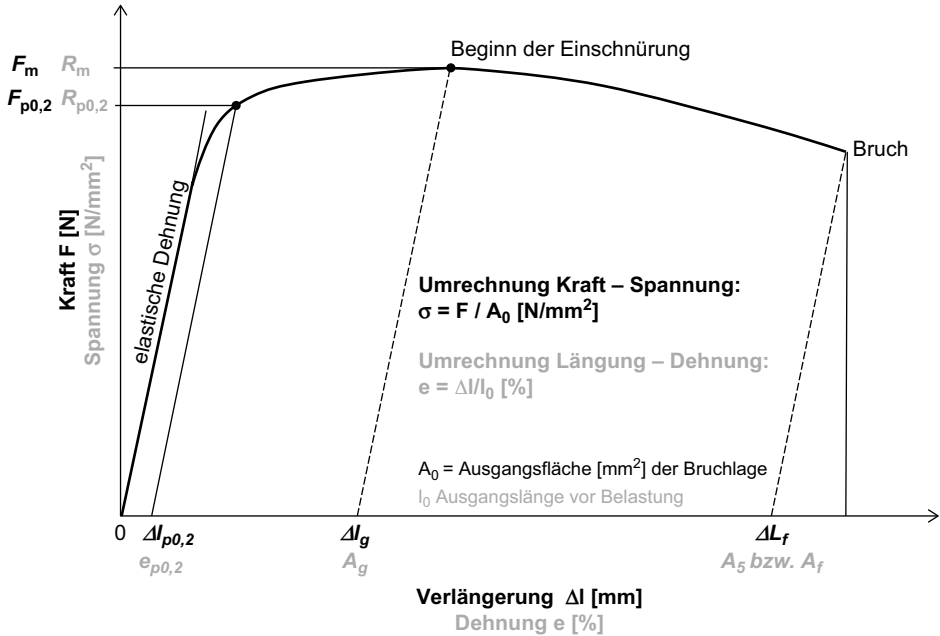


Bild 2.1 Zugversuchskennwerte im Kraft-Verlängerungs-Diagramm bzw. Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm erhält man aus dem Kraft-Verlängerungs-Diagramm durch Division der gemessenen Kraftwerte durch den tragenden Querschnitt A des Prüfteils sowie die Division der Verlängerungswerte durch die Ausgangslänge l_0 des Prüflings.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

(Gl. 2.1)

$$e = \frac{\Delta l}{l_0}$$

(Gl. 2.2)

Im elastischen Bereich ist die Spannung σ proportional zur Dehnung e . Die Proportionalitätskonstante entspricht der anfänglichen Steigung der Spannungs-Dehnungs-Kurve und entspricht bei Messung der Verlängerung eines zylindrischen Probenabschnitts mit konstantem Querschnitt dem Elastizitätsmodul E des Werkstoffs.

$$\sigma = E \cdot e$$

(Gl. 2.3)

Aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Bild 2.1) können die oben erwähnten mechanischen Zugprüfkennwerte R_m , $R_{p0,2}$, A_g , A_5 direkt abgelesen werden.

Der Verlauf des Kraft-Verlängerungs-Diagramms eines Prüfteils hängt jedoch neben den Eigenschaften des Werkstoffs auch von der geometrischen Gestaltung des Prüfteils ab [1; 2; 14]. Gemäß Gleichung 2.1 ist bei gleicher Last F die Spannung σ in einem Prüfteil in Bereichen geringer Querschnitte A größer als im Bereich dicker Querschnitte A und somit ist nach Gl. 2.3 auch die Längung des Prüfteils in Bereichen geringer Querschnitte höher als in Bereichen größerer Querschnitte.

Darüber hinaus führen Querschnittsübergänge oder Kerben im Prüfteil zu mehrachsigen Spannungszuständen und bewirken so eine Behinderung der Dehnung, woraus eine Anhebung der Bruchkraft resultiert [14].

MERKSATZ

Bei gegebener Werkstofffestigkeit hängt die ertragbare Bruchlast einer Schraube von der geometrischen Gestaltung der Schraube ab.



