

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	5
<b>Verwendete Formelzeichen</b>	17
<b>1 Einführung</b>	19
1.1 Ziele und Ausrichtung des Buches	19
1.2 Bauteile einer Schraubenverbindung	20
1.3 Anforderungen an eine Schraubenverbindung	21
1.4 Ausgewählte Eigenschaften von Schraubenverbindungen	22
1.5 Aufbau und Inhalt des Buches	23
<b>2 Grundlagen</b>	25
2.1 Grundlagen der Technischen Mechanik	25
2.1.1 Coulomb'scher Reibungseffekt	25
2.1.2 Schiefe Ebene und Selbsthemmung	27
2.1.3 Schiefe Ebene als Kraftverstärkung	29
2.1.4 Erzeugung eines Drehmomentes	30
2.1.5 Kraftverstärkung durch schiefe Ebene und Hebelarm	31
2.1.6 Zug- und Druckspannung	33
2.1.7 Torsionsspannung	35
2.2 Grundlagen zu Gewinden	36
2.2.1 Entstehung einer Schraubenlinie	36
2.2.2 Bewegungsgewinde	38
2.2.3 Befestigungsgewinde	38
2.2.4 Gewindesteigung und Kraftverstärkung	40
2.2.5 Feingewinde	42
2.3 Analyse einer Schraubenverbindung	43
<b>3 Normen und Richtlinien</b>	45
3.1 DIN-Normen	45
3.2 VDI Richtlinie 2230	45
3.3 VDI/VDE-Richtlinie 2862	46
3.4 Technische Lieferbedingungen	46
<b>4 Werkstoffe und Fertigung</b>	47
4.1 Zusammenhänge von Werkstoff, Fertigung und Funktion	47
4.1.1 Auswahl von Werkstoffen	47
4.1.2 Werkstofftechnische Kennwerte	47
4.1.3 Zugversuch	48
4.2 Festigkeit	49
4.2.1 Festigkeitsklassen für Schrauben	49
4.2.2 Festigkeitsklassen für Muttern	51
4.2.3 Festigkeit von Platten	51
4.2.4 Festigkeitsklassen für Schrauben und Muttern aus Edelstählen	52
4.2.5 Festigkeit von Schrauben und Muttern aus Leichtmetallen	52

4.3	Fertigung und Nachbehandlung von Schrauben und Muttern .....	52
4.3.1	Fertigungsverfahren .....	52
4.3.2	Genauigkeit .....	53
4.3.3	Werkstoffnachbehandlung .....	54
4.3.4	Beschichtung .....	55
4.3.5	Schmierung .....	56
4.4	Aspekte zu Werkstoff- und Fertigungseigenschaften .....	57
4.4.1	Aspekte zur Fertigung von Platten .....	57
4.4.2	Verhalten der Platten unter Last .....	58
<b>5</b>	<b>Belastungen und Beanspruchungen .....</b>	<b>59</b>
5.1	Analyse der Verbindung .....	59
5.1.1	Zugkraft und Zugspannung in der Schraube .....	59
5.1.2	Drehmoment und Torsionsspannung in der Schraube .....	62
5.1.3	Vergleichsspannung in der Schraube .....	63
5.1.4	Flächenpressung unter der Kopfauflage .....	63
5.1.5	Grenzflächenpressung .....	64
5.1.6	Druckspannung in den Platten .....	66
5.2	Verformungen .....	66
5.2.1	Federsteifigkeiten und Nachgiebigkeiten .....	66
5.2.2	Ermittlung der Nachgiebigkeiten der Schrauben .....	68
5.2.3	Ermittlung der Nachgiebigkeiten der Platten .....	70
5.2.4	Beispiele für ausgewählte Nachgiebigkeiten der Platten .....	72
5.3	Verspanntes System und Verspannungsschaubild .....	73
5.3.1	Schrauben und Platten als Federn .....	74
5.3.2	Schraubenverbindung als Federschaltung .....	74
5.3.3	Verspannungsschaubild .....	75
5.3.4	Einfluss der Montagevorspannkraft .....	76
5.3.5	Setzkraft und Restklemmkraft .....	77
5.4	Erweiterung des Verspannungsschaubildes .....	77
5.4.1	Einleitung einer axial wirkenden Betriebskraft .....	77
5.4.2	Einleitung einer axialen Druckkraft .....	79
5.4.3	Einleitung einer axialen Zugkraft innerhalb der Klemmlänge .....	80
5.4.4	Dynamische Betriebskräfte .....	81
5.5	Weitere Belastungen .....	82
5.5.1	Thermische Belastungen .....	82
5.5.2	Betriebskräfte quer zur Schraubenachse .....	82
5.5.3	Selbsttätiges Lösen von Schraubenverbindungen .....	83
5.5.4	Beispiel Pleuelverschraubung .....	84
5.5.5	Weiterführende Belastungs- und Beanspruchungsanalysen .....	85
<b>6</b>	<b>Berechnung der Belastungen und Beanspruchungen im Detail .....</b>	<b>87</b>
6.1	Ablauf der Berechnung .....	87
6.1.1	Randbedingungen .....	88
6.1.2	Vorgaben .....	88
6.1.3	Verspannung .....	88
6.1.4	Beanspruchungsfälle .....	89
6.1.5	Festigkeitsnachweise .....	89
6.1.6	Feingestaltung .....	89

