

---

# Springer-Lehrbuch

---

Horst Haberhauer • Ferdinand Bodenstein<sup>†</sup>

# Maschinenelemente

Gestaltung, Berechnung, Anwendung

17., bearbeitete Auflage

Professor Dr.-Ing. Horst Haberhauer  
Hochschule Esslingen  
University of Applied Sciences  
Esslingen, Deutschland

Ferdinand Bodenstein<sup>†</sup>

<http://extras.springer.com/2013/978-3-642-37416-6>

ISSN 0937-7433

ISBN 978-3-642-37416-6

DOI 10.1007/978-3-642-37417-3

ISBN 978-3-642-37417-3 (eBook)

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 Berlin Heidelberg 1905, 1913, 1920, 1922, 1930, 1951, 1956, 1968, 1979, 1996, 2001, 2003, 2005, 2007, 2009, 2011, 2014

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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.  
[www.springer-vieweg.de](http://www.springer-vieweg.de)

---

## Vorwort zur 17. 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.

Für die 17. Auflage wurden Normen aktualisiert und einige Textstellen im Hinblick auf bessere Verständlichkeit und Eindeutigkeit überarbeitet. Insbesondere wurden die Kapitel 1.4.4 Toleranzen und Passungen und 2.5.7 Berechnen von Schraubenverbindungen überarbeitet.

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.

Esslingen, im Sommer 2013

Horst Haberhauer

**Wichtiger Hinweis:**

Über die Homepage des Springer-Verlages ([www.springer.com/de/xxx](http://www.springer.com/de/xxx)) kommen Sie zur Website des vorliegenden Buches. Dort finden Sie Ergänzungen zum Thema Maschinenelemente (z.B. eine Formelsammlung und weitere Beispiele), die Sie kostenlos herunterladen können.

---

# 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	7
1.3.3 Festigkeitsgerechtes Gestalten (Dimensionierung)	12
1.3.4 Werkstoffgerechtes Gestalten	24
1.3.5 Herstellgerechtes Gestalten	29
1.3.6 Recyclinggerechtes Gestalten	34
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	62
<b>2 Verbindungselemente</b>	<b>69</b>
2.1 Schweißverbindungen	70
2.1.1 Schweißverfahren	71
2.1.2 Schweißbarkeit	72
2.1.3 Schweißnahtgüte	74
2.1.4 Schweißstoß und Schweißnaht; Zeichnerische Darstellung	75
2.1.5 Berechnen von Schweißverbindungen	80
2.1.6 Gestalten von Schweißverbindungen	97
2.2 Lötverbindungen	102
2.2.1 Lote, Lötverfahren und Anwendungen	102
2.2.2 Berechnen von Lötverbindungen	103
2.2.3 Gestalten von Lötverbindungen	104

---

2.3	Klebeverbindungen . . . . .	106
2.3.1	Klebstoffe . . . . .	107
2.3.2	Berechnen von Klebeverbindungen . . . . .	107
2.3.3	Gestalten von Klebeverbindungen . . . . .	109
2.4	Reibschlußverbindungen . . . . .	110
2.4.1	Keilverbindungen . . . . .	111
2.4.2	Kegelsitz . . . . .	117
2.4.3	Konische Spannelementverbindungen . . . . .	120
2.4.4	Verbindungen mit federnden Zwischengliedern . . . . .	123
2.4.5	Preßverbindungen (Zylindrische Preßverbände) . . . . .	126
2.4.6	Klemmverbindungen . . . . .	140
2.5	Formschlußverbindungen . . . . .	145
2.5.1	Paß- und Scheibenederverbindungen . . . . .	145
2.5.2	Profilwellenverbindungen . . . . .	150
2.5.3	Bolzen- und Stiftverbindungen . . . . .	155
2.5.4	Elemente zur axialen Lagesicherung . . . . .	162
2.6	Nietverbindungen . . . . .	165
2.6.1	Herstellung und Gestaltung von Nietverbindungen . . . . .	165
2.6.2	Berechnen von Nietverbindungen . . . . .	171
2.6.3	Durchsetzfügen (Clinchen) . . . . .	172
2.7	Schraubenverbindungen . . . . .	173
2.7.1	Definition der Schraube; Bestimmungsgrößen . . . . .	174
2.7.2	Gewindearten . . . . .	176
2.7.3	Genormte Schrauben, Muttern und Unterlegscheiben . . . . .	179
2.7.4	Werkstoffe und Festigkeitswerte . . . . .	184
2.7.5	Berechnen von Schraubenverbindungen . . . . .	185
2.7.5.1	Verspannungsschaubild . . . . .	186
2.7.5.2	Gewindekräfte und -momente . . . . .	195
2.7.5.3	Spannungen in Schraubenverbindungen; Bemessungsgrundlagen . . . . .	199
2.7.6	Schraubensicherungen . . . . .	207
2.7.7	Gestalten von Schraubenverbindungen . . . . .	211
2.7.8	Bewegungsschraube . . . . .	211
2.8	Elastische Verbindungen (Federn) . . . . .	219
2.8.1	Kennlinie; Arbeit; Dämpfung; allgemeine Dimensionierungsgrundlagen . . . . .	219
2.8.2	Federschaltungen . . . . .	222
2.8.3	Metallfedern . . . . .	224
2.8.4	Gummifedern . . . . .	253

