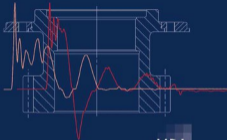


Eckhard Kirchner

# Leistungsübertragung in Fahrzeuggetrieben

Grundlagen der Auslegung, Entwicklung  
und Validierung von Fahrzeuggetrieben  
und deren Komponenten



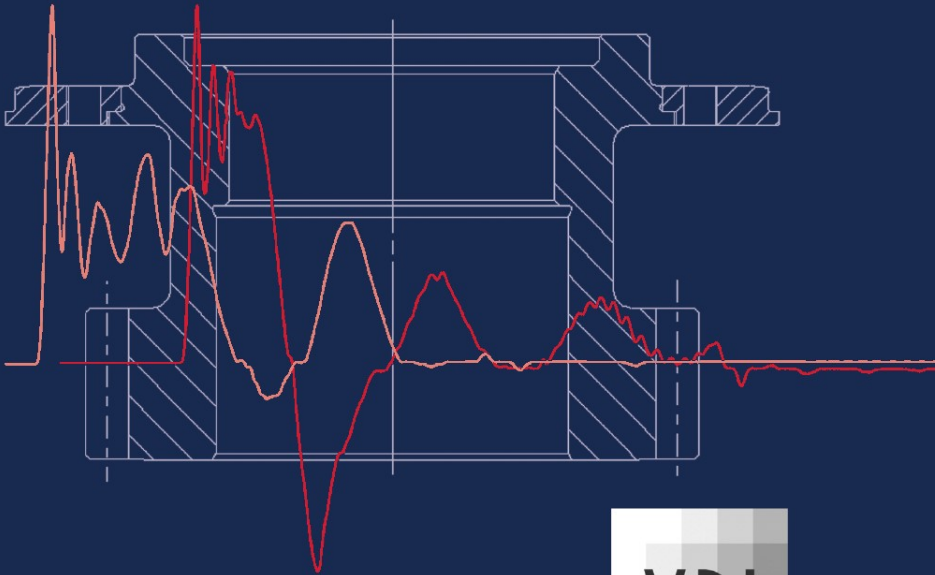
VDI

 Springer

Eckhard Kirchner

# Leistungsübertragung in Fahrzeuggetrieben

Grundlagen der Auslegung, Entwicklung  
und Validierung von Fahrzeuggetrieben  
und deren Komponenten



VDI

 Springer

Eckhard Kirchner

---

Leistungsübertragung in Fahrzeuggetrieben

Eckhard Kirchner

# Leistungsübertragung in Fahrzeuggetrieben

Grundlagen der Auslegung, Entwicklung  
und Validierung von Fahrzeuggetrieben  
und deren Komponenten

Mit 532 Abbildungen und 58 Tabellen

 Springer

Professor Dr.-Ing. Eckhard Kirchner  
Fachhochschule Wiesbaden  
Fachbereich Ingenieurwissenschaften  
Am Brückweg 26  
65428 Rüsselsheim  
*kirchner@mb.fh-wiesbaden.de*

hofer powertrain GmbH  
Rudolf-Diesel-Strasse 11  
85101 Lenting  
*e.kirchner@hofer.de*

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.

ISBN 978-3-540-35288-4 Springer Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk- sendung, der Mikroverfilmung oder der 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 Gren- zen 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 ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media  
[springer.de](http://springer.de)

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007

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: Digitale Vorlage des Autors  
Herstellung: LE-TEX Jelonek, Schmidt & Vöckler GbR, Leipzig  
Einbandgestaltung: WMXDesign, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier 68/3180/YL – 5 4 3 2 1 0

---

## Vorwort

Eigentlich sollte man annehmen, dass nach mehr als 100 Jahren Automobilbau alles über die Leistungsübertragung in Fahrzeuggetrieben in schriftlicher Form dokumentiert ist. Aber weit gefehlt: Das Fahrzeuggetriebe beschäftigt mehr denn je die Ingenieure in Forschung und Entwicklung, um unter dem Druck der Selbstverpflichtung der Automobilindustrie das technisch und ökonomisch Mögliche zur Senkung von Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Ausstoß bei gleichzeitiger Steigerung der Tragfähigkeit zu leisten.

