

Eckhard Kirchner

Maschinenelemente und Mechatronik II



SCHAEFFLER

Umschlagbild mit freundlicher Unterstützung der Schaeffler AG,
Industriestraße 1-3, 91074 Herzogenaurach,
www.schaeffler.de/career

Maschinenelemente und Mechatronik II



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

5. überarbeitete Auflage

Copyright Shaker Verlag 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7284-6

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort zur fünften Auflage

Die nun vorliegende fünfte Auflage wurde aus mehreren Gründen notwendig. Zum einen sollen die Verweise auf zahlreiche Anschauungsmodelle, die im Gerhard-Pahl-Zentrum an der TU Darmstadt für die Studierenden zur Verfügung stehen, den physischen Kontakt zu den Beispielen und damit das Verstehen erleichtern. Die Beschreibungen, die über die QR-Codes zugänglich sind, erklären die Modelle; die gleichen Codes sind auch an den Modellen angebracht. Ferner wurde für die Lehre im Fach Maschinenelemente an der Technischen Universität Darmstadt zur Unterstützung der zeichnerischen Fähigkeiten ein separater Konstruktionsleitfaden erarbeitet, welcher den Studierenden zur Verfügung steht.

Als zweiter wesentlicher Grund für die Neuauflage sind zahlreiche kleinere Ergänzungen zu nennen, die Wissenslücken schließen und bekannte Fehler beheben sollen. Die Gliederung der vierten Auflage wurde beibehalten, große inhaltliche Ergänzungen wurden mit Ausnahme der Hinweise zur Gestaltung für additive Fertigungsverfahren in Abschnitt 5.4.6 nicht vorgenommen. Ihre Hinweise und Anmerkungen für weitere Verbesserungen schicken Sie uns bitte per Email an MM2@pmd.tu-darmstadt.de.



Auch bei dieser Überarbeitung haben wieder die wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter am Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente der TU Darmstadt tatkräftig mitgeholfen, vor allem bei der Erarbeitung und Dokumentation der verschiedenen Anschauungsmodelle zur Vorlesung. Zu nennen sind hier insbesondere Herr Jannik Reichwein, M.Sc., der den Abschnitt zur Gestaltung additiv gefertigter Bauteile basierend auf den Vorlesungsunterlagen von Herrn Dr.-Ing. Jan Würtenberger verfasst hat. Herr Tobias Schirra, M.Sc., hat die Inhalte des Kapitels Wälzlager gesichtet, gestrafft und aktualisiert, Herr André Harder, M.Sc., hat das Kapitel Gleitlager neu geordnet und die Lehrinhalte mit der weiterführenden Lehrveranstaltung abgeglichen. Die Herren Marcel Neu, M.Sc. und Sven Vogel, M.Sc., haben mit zahlreichen kleinen Verbesserungsvorschlägen versucht, die in den Übungen erkannten Verständnisschwierigkeiten der Studierenden zu beheben. Bei allen Mitarbeitern bedanke ich mich an dieser Stelle ausdrücklich für das Engagement in der Maschinenelemente-Lehre!!

Die große Zäsur für dieses Skript zur Darmstädter Maschinenelemente-Lehre zeichnet sich daran ab, dass ich nun alleine als Autor die Verantwortung für die Überarbeitung übernommen habe. Herrn Kollegen Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Dr. h.c. H. Birkhofer, der sich im Un-Ruhestand noch immer sehr für das Fachgebiet interessiert und engagiert, danke ich herzlich für seine stete Unterstützung und für die Erlaubnis, das Buch von nun an alleine aufbauend auf seinen Gedanken weiter zu entwickeln.

Darmstadt, im Februar 2020

Eckhard Kirchner

Vorwort zur vierten Auflage

Diese vierte Auflage war notwendig, nachdem ich im ersten Vorlesungsdurchgang an der TU Darmstadt Erfahrungen mit dem vorliegenden Stoff gesammelt hatte und mir eine Neuordnung der Abschnitte entsprechend der Reihenfolge des Lehrstoffs als erforderlich erschien. Darüber hinaus habe ich "meine" Beispiele in den Umdruck aufgenommen, an denen ich die Praxisrelevanz der vorgestellten Theorie authentisch erläutern kann. Bezüglich der behandelten Themen entspricht diese vorliegende vierte Auflage in großen Teilen der dritten, die von meinem Vorgänger Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Dr. h.c. H. Birkhofer erarbeitet wurde. Als ich Herrn Birkhofer bat, mich bei der Überarbeitung des Umdrucks zu unterstützen und Teile des Manuskripts zu lesen, war seine Frage nicht "Warum?" sondern "Bis wann?". Ich habe mich über diese Reaktion und die kritischen Anmerkungen zum Manuskript von Herrn Birkhofer sehr gefreut. Aus diesem Grund sind wir beide als Autoren dieser vierten Auflage genannt.