6.2	Ermittlung der Vorgaben .....	89
6.2.1	Nenndurchmesser und Grenzabmessung – R0 .....	89
6.2.2	Anziehfaktor – R1 .....	92
6.2.3	Mindestklemmkraft – R2 .....	95
6.3	Ermittlung der Verspannung .....	97
6.3.1	Aufteilung der Betriebskraft – R3 .....	97
6.3.2	Änderungen der Vorspannkraft – R4 .....	99
6.3.3	Minimal erforderliche Montagevorspannkraft – R5 .....	100
6.3.4	Maximal auftretende Montagevorspannkraft – R6 .....	100
6.4	Ermittlung der Beanspruchungsfälle .....	100
6.4.1	Montagebeanspruchung – R7 .....	100
6.4.2	Betriebsbeanspruchung – R8 .....	104
6.4.3	Schwingbeanspruchung – R9 .....	107
6.5	Festigkeitsnachweise .....	109
6.5.1	Flächenpressung – R10 .....	109
6.5.2	Mindesteinschraubtiefe – R11 .....	111
6.5.3	Gleiten oder Abscheren – R12 .....	112
6.5.4	Anziehdrehmoment – R13 .....	113
<b>7</b>	<b>Einflüsse auf die Tragfähigkeit .....</b>	<b>115</b>
7.1	Einflüsse zu den Vorgaben (R0 bis R2) .....	115
7.1.1	Anziehfaktor – R1 .....	115
7.1.2	Mindestklemmkraft – R2 .....	115
7.2	Einflüsse zur Verspannung (R3 bis R6) .....	116
7.2.1	Aufteilung der Betriebskraft – R3 .....	116
7.2.2	Setzkraft – R4 .....	117
7.2.3	Minimale Montagevorspannkraft – R5 .....	120
7.2.4	Maximale Montagevorspannkraft – R6 .....	120
7.3	Einflüsse zu den Beanspruchungsfällen (R7 bis R9) .....	120
7.3.1	Montagebeanspruchung – R7 .....	120
7.3.2	Betriebsbeanspruchung – R8 .....	120
7.3.3	Schwingbeanspruchung – R9 .....	120
7.4	Einflüsse zu den Festigkeitsnachweisen (R10 bis R13) .....	121
7.4.1	Flächenpressung – R10 .....	121
7.4.2	Mindesteinschraubtiefe – R11 .....	122
7.4.3	Gleiten oder Abscheren – R12 .....	122
7.4.4	Anziehdrehmoment – R13 .....	122
<b>8</b>	<b>Montage von Schraubenverbindungen .....</b>	<b>123</b>
8.1	Erzeugung der Vorspannkraft .....	123
8.1.1	Erzeugung der Vorspannkraft durch das Anziehdrehmoment .....	123
8.1.2	Einfluss der Reibwerte .....	125
8.1.3	Erzeugung der Vorspannkraft durch den Anziehdrehwinkel .....	127
8.1.4	Beispielrechnung zu Kenngrößen beim Anziehen .....	128
8.2	Aspekte bei der Montage von Schraubenverbindungen .....	130
8.3	Schraubfälle .....	131
8.3.1	Schraubfallhärte .....	131
8.3.2	Konstruktive Beeinflussung der Schraubfallhärte .....	132