Das Manuskript zu diesem Buch entsteht also mitten in einer Zeit, in der die Automobilwirtschaft mit großem technischen Ehrgeiz nach neuen technischen Möglichkeiten zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs bei gleichzeitiger Beibehaltung der üblichen Fahrleistungen sucht. Zeitgleich haben Kostendruck und Aufgabenteilung in der Entwicklung ein bisher noch nicht bekanntes Niveau erreicht. Hinzu kommen die Anforderungen des Kunden nach immer komfortableren, robusten Getrieben, die ihn begeistern und nicht nur zufriedenstellen.

Der Aspekt der Kundensicht und mit ihm die vielfältigen Fragestellungen nach komfortrelevanten Phänomenen verbunden mit einem soliden Überblick über konstruktive und entwicklungsmethodische Grundzüge der Fahrzeuggetriebe war meine ursprüngliche Motivation für dieses Buch. Es entstand auf der Grundlage einer Vorlesung, die ich für Studierende des Maschinenbaus halte; die positiven Rückmeldungen zum Inhalt der Vorlesung haben das Entstehen dieses Buches vorangetrieben.

Die Zielgruppe dieses Buches ist somit in meinem ehemaligen Tätigkeitsbereich – der Fahrzeug- und insbesondere in der Getriebeentwicklung – zu suchen; es ist als Einführungs- und Nachschlagewerk gleichermaßen konzipiert. Hinzu kommen als potentielle Leser die Studierenden an den deutschsprachigen ingenieurwissenschaftlichen Fakultäten, die sich für den Antrieb von Kraftfahrzeugen interessieren. Die Ausführungen und Auslegungsrichtlinien sind jeweils für einen Erstentwurf und dessen Dimensionierung der verschiedenen Getriebekonzepte und ihrer Komponenten umfangreich genug, für die

Optimierung der Einzelteile werden viele Hinweise auf tieferegehende Quellen gegeben. Auf den Einsatz einer speziellen Software wurde ganz bewusst verzichtet, alle Auslegungsaufgaben und Beispiele sind mit dem Taschenrechner oder einem einfachen Tabellenkalkulationsprogramm lösbar. Die ausführlichen Lösungen zu den enthaltenen Auslegungsfragen stelle ich gerne auf Anfrage zur Verfügung.

Zumindest indirekt geholfen beim Entstehen haben viele ehemalige Kollegen, mit denen ich viele der hier zusammengetragenen Fakten diskutieren konnte; namentlich genannt seien – stellvertretend – Georg Bednarek, Friedhelm Krake, Josef Hau und Jörg Bönning (Alle GM Powertrain Europe) aber auch Dr. Klaus Kalmbach, Dr. Peter Werth, Thomas Hackl, Ulf Polzin und Patrick Vikari, alle hofer powertrain GmbH. Die letztgenannten Herren, ihre Begeisterung und ihr Wissen um die Thematik haben viele Punkte einfließen lassen, die hier zusammengetragen sind. Darüber hinaus hat die hofer powertrain GmbH mir die Einbindung der Bilder in Farbe ermöglicht und stand meinen Bildwünschen immer aufgeschlossen gegenüber.

Viele wertvolle Denkanstöße zur Darstellung einzelner Fragestellungen habe ich von Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Sauer, TU Kaiserslautern erhalten; zu nennen ist hier beispielsweise die explizite Auseinandersetzung mit den Wirkprinzipien mechanischer Leistungsübertragung direkt in der Einleitung.

Weiterhin möchte ich mit bei einer Reihe von Studierenden bedanken, die im Rahmen von Studien- und Diplomarbeiten Bausteine zu abgeschlossenen Themen erarbeitet und so zu diesem Buch beigetragen haben. Genannt seien hier Frau Rike Grotepass sowie die Herren Rene Johnne, Hagen Plisch, Tillmann Schäfer, Martin Sängler, Christian Lunkenheimer, Florian Herbold, Matthias Reimann und Christian Hamann. Die Herren Dr.-Ing. Andreas Laschet (Arla Maschinentechik, Kürten) und Dr. Jan Schlipf (GIF GmbH, Alsdorf) sowie die Firmen GM Powertrain Europe, DaimlerChrysler, BMW, ZF Zahnradfabrik Friedrichshafen, Voith Turbo Systems, ElringKlinger, Hörbiger Antriebstechnik, LuK, INA, Jopp, MagnaSteyr und AGCO haben mir Material zur Verfügung gestellt. Ich bitte um Nachsicht, wenn ich jemanden vergessen haben sollte, der zu diesem Buch beigetragen hat.

