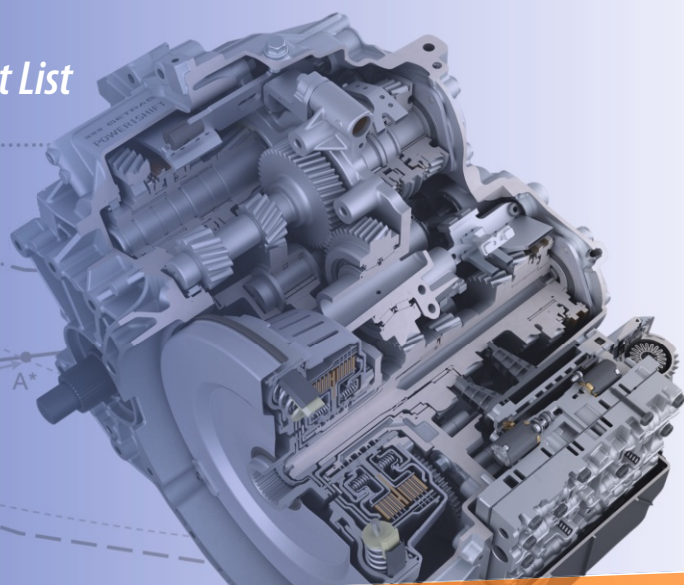


Der Fahrzeugantrieb
Reihenherausgeber: Helmut List

Robert Fischer
Ferit Küçükay
Gunter Jürgens
Burkhard Pollak



Das Getriebebuch

2. Auflage

Der Fahrzeugantrieb

Herausgegeben von
H. List, Graz, Austria

Der Fahrzeugantrieb

herausgegeben von Helmut List

Die von Hans List herausgegebene Reihe „Die Verbrennungskraftmaschine“ diente über Jahrzehnte den Ingenieuren in der Praxis und den Studierenden an Universitäten als unentbehrlicher Ratgeber. Mit Rücksicht auf die Schnelllebigkeit der Technik habe ich mich im Jahr 2002 entschlossen, die Reihe neu zu konzipieren und unter dem Titel „Der Fahrzeugantrieb“ herauszugeben. Dies brachte zum Ausdruck, dass die Verbrennungskraftmaschinen vermehrt als Bestandteile von Antriebssystemen zu sehen sind. Inzwischen wurde das Anliegen der Reihe weiter diskutiert und schließlich in diesem Jahr beschlossen, die Reihe unter dem gleichen Titel „Der Fahrzeugantrieb“, jedoch mit neuem Layout weiter zu führen und auch einen neuen Wissenschaftlichen Beirat zu etablieren. Wie bisher bleibt es oberstes Ziel der Reihe, die ganzheitlichen Zusammenhänge der einzelnen unterschiedlichen Komponenten eines Fahrzeugantriebes aufzuzeigen. Neu ist der Wunsch, die englischsprachigen Ausgaben neben den deutschsprachigen Ausgaben verstärkt zu forcieren.

Ausgehend von den Grundlagen mit Beschreibung der notwendigen Hintergrundinformation ist Zielsetzung der Reihe, auch die neuen Elemente der zukünftigen Antriebssysteme und deren gegenseitige Beeinflussung in einer Systembetrachtung anzusprechen. Neben den technischen Inhalten werden auch Werkzeuge, Methoden und Prozesse für die Entwicklung der Komponenten dargestellt. Die Gegebenheiten der unterschiedlichen Wirtschaftsräume und ihre jeweiligen Anforderungen an Konzepte werden darin dargelegt. Diese Buchserie bietet sich sowohl den Studierenden an Universitäten und Fachhochschulen als auch den Praktikern in der Industrie als Ratgeber an, um sich aus dem aufbereiteten Erfahrungsschatz der Autoren das erforderliche Fachwissen anzueignen.