Aus diesem Grund müssen zur Bestimmung von allgemein gültigen und abmessungsunabhängigen Werkstoffkennwerten normierte Zugproben verwendet werden. Solche durch einen zylindrischen Schaft und eine definierte Länge des zylindrischen Schaftdurchmessers gekennzeichneten Proben sind zum Beispiel in DIN 50125 [26] oder in der für hochfeste Verbindungselemente verwendeten Norm DIN EN ISO 898-1 [4] beschrieben.

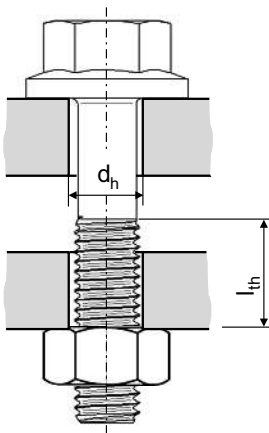


Bild 2.2 Prüfanordnung
Zugversuch am ganzen
Bauteil [4]

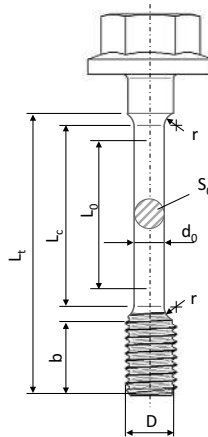


Bild 2.3 Normierte Prüfprobe nach DIN EN ISO 898-1 [4]

Legende

- D Gewindenenddurchmesser
- d_0 Durchmesser der abgedrehten Probe ($d_0 \geq 3\text{mm}$)
- b Gewindelänge ($b \geq d_0$)
- l_0 Ausgangsmesslänge der abgedrehten Probe
- l_c Länge des zylindrischen Schaftes der abgedrehten Probe
- l_t Gesamtlänge der abgedrehten Probe ($l_t = 2r + b$)
- S_0 Querschnittsfläche der abgedrehten Probe
- r Übergangsradius ($r \geq 4\text{mm}$)

Da die Herstellung dieser Normproben Aufwand an Bearbeitung und Zeit bedeutet, ist in DIN EN ISO 898-1 [4] auch die Ermittlung von mechanischen Zugprüfkennwerten als Bauteilkennwert an ganzen Schrauben beschrieben – mit dem Vorteil, dass zu dieser Prüfung keine Bearbeitung der Prüfteile erfolgen muss. Dem Vorteil der einfachen Prüfbarkeit von ganzen Schrauben steht diesem Vorgehen jedoch folgender Nachteil entgegen: Bei der Er-

mittlung von Zugprüfungskennwerten durch Prüfung am Bauteil Schraube (Bauteilkennwert) aufgrund von Geometrieinflüssen können insbesondere die dehnungsabhängigen Kennwerte Dehngrenze $R_{p0,2}$, Gleichmaßdehnung A_g , Bruchdehnung A_5 und Brucheinschnürung Z von den am zylindrischen Teil einer Normprobe ermittelten Werten (Werkstoffkennwert) abweichen. Eine allgemeingültige Vergleichbarkeit von Werkstoffeigenschaften ist nur durch Werkstoffkennwerte gegeben. Während bei der Normprobe der zylindrisch glatte Prüfschaft bis zum Erreichen der Gleichmaßdehnung einem über den Querschnitt konstanten einachsigen Spannungszustand bzw. einem zweiachsigen Dehnungszustand unterliegt, ist die Spannungsverteilung im zugbelasteten Schraubengewinde über den Querschnitt nicht konstant und unterliegt einem dreiachsigen Spannungs- und Dehnungszustand [1; 2; 14]. Dies führt beispielsweise dazu, dass die gemessene Zugfestigkeit einer Schraube bei kurzer Länge des nicht eingeschraubten belasteten Gewindes (l_{th}) höher ist und sich erst mit zunehmender Zahl der freien belasteten Gewindegänge der Zugfestigkeitswert dem Zugfestigkeitswert der Normprobe annähert [2; 14].

Um diesem Befund Rechnung zu tragen und eine näherungsweise Vergleichbarkeit herzustellen, definiert die Norm 898-1 [4] für die Ermittlung von Zugkennwerten an ganzen Schrauben (Bauteilkennwert) eine freie belastete Gewindelänge (l_{th}) von $1,0 \cdot D$ bzw. $1,2 \cdot D$ (D = Nenndurchmesser des Gewindes) [4].