Dem Springer Verlag, insbesondere Herrn Dr.-Ing. B. Gebhardt, danke ich für die gute konstruktive Zusammenarbeit und die Unterstützung bei der Wahl der Schwerpunkte dieses Buchs.

Es bleibt ein riesiges Danke an meine Frau Dr. Nina Kirchner für ihre Hilfe beim Korrekturlesen und ihre vielen Verbesserungsvorschläge sowie meinen Kindern für ihr Verständnis, wenn ich am Manuskript gearbeitet habe anstatt mit ihnen zu spielen. Mir hat es Spass gemacht, mein Wissen zum Thema Getriebe soweit möglich niederzuschreiben; ich hoffe, dass man das merkt.

---

## Geleitwort

In den Zeiten des Internet ist ein neues Fachbuch an sich ja schon etwas Besonderes – die “Halbwertszeit” des Inhaltes wird durch die ständig verfügbare und aktuelle Information stetig kürzer. Manche Autoren vor allem technischer Grundlagenwerke versuchen deshalb, mit einer Flut von Verweisen auf diverse Stellen des Internets der Situation Herr zu werden, und machen dadurch so manches Buch ohne einen Zugang zum Internet ungenießbar.

Als Mitglied im Führungsteam eines schnell wachsenden Triebstrang-Entwicklers bin ich ständig mit der Aufgabe konfrontiert, Grundlagenwissen weiterzugeben oder neue Mitarbeiter mit universitärer Vorbildung aus verschiedenen Fächern auf ein vergleichbares Niveau zu bringen. Manchmal ist aber auch ein kompaktes Nachschlagewerk zu vermitteln, das dem Ingenieur Hilfe bei der Lösung seiner täglichen Aufgaben bietet, was hier vor allem durch die intuitive Gliederung erleichtert wird.

Dieses Buch besitzt nun genau jenen Detaillierungsgrad, den der Ingenieur im Arbeitsleben benötigt. Man wird Problemstellungen finden, die man scheinbar gelöst glaubte, und man wird Hinweise auf Problemlösungen finden, die inzwischen zum Standard-Repertoire des Triebstrangentwicklers gehören.

Begriffe wie Automatisierung des Getriebes, Komfortaspekte, Simulation und Validierung fehlen ebensowenig wie Konzepte auch für Nutzfahrzeuge oder Hybridfahrzeuge. Man hat ein Buch in der Hand, das sich vor der Verschmelzung von klassischem Maschinenbau, elektronischen und hydraulischen Steuerungen, elektromechanischen und hydraulischen Aktuatoren sowie der zugehörigen Software, abgeleitet von brauchbaren Simulationsmodellen, nicht verschließt. Genau hier liegt die Zukunft des Triebstrangs: Im sinnvollen Zusammenwirken der verschiedenen Technologien zum Nutzen der Umwelt, des Verbrauchs und der Fahrdynamik.

München, im März 2007

*Dr.-Ing. Peter M. Werth*  
(Vorstandsmitglied der hofer AG)



