

# Springer - Lehrbuch

---

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

Horst Haberhauer  
Ferdinand Bodenstein

---

# Maschinenelemente

Gestaltung, Berechnung, Anwendung

Zehnte, vollständig neubearbeitete Auflage  
mit 515 Abbildungen und 87 Tabellen



Springer

Professor Dr.-Ing. Horst Haberhauer  
Fachhochschule Esslingen  
Hochschule für Technik  
Fachbereich Maschinenbau  
Kanalstraße 33  
73728 Esslingen

Ferdinand Bodenstein †

---

*Die 1. bis 9. Auflage erschien unter dem Titel:  
Tochtermann/Bodenstein, Konstruktionselemente des Maschinenbaus  
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg*

---

ISBN 978-3-662-08523-3      ISBN 978-3-662-08522-6 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-662-08522-6

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Haberhauer, Horst:

Maschinenelemente : Gestaltung, Berechnung, Anwendung /

Horst Haberhauer ; Ferdinand Bodenstein. - 10., vollständig neubearbeitete Aufl. -

Berlin ; Heidelberg ; New York ; Barcelona ; Budapest ; Hongkong ; London ;

Mailand ; Paris ; Santa Clara ; Singapur ; Tokio : Springer, 1996

(Springer-Lehrbuch)

NE: Bodenstein, Ferdinand:

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1905, 1913, 1920, 1922, 1930, 1951, 1956, 1968, 1979, and 1996

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1996.

Softcover reprint of the hardcover 10th edition 1996

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch 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.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Satz: Fotosatz-Service Köhler OHG, Würzburg

SPIN: 10011451      62/3020 - 5 4 3 2 1 0 - Gedruckt auf säurefreiem Papier

---

## Vorwort zur 10. Auflage

Die *Konstruktionselemente des Maschinenbaus* von TOCHTERMANN/BODENSTEIN waren in der Vergangenheit für viele Studenten und Ingenieure des Maschinenbaus sehr bewährte Lehr- und Arbeitsbücher. Die enormen Veränderungen der Berechnungsvorschriften und Normen machten eine Neubearbeitung der zuletzt im Jahre 1979 herausgegebenen 9. Auflage dringend erforderlich. Dabei habe ich wie meine Vorgänger versucht, das komplexe Stoffgebiet der Konstruktions- bzw. Maschinenelemente zum einen praxisnah, aber dennoch theoretisch fundiert und gut verständlich darzustellen.

Um eine bessere Übersichtlichkeit zu erzielen, aber auch aus Kostengründen, wurden die bisher vorliegenden zwei Teile in einem Band zusammengefaßt. Der überaus große Stoffumfang erforderte eine Konzentration auf die wichtigsten Maschinenelemente. So wurde auf das bisher enthaltene Kapitel „Gehäuse, Behälter, Rohrleitungen und Absperrvorrichtungen“ verzichtet, da sie zu den Elementen des Apparate- und Anlagenbaus gehören und in der Literatur dieser Branche ausführlich beschrieben sind. An ihrer Stelle wurden die *Dichtungen* aufgenommen, die heute im Maschinenbau eine sehr wichtige Rolle spielen.

In Zukunft werden immer mehr Berechnungsprogramme für die Dimensionierung von Maschinenelementen eingesetzt. Für die Anwendung dieser Programme ist nicht so sehr die Kenntnis von speziellen Gleichungen (wie z. B. Kennwerte) wichtig, sondern die Zusammenhänge und Einflüsse von Belastungen, Randbedingungen, geometrische Größen usw. müssen bekannt sein, um Berechnungsergebnisse richtig beurteilen zu können. Daher wurde auf Gleichungen für Kennwerte bewußt verzichtet, da diese in den Normenwerken und Berechnungsprogrammen enthalten sind und zudem für überschlägige Berechnungen von Hand Tabellen und Diagramme wesentlich besser geeignet sind um Einflüsse zu erkennen.

Auch auf eine Formelsammlung wurde verzichtet, da sie zu rezepthaftem Arbeiten verleitet. Das heißt, es besteht die Gefahr, daß nur nach einer passenden Formel gesucht, Zahlen eingesetzt und ein Wert berechnet wird, ohne Kenntnis des Rechenmodells und den dafür notwendigen, meist vereinfachenden, Annahmen. Es wurde daher bei allen Berechnungen versucht, die Entstehung sowie die Voraussetzungen bzw. den Gültigkeitsbereich von Berechnungsgleichungen aufzuzeigen.