Eine weitere Quelle der Ungenauigkeit bei der Ermittlung von Zugfestigkeitskennwerten an ganzen Schrauben ergibt sich aus der ungenauen Ermittlung des Spannungsquerschnitts A_s . Bei der Durchführung einer Zugprüfung wird zunächst messtechnisch die Zugkraft erfasst und die Spannung wird aus der gemessenen Kraft durch Division durch den Querschnitt der Probe nach der Beziehung nach Gl. 2.1 berechnet. Es ist offensichtlich, dass sich der Spannungsquerschnitt A_s einer zylindrisch glatten Probe mit hoher Genauigkeit durch Messung des Durchmessers d_s des Probenschafes ermitteln lässt. Für den Querschnitt A_s eines Schraubengewindes muss jedoch zur Kompensation der inhomogenen Spannungsverteilung ein empirisch ermittelter Spannungsquerschnitt A_s eingesetzt werden, der sich nach [28] für metrische Gewinde aus dem arithmetischen Mittelwert des Flankendurchmessers d_2 und Kerndurchmessers d_3 des Gewindes berechnet:

$$A_s = \frac{\pi}{4} \left[\frac{1}{2} (d_2 + d_3) \right]^2 \quad (\text{Gl. 2.4})$$

Die Spannungsquerschnitte A_s für metrische Regel- und Feingewinde sind in der Schraubennorm ISO 898-1 [4] auf Basis der Toleranzlage h6 des Gewindes angegeben. Da Schrauben zur Kompensation der Schichtdicke von Beschichtungen, die zur Reibwertein- stellung bzw. zum Zweck des Korrosionsschutzes aufgebracht werden, in der Regel jedoch in einer Untermaß-Toleranzlage, z.B. 6g oder 6e, gefertigt werden, wird bei Verwendung des Nennspannungsquerschnitts A_s nach ISO 898-1 [4] ein gegenüber der Normprobe zu geringer Zugfestigkeitswert R_m berechnet. Diese Abweichung ist insbesondere bei kleinen Schraubenabmessungen von Bedeutung und beträgt zum Beispiel bei einem Gewinde M6×1 der Toleranzlage 6g eine Abweichung bis 6%, was wiederum bei einer Zugfestigkeit von 1500 MPa zu einer Differenz der ermittelten Spannung von 90 MPa führt. Wird hingegen der Spannungsquerschnitt A_s aus dem tatsächlich gemessenen Kern- und Flankendurchmesser des geprüften Gewindes berechnet, erhält man bezüglich der Zugfestigkeit R_m eine sehr gute Übereinstimmung mit der am Normprobestab ermittelten Zugfestigkeit [14]. Insbesondere für größere Gewindeabmessungen ab M10 erweist sich in der Praxis die Berechnung des realen

Spannungsquerschnitts A_s aus den Mittelwerten des Flanken- und Kerndurchmessers d_2 bzw. d_3 der jeweiligen Toleranzlage als ausreichend gute Näherung. Die maximale Abweichung des aus den Toleranzmittelwerten gebildeten Spannungsquerschnitts vom Spannungsquerschnitt der unteren Toleranzgrenze ist dann kleiner 2%.

Die an der Normprobe ermittelte Dehngrenze $R_{p0,2}$ – bei einer plastischen Verlängerung von 0,2% des zylindrischen Probenteils bestimmt – wird zur Kompensation des Einflusses des Gewindes auf die Verformungsfähigkeit des Werkstoffs auf die bauteilbezogene Dehngrenze R_{pf} bei einer plastischen Verlängerung von $0,0048 \cdot D$ (D = Nenndurchmesser des Gewindes) ermittelt. Ähnlich verhält es sich für die Bestimmung der bauteilbezogenen Bruchdehnung A_f , die aus der plastischen Längung der gebrochenen, freien belasteten Gewindelänge von $1,2 \cdot D$ ermittelt wird.

Die Ermittlung der Brucheinschnürung Z ist an einer ganzen Schraube mit Bruchlage im freien tragenden Gewinde aufgrund der Dehnungsbehinderung durch die Kerbgeometrie des Gewindes nicht sinnvoll messbar.