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	1
1.1	Aufgaben des Fahrzeuggetriebes .....	1
1.2	Ziel und Schwerpunkt .....	5
1.3	Beschreibung der mechanischen Schnittstellen .....	7
1.4	Gliederung .....	9
<b>2</b>	<b>Antriebsstrang- und Getriebekonzepte für PKW und Nutzfahrzeuge</b> .....	13
2.1	PKW mit Frontantrieb .....	14
2.2	Heckangetriebene PKW .....	17
2.3	Sonderformen des PKW-Antriebsstranges .....	19
2.3.1	Allradfahrzeuge .....	19
2.3.2	Mittelmotorkonzepte für Sportwagen .....	21
2.4	Nutzfahrzeuge und Busse .....	23
2.4.1	Lastkraftwagen .....	23
2.4.2	Busse .....	27
2.5	Automatisierungsgrade von Fahrzeuggetrieben .....	28
2.5.1	Teilautomatisierte PKW- und NKW-Schaltgetriebe ...	29
2.5.2	Vollautomatische Schaltgetriebe .....	30
2.6	Manuelle Schaltgetriebe .....	31
2.6.1	Getriebe für den Frontquereinbau .....	32
2.6.2	Getriebe für frontgetriebene Fahrzeuge mit Längsmotor	37
2.6.3	Getriebe für Fahrzeuge mit Heckantrieb .....	39
2.6.4	Beispiele für Sportwagen-Schaltgetriebe .....	40
2.6.5	Manuell schaltbares Gruppengetriebe 16S109 .....	42
2.7	Teil- und vollautomatische Getriebe .....	45
2.7.1	Sequentielle, teilautomatisierte Getriebe .....	45
2.7.2	Doppelkupplungsgetriebe .....	46
2.7.3	Stufenautomatikgetriebe .....	52
2.7.4	Stufenlose Automatikgetriebe .....	57

<b>3</b>	<b>Systemauslegung von Antriebsträngen</b> .....	65
3.1	Vorbemerkungen und Definitionen .....	66
3.1.1	Vorzeichenkonvention und Übersetzungen .....	66
3.1.2	Relativdrehzahlen .....	72
3.1.3	Verluste, Wirkungsgrad und Schleppmoment .....	74
3.2	Fahrleistung und Verbrauch .....	77
3.2.1	Ideale Zugkrafthyperbel und allgemeine Fahrwiderstände	78
3.2.2	Einfluss und Auslegung von Getriebeübersetzungen ....	86
3.2.3	Verbrauchsaspekte .....	95
3.2.4	Fahrleistung und Beschleunigungsvermögen .....	96
3.3	Lastannahmen für die System- und Komponentenauslegung ...	100
3.3.1	Auslegungslebensdauer .....	101
3.3.2	Missbrauchslasten .....	102
3.3.3	Lastkollektive für die Betriebsfestigkeitsanalyse .....	104
3.3.4	Komfortanforderungen .....	105
3.4	Lastenheft, Systemkonfiguration und Entwicklungsprozess ....	105
3.4.1	Lastenhefterstellung .....	106
3.4.2	Identifikation möglicher Systemkonfigurationen .....	107
3.4.3	Entwicklungsprozess .....	108
<b>4</b>	<b>Auslegung und Charakteristika spezieller Systeme und Baugruppen von manuellen Schaltgetrieben</b> .....	111
4.1	Kupplungen und Schwungräder .....	112
4.1.1	Aufbau des Kupplungsmoduls im Fahrzeuggetriebe ....	115
4.1.2	Belagmaterialien und ihre Belastungsgrenzen .....	121
4.1.3	Auslegung des Kupplungssystems .....	126
4.1.4	Mechanismen zur Selbstnachstellung .....	138
4.1.5	Kupplungsbetätigung .....	140
4.1.6	Prinzipieller Aufbau von Doppelkupplungen .....	146
4.2	Wellen und Räder .....	147
4.2.1	Gestaltung und Auslegung von Wellen .....	150
4.2.2	Festigkeitsnachweis von Getriebewellen .....	163
4.2.3	Gestaltung von Rädern .....	165
4.3	Auslegung von Verzahnungen .....	168
4.3.1	Leistungsgrenzen, Tragbilder und Tragfähigkeitsgrenzen	171
4.3.2	Achsabstand, Zahnbreite und Schrägungswinkel .....	179
4.3.3	Überprüfung der Vorauslegung .....	192
4.3.4	Nachweis von Zahnfuß- und Zahnflankentragfähigkeit ..	193
4.3.5	Verzahnungskräfte bei Stirnradstufen .....	204
4.3.6	Besonderheiten von Kegelrädern .....	206
4.3.7	Qualitätssicherung und Optimierungsansätze .....	209
4.4	Synchronisation .....	214
4.4.1	Aufbau der Synchronisation .....	214
4.4.2	Phasen des Synchronisationsvorgangs .....	220
4.4.3	Auslegung der Synchroneinheiten .....	227