<b>3 Dichtungen</b>	259
3.1 Dichtungen zwischen ruhenden Bauteilen	260
3.1.1 Unlösbare Dichtungen	260
3.1.2 Bedingt lösbare Dichtungen	260
3.1.3 Lösbare Dichtungen	261
3.2 Dichtungen zwischen bewegten Bauteilen	269
3.2.1 Berührungsdichtungen	270
3.2.2 Berührungslose Dichtungen	278
3.2.3 Hermetische Dichtungen	281
<b>4 Elemente der drehenden Bewegung</b>	283
4.1 Achsen	283
4.2 Wellen	288
4.2.1 Bemessung auf Tragfähigkeit	289
4.2.2 Bemessung auf Verformung	298
4.2.3 Dynamisches Verhalten	302
4.2.4 Wellengestaltung	308
4.2.5 Sonderausführungen	311
4.3 Lager	313
4.3.1 Gleitlager	313
4.3.1.1 Schmierstoffe: Eigenschaften, Arten und Zuführung	315
4.3.1.2 Druck-, Geschwindigkeits- und Reibungsverhältnisse im Tragfilm	320
4.3.1.3 Mischreibung und Übergangsdrehzahl	342
4.3.1.4 Wellen- und Lagerwerkstoffe	344
4.3.1.5 Gestaltung	345
4.3.2 Wälzlager	352
4.3.2.1 Radiallager	355
4.3.2.2 Axiallager	360
4.3.2.3 Lagerbezeichnung	362
4.3.2.4 Lagerberechnung	364
4.3.2.5 Gestaltung von Wälzlagerungen	377
4.4 Kupplungen	388
4.4.1 Starre Kupplungen	389
4.4.2 Bewegliche Kupplungen (Ausgleichskupplungen)	392
4.4.3 Elastische Kupplungen	398
4.4.4 Formschlüssige Schaltkupplungen	405
4.4.4.1 Fremdbetätigte Schaltkupplungen	405
4.4.4.2 Momentbetätigte Schaltkupplungen	409
4.4.4.3 Richtungsbetätigte Schaltkupplungen	409