Um die Ergebnisse der Zugprüfungskennwerte, die an der Normprobe ermittelt wurden, von den Ergebnissen, die an ganzen Bauteilen ermittelt wurden, klar zu unterscheiden, sind die ermittelten Zugprüfungskennwerte nach DIN EN ISO 898-1 [4] je nach Art der Probenform unterschiedlich zu bezeichnen (s. Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1 Nomenklatur mechanische Festigkeits- und Duktilitätskennwerte an Schrauben (nach [4])

Kennwert aus Zugversuch	Prüfung am ganzen Bauteil	Prüfung an normierter Probe (Proportionalstab)
Zugfestigkeit	R_m	R_m
	Ermittlung aus Kraft bei Bruch F_m und Spannungsquerschnitt A_s der Bruchlage $R_m = F_m/A_s$: Spannungsquerschnitte der Bruchlage Gewinde: $A_s = \pi/4 \cdot [1/2 \cdot (d_2 + d_3)]^2$ Dehnschaft: $A_s = \pi/4 \cdot d_s^2$, mit d_2^2 Flankenwinkel des Gewindes d_3^2 Kerndurchmesser des Gewindes d_s^2 Durchmesser des Dehnschaftes	Spannungsquerschnitt: $A_s = S_0 = \pi/4 \cdot d_0^2$ mit d_0 Durchmesser der abgedrehten Probe
Dehngrenze	R_{pf}	$R_{p0,2}$
	Ermittlung aus Kraft F_{pf} bei $\Delta L = 0,0048 \cdot d$ bei $L_{th} = 1,2 D$ und Spannungsquerschnitt A_s der Bruchlage (s. R_m) $R_{pf} = F_{pf}/A_s$	Ermittlung aus Kraft bei 0,2% Dehnung $F_{p0,2}$ und Spannungsquerschnitt A_s der Bruchlage (s. R_m) $R_{p0,2} = F_{p0,2}/A_s$
Bruchdehnung	A_f	A_5
	$A_f = \Delta L_{pf}/1,2 \cdot D$ mit ΔL_{pf} plastische Längung bei Bruch D Nenndurchmesser Gewinde	$A_5 = (L_u - L_0) / L_0 \cdot 100\%$ mit L_u plastische Längung der Messlänge L_0 bei Bruch L_0 Messlänge $5 \cdot d_0$ d_0 Durchmesser der abgedrehten Probe
Brucheinschnürung	–	Z
	Im Gewinde nicht quantitativ auswertbar, im Dehnschaft bei ausreichender Länge wie Proportionalstab	$Z = (S_0 - S_u) / S_0 \cdot 100\%$ mit S_0 Querschnitt der abgedrehten Probe vor Zugversuch S_u Querschnitt der Bruchfläche

Die oben beschriebenen Einflüsse der Kerbgeometrie eines Prüfteils, z.B. des Gewindes, auf das Ergebnis einer Zugprüfung verdeutlichen, warum für eine exakte Beschreibung eines Werkstoffzustandes die Ermittlung der mechanischen Zugprüfkennwerte an einer Normprobe erfolgen muss. Dies ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn durch Zugprüfkennwerte verschiedene Werkstoffe oder unterschiedliche Gefügestände verglichen werden sollen. Aus diesem Grund werden im Folgenden die mechanischen Kennwerte ultrahochfester Schrauben *KXtreme* an den Normkenngrößen R_m , $R_{p0,2}$, A_5 , Z , die an zylindrisch abgedrehten Schrauben ermittelt wurden, dargestellt.

MERKSATZ

Werkstofffestigkeitskennwerte $R_{p0,2}$, A_5 , und Z können ausschließlich an normierten Prüfkörpern mit definierter Geometrie bestimmt werden.

Zur Ermittlung von Festigkeits- und Duktilitätskennwerten am Bauteil müssen die aus der Geometrie resultierenden unterschiedlichen Spannungen und Dehnungen berücksichtigt werden. Bauteilfestigkeitskennwerte können von den Norm-Werkstofffestigkeitskenngrößen abweichen.

In den Bildern 2.4 und 2.5 sind typische Zugversuchskurven von ultrahochfesten Werkstoffzuständen *KXtreme* 16.8U bzw. 14.9U, gemessen an abgedrehten Proben, dargestellt.