4.4.4	Fehlfunktionen .....	236
4.4.5	Reibbeläge für Synchronisationen .....	237
4.5	Komponenten der Schaltbetätigung .....	242
4.5.1	Schalten und Wählen – Externe Schaltung .....	245
4.5.2	Komponenten der Innenschaltung .....	254
4.5.3	Rastierelemente .....	257
<b>5</b>	<b>Architektur, Komponenten und Baugruppen automatisch schaltender PKW-Getriebe .....</b>	<b>265</b>
5.1	Kommunikation zwischen Fahrzeug, Motor und Getriebe .....	266
5.2	Teilautomatisierung manueller Schaltgetriebe .....	269
5.2.1	Automatisierungsstrategie – Änderungsumfang .....	269
5.2.2	Komponenten zur Teilautomatisierung .....	273
5.3	Doppelkupplungssystem .....	275
5.3.1	Der mechanische Aufbau von Doppelkupplungsgetrieben	276
5.3.2	Vergleich trocken und nass laufender Doppelkupplungen	283
5.3.3	Aktuatorik und Regelung .....	290
5.4	Aufbau und Betätigungselemente von Stufenautomatgetrieben	295
5.4.1	Architektur und Leistungsfluss .....	296
5.4.2	Leistungsführende Schaltelemente .....	301
5.4.3	Betätigungselemente von Stufenautomatikgetrieben .....	313
5.5	Drehmomentwandler für Stufenautomaten .....	321
5.5.1	Prinzip der hydrodynamischen Leistungsübertragung .....	322
5.5.2	Auslegung des Wandlers .....	333
5.5.3	Wandlerüberbrückungskupplung .....	347
5.5.4	Entwicklungstrends .....	351
5.6	Planetensätze .....	355
5.6.1	Aufbau und Besonderheiten .....	356
5.6.2	Der einfache Planetensatz .....	358
5.6.3	Graphische Verfahren – Momenten- und Drehzahlplan .....	376
5.6.4	Aufwändigere und verkettete Planetensätze .....	381
5.6.5	Planetensätze mehrstufiger Stufenautomatgetriebe .....	387
5.7	Spezielle mechanische Komponenten stufenloser Getriebe .....	396
5.7.1	Wirkprinzipien mechanischer Stufenlosgetriebe .....	397
5.7.2	Abschätzung der Verlustleistungen .....	402
5.7.3	Ausgewählte Komponenten des Kegelringgetriebes .....	406
5.7.4	Leistungsübertragung in Umschlingungsgetrieben .....	412
<b>6</b>	<b>Allgemeine Komponenten der Fahrzeuggetriebe .....</b>	<b>423</b>
6.1	Differentiale – Ausgleichsgetriebe .....	423
6.1.1	Achsparalleler An- und Abtrieb .....	426
6.1.2	Winkliger An- und Abtrieb .....	434
6.1.3	Differentiale mit Sperrwirkung .....	437
6.2	Achs- und Längswellen und Gelenke .....	439
6.2.1	Achswellen .....	440