Ich bedanke mich recht herzlich beim Wissenschaftlichen Beirat, der mir sowohl bei der Unterteilung des sehr umfassenden Themengebietes als auch bei der Auswahl der Autoren zur Seite steht. Die Mitglieder des Beirats sind:

Rémi Bastien, Vice President, Renault

Christian Beidl, Professor, Technische Universität Darmstadt

Helmut Eichlseder, Professor, Technische Universität Graz

Herbert Kohler, Vice President, Daimler

Jun Li, Vice President, FAW

Rolf D. Reitz, Professor, University of Wisconsin-Madison

Ich danke den Autoren, die sich bereit erklärt haben, ihr Wissen in diese Buchreihe einzubringen, und ihre Arbeitskraft hierfür einsetzen. Ebenso möchte ich dem Springer-Verlag danken.

Helmut List

Robert Fischer · Ferit Küçükay ·
Gunter Jürgens · Burkhard Pollak

Das Getriebebuch

2., überarbeitete Auflage

Mit Unterstützung von Gerhard Kokalj, Björn Wulsch,
Christian Hörsken, Tobias Kassel, Artur Plötner und
Carl-Philipp Seekamp

 Springer Vieweg

Robert Fischer
Graz, Österreich

Gunter Jürgens
Graz, Österreich

Ferit Küçükay
Braunschweig, Deutschland

Burkhard Pollak
Weinheim, Deutschland

ISSN 1617-8920

Der Fahrzeugantrieb

ISBN 978-3-658-13103-6

DOI 10.1007/978-3-658-13104-3

ISBN 978-3-658-13104-3 (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 Fachmedien Wiesbaden 2012, 2016

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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Vorwort

Die Getriebetechnik hat einen bedeutenden Einfluss auf Verbrauch, Fahrbarkeit, Gewicht und Kosten von Fahrzeugen. Die Relevanz dieser Eigenschaften hat in der jüngeren Vergangenheit wesentlich zugenommen, und in der Wechselwirkung mit dem gesamten Antriebsstrang und dem Gesamtfahrzeug werden Getriebe zunehmend wichtiger.

Lange Zeit war die Innovationsrate in der Getriebetechnik relativ gering. Im Wesentlichen gab es bis Anfang der achtziger Jahre des letzten Jahrhunderts auf der einen Seite Handschaltgetriebe und auf der anderen Seite Standardplanetenautomaten mit hydraulischer Steuerung. Automatikgetriebe wurden vor allem zur Bedienungsvereinfachung eingesetzt. Weder die Sportlichkeit noch der Verbrauch war besser als bei einem Handschaltgetriebe.

Evolutionär wurde mehrfach die Anzahl der Gänge bzw. Stufen sowohl bei Handschaltgetrieben als auch bei Stufenautomaten erhöht, die Motivation dazu waren Fahrbarkeit und Verbrauch. Der erste größere Innovationsschub bei den Automatikgetrieben kam mit der Einführung elektronischer Steuergeräte. Damit standen zusätzliche Freiheitsgrade zur Verfügung, die vor allem für Komfortverbesserungen und die bessere Abstimmung mit dem Motor genutzt wurden. So ließen sich auch die Potenziale von Wandlerüberbrückungskupplungen zur Verbrauchsverbesserung besser nutzen.

Einen weiteren starken Schub hat die Getriebetechnik dann in den neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts bekommen. Mit der Einführung von Stufenlosgetrieben für höhere Drehmomente kamen die Planetengetriebe unter Druck. In mehreren Evolutionsstufen haben sie aber wieder eine Spitzenposition erreicht. Mit den Doppelkupplungsgetrieben wurde das Spektrum nochmals erweitert. Der Bedarf an automatisch schaltenden Getrieben steigt auch in Märkten, die von Handschaltgetrieben dominiert waren, und mit der Doppelkupplungstechnologie können bestehende Fertigungsanlagen für Handschaltgetriebe weiter genutzt werden.

