



Fabian Kraemer

Bewertung von Einflussfaktoren auf das Montage- und Ermüdungsverhalten gewindefurchender und metrischer Schraubenverbindungen

**Schriftenreihe des Zentrums für
Konstruktionswerkstoffe (MPA + IfW):
„Werkstofftechnologie“**

Hrsg: Prof. Dr.- Ing. Matthias Oechsner



Bewertung von Einflussfaktoren auf das Montage- und Ermüdungsverhalten gewindefurchender und metrischer Schraubenverbindungen



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



am Fachbereich Maschinenbau
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Fabian Kraemer
aus Freising

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche

Tag der Einreichung: 14.10.2019
Tag der mündlichen Prüfung: 17.12.2019

Darmstadt 2019
D17

Kraemer, Fabian: Bewertung von Einflussfaktoren auf das Montage- und Ermüdungsverhalten gewindefurchender und metrischer Schraubenverbindungen
Darmstadt, Technische Universität Darmstadt,
Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUpriints: 2020
Tag der mündlichen Prüfung: 17.12.2019

Veröffentlicht unter CC BY-NC-ND 4.0 International
<https://creativecommons.org/licences/>

Schriftenreihe des Zentrums für Konstruktionswerkstoffe
(MPA + IfW): "Werkstofftechnologie"

Fabian Kraemer

**Bewertung von Einflussfaktoren auf das Montage-
und Ermüdungsverhalten gewindefurchender und
metrischer Schraubenverbindungen**

D17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2020

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7258-7

ISSN 2363-779X

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde (IfW) der Technischen Universität Darmstadt.

Dem Leiter der staatlichen Materialprüfungsanstalt (MPA) und des Fachgebiets und Instituts für Werkstoffkunde, Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner, danke ich für die Betreuung und Unterstützung bei der Entstehung dieser Arbeit. Vielen Dank für die Übernahme der Berichterstattung und das mir stets entgegengebrachte Vertrauen, insbesondere in der Zeit, in der mir die kommissarische Abteilungsleitung für den Kompetenzbereich Bauteilfestigkeit übertragen wurde.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche, dem Leiter des Instituts für Produktionstechnik und Umformmaschinen, gilt mein herzlicher Dank für die freundliche Übernahme der Mitberichterstattung.

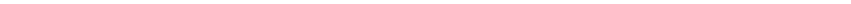
Meiner Familie und meinen Eltern gilt ein besonderer Dank, die mir in jeder Lebenslage stets ein Vorbild sind, mich durchweg unterstützt haben und bei jeder Entscheidung auf meinem bisherigen Weg voll und ganz hinter mir standen. Meinem Vater danke ich darüber hinaus für die zahlreichen fachlichen Diskussionen und Anregungen. Von der alten Ingenieurschule kann man doch auch heute noch sehr viel lernen.

Bei meinem ehemaligen Arbeitgeber und Ausbildungsbetrieb während des dualen Studiums, der Firma EJOT, möchte ich mich ausgesprochen bedanken. Die mir ermöglichten Erfahrungen im Bereich Forschung und Entwicklung und auch die internationalen Erfahrungen, besonders in USA und Mexiko, bildeten ein wertvolles Fundament für den Schritt „Dissertation“. Darüber hinaus vielen Dank für die bereitgestellten Muster, das Mitwirken im Arbeitskreis und die zahlreichen Gespräche und Diskussionen.

Dem gesamten Kompetenzbereich Bauteilfestigkeit um den Leiter Herrn Dr.-Ing. Marcus Klein und auch dem ehemaligen Leiter Herrn Dr.-Ing. Jörg Beyer möchte ich ganz herzlich danken. Bei Marcus möchte ich mich ganz besonders bedanken. Du hast mich auf deine respektvolle und freundschaftliche Art gefördert und gefordert und damit zu dem Erfolg dieser Arbeit in besonderem Maße beigetragen. Ich möchte mich besonders bei meinen direkten Bürokollegen Andrea, Andreas und natürlich bei Anna für die tolle gemeinsame Zeit am Institut bedanken. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei meinen ehemaligen Kollegen Andre, Fabian und Dominic sowie bei den Prüflingenieurinnen und Technikern für ihre Unterstützung und die tolle Zusammenarbeit.

