

G. Lechner, H. Naunheimer

# Fahrzeug- getriebe

Grundlagen, Auswahl, Auslegung  
und Konstruktion

Mit 364 Abbildungen

Springer-Verlag

Berlin Heidelberg New York

London Paris Tokyo

Hong Kong Barcelona Budapest

# Inhaltsverzeichnis

<b>Bezeichnungen und Formelzeichen .....</b>	<b>XV</b>
<b>1 Einführung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Einleitung .....	1
1.2 Geschichte der Fahrzeuggetriebe .....	6
1.2.1 Basisinnovationen .....	6
1.2.2 Entwicklung von Fahrzeugen und Antriebsaggregaten .....	8
1.2.3 Entwicklungsschritte bei Fahrzeuggetrieben .....	9
1.2.4 Entwicklung von Verzahnungen und anderen Getriebebauelementen .....	17
1.2.5 Entwicklung hydrodynamischer Wandler und Kupplungen .....	19
1.2.6 Erforschung von Phänomenen: Getriebeverluste und Wirkungsgrad .....	20
1.2.7 Zusammenfassender Überblick .....	21
<b>2 Überblick über das System Verkehr – Fahrzeug – Getriebe .....</b>	<b>23</b>
2.1 Grundlagen der Verkehrs- und Fahrzeugtechnik .....	23
2.1.1 Bedeutung des Kraftfahrzeugs in unserer mobilen Welt .....	24
2.1.2 Entwicklungslinien der Verkehrstechnik .....	28
2.1.3 Transportsysteme für den Personen- und Güterverkehr .....	30
2.1.4 Alternative Transportkonzepte .....	34
2.2 Markt- und Entwicklungssituation bei Fahrzeugen, Fahrzeuggetrieben und deren Komponenten .....	36
2.2.1 Marktsituation und Produktionszahlen .....	36
2.2.2 Entwicklungssituation .....	39
2.3 Grundlagen der Fahrzeug- und Getriebetechnik .....	40
2.3.1 Systematik der Fahrzeuge und des Fahrzeugeinsatzes .....	41
2.3.2 Warum brauchen Fahrzeuge Getriebe? .....	43
2.3.3 Haupt- und Nebenfunktionen von Fahrzeuggetrieben, Anforderungsprofil .....	45
2.3.4 Grundzusammenhänge: Drehrichtung, Übersetzung, Drehmoment ....	45
2.3.5 Straßenprofile, Lastkollektive, typische Fahrzeugeinsätze und Fahrertypen .....	49
2.4 Elementare Leistungsmerkmale von Fahrzeuggetrieben .....	50
2.4.1 Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Getrieben .....	51

2.4.2	Kennwert Achsabstand .....	52
2.4.3	Kennwert Getriebemasse .....	53
2.4.4	Kennwert Getriebekosten .....	54
2.4.5	Getriebegeräusch .....	55
2.4.6	Getriebeverluste und Wirkungsgrad .....	55
2.5	Trends bei den Getriebebauarten .....	57
<b>3</b>	<b>Leistungsbedarf und Leistungsangebot .....</b>	<b>59</b>
3.1	Leistungsbedarf .....	59
3.1.1	Radwiderstand .....	59
3.1.2	Kraftschluß, dynamischer Radhalbmesser und Schlupf .....	61
3.1.3	Luftwiderstand .....	62
3.1.4	Steigungswiderstand .....	64
3.1.5	Beschleunigungswiderstand .....	64
3.1.6	Gesamt-Fahrwiderstand .....	65
3.1.7	Wirkungsgradkennfeld .....	66
3.2	Vielfalt der Antriebsaggregate .....	69
3.2.1	Übersicht .....	69
3.2.2	Elektroantrieb .....	70
3.2.3	Hybridantrieb .....	71
3.3	Leistungsangebot, Motorkennung von Verbrennungsmotoren .....	72
3.3.1	Drehmoment-/Drehzahlcharakteristik .....	73
3.3.2	Motorspreizung, Drosselklappenkennfeld .....	75
3.3.3	Verbrauchskennfeld .....	76
<b>4</b>	<b>Kennungswandler – Wahl der Übersetzungen .....</b>	<b>78</b>
4.1	Antriebsstrang .....	79
4.2	Drehzahlwandler für den Anfahrvorgang .....	80
4.3	Gesamtübersetzung und Getriebespreizung .....	82
4.3.1	Getriebespreizung $i_{G, ges}$ .....	83
4.3.2	Wahl der größten Übersetzung $i_{A, max}$ .....	84
4.3.3	Wahl der kleinsten Übersetzung $i_{A, min}$ .....	85
4.3.4	Endübersetzung .....	88
4.4	Wahl der Zwischengänge .....	88
4.4.1	Geschwindigkeits-Drehzahl-Diagramm .....	89
4.4.2	Geometrische Gangabstufung .....	90
4.4.3	Progressive Gangabstufung .....	90
4.5	Übersetzungen und ihre Änderung bei Stufenlosgetrieben .....	92
<b>5</b>	<b>Zusammenarbeit Verbrennungsmotor – Getriebe .....</b>	<b>93</b>
5.1	Zugkraftdiagramm .....	95
5.1.1	Ermittlung eines Zugkraftdiagramms, Beispiel .....	96