Dieser neue Wettbewerb war und ist sehr fruchtbar. Moderne Automatikgetriebe können sowohl in Verbrauch als auch in Fahrbarkeit Handschaltgetriebe übertrumpfen.

Mit dem Auftreten der Hybridtechnik ist noch mehr Leben in die Getriebewelt gekommen. Die Freiheitsgrade nehmen weiter zu und vielfältige Kombinationen aus Verbrennungsmotor, E-Motor und Getriebe sind machbar. Dabei muss u. a. beachtet werden, dass z. B. bestimmte Verbrauchsreduzierungspotentiale aus Optimierungsmaßnah-

men nicht kumulativ nutzbar sind. Eine Gesamtsystemauslegung ist zwingend notwendig, um die möglichen Potenziale zu erschließen.

Damit ist erläutert, warum Getriebe eine so bedeutende Stellung haben. Ist das auch die Rechtfertigung für ein weiteres Getriebebuch, da es doch schon eine ganze Anzahl guter Bücher gibt?

Die heutigen Innovationsgeschwindigkeit macht das Ausführungswissen schnell vergänglich, mit Hilfe von Auslegungswissen können bestehende Getriebekonzepte und -technologien im Hinblick auf neue Anforderungen und Applikationen angepasst und weiter entwickelt werden. Beides ist sehr gut in der existenten jüngeren Literatur zu Fahrzeuggetrieben abgebildet.

Wir haben einen darüber hinausgehenden Anspruch und gehen einen zusätzlichen Schritt. Die System- und Methodenkompetenz zu Fahrzeuggetrieben stellt das Wissen um die Motivation und die Notwendigkeit für Getriebetechnologien sowie die Wechselwirkungen mit umgebenden Systemen im Kontext der Gesamtfahrzeuge in den Mittelpunkt. Abstrahierend werden die zahlreichen Komponenten und Subsysteme eingeführt, sodass eine zeitlose Kompetenz vermittelt wird.

Auf dieser Basis lassen sich auch neue Konzepte entwickeln und bewerten; wir würden uns sehr freuen, wenn wir mit diesem Buch Anregungen dafür gäben.

Bei der Verfassung des Buches haben uns Fachleute der Unternehmen AVL und GETRAG, des Instituts für Fahrzeugtechnik der TU Braunschweig und des Instituts für Maschinenelemente und Entwicklungsmethodik der TU Graz durch Diskussionen, Korrekturlesen des Textes und Anregungen wesentlich unterstützt. Hierfür gebührt ihnen unser herzlicher Dank. Besonders zu erwähnen sind an dieser Stelle die Herren Gerhard Kokalj, Björn Wulsch, Christian Hörsken, Tobias Kassel, Artur Plötner und Carl-Philipp Seekamp, die mit fachlichen Diskussionen und Anregungen beigetragen haben. Weiterhin wollen wir ihnen für die Koordinationsarbeiten bei der Verfassung des Manuskripts danken, die trotz der Arbeitsbelastung und räumlichen Entfernung der Autoren und des Verlags mit bewundernswerter Übersicht und Geduld gelöst wurden. Bei Rolf Najork möchten wir uns für seine Mitarbeit als Autor der ersten Auflage bedanken.

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen¹

Formelzeichen

a	Achsabstand
A	Fläche
b_e	spezifischer Kraftstoffverbrauch
c	(Feder-)steifigkeit
c_u	Umfangskomponente der Absolutgeschwindigkeit
c_w	Luftwiderstandsbeiwert (in Fahrzeuglängsrichtung)
d	Dämpfung; Durchmesser
E	Energie
f	Frequenz
f_R	Rollwiderstandsbeiwert
F	Kraft
F_B	Beschleunigungswiderstandskraft
F_G	Gewichtskraft
F_k	Zugkraft Konstantfahrt
F_L	Luftwiderstandskraft
F_N	Normalkraft
F_R	Rollwiderstandskraft
F_{St}	Steigungswiderstandskraft
F_x	Reifenlängskraft
F_z	Radvertikallast
g	Erdbeschleunigung
i	Übersetzung
i_0	Standgetriebeübersetzung des Planetenradsatzes
J	Massenträgheit