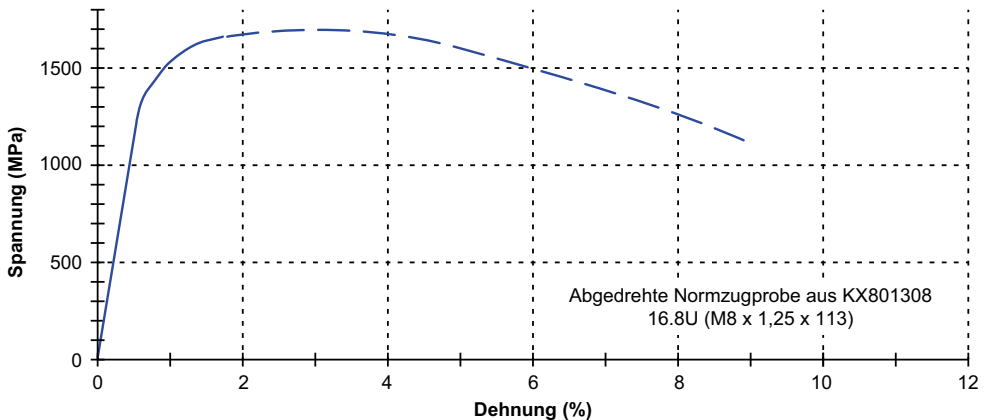


Bild 2.4 Zugversuchskurve Werkstoffzustand 16.8U, Dehngrenzverhältnis $>0,8$

Neben den oben beschriebenen, im Zugversuch ermittelten Werkstoffkennwerten kommen zur umfassenden Beschreibung der mechanischen Werkstoffeigenschaften noch eine Reihe weiterer Prüfungen, wie zum Beispiel der Prüfkraftversuch nach DIN EN ISO 898-1 [4], die Dauerschwingprüfungen nach DIN 969 [24], der Schlagzugversuch oder der Schlagbiegeversuch nach DIN EN ISO 148-1 [19] oder Härtemessung zur Anwendung. Auf diese Prüfverfahren wird nachfolgend ebenfalls eingegangen.

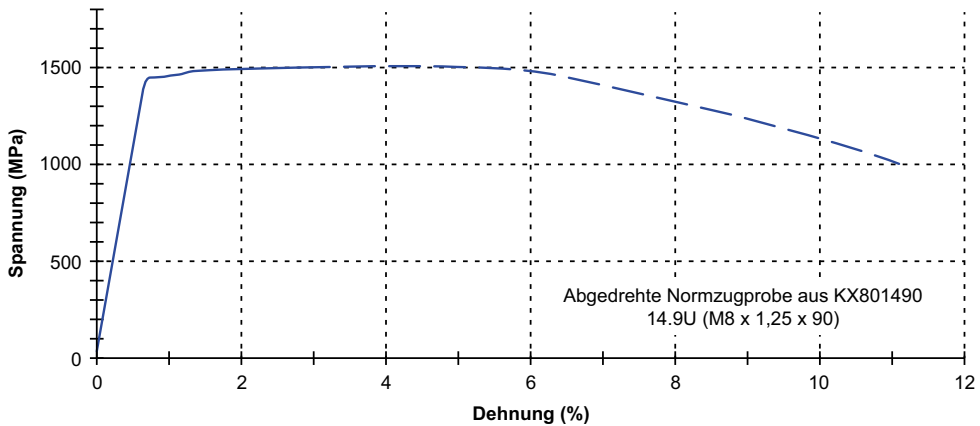


Bild 2.5 Zugversuchskurve Werkstoffzustand 14.9U, Dehngrenzverhältnis $>0,9$

2.2 Mechanische Kennwerte bei Raumtemperatur

Tabelle 2.2 zeigt einen Überblick über die mechanischen Kennwerte verschiedener KXtreme-Festigkeitsklassen. Da die Dehngrenze $R_{p0,2}$ und somit auch das Dehngrenzverhältnis $R_{p0,2}/R_m$, wie in Abschnitt 2.2.2 gezeigt wird, durch Wahl des Herstellprozesses und des Werkstoffs gezielt gesteuert werden können, lassen sich teilweise pro Festigkeitsklasse unterschiedliche Mindest-Dehngrenzwerte einstellen.