Dem Geschäftsführer des Deutschen Schraubenverbands, Herrn Dr.-Ing. Stefan Beyer, gilt mein Dank für die tolle Unterstützung, auch die Möglichkeit im Arbeitskreis Gemeinschaftsforschung mitzuwirken und für die Teilnahme an der Schraubfachausbildung.

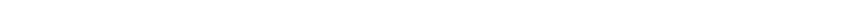
Der größtmögliche Dank gilt meiner Frau Anna. Deine fachliche und moralische Unterstützung, dein Rückhalt und dein bedingungsloses Verständnis in diesem aufregenden Jahr, gekrönt von der Geburt unseres Sohnes kurz vor der Disputation, all das werde ich dir nie vergessen. Vielen Dank!



Kurzfassung

Die Zuverlässigkeit und die Lebensdauer von Schraubenverbindungen hängen von vielen Einflussfaktoren ab. Die Direktverschraubung mittels gewindefurchender Schrauben stellt ein Fügeverfahren dar, das gegenüber konventionellen Verfahren mit einer signifikanten Prozesskostenreduzierung verbunden ist und gleichzeitig verbesserte mechanische Eigenschaften mit höherer Beanspruchbarkeit aufweist. Für die umformende Gewindefertigung und die große Produktvielfalt gewindefurchender Schrauben besteht aktuell großer Forschungsbedarf, um die relevanten Einflussfaktoren auf das Montage- und Betriebsverhalten zu identifizieren und zu bewerten. In Form einer systematischen Untersuchung des Gewindefurchens werden in dieser Arbeit das Einschraubverhalten praxistypischer Gewindegeometrien und Oberflächensysteme untersucht und das gefurchte Muttergewinde charakterisiert. Die methodische Vorgehensweise stützt sich zunächst auf ein Screening repräsentativer Schraubentypen, um speziell den Einfluss der Furchspitzengeometrie als formgebendes Werkzeug zu bewerten. Die separierte Betrachtung des tribologischen Einflusses erfolgt durch Variation anwendungstypischer Oberflächenbeschichtungen und Gleitmittelsysteme. Das Einschraubverhalten wird nach DIN 267-30 bewertet und anhand des Drehmoment-Drehwinkelverlaufs systematisch in zwei Bereiche unterteilt, die charakteristisch dem Umformvorgang und den Reibverhältnissen beim Einschrauben zugeordnet werden können. Die Bewertung der Gewindeausformung wird metallografisch und mithilfe der Computertomografie vorgenommen. Das kaltverfestigte Muttergewinde kennzeichnet ein Härtegradient, ausgehend vom maximal verformten Randbereich, der mittels Nano-Indentation bestimmt wird. Anwendungsorientiert wird der Einfluss der Montagedrehzahl und die Größe des Vorlochdurchmessers für die praxisrelevante Einschraubtiefe $t_E = 2,5x_d$ untersucht. Vorspannkraftmessungen sowie Überdreh- und Auszugsversuche führen zu einer Bewertung der quasi-statischen Beanspruchbarkeit. Für die Berechnung der Mindesteinschraubtiefe wird ein analytischer Berechnungsansatz hergeleitet.