Ein großes Problem stellt die derzeit stattfindende Umstellung von nationalen auf europäische und internationale Normen dar. So existieren z. B. von Bau- und Vergütungsstählen schon gültige europäische Normen, hingegen von Einsatz- und Automatenstählen gerade erst Normentwürfe erschienen sind. Auch

von Schrauben und anderen Verbindungselementen sind zur Zeit nur teilweise EN- und ISO-Normen vorhanden. Da es sicher noch eine Zeit dauert bis sich die neuen Bezeichnungen etabliert haben, wurden in dieser Auflage grundsätzlich die alten Bezeichnungen (nach DIN) verwendet und die internationalen, soweit vorhanden, zusätzlich angegeben.

Dem Springer-Verlag bin ich für die gute Zusammenarbeit und das verständnisvolle Entgegenkommen in Terminfragen zu großem Dank verpflichtet. In gleicher Weise gilt mein Dank den Kollegen, die mich bei der Verfassung dieses Buches unterstützt haben. In besonderer Weise danke ich meiner Frau Esther, die mich während der Entstehung dieses Buches sowohl aktiv als auch in Form moralischen Zuspruchs stets unterstützte und mir dadurch eine sehr große Hilfe war.

Esslingen, im Mai 1996

H. Haberhauer

# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 Grundlagen</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 Definition der Maschinenelemente                         | 1         |
| 1.2 Konstruieren   | 1         |
| 1.2.1 Definition des Begriffs Konstruieren                   | 1         |
| 1.2.2 Konstruktionsprozeß                                    | 2         |
| 1.2.3 Rechnerunterstütztes Konstruieren                      | 5         |
| 1.3 Das Gestalten  | 6         |
| 1.3.1 Funktions- und anforderungsgerechtes Gestalten         | 7         |
| 1.3.2 Beanspruchungsgerechtes Gestalten                      | 8         |
| 1.3.3 Festigkeitgerechtes Gestalten (Dimensionierung)        | 12        |
| 1.3.4 Werkstoffgerechtes Gestalten                           | 24        |
| 1.3.5 Herstellgerechtes Gestalten                            | 29        |
| 1.3.6 Recyclinggerechtes Gestalten                           | 33        |
| 1.3.7 Zeitgerechtes Gestalten (Formschönheit)                | 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                                 | 61        |
| <b>2 Verbindungselemente</b>                                 | <b>67</b> |
| 2.1 Schweißverbindungen                                      | 68        |
| 2.1.1 Schweißverfahren                                       | 69        |
| 2.1.2 Schweißbarkeit   | 70        |
| 2.1.3 Schweißnahtgüte  | 72        |
| 2.1.4 Schweißstoß und Schweißnaht; Zeichnerische Darstellung | 74        |
| 2.1.5 Berechnen von Schweißverbindungen                      | 78        |
| 2.1.6 Gestalten von Schweißverbindungen                      | 95        |
| 2.2 Lötverbindungen  | 100       |
| 2.2.1 Lote, Lötverfahren und Anwendungen                     | 101       |
| 2.2.2 Berechnen von Lötverbindungen                          | 101       |
| 2.2.3 Gestalten von Lötverbindungen                          | 102       |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 2.3      | Klebeverbindungen . . . . .   | 104        |
| 2.3.1    | Klebstoffe . . . . .  | 105        |
| 2.3.2    | Berechnen von Klebeverbindungen . . . . .                                       | 105        |
| 2.3.3    | Gestalten von Klebeverbindungen . . . . .                                       | 107        |
| 2.4      | Reibschlußverbindungen . . . . .  | 108        |
| 2.4.1    | Keilverbindungen . . . . .  | 109        |
| 2.4.2    | Kegelsitz . . . . .   | 115        |
| 2.4.3    | Konische Spannelementverbindungen . . . . .                                     | 118        |
| 2.4.4    | Verbindungen mit federnden Zwischengliedern . . . . .                           | 121        |
| 2.4.5    | Preßverbindungen (Zylindrische Preßverbände) . . . . .                          | 124        |
| 2.4.6    | Klemmverbindungen . . . . .   | 138        |
| 2.5      | Formschlußverbindungen . . . . .  | 141        |
| 2.5.1    | Paß- und Scheibenederverbindungen . . . . .                                     | 141        |
| 2.5.2    | Profilwellenverbindungen . . . . .  | 146        |
| 2.5.3    | Bolzen- und Stiftverbindungen . . . . .   | 151        |
| 2.5.4    | Elemente zur axialen Lagesicherung . . . . .                                    | 158        |
| 2.6      | Nietverbindungen . . . . .  | 161        |
| 2.6.1    | Herstellung und Gestaltung von Nietverbindungen . . . . .                       | 161        |
| 2.6.2    | Berechnen von Nietverbindungen . . . . .  | 166        |
| 2.7      | Schraubenverbindungen . . . . .   | 167        |
| 2.7.1    | Definition der Schraube; Bestimmungsgrößen . . . . .                            | 168        |
| 2.7.2    | Gewindearten . . . . .  | 170        |
| 2.7.3    | Genormte Schrauben, Muttern und Unterlegscheiben . . . . .                      | 171        |
| 2.7.4    | Werkstoffe und Festigkeitswerte . . . . .                                       | 176        |
| 2.7.5    | Berechnen von Schraubenverbindungen . . . . .                                   | 179        |
|          | 2.7.5.1 Verspannungsschaubild . . . . .   | 181        |
|          | 2.7.5.2 Gewindekräfte und -momente . . . . .                                    | 188        |
|          | 2.7.5.3 Spannungen in Schraubenverbindungen;<br>Bemessungsgrundlagen . . . . .  | 192        |
| 2.7.6    | Schraubensicherungen . . . . .  | 201        |
| 2.7.7    | Gestalten von Schraubenverbindungen . . . . .                                   | 204        |
| 2.7.8    | Bewegungsschraube . . . . .   | 206        |
| 2.8      | Elastische Verbindungen (Federn) . . . . .                                      | 213        |
| 2.8.1    | Kennlinie; Arbeit; Dämpfung;<br>allgemeine Dimensionierungsgrundlagen . . . . . | 213        |
| 2.8.2    | Federschaltungen . . . . .  | 216        |
| 2.8.3    | Metallfedern . . . . .  | 218        |
| 2.8.4    | Gummifedern . . . . .   | 247        |
| <b>3</b> | <b>Dichtungen . . . . .</b>   | <b>253</b> |
| 3.1      | Dichtungen zwischen ruhenden Bauteilen . . . . .                                | 254        |
| 3.1.1    | Unlösbare Dichtungen . . . . .  | 254        |
| 3.1.2    | Bedingt lösbare Dichtungen . . . . .  | 254        |
| 3.1.3    | Lösbare Dichtungen . . . . .  | 255        |



