
Maschinenelemente

Horst Haberhauer

Maschinenelemente

Gestaltung, Berechnung, Anwendung

18., überarbeitete Auflage

Horst Haberhauer
Hochschule für Technik
Esslingen
Deutschland

Das Buch erschien bis zur 17. Auflage unter der Autorenschaft Haberhauer/Bodenstein.

Die Darstellung von manchen Formeln und Strukturelementen war in einigen elektronischen Ausgaben nicht korrekt, dies ist nun korrigiert. Wir bitten damit verbundene Unannehmlichkeiten zu entschuldigen und danken den Lesern für Hinweise.

Zusätzliche Materialien finden Sie unter <http://www.springer.com/de/book/9783662530474>

ISBN 978-3-662-53047-4 ISBN 978-3-662-53048-1 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-53048-1>

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland 1905, 1913, 1920, 1922, 1930, 1951, 1956, 1968, 1979, 1996, 2001, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011, 2014, 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Deutschland
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort zur 18. Auflage

Neue Normen, Berechnungsvorschriften und Literatur erfordern eine ständige Aktualisierung des vorliegenden Lehrbuches. Großer Wert wurde darauf gelegt, das komplexe Stoffgebiet der Maschinenelemente zum einen kompakt und praxisnah, aber dennoch theoretisch fundiert und gut verständlich darzustellen. So bildet dieses Lehrbuch ein stabiles Fundament für die Vertiefung in Spezialgebiete.

Rezepthaftes Anwenden von Beispielen und Formeln sind bei der Lösung ingenieurspezifischer Probleme nicht zu empfehlen. Daher wurde bewusst auf die Darstellung fertiger Gleichungen verzichtet. Es wurde versucht, bei allen Berechnungen die Entstehung sowie die Voraussetzungen und die Gültigkeitsbereiche der Berechnungsgleichungen aufzuzeigen. Ohne die Kenntnis der physikalischen Grundlagen und den der Berechnung zugrunde liegenden Rechenmodellen, sowie den dafür notwendigen, meist vereinfachenden Annahmen, ist eine ingenieurmäßige Problemlösung in der Regel nicht möglich. Auch für die Anwendung und Interpretation der Ergebnisse von Berechnungsprogrammen, die heute aus den Konstruktionsbüros nicht mehr wegzudenken sind, ist ein solides Grundlagenwissen unbedingt erforderlich.

Die 18. Auflage wurde vollständig überarbeitet. Die bewährte Gliederung wurde beibehalten, der Inhalt jedoch sprachlich und technisch auf den neuesten Stand gebracht. So wurden neben der Umstellung auf die neue Rechtschreibung alle Normen und Berechnungsmodelle überprüft und aktualisiert. Auch Abbildungen und Tabellen wurden zum Teil neu erstellt bzw. ersetzt.

Über die den Link <http://www.springer.com/de/book/9783662530474> kommen Sie zur Website des vorliegenden Buches. Dort finden Sie auch Ergänzungen zum Thema Maschinenelemente (z.B. eine Formelsammlung und weitere Beispiele), die Sie kostenlos herunterladen können.