Die vorgenommenen Umstellungen der einzelnen Abschnitte berücksichtigen nun in besserer Art und Weise die Vorgehensweise und die Stofffolge der Vorlesung. Bisher war ein häufiges Springen im Umdruck notwendig, um der Vorlesung folgen zu können. Dieser Nachteil soll mit der vorliegenden Überarbeitung beseitigt werden. Der Aufbau und die Reihenfolge der Kapitel orientiert sich an der von mir gehaltenen Vorlesung. Der Text wurde neu geschrieben und viele der Abbildungen neu erstellt oder grundlegend überarbeitet, ferner ist der Text umfangreicher und eher auch für ein Selbststudium geeignet.

Die Neuordnung der einzelnen Abschnitte betrifft insbesondere das Thema Gestaltung, in dem die fertigungs- und beanspruchungsgerechte Konstruktion der Maschinenelemente besprochen wird. In der dritten Auflage stand dieser Abschnitt am Anfang, die nun gewählte Anordnung nach der Festigkeitsberechnung entspricht der zeitlichen Abfolge des Maschinenelemente-Kurses an der TU Darmstadt. Zudem sind die Gestaltungsregeln wo immer möglich den einzelnen Maschinenelementen direkt zugeordnet, als Beispiel sei auf die gießgerechte Gestaltung in Abschnitt 13.4.4 verwiesen, die nun eben in direktem Zusammenhang mit der Gestaltung von Gehäusen besprochen wird. Ferner wurde die Reihenfolge der Schraubenverbindungen und der Federungen und Dämpfer getauscht, da Schrauben mit dem Modell der Feder ausgelegt werden, erschien uns diese Änderung als logisch und für das Verständnis der Studierenden vorteilhaft. Das neue Kapitel zu den gleichförmig übersetzenden Getrieben fokussiert auf die mechanischen Kräfte aus Stirnradgetrieben und Hüllgetrieben, die Wellen, Lager und Gehäuse beanspruchen; das Ziel ist *nicht*, eine umfassende Einführung in die Verzahnungstechnik zu geben.

Ferner sei darauf hingewiesen, dass mit der Einführung des Darmstädter Lehrkonzepts im Fach Maschinenelemente eine Reduktion der Stofffülle notwendig wurde, um Raum für das Denken in Systemen zu schaffen. Dies drückt sich dadurch aus, dass beispielsweise die Gestaltung von Zahnradgetrieben und Umschlingungsgetrieben nur sehr knapp behandelt wird, was alleine durch die Beschränkung auf eine vierstündige einsemestrige Lehrveranstaltung begründet ist. Weitergehende Details der Maschinenelemente werden in der weiterführenden Lehrveranstaltung „Innovative Maschinenelemente“ besprochen, die ich ebenfalls an der TU Darmstadt anbiete. Darüber hinaus sind im Anhang umfangreiche Literaturempfehlungen enthalten, die für ein vertieftes Selbststudium aber auch für die Anwendung in der Praxis nützlich sein können.

Innerhalb dieses Umdrucks wird folgende Konvention für die Querverweise benutzt: auf Gleichungen, die in den verschiedenen Kapiteln zu finden sind, wird lediglich mit einer Zahl in

runden Klammern verwiesen, zum Beispiel (2.1); auf Literaturstellen einfach mit einer Zahl in eckigen Klammern, z. B. [80]. Das alphabetisch sortierte Literaturverzeichnis findet sich am Ende dieses Umdrucks.

Der vorliegende Band ist vor allem auch ein Gemeinschaftswerk des gesamten Fachgebiets *Produktentwicklung und Maschinenelemente*. Bei der Überarbeitung haben mich die Herren Dr. Ilyas Mattmann (Gesamtkoordination und Abschnitt stoffschlüssige Bauteilverbindungen), Jan Würtenberger und Julian Lotz (Schraubenverbindungen), Sven Vogel (Federn & Dämpfer), Dr. Hermann Klobberdanz (Kapitel Gestaltung), Christian Wagner (Abschnitte Passungen und Tribologie), Michael Roos (Abschnitte Systematik der Bauteilverbindungen sowie formschlüssige Bauteilverbindungen), Georg Martin (HERTZ'sche Pressung), Stefan Schork (Kapitel Toleranzen) und Tillmann Freund (Kapitel Gestaltung und Abschnitt reibkraftschlüssige Bauteilverbindungen) sowie Sandra Link, Julian Sarnes, Jean-Paul Beetz und Tobias Schirra (Korrektur aller Kapitel) – allesamt wissenschaftliche Mitarbeiter am Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente der TU Darmstadt – tatkräftig unterstützt und ihre Erfahrungen aus den Gruppen- und Hörsaalübungen eingebracht. Ferner haben etliche Studierende im Hintergrund bei der Überarbeitung der Bilder und bei der Neuerstellung mitgearbeitet.

Besonders zu erwähnen ist die Unterstützung aus der Industrie. Herr Dr.-Ing. Thomas Steinert (Fa. Breco Antriebstechnik) hat den Abschnitt zu den Hüllgetrieben kritisch gelesen und aktuelle Ergebnisse seines Hauses beigesteuert. Herr Prof. Dr.-Ing. Eberhard Bock (Freudenberg Sealing Technologies GmbH & Co. KG) hat das Kapitel zu den Dichtungen gesichtet und ebenfalls aktuelle Daten von Freudenberg zur Erreichung eines modernen Standes der Lehrunterlage zur Verfügung gestellt.