¹ Diese Liste enthält die wesentlichen Formelzeichen, die in diesem Buch verwendet werden. Bei Doppelbelegungen geht die Bedeutung aus dem Kontext hervor.

m	Masse
\dot{m}	verbrauchter Kraftstoff/Zeit
M	Moment
n	Drehzahl
n_0	Leerlaufdrehzahl
n_S	Ganganzahl
N	Anzahl
O_e	Erregungsordnung
p	Druck; Flächenpressung
P	Leistung
Q	Wärme
r	Radius
r_m	mittlerer Reibradius
r_W	Wirkradius
S	Schlupf
t	Zeit
T	Periodendauer; Temperatur
V	Volumen
\dot{V}	Volumenstrom
W_{kin}	kinetische Energie
x	Strecke
\dot{x}	Geschwindigkeit
\dot{x}_{max}	maximale Fahrzeuggeschwindigkeit
\ddot{x}	Beschleunigung
x_i	Profilverschiebung
z	Zähnezahl
Z	Anzahl Reibpaarungen
α	Winkel
α_n	Eingriffswinkel
β	Schrägungswinkel
δ	Winkel
Δ	Differenz
ε	Überdeckung
ε_α	Profilüberdeckung
ε_β	Sprungüberdeckung
η	Wirkungsgrad
λ	Drehmassenzuschlagsfaktor; aufnehmbares Eingangsmoment in Abhängigkeit von Drehzahlverhältnis
μ	Reibkoeffizient; Drehmomentwandlung
μ_g	Gleitreibbeiwert
μ_h	Haftreibbeiwert
ν	Drehzahlverhältnis am Wandler

ρ	Dichte
ρ_L	Luftdichte
φ	Verdrehwinkel
φ_k	Übersetzungsstufensprung vom i -ten zum $i + 1$ -ten Gang
φ_S	Spreizung
Ψ	Progressionsfaktor
ω	Winkelgeschwindigkeit

Indizes

a	außen
alt	alt
An	Antrieb
b, B	Beschleunigungswiderstand
B	Biegung
be	Beschleunigungsleistung am Rad
BS	Bezugsseite
des	destroking
Diesel	Dieselmotor (-konzept)
dyn	dynamisch
e	Erregung; in Verbindung mit spezif. Kraftstoffverbrauch
e,H	Haupterregung
eff	effektiv
Fzg	Fahrzeug
g	Gleit (-beiwert)
G	Getriebe
ges	gesamt
GW	Gelenkwelle
h	Haft (-beiwert)
H	Hohlrad
HG	Hauptgetriebe
H α	Profilwinkelmodifikation
i	innen
i	Übersetzungsstufe i
in	eingehend, Eingang
iso	Isolation
K	Kupplung
k	konstant
k	Stufensprung
ke	Leistung am Rad bei Konstantfahrt
L	Luft, Luftwiderstand

LT	Leertrum
M	Motor
m	mittel, mittlere, mittlerer
max	maximal
min	minimal
N	Normal-
n	höchste Übersetzungsstufe; Schrägungswinkel; Modulgrößen
Na	Kopfnutzkreis
nBS	Nichtbezugsseite
nenn	Nennzahl; -moment
neu	neu
Nf	Fußnutzkreis
Otto	Ottomotor (-konzept)
out	ausgehend, Ausgang
P	Planetenrad
R	Reibung; Rollwiderstand; Reifen
Ra	Rangegruppe
rad	Rad
S	Spreizung; Sonnenrad
Sp	Splitgruppe
St	Steigung, Steigungswiderstand
stroke	stroking
SW	Seitenwelle
Sync	Synchron
t	tangential
T	Planetenradträger
th	theoretisch
u	Umfang
V	Verlust
VKM	Verbrennungskraftmaschine
w	wirkend
W	Wind
wt	Umfangskraft
z	Zähnezahl
ZT	Zugtrum
α	Profilüberdeckung
α	Profilballigkeit
αa	Kopfrücknahmen
αf	Fußrücknahmen
$\alpha\beta$	Flankenwinkelmodifikation
β	Sprungüberdeckung
β	Breitenballigkeit