Dem Springer-Verlag danke ich für die gute Zusammenarbeit bei der Herstellung dieses Buches. Vielen Dank für konstruktive Kritik und wertvolle Anregungen und Diskussionen. Hinweise auf Druck- und Verständnisfehler sowie eventuellen Ergänzungen nehme ich auch in Zukunft gerne entgegen.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| 1 Grundlagen | 1 |
| 1.1 Definition der Maschinenelemente | 1 |
| 1.2 Konstruieren | 1 |
| 1.2.1 Definition des Begriffes Konstruieren | 2 |
| 1.2.2 Konstruktionsprozess | 3 |
| 1.2.3 Rechnergestütztes Konstruieren | 5 |
| 1.3 Das Gestalten | 7 |
| 1.3.1 Funktions- und anforderungsgerechtes Gestalten | 7 |
| 1.3.2 Beanspruchungsgerechtes Gestalten | 8 |
| 1.3.3 Festigkeitsgerechtes Gestalten | 14 |
| 1.3.4 Werkstoffgerechtes Gestalten | 23 |
| 1.3.5 Herstellgerechtes Gestalten | 29 |
| 1.3.6 Recyclinggerechtes Gestalten | 34 |
| 1.3.7 Zeitgerechtes Gestalten (Design) | 35 |
| 1.4 Normung | 36 |
| 1.4.1 Grundlagen der Normung | 36 |
| 1.4.2 Normen und ihre rechtliche Bedeutung | 37 |
| 1.4.3 Normzahlen (NZ) | 39 |
| 1.4.4 Toleranzen und Passungen | 42 |
| 1.4.5 Technische Oberflächen | 57 |
| Literatur | 62 |
| 2 Verbindungselemente | 65 |
| 2.1 Schweißverbindungen | 66 |
| 2.1.1 Schweißverfahren | 67 |
| 2.1.2 Schweißbarkeit | 68 |
| 2.1.3 Schweißnahtgüte | 71 |
| 2.1.4 Schweißstoß, Schweißnaht und zeichnerische Darstellung | 72 |
| 2.1.5 Berechnung von Schweißverbindungen | 76 |
| 2.1.6 Gestaltung von Schweißverbindungen | 93 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 2.2 | Lötverbindungen | 98 |
| 2.2.1 | Lote, Lötverfahren und Anwendungen | 98 |
| 2.2.2 | Berechnung von Lötverbindungen | 99 |
| 2.2.3 | Gestaltung von Lötverbindungen | 100 |
| 2.3 | Klebeverbindungen | 101 |
| 2.3.1 | Klebstoffe | 102 |
| 2.3.2 | Berechnung von Klebeverbindungen | 103 |
| 2.3.3 | Gestaltung von Klebeverbindungen | 104 |
| 2.4 | Reibschlussverbindungen | 105 |
| 2.4.1 | Keilverbindungen | 107 |
| 2.4.2 | Kegelverbindung | 111 |
| 2.4.3 | Konische Spannelementverbindungen | 116 |
| 2.4.4 | Verbindungen mit federnden Zwischengliedern | 119 |
| 2.4.5 | Pressverbindungen (Zylindrische Pressverbände) | 122 |
| 2.4.6 | Klemmverbindungen | 136 |
| 2.5 | Formschlussverbindungen | 142 |
| 2.5.1 | Pass- und Scheibenfederverbindungen | 142 |
| 2.5.2 | Profilwellenverbindungen | 146 |
| 2.5.3 | Bolzen- und Stiftverbindungen | 151 |
| 2.5.4 | Elemente zur axialen Lagesicherung | 160 |
| 2.6 | Nietverbindungen | 163 |
| 2.6.1 | Herstellung und Gestaltung von Nietverbindungen | 163 |
| 2.6.2 | Berechnung von Nietverbindungen | 169 |
| 2.6.3 | Durchsetzfügen | 170 |
| 2.7 | Schraubenverbindungen | 171 |
| 2.7.1 | Definition der Schraube; Bestimmungsgrößen | 171 |
| 2.7.2 | Gewindearten | 174 |
| 2.7.3 | Genormte Schrauben, Muttern und Unterlegscheiben | 175 |
| 2.7.4 | Werkstoffe und Festigkeitswerte | 183 |
| 2.7.5 | Berechnung von Schraubenverbindungen | 184 |
| 2.7.5.1 | Verspannungsschaubild | 185 |
| 2.7.5.2 | Gewindekräfte und –momente | 196 |
| 2.7.5.3 | Spannungen in Schraubenverbindungen; Bemessungsgrundlagen | 201 |
| 2.7.6 | Schraubensicherungen | 209 |
| 2.7.7 | Gestaltung von Schraubenverbindungen | 213 |