Das experimentell untersuchte Ermüdungsverhalten von Schraubenverbindungen mit gefurchtem Gewinde zeigt vergleichend zu geschnittenem Muttergewinde höhere Beanspruchbarkeiten. Eine systematische Analyse zur Bestimmung des Einflusses der sich einstellenden Lastverteilung erfolgt durch Versuche mit geschnittenen Muttergewinden aus Stahl und Aluminium für unterschiedliche Einschraubtiefen. Die Mittellastabhängigkeit wird durch Versuche im elastischen Vorspannkraftbereich von $0,2 \cdot F_{0,2} \leq F_m \leq 0,8 \cdot F_{0,2}$ und an zuvor überelastisch vorbelasteten Varianten untersucht. Letztere zeigen Verbesserungen der Lebensdauer infolge einer geänderten Lastverteilung und vorlastinduzierter Druckeigenspannungen bis max. 111 % bei gleicher Mittellast. Zur Analyse der Kontakt- und Lasteinleitungsbedingungen sowie zur Bewertung des Oberflächen- und Gewindereibungseinflusses werden systematische Prüfungen mit unterschiedlicher Lastaufbringung durchgeführt. Die numerische Simulation wird als unterstützende Methode eingesetzt, um aus experimentellen Ergebnissen bereits abgeleitete Hypothesen zu validieren und vertiefend zu interpretieren. Für die geprüften Schraube-Mutter-Konfigurationen wird die resultierende Lastverteilung auf Basis elastischen und elastisch-plastischen Materialverhaltens bestimmt. Die elastische Berechnung dient der Bestimmung der für die Schraubenverbindung kräftegebundenen Kerbformzahlen und der resultierenden Stützwirkung infolge der inhomogenen Spannungsverteilung über den Schraubenquerschnitt. Die Bestimmung der örtlichen Beanspruchungen wird für elastisch verspannte und überelastisch vorbelastete Schraubenverbindungen vorgenommen und anhand lokaler Spannungs-Dehnungs-Hysteresen vergleichend bewertet.

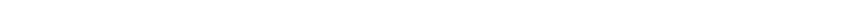


Abstract

The reliability of bolted joints is determined by a large number of influencing factors. Self-tapping screws lead to both a reduction of process costs and an improvement of the static and cyclic strength of the connection. A large variety of thread forming screws denotes great need for research in the field of directly threaded screw connections. In terms of a systematic investigation of thread forming the installation behavior as well as the characterization of the formed nut thread will be investigated for different thread styles and surface systems.

The methodological approach is based on a screening of representative thread forming screws particularly in order to evaluate the influence of the shaping point. The separated consideration of the tribological influence is investigated by varying application-typical coatings and lubricant systems for one chosen thread geometry. The torque - rotation angle curve is evaluated based on the torque gradient. There will be a systematic classification into two sections, which are characteristic for the forming process on the one hand and for the friction conditions while screwing in on the other hand. The formed nut thread shape is investigated by metallographic microsections as well as by means of computed tomography (CT). Further characterization is made by the evaluation of the strain hardening effect of the formed nut thread. By means of nano-indentations hardness profiles, starting from the area of maximum deformation, are determined. With regard to practical demands, screw-in depths up to $t_E = 2.5x_d$ as well as the influence of the installation speed and the size of the pre-drilled pilot hole are investigated as characteristic parameters. The quasi-static load capacity is evaluated by means of pre-load measurements, stripping torque by over-driving tests and pull out tests for different depths of engagement. For the calculation of the minimum depth of engagement an analytical approach will be derived under consideration of the formed thread shape determined by the size of the pre-drilled pilot hole.

The fatigue behavior is investigated comparing formed and cut threads. A systematic analysis of the influence of the load distribution on the fatigue strength is done by experimental tests with cut nut threads made from steel and aluminum for different nut heights. Due to the requirement of high reliability screw connections are increasingly installed beyond yield strength. The assessment of the pre-load level as an influence on the fatigue strength both elastically as well as over-elastically pre-loaded connections are tested in the range of 0.2 to 0.8 $F_{0.2}$ as constant controlled mid-load. When an over-elastic pre-load is applied, the fatigue strength was increased up to max. 111 % . This investigation is based on an improved load distribution and compressive residual stresses, deriving from an inhomogeneous stress distribution (notch effect). In detail, further analyses are performed to evaluate the influence of the contact area and load transmitting conditions as well as for the evaluation of the surface and thread friction influence. A systematic testing by means of different ways of load application lead to an assessment of the main influencing effects on the fatigue strength. Numerical simulations on the load distribution for the tested configurations of different nut styles and materials are executed in order to validate the hypotheses derived from the experimental results and in order to expand the understanding and interpretation of their influences on the fatigue strength. Both elastic as well as elastic-plastic material behavior were mainly considered to determine notch factors and the resulting strains determined by the load distribution. The comparison of local stress-strain hysteresis for elastically stressed and over-elastically pre-loaded connections lead to an assessment of the fatigue behavior and the evaluation of the mid-load dependency of bolted connections.



Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Kurzfassung	III
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Grundlagen des Gewindefurchens	4
2.1.1 Gewindefurchende Schrauben und Normen	5
2.1.2 Konstruktive Auslegung	8
2.2 Ermüdungsverhalten von Schraubenverbindungen	10
2.2.1 Einflussfaktoren auf die Ermüdungsfestigkeit	11
2.2.2 Festigkeitsnachweiskonzepte	14
3 Problemstellung und Zielsetzung	17
3.1 Forschungsbedarf	17
3.2 Bearbeitungskonzept	18
4 Probekörper und Versuchstechnik	21
4.1 Probekörper	21
4.2 Anziehprüfstände	23
4.3 Universalzugprüfmaschine	23
4.4 Hochfrequenzresonanzpulsatoren	24
4.5 Computertomograf	24
4.6 Nano-Indenter	24
4.7 Sonstige Versuchstechnik	24
5 Gewindefurchende Schraubenverbindungen	25
5.1 Grundcharakterisierung	25
5.1.1 Mechanische Bauteilkennwerte nach DIN EN ISO 898-1	26
5.1.2 Werkstoffkennwerte für die numerische Simulation	28
5.2 Screening gewindefurchender Schrauben	29
5.2.1 Einschraubversuche	30
5.2.2 Charakterisierung der Mutterngewinde	36
5.3 Bewertung des Oberflächen- und Gleitmitteleinflusses	50
5.3.1 Einschraubversuche	50
5.3.2 Gewindeausformung - Computertomografie	54
5.3.3 Montageversuche	58
5.4 Anwendungsorientierte Bauteilverschraubung	62
5.4.1 Einschraubversuche	62
5.4.2 Gewindeausformung - Schliiffbilder	65
5.4.3 Nano-Indentation	68
5.4.4 Ausreißversuche	71
5.5 Schlussfolgerung und Fazit	73

6	Ermüdungsverhalten von Schraubenverbindungen	77
6.1	Einfluss der Muttergewindeart	78
6.2	Einfluss des Mutterwerkstoffs und der Mutternhöhe	81
6.3	Einfluss der Vorspannung	84
6.4	Diskussion und Identifikation der Mechanismen	88
6.4.1	Einfluss der überelastischen Vorbelastung	90
6.4.2	Werkstoffanalytik	92
6.4.3	Einfluss der Oberfläche	95
6.4.4	Einfluss der Gewindereibung	98
6.5	Schlussfolgerung und Anwendbarkeit	100
7	Numerische Simulation	103
7.1	Lastverteilung und örtliche Beanspruchungen	103
7.1.1	Spannungsverteilung der Schraube-Mutter-Verbindung	103
7.1.2	Kerbformzahl und Stützwirkung	107
7.1.3	Validierungsversuche - Mutternaufleger	109
7.2	Überelastische Vorbelastung	110
7.2.1	Freie belastete Kerbprobe	110
7.2.2	Schraube-Mutter-Verbindung	112
7.3	Schlussfolgerung und Fazit	117
8	Zusammenfassung	120
9	Ausblick	126
10	Anhang	130
	Literaturverzeichnis	190
	Abbildungsverzeichnis	195
	Tabellenverzeichnis	200
	Lebenslauf	201
	Konferenzbeiträge, Veröffentlichungen und Lehre	202