Abkürzungen

ABS	Anti-Blockier-System
AMT	automated manual transmission (automatisiertes Schaltgetriebe)
ASIL	automotive safety integrity level
ASIC	application-specific integrated circuit
ASM	Asynchronmaschine
AT	automatic transmission (Automatikgetriebe, Stufenautomat)
ATF	automatic transmission fluid
B	Bremse
CAE	computer-aided engineering
CAN	controller area network
CFD	computational fluid dynamics
CVT	continuously variable transmission (Stufenlosgetriebe)
DCT	double clutch transmission (Doppelkupplungsgetriebe)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DK	Direktgangkupplung
EK	Eingangskupplung
EMS	Einmassenschwungrad
EMV	elektromagnetische Verträglichkeit
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
EVT	electric variable transmission
FL	Freilauf
FMEA	failure modes and effects analysis (Fehler-Möglichkeits- und -Einflussanalyse)
GWK	geregelte Wandlerüberbrückungskupplung
HA	Hinterachse
HPDC	high-pressure die cast
IEC	International Electrotechnical Commission
IGBT	insulated-gate bipolar transistor (Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode)
ISO	International Organization for Standardization
IVT	infinitely variable transmission
K	Konstantübersetzung
K	Kupplung
konst	konstant
L	Leitrad
LIN	local interconnect network
Lkw	Lastkraftwagen
mech	mechanisch
MOSFET	metal oxide semiconductor field-effect transistor (Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor)
MPI	multipoint injection

MT	manual transmission (Handschatgetriebe, manuelles Getriebe)
NEDC	New European Driving Cycle
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NiMH	Nickel-Metallhydrid
NTC	negative temperature coefficient
NVH	noise, vibration, harshness
NYCC	New York City Cycle (New-York-Stadtzyklus)
OBD	On-Board-Diagnose
OEM	Original Equipment Manufacturer
OK	Overdrive-Kupplung
P	Pumpenrad
PB	Pumpenbremse
PCM	powertrain control modul
Pkw	Personenkraftwagen
PSM	permanenterregte Synchronmaschinen
PTC	positive temperature coefficient
PWM	Pulsweiten-Modulierung
QFD	quality function deployment
R	Rückwärtsgang
RB	Rückwärtsgangbremse
SAE	Society of Automotive Engineers
SIL	safety integrity level
SUV	Sports Utility Vehicle
T	Turbinenrad
TA	traction assist
TCC	torque converter clutch
TCU	transmission control unit
TRS	transmission range sensor
VA	Vorderachse
VBS	variable bleed solenoid
VFS	variable force solenoid
VKM	Verbrennungskraftmaschine
WOT	wide open throttle (Vollast)
ZEV	Zero-Emission Vehicle
ZMS	Zweimassenschwungrad

