

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
Verwendete Formelzeichen	17
1 Einführung	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
2 Grundlagen	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
3 Normen und Richtlinien	45
3.1 DIN-Normen	45
3.2 VDI Richtlinie 2230	45
3.3 VDI/VDE-Richtlinie 2862	46
3.4 Technische Lieferbedingungen	46
4 Werkstoffe und Fertigung	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	Genaugkeit	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
5	Belastungen und Beanspruchungen	59
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 Kopfaulage	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	Selbsttäiges Lösen von Schraubenverbindungen	83
5.5.4	Beispiel Pleuelverschraubung	84
5.5.5	Weiterführende Belastungs- und Beanspruchungsanalysen	85
6	Berechnung der Belastungen und Beanspruchungen im Detail	87
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
7	Einflüsse auf die Tragfähigkeit	115
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
8	Montage von Schraubenverbindungen	123
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 Kopfauflageflächen	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
9	Messungen zu den Montageeigenschaften	141
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
10	Zusammenfassung	159
10.1	Zusammenfassung wesentlicher Gesichtspunkte	159
10.2	Weiterführende Themenfelder	160
10.3	Ausblick	160

Expertenbeiträge

1	Berechnung von Schraubenverbindungen mit der Finite-Element-Methode ..	165
	Prof. Dr.-Ing. THOMAS GRÄTSCH	
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 Reibkontakte	176
1.3.6	Einfluss der Geometrie	177
1.4	Praxisbeispiel Kreisflansch PN6-DN50	177
1.4.1	Variantenstudie	179
	Literaturverzeichnis	183
2	Verfahren und Techniken zur Ermittlung der Vorspannkraft an Verbindungselementen	185
	Dipl.-Ing. GERT HÖRING	
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
3	Auslegung innermotorischer Verschraubungen am Beispiel der Zylinderkopfverschraubung	209
	M. Eng. DJAWED RAJABI, DIPL.-ING. JAN-HENDRIK KNOTH	
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 Vorspannkräfte im Vollmotor	217
3.8	Erhöhung der Schrauben-Streckgrenze	220
3.9	Einflüsse auf den innermotorischen Betrieb	222

4	Der Drehwinkel in der Schraubtechnik	225
Dipl. Wirt.-Ing. MARKUS FISCHER		
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
5	Prüfen von Schrauben und Schraubenverbindungen	241
Dipl.-Ing. (FH) MORITZ STAHL, B. ENG. JAN BÜCHLE		
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
6	Wasserstoffinduzierter Sprödbruch bei hochfesten und ultrahochfesten Verbindungselementen	263
Dipl.-Ing. HORST DIETERLE		
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
7	Große Schraubenverbindungen im thermischen Maschinen- und Anlagenbau	281
	M. Eng. FLORIAN BRAHM	
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
8	Gewindefurchende Schraubenverbindungen	299
	Dipl.-Ing. (FH) MORITZ STAHL	
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
9 Elektrischer Übergangswiderstand bei Schraubenverbindungen	327
Dipl.-Ing. BERNHARD RECK	
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
Case Study von Dresselhaus: Vollautomatisiertes C-Teile-Management für den letzten Meter der Produktion	339
Literaturverzeichnis	350
Stichwortverzeichnis	353