|   |            |
|---|------------|
| 3.2 Dichtungen zwischen bewegten Bauteilen . . . . .                                | 263        |
| 3.2.1 Berührungsdichtungen . . . . .  | 264        |
| 3.2.2 Berührungslose Dichtungen . . . . .   | 272        |
| 3.2.3 Hermetische Dichtungen . . . . .  | 275        |
| <br>  |            |
| <b>4 Elemente der drehenden Bewegung . . . . .</b>                                  | <b>277</b> |
| <br>  |            |
| 4.1 Achsen . . . . .  | 277        |
| <br>  |            |
| 4.2 Wellen . . . . .  | 282        |
| 4.2.1 Bemessung auf Tragfähigkeit . . . . .   | 283        |
| 4.2.2 Bemessung auf Verformung . . . . .  | 287        |
| 4.2.3 Dynamisches Verhalten . . . . .   | 292        |
| 4.2.4 Wellengestaltung . . . . .  | 298        |
| 4.2.5 Sonderausführungen . . . . .  | 301        |
| <br>  |            |
| 4.3 Lager . . . . .   | 303        |
| 4.3.1 Gleitlager . . . . .  | 303        |
| 4.3.1.1 Schmierstoffe: Eigenschaften, Arten und<br>Zuführung . . . . .              | 304        |
| 4.3.1.2 Druck-, Geschwindigkeits- und<br>Reibungsverhältnisse im Tragfilm . . . . . | 310        |
| 4.3.1.3 Mischreibung und Übergangsdrehzahl . . . . .                                | 332        |
| 4.3.1.4 Wellen- und Lagerwerkstoffe . . . . .                                       | 334        |
| 4.3.1.5 Gestaltung . . . . .  | 335        |
| 4.3.2 Wälzlager . . . . .   | 342        |
| 4.3.2.1 Radiallager . . . . .   | 345        |
| 4.3.2.2 Axiallager . . . . .  | 350        |
| 4.3.2.3 Lagerbezeichnung . . . . .  | 352        |
| 4.3.2.4 Lagerberechnung . . . . .   | 354        |
| 4.3.2.5 Gestaltung von Wälzlagerungen . . . . .                                     | 365        |
| <br>  |            |
| 4.4 Kupplungen . . . . .  | 375        |
| 4.4.1 Starre Kupplungen . . . . .   | 376        |
| 4.4.2 Bewegliche Kupplungen (Ausgleichskupplungen) . . . . .                        | 379        |
| 4.4.3 Elastische Kupplungen . . . . .   | 385        |
| 4.4.4 Formschlüssige Schaltkupplungen . . . . .                                     | 392        |
| 4.4.4.1 Fremdbetätigte Schaltkupplungen . . . . .                                   | 392        |
| 4.4.4.2 Momentbetätigte Schaltkupplungen . . . . .                                  | 396        |
| 4.4.4.3 Richtungsbetätigte Schaltkupplungen . . . . .                               | 396        |
| 4.4.5 Kraftschlüssige Schaltkupplungen (Reibungskupplungen) . . . . .               | 397        |
| 4.4.5.1 Fremdbetätigte Reibungskupplungen . . . . .                                 | 401        |
| 4.4.5.2 Momentbetätigte Reibungskupplungen . . . . .                                | 410        |
| 4.4.5.3 Drehzahlbetätigte Reibungskupplungen . . . . .                              | 412        |
| 4.4.5.4 Richtungsbetätigte Reibungskupplungen . . . . .                             | 414        |
| 4.4.6 Bremsen . . . . .   | 416        |

|   |     |
|---|-----|
| <b>5 Elemente der geradlinigen Bewegungen</b> . . . . .           | 419 |