| 2.7.8 | Bewegungsschraube | 213 |
| 2.7.8.1 | Einfachschraubgetriebe | 218 |
| 2.7.8.2 | Zweifachschraubgetriebe | 219 |
| 2.8 | Elastische Verbindungen | 222 |
| 2.8.1 | Grundlagen | 222 |
| 2.8.2 | Federschaltungen | 225 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 2.8.3 | Metallfedern | 227 |
| 2.8.3.1 | Zugstabfeder | 229 |
| 2.8.3.2 | Ringfeder | 230 |
| 2.8.3.3 | Blattfedern | 230 |
| 2.8.3.4 | Gekrümmte Biegefeder | 235 |
| 2.8.3.5 | Spiralfeder, Drehfeder | 235 |
| 2.8.3.6 | Tellerfedern | 236 |
| 2.8.3.7 | Drehstabfeder | 241 |
| 2.8.3.8 | Zylindrische Schraubenfedern | 245 |
| 2.8.4 | Gummifedern | 259 |
| | Literatur | 263 |
| 3 | Dichtungen | 265 |
| 3.1 | Dichtungen zwischen ruhenden Bauteilen | 266 |
| 3.1.1 | Unlösbare Dichtungen | 266 |
| 3.1.2 | Bedingt lösbare Dichtungen | 267 |
| 3.1.3 | Lösbare Dichtungen | 267 |
| 3.2 | Dichtungen zwischen bewegten Bauteilen | 272 |
| 3.2.1 | Berührungsdichtungen | 272 |
| 3.2.1.1 | Dichtungen für Drehbewegungen | 272 |
| 3.2.1.2 | Dichtungen für Längsbewegungen | 275 |
| 3.2.1.3 | Dichtungen für Längs- und Drehbewegungen | 278 |
| 3.2.2 | Berührungslose Dichtungen | 280 |
| 3.2.3 | Hermetische Dichtungen | 284 |
| | Literatur | 286 |
| 4 | Elemente der drehenden Bewegung | 287 |
| 4.1 | Achsen | 287 |
| 4.2 | Wellen | 292 |
| 4.2.1 | Bemessung auf Tragfähigkeit | 293 |
| 4.2.1.1 | Auslegung einer Welle | 293 |
| 4.2.1.2 | Festigkeitsnachweis für eine Welle | 296 |
| 4.2.2 | Bemessung auf Verformung | 304 |
| 4.2.3 | Dynamisches Verhalten | 309 |
| 4.2.4 | Wellengestaltung | 316 |
| 4.2.5 | Sonderausführungen | 319 |
| 4.3 | Lager | 321 |
| 4.3.1 | Gleitlager | 322 |
| 4.3.1.1 | Schmierstoffe: Eigenschaften, Arten und Zuführung | 324 |
| 4.3.1.2 | Druck-, Geschwindigkeits- und Reibungsverhältnisse im Tragfilm | 329 |
| 4.3.1.3 | Mischreibung und Übergangsdrehzahl | 354 |
| 4.3.1.4 | Wellen- und Lagerwerkstoffe | 356 |
| 4.3.1.5 | Gestaltung | 357 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.3.2 | Wälzlager | 362 |
| 4.3.2.1 | Lagerbezeichnungen | 367 |
| 4.3.2.2 | Radiallager | 369 |
| 4.3.2.3 | Axiallager | 399 |
| 4.4 | Kupplungen und Bremsen | 402 |
| 4.4.1 | Starre Kupplungen | 404 |
| 4.4.2 | Bewegliche Kupplungen (Ausgleichskupplungen) | 406 |
| 4.4.3 | Elastische Kupplungen | 412 |
| 4.4.3.1 | Drehsteife Momentübertragung | 412 |
| 4.4.3.2 | Drehelastische Momentübertragung | 413 |
| 4.4.4 | Formschlüssige Schaltkupplungen | 420 |
| 4.4.4.1 | Fremdbetätigte Schaltkupplungen | 420 |
| 4.4.4.2 | Momentbetätigte Schaltkupplungen | 423 |
| 4.4.4.3 | Richtungsbetätigte Kupplungen | 424 |
| 4.4.5 | Kraftschlüssige Schaltkupplungen (Reibungskupplungen) | 425 |
| 4.4.5.1 | Fremdbetätigte Reibungskupplungen | 428 |
| 4.4.5.2 | Momentbetätigte Reibungskupplungen | 439 |
| 4.4.5.3 | Drehzahlbetätigte Reibungskupplungen | 441 |
| 4.4.5.4 | Richtungsbetätigte Reibungskupplungen | 443 |
| 4.4.6 | Bremsen | 445 |
| | Literatur | 451 |
| 5 | Elemente der geradlinigen Bewegungen | 453 |
| 5.1 | Paarung ebener Flächen | 454 |
| 5.1.1 | Führungen mit Gleitpaarungen | 454 |
| 5.1.2 | Führungen mit Wälzlagerungen | 459 |
| 5.2 | Paarung von zylindrischen Flächen | 467 |
| 5.2.1 | Gleitende Rundlingspaarungen | 467 |