6.2.2	Längswellen .....	441
6.2.3	Kreuzgelenke .....	442
6.3	Leistungsverteilende Komponenten für Allradfahrzeuge .....	448
6.3.1	Systematik von Allradantrieb und Leistungsverteilung .....	450
6.3.2	Leistungsverteilung in Fahrzeuglängsrichtung .....	458
6.3.3	Aktive Leistungsverteilung .....	465
6.4	Wälzlagerungen .....	467
6.4.1	Wälzlager in Fahrzeuggetrieben .....	471
6.4.2	Dimensionierung auf Betriebsfestigkeit .....	474
6.4.3	Nadel- und Rollenlager für die Lagerung von Losrädern .....	479
6.4.4	Kegel-, Rollen- und Kugellager für die Wellenlagerung .....	481
6.4.5	Wälzlagerungen für Komfortbauteile der Schaltung .....	483
6.4.6	Lagerschäden: Ursachen und Auswirkungen .....	484
6.5	Gehäuse, Dichtung und Beölung .....	487
6.5.1	Mechanische Funktionen des Gehäuses .....	487
6.5.2	Dichtkonzepte bei mehrteiligen Gehäusen .....	491
6.5.3	Beölung – Öl als Konstruktionselement .....	496
<b>7</b>	<b>Leistungsübertragung in Nutzfahrzeuggetrieben .....</b>	<b>505</b>
7.1	Nutzfahrzeuggetriebe mit mechanischer Leistungsübertragung .....	506
7.1.1	Integration des Getriebes in den Triebstrang .....	506
7.1.2	Gruppenbauweise .....	511
7.1.3	Automatisierungsstrategien .....	520
7.2	Nutzfahrzeugantriebe mit hydraulischer Leistungsübertragung .....	525
7.2.1	Nutzfahrzeuggetriebe mit hydraulischen Komponenten .....	525
7.2.2	Vario-Getriebe von Fendt .....	532
7.2.3	DIWA-Getriebe von Voith .....	537
7.2.4	Hydraulisch betätigter optionaler Allradantrieb .....	542
7.3	Spezielle Komponenten .....	544
7.3.1	Klauenschaltung .....	545
7.3.2	Hydrodynamische Strömungsbremse – Retarder .....	545
7.3.3	Hydropumpen und -motoren .....	550
<b>8</b>	<b>Leistungsübertragung in Hybridfahrzeugen .....</b>	<b>559</b>
8.1	Allgemeines .....	562
8.1.1	Geschichtlicher Hintergrund .....	563
8.1.2	Grundstrukturen der Hybridantriebe .....	565
8.1.3	Einteilung nach der installierten Leistung .....	571
8.1.4	Verbrauchsaspekte .....	572
8.2	Betriebsstrategien und Antriebstrangkonfiguration .....	574
8.2.1	Hybridkonzept des Toyota Prius .....	576
8.2.2	Elektrischer Allradantrieb .....	580
8.2.3	Two-Mode-Hybrid System .....	581
8.3	Leistungsübertragung bei Brennstoffzellenfahrzeugen .....	585

<b>9</b>	<b>Komfortaspekte</b> .....	587
9.1	Subjektive Einflussfaktoren und Ansätze zur Objektivierung .....	588
9.2	Schwingungen des Antriebstrangs .....	591
9.2.1	Rupfen .....	592
9.2.2	Ruckeln .....	594
9.2.3	Lastwechselstöße und -geräusche .....	595
9.2.4	Schwingungen und Geräusche bei Allradsystemen .....	596
9.2.5	Mögliche Schwingungstilgung beim Hybridantrieb .....	597
9.3	Zugkraftunterbrechung und Lastwechsel .....	597
9.3.1	Wesen von Zugkraftunterbrechung und Lastwechsel .....	598
9.3.2	Schaltkomfort automatisierter Schaltgetriebe .....	599
9.3.3	Doppelrückschaltungen bei Doppelkupplungsgetrieben .....	601
9.3.4	Zugkraftunterbrechung bei Hybridkonzepten .....	602
9.4	Schaltkomfort .....	603
9.4.1	Begriffsklärung und relevante Kenngrößen .....	605
9.4.2	Phänomene des Schaltkratzens .....	608
9.4.3	Fahrversuch, Prüfstand und Rechnung .....	611
9.4.4	Maßnahmen zur Schaltkomfortoptimierung .....	614
9.5	Geräusche und Schwingungen von Schaltung und Kupplung .....	615
9.5.1	Vibrationen des Kupplungspedals .....	615
9.5.2	Wählrauhigkeit .....	617
9.5.3	Vibrationen im Schaltsystem .....	618
9.6	Getriebeegeräusche .....	623
9.6.1	Getriebeheulen oder -pfeifen .....	624
9.6.2	Getrieberasseln oder -klappern .....	625
9.6.3	Maßnahmen zur Geräuschreduzierung .....	630
9.6.4	Schaltgeräusche .....	633
9.6.5	Lagergeräusche .....	634
<b>10</b>	<b>Validierung: Möglichkeiten und Konzepte</b> .....	635
10.1	Validierung und Entwicklung im Fahrzeug .....	635
10.2	Dauerlauferprobung auf Komponentenprüfständen .....	638
10.3	Prüfstände für Fahrmanöver und Komfortentwicklung .....	643
10.3.1	Komponenten- und Funktionsprüfstände .....	644
10.3.2	Prüfstände für Sondermanöver .....	648
10.4	Möglichkeiten und Grenzen der virtuellen Validierung .....	649
10.4.1	Vertrauenskennziffer .....	649
10.4.2	Methoden der Strukturmechanik .....	651
10.4.3	Mehrkörpersimulationsverfahren .....	652
10.4.4	Strömungsmechanische Verfahren .....	653
10.4.5	Road-to-Rig-to-Math Strategie .....	654