Abkürzungsverzeichnis

Kürzel	Beschreibung
a_G	Werkstoffkonstante zur Berechnung der Stützziffer nach Stieler
b_{Flanke}	Breite der Schraubenflankenspitze
b_G	Werkstoffkonstante zur Berechnung der Stützziffer nach Stieler
d	Durchmesser der Schraube
d_2	Flankendurchmesser
d_3	Kerndurchmesser der Schraube
d_{Kerbe}	Kerbgrunddurchmesser (Kerbprobe)
d_{VL}	Vorlochdurchmessers
e	Elementkantenlänge
f	Prüffrequenz
f_{last}	Lastflankenseitige radiale Ausprägung des gefurchten Gewindes
$flZn$	Zinc Flake (Zinklamelle)
f_p	Längenänderung der Platten (Verspannungsschaubild)
$f_{\text{rück}}$	Rückflankenseitige radiale Ausprägung des gefurchten Gewindes
f_s	Längenänderung der Schraube (Verspannungsschaubild)
h_f	Höhe des Fischeuges (gefurchtes Gewinde)
h_n	Abscherhöhe im Gewindeeingriff
h_V	verfestigter Bereich (gestreckte Kornstruktur)
k	Steigungsexponent (Wöhlerlinie), Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Gewindeausformung
krz	kubisch raumzentrierte Gitterstruktur
l	Nennlänge
l_1	Hebelarm des Kraftangriffs im Muttergewindezahn
$l_{\text{Furch}}, l_{\text{fr}}$	Furchlänge
m	Mutternhöhe
m_{eff}	effektive Mutternhöhe
n	Drehzahl, Stichprobenanzahl
n_r	Anzahl der Radien
n_σ	Stützziffer
n_φ	Anzahl der Winkel
r	Abstand vom Kerbrand in Richtung des Bauteilinneren
r_{AP80}	Gewindegrundradius gewindefurchende Schraube ALtracs® Plus 80
r_{M8}	Gewindegrundradius ISO-metrische Schraube M8
r_{MG}	Radius der Muttergewindegrundausrundung (gefurchtes Gewinde)
rpm	revolutions per minute (Umdrehungen pro Minute)
s	Standardabweichung, Weg
s_{ulot}	Standardabweichung der Gesamtreibungszahl
s_d	Standardabweichung des Nenndurchmessers (optische Vermessung)
s_{d3}	Standardabweichung des Kerndurchmessers (optische Vermessung)
s_K	Standardabweichung des K-Faktors
s_P	Standardabweichung der Steigung (optische Vermessung)
t_E	Einschraubtiefe
t_{eff}	effektive Einschraubtiefe
tZn	thermisch Zink

Kürzel	Beschreibung
A	Bruchdehnung
Al	Aluminium
AP	ALtracs® Plus
A _S	Spannungsquerschnitt
A _{SGM}	Scherfläche des Muttergewindes
A _{SGS}	Scherfläche des Schraubengewindes
C ₁	Konstante zur Berechnung der Mindesteinschraubtiefe
C ₃	Konstante zur Berechnung der Mindesteinschraubtiefe
C _{IT}	Kriechmodul
CT	Computertomografie
D ₁	Kerndurchmesser des Muttergewindes
DF	Dry Film
D _{Km}	Kopfreibdurchmesser
E	Elastizitätsmodul
E _{IT}	Eindringmodul
EN	Europäische Norm
F	Kraft
F _{0,2}	Kraft an der 0,2%-Dehngrenze
F _A	Kraftamplitude
F _{ASV50}	ertragbare Kraftamplitude mit 50 % Überlebenswahrscheinlichkeit
FK	Festigkeitsklasse
F _m	Mittellast (Ermüdungsversuch), Kraft bei Zugfestigkeit (Zugversuch)
F _{m0}	Kraft bei axialer Vorbelastung
F _{m0T}	Kraft bei Vorbelastung mit Torsion
F _o	Oberlast
F _P	Prüfkraft nach DIN EN ISO 898-1
F _{PA}	Plattenzusatzkraft
F _{pf}	Kraft der 0,0048 d - Dehngrenze
F _{SA}	Schraubenzusatzkraft
F _{Sm}	mittlere Schraubenkraft
FSP	Forschungsschwerpunkt
F _{Step i}	Belastungshöhe für den Belastungsschritt i (FE-Simulation)
F _v	Vorspannkraft
F _{v max}	maximale Vorspannkraft
G	Gradient
GfS	Gewindefurchende Schraube
GZ	Gleitmittelzusatz
G _σ	bezogenes Spannungsgefälle
H	Gewindetiefe nach DIN 13
HB	Härte nach Brinell
H _{IT}	Eindringhärte
H _{ITr}	Eindringhärte in Richtung des Radius
H _{ITφ}	Eindringhärte über den Winkel
HV	Härte nach Vickers, HV-Schraube (hochfest vorspannbar)