Ganz besonders freut es mich natürlich, dass wir als optische Besonderheit diesen Umdruck mit einem aktuellen Produktbild der Schaeffler Technologies AG schmücken dürfen. Ermöglichlich haben dies – man möge mir nachsehen, wenn ich jetzt nur wenige Personen namentlich nenne – vor allem mein ehemaliger Kollege Herr Johannes Enders sowie Frau Rita Rohmfeld.

Sollten trotz sorgfältiger Prüfung noch inhaltliche Unzulänglichkeiten oder Rechtschreibfehler in diesem Umdruck enthalten sein, so teilen Sie mir dies bitte mit. Für alle noch enthaltenen Fehler bin ich in vollem Umfang alleine verantwortlich.

Darmstadt, im Februar 2017

Eckhard Kirchner

Abkürzungsverzeichnis

CAD	Computer-Aided-Design
C&CM	Contact & Channel Modell, vgl. Abschnitt 6.1.3
KMU	Kleine und mittelständische Unternehmen
PE	Produktentwicklung
PGE	Produktgenerationsentwicklung
PLM	Produktdatenmanagement-System (Product Lifecycle Management)
PTFE	Polytetrafluorethylen

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Festigkeitsnachweise	13
2.1	Darstellungsformen im Maschinenbau	13
2.2	Grundlagen der Festigkeitslehre	18
2.3	Instationärer Festigkeitsnachweis – Dauerfestigkeit	43
2.4	Statischer Festigkeitsnachweis – Sicherheit bei Maximallast	70
3	Spezifikation von Toleranzen und technischen Oberflächen auf Bauteilebene	78
3.1	Motivation und Ursachen der Geometrieabweichungen	78
3.2	Maßtoleranzen	81
3.3	Form- und Lagetoleranzen	87
3.4	Spezifikation technischer Oberflächen	87
3.5	Regeln zum Festlegen von Toleranzen und Oberflächenangaben	93
4	Bauteilkontakt	96
4.1	Geometrie von Bauteilkopplungen – Passungen	98
4.2	Geometrie und Kinematik von Bauteilkopplungen	107
4.3	Beanspruchungen von Bauteilkopplungen durch Normalkräfte	108
4.4	Beanspruchung von Bauteilkopplungen – Tribologie	118
5	Bauteilgestaltung	134
5.1	Hilfsmittel zum Methodischen Gestalten	136
5.2	Grundregeln zur Gestaltung	138
5.3	Gestaltungsprinzipien und Bauweisen	145
5.4	Regeln und Richtlinien zur Gestaltung	155
6	Bauteilverbindungen	178
6.1	Systematik von Bauteilverbindungen	178
6.2	Stoffschlüssige Bauteilverbindungen	189
6.3	Formschlüssige Bauteilverbindungen	215
6.4	Reibkraftschlüssige Verbindungen	241
7	Federungen und Dämpfer	270
7.1	Unterscheidung von Federungen und Dämpfern	270



7.2	Makroskopische Eigenschaften von Federn	273
7.3	Metallfedern	278
7.4	Elastomerfedern	301
7.5	Pneumatische Federn	304
7.6	Eigenschaften von Dämpferelementen	307
8	Schraubenverbindungen	316
8.1	Systematik und Grundbegriffe	316
8.2	Modellbetrachtung	318
8.3	Mechanisches Verhalten der Verschraubung	325
8.4	Montage von Schraubenverbindungen	339
8.5	Berechnung von Schraubenverbindungen	345
8.6	Gestaltung von Schraubenverbindungen	349
9	Wälzlager	356
9.1	Systematik der Lagerungen und Führungen	357
9.2	Überblick Wälzlagerungen	361
9.3	Lagerbelastung und Lageranordnung	378
9.4	Berechnung der Wälzlagerlebensdauer	389
9.5	Konstruktive Hinweise zur Gestaltung	406
10	Gleitlager	412
10.1	Systematik der Gleitlager	412
10.2	Gleitlagerbuchsen	413
10.3	Hydrodynamische Gleitlager	421
11	Dichtungen	440
11.1	Überblick und Funktionen von Dichtungen	440
11.2	Statische Dichtungen	447
11.3	Rotatorische dynamische Dichtungen mit berührender Gleitpaarung	458
11.4	Translatorische dynamische Dichtungen mit berührender Gleitpaarung	466
11.5	Dynamische Dichtungen mit berührungsloser Gleitpaarung	470
12	Kupplungen	474
12.1	Systematik der Kupplungen	475
12.2	Starre Kupplungen	480
12.3	Torsionssteife Kupplungen	484
12.4	Elastische Kupplungen	495
12.5	Auswahlkriterien für nicht schaltbare Wellenkupplungen	503
12.6	Rutschkupplungen als Sicherheitselement	504
13	Systematik von Getrieben	509
13.1	Konventionen und Begriffe	510
13.2	Rädergetriebe	520
13.3	Hüllgetriebe	533
13.4	Gehäuse	563