| 5.2.2 | Rundführungen mit Wälzlagerungen | 469 |
| | Literatur | 471 |
| 6 | Elemente zur Übertragung gleichförmiger Drehbewegungen | 473 |
| 6.1 | Stirnradgetriebe | 477 |
| 6.1.1 | Verzahnungsgeometrie geradverzahnter Stirnräder | 477 |
| 6.1.1.1 | Allgemeines Verzahnungsgesetz | 479 |
| 6.1.1.2 | Verzahnungsarten | 486 |
| 6.1.1.3 | Bezugsprofil und Herstellung | 494 |
| 6.1.1.4 | Unterschnitt und Grenzzähnezahl | 497 |
| 6.1.1.5 | Profilverschiebung | 499 |
| 6.1.1.6 | Zahnradpaarung | 504 |
| 6.1.1.7 | Innenverzahnung | 512 |
| 6.1.1.8 | Zahnstange | 517 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 6.1.2 | Verzahnungsgeometrie schrägverzahnter Stirnräder | 518 |
| 6.1.2.1 | Grundbegriffe und –beziehungen | 520 |
| 6.1.2.2 | Paarung schrägverzahnter V-Räder | 525 |
| 6.1.2.3 | Verzahnungstoleranzen | 527 |
| 6.1.3 | Kräfte und Momente am Zahnrad | 530 |
| 6.1.4 | Grundlagen der Tragfähigkeitsberechnung (DIN 3990) | 535 |
| 6.1.4.1 | Allgemeine Faktoren | 537 |
| 6.1.4.2 | Zahnfußtragfähigkeit | 542 |
| 6.1.4.3 | Flankentragfähigkeit | 548 |
| 6.1.5 | Auslegung und Gestaltung | 555 |
| 6.2 | Kegelradgetriebe | 562 |
| 6.2.1 | Verzahnungsgeometrie geradverzahnte Kegelräder | 562 |
| 6.2.2 | Kegelräder mit Schräg- und Bogenverzahnung | 568 |
| 6.2.3 | Kräfte am Kegelrad | 570 |
| 6.2.4 | Tragfähigkeitsberechnung (DIN 3991) | 572 |
| 6.3 | Schraubradgetriebe | 572 |
| 6.3.1 | Verzahnungsgeometrie der Schraubenräder | 574 |
| 6.3.2 | Kräfteverhältnisse und Wirkungsgrad | 575 |
| 6.3.3 | Bemessungsgrundlagen | 577 |
| 6.4 | Schneckengetriebe | 579 |
| 6.4.1 | Flankenformen der Zylinderschnecken | 580 |
| 6.4.2 | Verzahnungsgeometrie | 582 |
| 6.4.3 | Kräfteverhältnisse und Wirkungsgrad | 586 |
| 6.4.4 | Empfehlungen für die Bemessung | 587 |
| 6.4.5 | Lagerkräfte und Beanspruchungen der der Schneckenwelle | 590 |
| 6.4.6 | Gestaltung | 592 |
| 6.5 | Umlaufgetriebe | 594 |
| 6.5.1 | Drehzahlen und Übersetzungen | 594 |
| 6.5.2 | Kräfte, Momente und Leistungen | 606 |
| 6.5.3 | Kegelrad-Umlaufgetriebe | 612 |
| 6.6 | Reibradgetriebe | 612 |
| 6.6.1 | Werkstoffpaarungen und Berechnungsgrundlagen | 613 |
| 6.6.2 | Reibradgetriebe mit konstanter Übersetzung | 617 |
| 6.6.3 | Reibradgetriebe mit stufenlos verstellbarer Übersetzung | 619 |
| 6.7 | Formschlüssige Zugmitteltriebe | 622 |
| 6.7.1 | Kettentriebe | 622 |
| 6.7.2 | Zahnriementriebe | 628 |
| 6.8 | Kraftschlüssige Zugmitteltriebe (Riementrieb) | 629 |
| 6.8.1 | Theoretische Grundlagen | 631 |
| 6.8.1.1 | Riemenkräfte und Nutzspannung | 632 |
| 6.8.1.2 | Einfluss der Fliehkraft | 634 |
| 6.8.1.3 | Biegespannung und Biegefrequenz | 635 |

| | | |
|------------------------|---|------------|
| 6.8.1.4 | Gesamtspannung, Bandgeschwindigkeit und Schlupf | 636 |
| 6.8.1.5 | Folgerungen aus den theoretischen Betrachtungen | 639 |
| 6.8.2 | Bauarten für konstante Übersetzungen | 640 |
| 6.8.2.1 | Flachriementriebe | 641 |
| 6.8.2.2 | Keilriementrieb | 644 |
| 6.8.3 | Bauarten für stufenlos verstellbare Übersetzungen | 648 |
| Literatur | | 657 |
| Anhang A | | 659 |
| Anhang B | | 665 |
| Anhang C | | 675 |
| Anhang D | | 679 |
| Anhang E | | 681 |
| Sachverzeichnis | | 683 |