| 5.1 Paarung von ebenen Flächen . . . . .                          | 419 |
| 5.1.1 Führungen mit Gleitlagerungen . . . . .                     | 419 |
| 5.1.2 Führungen mit Wälzlagerungen . . . . .                      | 425 |
| 5.2 Rundlingspaarungen . . . . .                                  | 430 |
| 5.2.1 Gleitende Rundlingspaarungen . . . . .                      | 430 |
| 5.2.2 Rundführungen mit Wälzlagerungen . . . . .                  | 433 |
| <br>  |     |
| <b>6 Elemente zur Übertragung gleichförmiger Drehbewegungen</b> . | 435 |
| 6.1 Stirnradgetriebe . . . . .                                    | 437 |
| 6.1.1 Verzahnungsgeometrie geradverzahnter Stirnräder . . . .     | 437 |
| 6.1.1.1 Allgemeines Verzahnungsgesetz . . . . .                   | 439 |
| 6.1.1.2 Verzahnungsarten . . . . .                                | 445 |
| 6.1.1.3 Bezugsprofil und Herstellung . . . . .                    | 453 |
| 6.1.1.4 Unterschnitt und Grenzzähnezahl . . . . .                 | 456 |
| 6.1.1.5 Profilverschiebung . . . . .                              | 458 |
| 6.1.1.6 Zahnradpaarung . . . . .                                  | 462 |
| 6.1.1.7 Innenverzahnung . . . . .                                 | 469 |
| 6.1.2 Verzahnungsgeometrie schrägverzahnter Stirnräder . . . .    | 473 |
| 6.1.2.1 Grundbegriffe und -beziehungen . . . . .                  | 475 |
| 6.1.2.2 Paarungen schrägverzahnter V-Räder . . . . .              | 480 |
| 6.1.2.3 Verzahnungstoleranzen . . . . .                           | 481 |
| 6.1.3 Kräfte und Momente . . . . .                                | 485 |
| 6.1.4 Grundlagen der Tragfähigkeitsberechnung (DIN 3990) . . .    | 489 |
| 6.1.4.1 Allgemeine Faktoren . . . . .                             | 491 |
| 6.1.4.2 Zahnfußtragfähigkeit . . . . .                            | 497 |
| 6.1.4.3 Flankentragfähigkeit . . . . .                            | 504 |
| 6.1.5 Auslegung und Gestaltung . . . . .                          | 509 |
| 6.2 Kegelradgetriebe . . . . .                                    | 515 |
| 6.2.1 Verzahnungsgeometrie geradverzahnte Kegelräder . . . .      | 515 |
| 6.2.2 Kegelräder mit Schräg- und Bogenverzahnung . . . . .        | 520 |
| 6.2.3 Kräfte am Kegelrad . . . . .                                | 523 |
| 6.2.4 Tragfähigkeitsberechnung (DIN 3991) . . . . .               | 524 |
| 6.3 Schraubradgetriebe . . . . .                                  | 525 |
| 6.3.1 Verzahnungsgeometrie von Schraubenrädern . . . . .          | 526 |
| 6.3.2 Kräfteverhältnisse und Wirkungsgrad . . . . .               | 528 |
| 6.3.3 Bemessungsgrundlagen . . . . .                              | 529 |
| 6.4 Schneckengetriebe . . . . .                                   | 531 |
| 6.4.1 Flankenformen der Zylinderschnecken . . . . .               | 532 |
| 6.4.2 Verzahnungsgeometrie . . . . .                              | 534 |
| 6.4.3 Kräfteverhältnisse und Wirkungsgrad . . . . .               | 538 |
| 6.4.4 Empfehlungen für die Bemessung . . . . .                    | 539 |