8.4	Einfluss der Reibpaarungen .....	133
8.4.1	Reibungszahlen .....	133
8.4.2	Einflüsse auf Reibungszahlen .....	134
8.4.3	Geometrieabweichungen im Bohrungsbereich .....	134
8.4.4	Geometrieabweichungen der Kopfauftragflächen .....	136
8.5	Anziehverfahren – Schraubverfahren .....	136
8.5.1	Anziehen nach Drehmoment .....	137
8.5.2	Anziehen nach Drehwinkel .....	137
8.5.3	Anziehen nach Drehmoment und Drehwinkel .....	138
8.5.4	Anziehen nach Schraubendehnung .....	138
8.5.5	Nachziehen einer Schraubenverbindung .....	139
8.5.6	Werkzeuge zum Anziehen von Schraubenverbindungen .....	139
<b>9</b>	<b>Messungen zu den Montageeigenschaften .....</b>	<b>141</b>
9.1	Messung der Vorspannkraft .....	141
9.1.1	Messung mit Ringkraftaufnehmern .....	141
9.1.2	Messung mit Dehnmessstreifen .....	142
9.1.3	Ultraschallmesstechnik .....	142
9.2	Aspekte zur Qualitätskontrolle der Montage .....	142
9.2.1	Prüfung des Lösemoments .....	143
9.2.2	Prüfung des Weiterdrehmoments .....	143
9.2.3	Ausgewählte Versuchstechnik .....	144
9.3	Ermittlung einzelner Drehmomente .....	146
9.3.1	Messung des Gewindemomentes .....	146
9.3.2	Aufteilung des Gewindemomentes mit der gemessenen Vorspannkraft .....	147
9.3.3	Ermittlung des Kopfreibungsmomentes .....	148
9.4	Ermittlung weiterer Kenngrößen durch Versuch und Rechnung .....	149
9.4.1	Ansatz zur indirekten Messung der Vorspannkraft .....	149
9.4.2	Messung von Drehmoment und Drehwinkel beim Anziehen .....	150
9.4.3	Weitere Analyse der Drehmomentkurven .....	151
9.4.4	Berechnung der Vorspannkraft aus Drehmomentkurven .....	152
9.4.5	Anwendung für ein Berechnungsbeispiel .....	155
9.4.6	Prüfungen ohne Vorspannkraftmessung .....	156
9.4.7	Diskussion zu den Berechnungen .....	156
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>159</b>
10.1	Zusammenfassung wesentlicher Gesichtspunkte .....	159
10.2	Weiterführende Themenfelder .....	160
10.3	Ausblick .....	160

## Expertenbeiträge

<b>1</b>	<b>Berechnung von Schraubenverbindungen mit der Finite-Element-Methode ..</b>	<b>165</b>
	<b>Prof. Dr.-Ing. THOMAS GRÄTSCH</b>	
1.1	Einführung in die Finite-Element-Methode .....	165
1.1.1	Allgemeines .....	165
1.1.2	Die Grundidee .....	166

1.2	Schraubenmodelle in der FE-Berechnung .....	167
1.2.1	Modellklasse I: Schraube nicht ausmodelliert .....	167
1.2.2	Modellklasse II: Schraube als Balkenelement .....	168
1.2.3	Modellklasse III: Schraube als Volumenkörper .....	169
1.2.4	Modellklasse IV: Schraube als Volumenkörper mit Gewinde .....	170
1.3	Praxisbeispiel Kragträger .....	170
1.3.1	Berechnung der Kontaktspannungen .....	171
1.3.2	Nachgiebigkeit der verspannten Bauteile .....	173
1.3.3	Vergleich der Modellklassen .....	174
1.3.4	Einfluss der Vernetzung .....	175
1.3.5	Einfluss des Reibkontakts .....	176
1.3.6	Einfluss der Geometrie .....	177
1.4	Praxisbeispiel Kreisflansch PN6-DN50 .....	177
1.4.1	Variantenstudie .....	179
	Literaturverzeichnis .....	183
<b>2</b>	<b>Verfahren und Techniken zur Ermittlung der Vorspannkraft an Verbindungselementen .....</b>	<b>185</b>
	<b>Dipl.-Ing. GERT HÖRING</b>	
2.1	Mechanische Systeme – Längenmessung zur Bestimmung der Vorspannkraft .....	185
2.2	Dehnungsmessstreifen .....	187
2.3	Kraftmessdosen und Kraftmessringe .....	188
2.4	Vorspannkraftmessung mit Ultraschall .....	190
2.4.1	Puls-Echo-Methode .....	190
2.4.2	Längung und akustoelastischer Effekt .....	191
2.4.3	Der Piezoeffekt und seine Inversion .....	192
2.4.4	Ausführungsformen von Ultraschallsensoren .....	193
2.4.5	Temperaturkompensation .....	198
2.4.6	Messung an Verbindungsbauteilen mit inhomogener Temperaturverteilung .....	199
2.4.7	Messung in die Streckgrenze .....	204
2.5	Ausblicke .....	206
	Literaturverzeichnis .....	207
<b>3</b>	<b>Auslegung innermotorischer Verschraubungen am Beispiel der Zylinderkopfverschraubung .....</b>	<b>209</b>
	<b>M. Eng. DJAWED RAJABI, DIPL.-ING. JAN-HENDRIK KNOTH</b>	
3.1	Hochlastverbindungen im innermotorischen Bereich .....	209
3.2	Anforderungen an die Verschraubung innermotorischer Verbindungen .....	211
3.3	Innermotorischer Schraubfall: Zylinderkopfverschraubung am Vierliter-V8-Turbomotor (intern EA825) .....	212
3.4	Gängige Montageverfahren im Automobilbau .....	214
3.5	Motivation und Ziele bei der Motorentwicklung .....	215
3.6	Vergleich von drehwinkelgesteuerten Anziehverfahren .....	215
3.7	Ergebnis der gemessenen Vorspannkraft im Vollmotor .....	217
3.8	Erhöhung der Schrauben-Streckgrenze .....	220
3.9	Einflüsse auf den innermotorischen Betrieb .....	222