Tabelle 2.2 Zugversuchskennwerte und Härte von ultrahochfesten KXtreme-Schrauben in Abhängigkeit des Werkstoffs bzw. nach VDA 235-205 [5] und USCAR-IFI-Guide [6] für ultrahochfeste Schrauben

	Festigkeits- klasse	12.8U	12.9U	14.8U	14.9U	15.8U	15.9U	16.8U	17.8U
R_m	$R_{m \min} - R_{m \max}$ [MPa]	1220...1370		1400...1550		1500...1650		1600... 1750	1700... 1850
$R_{p0,2 \min}^1)$	nach VDA [5] und USCAR [6] [MPa]	$\geq 980^{(3)}$	$\geq 1100^{(3)}$	≥ 1120	$\geq 1260^{(3)}$	≥ 1200	$\geq 1350^{(3)}$	≥ 1280	–
	KX-2 [MPa]	–	–	≥ 1200	–	≥ 1290	–	≥ 1380	–
	KX-3 [MPa]	–	≥ 1130	–	≥ 1300	≥ 1320	≥ 1400	≥ 1400	≥ 1450
	SAE 8640 [MPa]	≥ 1020	–	≥ 1120	–	≥ 1200	–	≥ 1280	–
A_5	nach VDA [5] und USCAR [6] [%]	$\geq 12\%^{(3)}$	$\geq 12\%^{(3)}$	$\geq 10\%$	$\geq 10\%^{(3)}$	$\geq 9\%$	$\geq 9\%^{(3)}$	$\geq 8\%$	–
	KXtreme	$\geq 12\%$	$\geq 13\%$	$\geq 10\%$	$\geq 11\%$	$\geq 9\%$	$\geq 10\%$	$\geq 8\%$	$\geq 8\%$
Z	nach VDA [5] und USCAR [6] [%]	$\geq 52\%^{(3)}$	$\geq 52\%^{(3)}$	50%	$\geq 50\%^{(3)}$	48%	$\geq 48\%^{(3)}$	44%	–
	KXtreme	$\geq 52\%$	$\geq 52\%$	$\geq 50\%$	$\geq 50\%$	$\geq 48\%$	$\geq 48\%$	$\geq 46\%$	$\geq 46\%$
S_p [MPa]	nach VDA [5] und USCAR [6]	$\geq 870^{(3)}$	$\geq 970^{(3)}$	985	$\geq 1110^{(3)}$	1050	$\geq 1185^{(3)}$	1115	–

Tabelle 2.2 Zugversuchskennwerte und Härte von ultrahochfesten KXtreme-Schrauben in Abhängigkeit des Werkstoffs bzw. nach VDA 235-205 [5] und USCAR-IFI-Guide [6] für ultrahochfeste Schrauben – Fortsetzung

	Festigkeitsklasse	12.8U	12.9U	14.8U	14.9U	15.8U	15.9U	16.8U	17.8U
Härte ²⁾ HV10	nach VDA [5] und USCAR [6]	380...430 ³⁾		420...480	425...475 ³⁾	455...515	455...515 ³⁾	490...550	–
	KXtreme	385...435		425...475		450...500		480...530	505...550
Härte ²⁾ HRc	nach USCAR [6]	–		42...48	–	45...51	–	49...52	–

¹⁾ Dehngrenzverhältnis ist werkstoffabhängig, s. Abschnitt 2.2.2

²⁾ Die Umwertung der Zugfestigkeit aus der Härte unterliegt einer großen Ungenauigkeit. Maßgebend soll die Zugfestigkeit sein.

³⁾ Werte in Diskussion für Neuausgabe VDA 235-205. In derzeitiger Ausgabe VDA 235-205 [5] und USCAR [6] nicht enthalten.

Die Mindestbruchkraft $F_{m, \min}$ einer Schraube berechnet sich nach Gl. 2.1 aus der Mindestzugfestigkeit R_m des Schraubenwerkstoffs und dem höchstbelasteten Spannungsquerschnitt:

$$F_{m, \min} = R_{m, \min} \cdot A_s \tag{Gl. 2.5}$$

Werte $R_{m, \min}$ für die jeweilige Festigkeitsklasse können Tabelle 2.2 entnommen und A_s nach Gl. 2.4 aus dem Flanken- und Kerndurchmesser des Gewindes [30; 31] berechnet bzw. den Tabellen 2.3 bis 2.6 entnommen werden.