---

|  |            |
|--|------------|
| 6.4.5 Lagerkräfte und Beanspruchungen der Schneckenwelle . . .       | 541        |
| 6.4.6 Gestaltung . . . . .   | 543        |
| 6.5 Umlaufgetriebe . . . . .   | 545        |
| 6.5.1 Drehzahlen und Übersetzungen . . . . .                         | 545        |
| 6.5.2 Kräfte, Momente und Leistungen . . . . .                       | 557        |
| 6.5.3 Kegelrad-Umlaufgetriebe . . . . .                              | 563        |
| 6.6 Reibradgetriebe . . . . .  | 564        |
| 6.6.1 Werkstoffpaarungen und Berechnungsgrundlagen . . . . .         | 564        |
| 6.6.2 Reibradgetriebe mit konstanter Übersetzung . . . . .           | 569        |
| 6.6.3 Reibradgetriebe mit stufenlos verstellbarer Übersetzung . . .  | 570        |
| 6.7 Formschlüssige Zugmitteltriebe . . . . .                         | 573        |
| 6.7.1 Kettentriebe . . . . .   | 573        |
| 6.7.2 Zahnriementriebe . . . . .                                     | 579        |
| 6.8 Kraftschlüssige Zugmitteltriebe (Riementrieb) . . . . .          | 580        |
| 6.8.1 Theoretische Grundlagen . . . . .                              | 581        |
| 6.8.1.1 Bandkräfte und -spannungen . . . . .                         | 581        |
| 6.8.1.2 Einfluß der Fliehkraft . . . . .                             | 583        |
| 6.8.1.3 Biegespannung und Biegefrequenz . . . . .                    | 584        |
| 6.8.1.4 Gesamtspannung und optimale<br>Bandgeschwindigkeit . . . . . | 585        |
| 6.8.1.5 Folgerungen aus den theoretischen Betrachtungen . . .        | 586        |
| 6.8.2 Bauarten für konstante Übersetzungen . . . . .                 | 587        |
| 6.8.2.1 Flachriementriebe . . . . .                                  | 589        |
| 6.8.2.2 Keilriementrieb . . . . .                                    | 592        |
| 6.8.3 Bauarten für stufenlos verstellbare Übersetzungen . . . . .    | 603        |
| <b>Anhang . . . . .</b>  | <b>607</b> |
| <b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>                                | <b>613</b> |
| <b>Stichwortverzeichnis . . . . .</b>                                | <b>619</b> |