<b>4</b>	<b>Der Drehwinkel in der Schraubtechnik</b>	<b>225</b>
	<b>Dipl. Wirt.-Ing. MARKUS FISCHER</b>	
4.1	Drehwinkel in der Schraubtechnik – nicht ohne Drehmoment	225
4.2	Von der Kalibrierung zur Messsystemanalyse – welche Drehwinkelmessgeräte braucht man?	226
4.2.1	Drehwinkelkalibrierung	226
4.2.2	Messgerätefähigkeit (MGF) und Messsystemanalyse (MSA)	227
4.2.3	Sonderfälle von Drehwinkelmessgeräten	229
4.3	Drehwinkelbasierte Montage- und Überwachungsstrategien – was ist gefordert und was ist möglich?	231
4.3.1	Winkel für die fähige Parametrierung von Schraubsystemen	231
4.3.2	Drehwinkel und die schraubstellenbezogene Maschinenfähigkeitsuntersuchung (MFU)	236
4.3.3	Drehwinkel für die Prozessfähigkeitsuntersuchung (PFU)	237
4.4	Ausblick	239
	Literaturverzeichnis	239
<b>5</b>	<b>Prüfen von Schrauben und Schraubenverbindungen</b>	<b>241</b>
	<b>Dipl.-Ing. (FH) MORITZ STAHL, B. ENG. JAN BÜCHLE</b>	
5.1	Übersicht über Prüfungen	241
5.2	Normative Prüfungen	242
5.2.1	DIN 267 – Teil 27: Schrauben mit klebender Beschichtung	242
5.2.2	DIN 267 – Teil 28: Schrauben mit klemmender Beschichtung	244
5.2.3	DIN 267 – Teil 30: Metrische gewindefurchende Schrauben 10.9	245
5.2.4	DIN 7500-1: Gewindefurchende Schrauben für Metrisches ISO-Gewinde	246
5.2.5	DIN EN ISO 16047: Drehmoment-Vorspannkraft-Versuch	247
5.3	Anwendungstechnische Prüfungen	249
5.3.1	Zerstörender Einschraub- und Überdrehversuch	250
5.3.2	Montageversuch	251
5.3.3	Weiterdrehanalyse	253
5.3.4	Losdrehanalyse	254
5.3.5	Wiederholverschraubung	256
5.3.6	Vorspannkraftermittlung	257
5.3.7	Bauteilkonditionierung	260
	Literaturverzeichnis	262
<b>6</b>	<b>Wasserstoffinduzierter Sprödbbruch bei hochfesten und ultrahochfesten Verbindungselementen</b>	<b>263</b>
	<b>Dipl.-Ing. HORST DIETERLE</b>	
6.1	Schadensbild des Wasserstoffsprödbruchs an hochfesten Schrauben	263
6.2	Schadensmechanismus der wasserstoffinduzierten Spannungsrisskorrosion	265
6.2.1	Wasserstoff	265
6.2.2	Werkstoffzustand	267
6.2.3	Zugspannungen	269
6.3	Prüfmethoden zur Bewertung der Wasserstoffversprödung	270
6.4	Ausgewählte Prüfverfahren und Ergebnisse	272