Tabelle 2.3 Mindestbruchkräfte metrischer ISO-Regelgewinde ultrahochfester Schrauben der Toleranzlage 6g

Gewinde-Toleranzklasse 6g			Festigkeitsklasse				
			12.8U, 12.9U	14.8U, 14.9U	15.8U, 15.9U	16.8U	17.8U
D [mm]	Gewinde	$A_{s, \min, 6g}$ [mm ²]	Mindestbruchkräfte $F_{m, \min}$ [N]				
6	M6×1	18,9	23060	26460	28350	30240	32130
7	M7×1	27,4	33430	38360	41100	43840	46580
8	M8×1,25	34,8	42460	48720	52200	55680	59160
9	M9×1,25	46,0	56120	64400	69000	73600	78200
10	M10×1,5	55,4	67590	77560	83100	88640	94180
11	M11×1,5	69,4	84670	97160	104100	111040	117980
12	M12×1,75	80,8	98580	113120	121200	129280	137360
14	M14×2	111,0	135420	155400	166500	177600	188700
16	M16×2	151,5	184830	212100	227250	242400	257550
18	M18×2,5	186,1	227040	260540	279150	297760	316370
20	M20×2,5	237,6	289870	332640	356400	380160	403920

Tabelle 2.4 Mindestbruchkräfte metrischer ISO-Regelgewinde ultrahochfester Schrauben der Toleranzlage 6e

Gewinde-Toleranzklasse 6e			Festigkeitsklasse				
			12.8U, 12.9U	14.8U, 14.9U	15.8U, 15.9U	16.8U	17.8U
D [mm]	Gewinde	A_s min 6e [mm ²]	Mindestbruchkräfte $F_{m, \min}$ [N]				
6	M6×1	18,6	22690	26040	27900	29760	31620
7	M7×1	27,1	33060	37940	40650	43360	46070
8	M8×1,25	34,4	41970	48160	51600	55040	58480
9	M9×1,25	45,6	55630	63840	68400	72960	77520
10	M10×1,5	55,0	67100	77000	82500	88000	93500
11	M11×1,5	68,9	84060	96460	103350	110240	117130
12	M12×1,75	80,2	97840	112280	120300	128320	136340
14	M14×2	110,4	134690	154560	165600	176640	187680
16	M16×2	150,7	183850	210980	226050	241120	256190
18	M18×2,5	185,2	225940	259280	277800	296320	314840
20	M20×2,5	236,6	288650	331240	354900	378560	402220

Tabelle 2.5 Mindestbruchkräfte metrischer ISO-Feingewinde ultrahochfester Schrauben der Toleranzlage 6g

Gewinde-Toleranzklasse 6g			Festigkeitsklasse				
			12.8U, 12.9U	14.8U, 14.9U	15.8U, 15.9U	16.8U	17.8U
D [mm]	Gewinde	A_s min 6g	Mindestbruchkräfte $F_{m, \min}$ [N]				
6	M6×0,75	20,9	25500	29260	31350	33440	35530
7	M7×0,75	29,8	36360	41720	44700	47680	50660
8	M8×0,75	40,3	49170	56420	60450	64480	68510
8	M8×1	37,4	45630	52360	56100	59840	63580
9	M9×1	49,1	59900	68740	73650	78560	83470
10	M10×1	62,3	76010	87220	93450	99680	105910
10	M10×1,25	58,9	71860	82460	88350	94240	100130
11	M11×1	77,1	94060	107940	115650	123360	131070
12	M12×1	93,3	113830	130620	139950	149280	158610
12	M12×1,25	89,0	108580	124600	133500	142400	151300
12	M12×1,5	84,8	103460	118720	127200	135680	144160
14	M14×1	130,7	159450	182980	196050	209120	222190
14	M14×1,5	120,6	147130	168840	180900	192960	205020
16	M16×1	174,3	212650	244020	261450	278880	296310
16	M16×1,5	162,7	198490	227780	244050	260320	276590