4.4.5	Kraftschlüssige Schaltkupplungen (Reibungskupplungen) . . . . .	410
4.4.5.1	Fremdbetätigte Reibungskupplungen . . . . .	413
4.4.5.2	Momentbetätigte Reibungskupplungen . . . . .	423
4.4.5.3	Drehzahlbetätigte Reibungskupplungen . . . . .	424
4.4.5.4	Richtungsbetätigte Reibungskupplungen . . . . .	427
4.4.6	Bremsen . . . . .	429
<b>5</b>	<b>Elemente der geradlinigen Bewegungen . . . . .</b>	<b>435</b>
5.1	Paarung von ebenen Flächen . . . . .	435
5.1.1	Führungen mit Gleitlagerungen . . . . .	435
5.1.2	Führungen mit Wälzlagerungen . . . . .	441
5.2	Rundlingspaarungen . . . . .	446
5.2.1	Gleitende Rundlingspaarungen . . . . .	446
5.2.2	Rundführungen mit Wälzlagerungen . . . . .	449
<b>6</b>	<b>Elemente zur Übertragung gleichförmiger Drehbewegungen . . . . .</b>	<b>451</b>
6.1	Stirnradgetriebe . . . . .	453
6.1.1	Verzahnungsgeometrie geradverzahnter Stirnräder . . . . .	453
6.1.1.1	Allgemeines Verzahnungsgesetz . . . . .	455
6.1.1.2	Verzahnungsarten . . . . .	461
6.1.1.3	Bezugsprofil und Herstellung . . . . .	469
6.1.1.4	Unterschnitt und Grenzzähnezahl . . . . .	472
6.1.1.5	Profilverschiebung . . . . .	474
6.1.1.6	Zahnradpaarung . . . . .	478
6.1.1.7	Innenverzahnung . . . . .	485
6.1.1.8	Zahnstange . . . . .	490
6.1.2	Verzahnungsgeometrie schrägverzahnter Stirnräder . . . . .	491
6.1.2.1	Grundbegriffe und -beziehungen . . . . .	493
6.1.2.2	Paarungen schrägverzahnter V-Räder . . . . .	498
6.1.2.3	Verzahnungstoleranzen . . . . .	499
6.1.3	Kräfte und Momente . . . . .	503
6.1.4	Grundlagen der Tragfähigkeitsberechnung (DIN 3990) . . . . .	507
6.1.4.1	Allgemeine Faktoren . . . . .	509
6.1.4.2	Zahnfußtragfähigkeit . . . . .	515
6.1.4.3	Flankentragfähigkeit . . . . .	522
6.1.5	Auslegung und Gestaltung . . . . .	527
6.2	Kegelradgetriebe . . . . .	533
6.2.1	Verzahnungsgeometrie geradverzahnte Kegelräder . . . . .	533
6.2.2	Kegelräder mit Schräg- und Bogenverzahnung . . . . .	538
6.2.3	Kräfte am Kegelrad . . . . .	541
6.2.4	Tragfähigkeitsberechnung (DIN 3991) . . . . .	542
6.3	Schraubradgetriebe . . . . .	543
6.3.1	Verzahnungsgeometrie von Schraubenrädern . . . . .	544

---

6.3.2	Kräfteverhältnisse und Wirkungsgrad	546
6.3.3	Bemessungsgrundlagen	547
6.4	Schneckengetriebe	549
6.4.1	Flankenformen der Zylinderschnecken	550
6.4.2	Verzahnungsgeometrie	552
6.4.3	Kräfteverhältnisse und Wirkungsgrad	556
6.4.4	Empfehlungen für die Bemessung	557
6.4.5	Lagerkräfte und Beanspruchungen der Schneckenwelle	559
6.4.6	Gestaltung	561
6.5	Umlaufgetriebe	563
6.5.1	Drehzahlen und Übersetzungen	563
6.5.2	Kräfte, Momente und Leistungen	575
6.5.3	Kegelrad-Umlaufgetriebe	581
6.6	Reibradgetriebe	582
6.6.1	Werkstoffpaarungen und Berechnungsgrundlagen	582
6.6.2	Reibradgetriebe mit konstanter Übersetzung	587
6.6.3	Reibradgetriebe mit stufenlos verstellbarer Übersetzung	588
6.7	Formschlüssige Zugmitteltriebe	591
6.7.1	Kettentriebe	591
6.7.2	Zahnriementriebe	597
6.8	Kraftschlüssige Zugmitteltriebe (Riementrieb)	598
6.8.1	Theoretische Grundlagen	599
6.8.1.1	Bandkräfte und -spannungen	599
6.8.1.2	Einfluß der Fliehkraft	601
6.8.1.3	Biegespannung und Biegefrequenz	602
6.8.1.4	Gesamtspannung und optimale Bandgeschwindigkeit	603
6.8.1.5	Folgerungen aus den theoretischen Betrachtungen	604
6.8.2	Bauarten für konstante Übersetzungen	605
6.8.2.1	Flachriementriebe	607
6.8.2.2	Keilriementrieb	610
6.8.3	Bauarten für stufenlos verstellbare Übersetzungen	621
<b>Anhang</b>		<b>625</b>
A1	Werkstoffkennwerte	625
A2	Wälzlagerabmessungen	631
A3	Flächen- und Widerstandsmomente	639
A4	SI-Einheiten	641
A5	Griechisches Alphabet	642
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>643</b>
<b>Stichwortverzeichnis</b>		<b>649</b>