6.4.1	Langsamzugversuch mit Ex-situ-Wasserstoffbeladung .....	273
6.4.2	Step Load Test mit In-situ-Wasserstoffbeladung .....	276
	Literaturverzeichnis .....	278
<b>7</b>	<b>Große Schraubenverbindungen im thermischen Maschinen- und Anlagenbau .....</b>	<b>281</b>
	<b>M. Eng. FLORIAN BRAHM</b>	
7.1	Schraubenverbindungen im Dampfturbinenbau (exemplarische Betrachtung) .....	282
7.1.1	Einsatzbereiche .....	282
7.1.2	Normen .....	283
7.1.3	Werkstoffe .....	284
7.1.4	Schraubengrößen und Anzugswerteverhältnisse .....	284
7.2	Thermisch entlastetes Anziehen nach Drehwinkel (TEAD) .....	285
7.2.1	Prinzipielle Beschreibung .....	286
7.2.2	Prozessbeschreibung im Detail .....	286
7.2.3	Technische Anforderungen .....	288
7.2.4	Anwendungsbereiche .....	289
7.2.5	Vergleich zu anderen Anzugsverfahren .....	289
7.3	Herausforderungen bei der Schraubenauslegung im thermischen Maschinenbau .....	290
7.3.1	Werkstofffestigkeit .....	291
7.3.2	Wärmedehnung .....	291
7.3.3	Relaxation .....	292
7.4	Zusammenfassung und Ausblick .....	297
	Literaturverzeichnis .....	297
<b>8</b>	<b>Gewindefurchende Schraubenverbindungen .....</b>	<b>299</b>
	<b>Dipl.-Ing. (FH) MORITZ STAHL</b>	
8.1	Einsatz von gewindefurchenden Schraubenverbindungen und mögliche Kosteneinsparung .....	299
8.2	Gewindefurchende Schrauben für Leichtmetalle und Stahl .....	300
8.2.1	Verarbeitung und Montage .....	301
8.2.2	Festigkeitsklassen .....	303
8.2.3	Kernlöcher .....	303
8.2.4	Zusätzliche Sonderausführungen .....	307
8.3	Gewindefurchende Schrauben für Kunststoffe .....	309
8.3.1	Montage .....	310
8.3.2	Einflussgrößen auf die Verbindungseigenschaften .....	312
8.3.3	Versagensarten .....	313
8.3.4	Einschraubtubus .....	314
8.4	Fließlochformende Schrauben .....	315
8.4.1	Funktionsprinzip .....	317
8.4.2	Anwendungsbereiche .....	318
8.4.3	Schraubprozess .....	318
8.4.4	Vorlochung des Deckblechs beim Fließlochformen .....	320
8.5	Schrauben für Dünnbleche .....	321
8.5.1	Funktionsprinzip und Produktmerkmale .....	322
8.5.2	Schraubprozess .....	323

8.5.3	Anwendungen .....	323
8.5.4	Vergleich zur herkömmlichen Blechschraube .....	324
	Literaturverzeichnis .....	326
<b>9</b>	<b>Elektrischer Übergangswiderstand bei Schraubenverbindungen .....</b>	<b>327</b>
	<b>Dipl.-Ing. BERNHARD RECK</b>	
9.1	Allgemeine Beschreibung des elektrischen Übergangswiderstandes und des Kontaktwiderstandes .....	327
9.2	Physikalische Beschreibung – Formeln und Regelwerke .....	328
9.3	Der Übergangswiderstand .....	329
9.4	Elektrische Kontakte .....	330
9.4.1	Schraubkontakte .....	330
9.4.2	Schraubklemme (elektrische Klemme) .....	330
9.4.3	Schrauben-Mutter-Verbindung, Stromfluss über die Kontaktflächen ...	331
9.4.4	Schraube und Mutter verbinden zwei Leiter, Stromfluss über die Verschraubung .....	332
9.4.5	Sonderfall gewindeformende Schrauben .....	332
9.5	Bestimmung des Übergangswiderstandes .....	333
9.6	Die Montage .....	334
9.7	Temperatureinfluss .....	335
9.8	Medieneinfluss und Korrosion .....	335
9.9	Qualifizierung von elektrischen Schraubkontakten nach heutigem Automobilstandard .....	336
	<b>Case Study von Dresselhaus: Vollautomatisiertes C-Teile-Management für den letzten Meter der Produktion .....</b>	<b>339</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>350</b>
	<b>Stichwortverzeichnis .....</b>	<b>353</b>