Inhaltsverzeichnis

1	Kernaufgabe der Fahrzeuggetriebe	1
1.1	Zugkraftbedarf und Momentenbereitstellung bei Konstantfahrt	2
1.1.1	Zugkraftbedarf bei Konstantfahrt	2
1.1.2	Momentenbereitstellung bei Konstantfahrt	4
1.2	Zugkraftbedarf und Momentenbereitstellung bei instationären Fahrzuständen	6
1.2.1	Zugkraftbedarf bei Beschleunigung	6
1.2.2	Momentenbereitstellung bei Beschleunigung	8
1.2.3	Verbrauchskennfeld eines Verbrennungsmotors	9
1.2.4	Möglichkeiten der Leistungsbereitstellung	9
1.2.5	Zugkraftdiagramm	10
1.2.6	Ansprechverhalten	12
1.2.7	Elektrische Maschinen für den Hybrid- und E-Antrieb	14
1.3	Verbrauchsoptimierung	16
1.3.1	Verbrauchsermittlung	17
1.3.2	Lastpunktverschiebung	18
1.3.3	Optimierung der Verbrennungskraftmaschine	22
1.3.4	Potenzial kombinierter Lastpunktverschiebung und Optimierung der VKM	24
1.3.5	Wirkungsgrad	25
1.3.6	Zielkonflikt zwischen Verbrauch und Fahrspaß	28
1.4	Anfahren und Drehzahlangleichung	33
1.4.1	Kupplungen	34
1.4.2	Anfahrvorgang	38
1.5	Übersetzungen und ihre Auslegung	41
1.5.1	Übersetzungsverhältnis	41
1.5.2	Anforderungen zur Auslegung	42
1.5.3	Auslegung zur Erreichung der Höchstgeschwindigkeit	44
1.5.4	Auslegung der kleinsten Getriebeübersetzung als Overdrive	45
1.5.5	Auslegung der größten Getriebeübersetzung	46
1.5.6	Auslegung der Anzahl und Stufung der Gänge	47

1.5.7	Zielkonflikte bei der Übersetzungswahl	50
1.5.8	Praktische Auslegungshinweise	51
	Literatur	52
2	Schaltdynamik und Komfort	53
2.1	Grundlagen des Gangwechsels und der Synchronisation	53
2.1.1	Klassifizierung von Schaltungen	53
2.1.2	Lastschaltende Zughochschaltung ohne Motormomenteneingriff	56
2.1.3	Lastschaltende Zughochschaltung mit Motormomenteneingriff	59
2.1.4	Sensitivitäten am Beispiel der lastschaltenden Zughochschaltungen	60
2.1.5	Lastschaltende Zugrückschaltung	63
2.1.6	Zughochschaltung mit Zugkraftunterbrechung	65
2.1.7	Zugrückschaltung mit Zugkraftunterbrechung	69
2.1.8	Betriebspunkte während des Schaltens im Motorkennfeld	71
2.2	Antriebsstrangdynamik	72
2.2.1	Antriebsstrangmodell	73
2.2.2	Reduktion von Trägheitsmomenten	77
2.2.3	Reduktion von Federsteifigkeiten	78
2.2.4	Ersatzsystem	79
2.2.5	Eigenfrequenzen und Eigenformen	81
2.2.6	Schwingungsanregungen	86
2.2.7	Erzwungene Schwingung	89
2.2.8	Drehschwingungsdämpfung am Getriebeeingang	91
2.3	Fahrzeugakustik	94
2.3.1	Getriebe als Geräuschquelle	95
2.3.2	Getriebe im Zusammenhang mit akustischem Fahreindruck	98
2.4	Fahrzeugdynamik und Fahrerinteraktion	100
2.4.1	Fahrzeugdynamik	101
2.4.2	Dynamische Koppelung	102
2.4.3	Einfluss des Schaltens	102
2.4.4	Physiologische Empfindungen des Menschen	103
	Literatur	105
3	Elemente der Leistungsübertragung	107
3.1	Grundlagen und Wirkprinzipien	107
3.1.1	Übertragungsformen und Anordnungen	107
3.1.2	Schalten und Modulieren der Leistungsübertragung	110
3.1.3	Funktionsweise einer Kupplung – Grundsätze der Kraftübertragung durch Reibung	111
3.2	Einfache Verzahnungsstufen	112
3.2.1	Auslegungskriterien für Verzahnungsstufen	114
3.2.2	Die Hauptparameter einer Zahnradstufe	116