Kürzel	Beschreibung
K	K-Faktor zur Beschreibung der Reibung
K _f	Kerbwirkungszahl
K _t	Kerbformzahl
LE ₂₂	logarithmische Axialdehnung in 22-Richtung
M	Drehmoment, Mutternversagen im Ausreiversuch, Mittelspannungsempfindlichkeit
M _A	Anziehdrehmoment
M _{brech}	Losbrechdrehmoment
M _E	Einschraubdrehmoment
M _{Furch}	Furchmoment
M _G	Gewindereibmoment
MK	Mutternkrper
M _{L max}	maximales Losdrehmoment
M _{max}	maximales Drehmoment
M _Ü	berdrehmoment
M _V	Versagensmoment
N	Schwingspielzahl
N _B	Bruchlastspielzahl
N _G	Grenzschwingspielzahl
NI	Nano-Indentation
P	Gewindesteigung
PE	plastische Dehnung
PE _{MaxP}	plastische Hauptdehnung
P _J	Schädigungsparameter nach Vormwald
P _{SWT}	Schädigungsparametern nach SMITH, WATSON und TOPPER
P _{SWT, Bergmann}	Schädigungsparameter P _{SWT} mit Mittelspannungskorrektur nach Bergmann
P _Ü	Überlebenswahrscheinlichkeit
P _{Ü50}	Überlebenswahrscheinlichkeit von 50 %
R	Spannungsverhältnis
REM	Rasterelektronenmikroskop
R _m	Zugfestigkeit
R _{mB}	Zugfestigkeit des Bolzengewindes (Berechnung Mindesteinschraubtiefe)
ROI	Range of Interest (CT-Auswertung)
R _{p0,2}	0,2 %-Dehngrenze
S	Schraubenbruch
SG	schlussgewalzt
St	Stahl
SV	schlussvergtet
T	Streumaß in Belastungsrichtung (Wöhlerlinie)
T ₁ , T ₂ , T ₃	Temperatur (Thermoelement)
T ₄	Oberflächentemperatur (Infrarotkamera)
TA	Traganteil
TN	Test Number (Gleitmittel)
E	berelastisch (vorbelastet)
XRD	X-ray Diffraction

Kürzel	Beschreibung
α	Flankenwinkel
α_k	Kerbformzahl
α_k^*	kräftegebundene Kerbformzahl
β	Rückflankenwinkel
β_k	Kerbwirkungszahl
γ	Lastflankenwinkel
δ_p	Plattennachgiebigkeit
δ_s	Schraubennachgiebigkeit
ε	Dehnung
ε_{22}	Axialdehnung in 22-Richtung
ε_a	örtliche Dehnungsamplitude
$\varepsilon_{\text{nenn}}$	Nenndehnung
ε_W	wahre Dehnung
ϑ	Drehwinkel
κ	Anstellwinkel der Gewindefurchspitze
μ_b	Kopfreibungszahl
μ_{th}	Gewindereibungszahl
σ	Spannung
σ_1	1. Hauptspannung, oberer Spannungswert zur Berechnung des bezogenen Spannungsgradienten
σ_2	unterer Spannungswert zur Berechnung des bezogenen Spannungsgradienten
σ_{22}	Axialspannung in 22-Richtung
σ_a	örtliche Spannungsamplitude
σ_m	Mittelspannung
σ_{max}	Maximale Spannungsüberhöhung bei Kerben
σ_{nenn}	Nennspannung
σ_o	Oberspannung
σ_{rs}	Eigenspannung (residual stress)
σ_u	Unterspannung
σ_W	wahre Spannung
σ_{ASG}	ertragbare Nennspannungsamplitude für schlussgewalzte Schrauben
σ_{ASV50}	ertragbare Nennspannungsamplitude für schlussvergütete Schrauben
T_{BM}	Scherfestigkeit des Mutterwerkstoffs
T_{BS}	Scherfestigkeit des Schraubenwerkstoffs
φ	Winkel (Prüfmuster, Nano-Indentation)
Δr	Abstand der Prüfradien, Prüfraster bei instrumentierter Härteprüfung
Δx	Änderung in x-Richtung zur Berechnung des Spannungsgefälles
ΔF_A	Schwingbreite der Kraftamplitude, Stufensprung
ΔM	Schraubkanal, Drehmomentänderung
$\Delta \sigma$	Spannungsdifferenz
$\Delta \vartheta$	Drehwinkeländerung
$\Delta \varphi$	Winkeländerung, Prüfraster bei instrumentierter Härteprüfung
θ	Beugungswinkel
Ψ	Kippwinkel