<b>A</b>	<b>Erweiterungen der elementaren Festigkeitslehre</b> .....	655
A.1	Hertz'sche Flächenpressung .....	655
A.1.1	Vorbemerkungen .....	656
A.1.2	Punktberührung .....	658
A.1.3	Linienberührung .....	664
A.2	Grundzüge der Betriebsfestigkeit .....	666
A.2.1	Das Wöhlerschaubild .....	666
A.2.2	Original Palmgren-Miner-Regel .....	672
A.2.3	Relative Palmgren-Miner-Regel .....	674
A.2.4	Elementare Palmgren-Miner-Regel .....	675
A.2.5	Schädigungsäquivalenz .....	675
<b>B</b>	<b>Kurzlösungen zu den Auslegungsaufgaben</b> .....	679
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	683
	<b>Sachverzeichnis</b> .....	693

---

# Symbolverzeichnis

## Lateinische Buchstaben

$A$	Allg. Fläche, Projizierte Stirnfläche des Fahrzeugs [m <sup>2</sup> ]
$A_F^*, A_H^*$	Ausnutzungsgrad Zahnfuß- und Zahnflankentragfähigkeit [-]
$A_\alpha, B_\alpha, C_\alpha$	Koeffizienten zur Berechnung der Formzahlen [-]
$A_k$	Kolbenfläche von Lamellenkupplung und -bremse [mm <sup>2</sup> ]
$a$	Fahrzeugbeschleunigung [m/sec <sup>2</sup> ], Achsabstand und -versatz [mm], Halbachse der HERTZ'schen Kontaktellipse [mm]
$a_1$	Umrechnungsfaktor der Wälzlager-Ausfallwahrscheinlichkeit [-]
$b$	Zahnbreite, Flanschbreite, Halbachse der Kontaktellipse [mm]
$b_e$	Spezifischer Kraftstoffverbrauch [g/kWh]
$C, C_0$	Dynamische und statische Tragfähigkeit eines Wälzlagers [N]
$c$	Allgemeine Steifigkeit [N/mm], Absolutgeschwindigkeit [m/sec]
$c_c, c_e$	Breitenballigkeit, Endrücknahme [mm]
$c_F$	Steifigkeit der Arretierungsfeder [N/mm]
$c_{\text{strang}}$	Triebstrangtorsionssteifigkeit [Nm/rad]
$c_t$	Torsionssteifigkeit eines Wellenabschnitts [Nm/rad]
$c_w$	Luftwiderstandsbeiwert [-]
$D$	Dämpfungsbeiwert [Nm/sec], Schädigung [-], Durchmesser [mm]
$D_{NZ}, D_{GZ}$	Durchmesser von Kupplungs-Nehmer- und Geberzylinder [mm]
$D_M$	Prüfkörperdurchmesser bei Zweikugelmaßmessung [mm]
$d$	(Maßgeblicher) Wellendurchmesser [mm], allg. Abstand [ $\mu$ m]
$d_1, d_2$	Teilkreisdurchmesser von Ritzel und Rad [mm]
$d_{a1}, d_{a2}$	Grundkreisdurchmesser von Ritzel und Rad [mm]
$d_{b1}, d_{b2}$	Kopfkreisdurchmesser von Ritzel und Rad [mm]
$d_s$	Wirkdurchmesser der Dachflächen [mm]
$d_{w1}, d_{w2}$	Wälzkreisdurchmesser von Ritzel und Rad [mm]
$E$	Elastizitätsmodul [GPa]
$E^*$	Modifizierter Elastizitätsmodul der Kontaktpaarung [GPa]
$Eu$	EULER-Zahl [-]
$e$	Exzentrizität [mm], axiale Grenzbeanspruchung [-]