5.1.2	Motorbremskraft .....	98
5.1.3	Stufengetriebe mit Trockenkupplung .....	99
5.1.4	Stufengetriebe mit Trilok-Wandler .....	99
5.2	Fahrleistungen .....	102
5.2.1	Höchstgeschwindigkeit .....	103
5.2.2	Steigvermögen .....	104
5.2.3	Beschleunigungsvermögen .....	104
5.3	Kraftstoffverbrauch .....	105
5.3.1	Rechnerische Kraftstoffverbrauchsermittlung, Beispiel .....	105
5.3.2	Kraftstoffverbrauchsermittlung durch Messung .....	106
5.3.3	Senkung des Kraftstoffverbrauchs .....	108
5.3.4	Stufenlosgetriebe .....	109
5.4	Emissionen .....	110
5.5	Dynamisches Verhalten des Antriebsstrangs, Komfort .....	110
<b>6</b>	<b>Systematik der Fahrzeuggetriebe: Konstruktive Grundkonzepte .....</b>	<b>112</b>
6.1	Anordnung des Getriebes im Fahrzeug .....	112
6.1.1	Personenkraftwagen .....	112
6.1.2	Lkw und Busse .....	116
6.1.3	Pkw mit Allradantrieb .....	116
6.1.4	Vereinfachte Darstellung der Quer- und Längsdynamik beim Allradantrieb .....	120
6.2	Bauformen und Bauarten von Getrieben .....	121
6.2.1	Bauform .....	122
6.2.2	Bauart .....	123
6.3	Grundsätzlicher Aufbau von Getrieben .....	124
6.3.1	Schalten mit Zugkraftunterbrechung .....	125
6.3.2	Schalten ohne Zugkraftunterbrechung .....	126
6.3.3	Stufenlose Getriebe ohne Zugkraftunterbrechung .....	126
6.4	Stand-, Vorgelege- und Umlauf-Getriebe .....	127
6.5	Lösungsprinzipien für Teilfunktionen, Bewertung .....	129
6.5.1	Rückwärtsgang .....	130
6.6	Pkw-Getriebe .....	131
6.6.1	Pkw-Handschaltgetriebe .....	132
6.6.2	Teilautomatisierte Pkw-Schaltgetriebe .....	134
6.6.3	Vollautomatisierte Pkw-Schaltgetriebe .....	135
6.6.4	Stufenlose Pkw-Getriebe .....	142
6.7	Nkw-Getriebe .....	146
6.7.1	Ein-Gruppengetriebe .....	147
6.7.2	Mehr-Gruppengetriebe .....	149
6.7.3	Praktische Ausführung von Zwei- und Drei-Gruppengetrieben .....	154
6.7.4	Teilautomatisierte Nkw-Schaltgetriebe .....	158
6.7.5	Vollautomatisierte Nkw-Schaltgetriebe .....	159
6.7.6	Nkw-Stufenlosgetriebe .....	160

6.8	Verteilergetriebe und Nebenabtriebe .....	161
6.9	Endantriebe: Bauformen, Leistungsgrenzen, Übersetzungsverhältnisse .....	164
6.9.1	Endantriebskonzepte bei Pkw .....	164
6.9.2	Endantriebskonzepte bei Nkw .....	166
6.10	Differentialgetriebe, Differentialsperren und Sperrdifferentiale .....	169
6.10.1	Grundlagen der Differentialgetriebe .....	169
6.10.2	Zur Notwendigkeit des Sperrens .....	171
6.10.3	Der Sperrwert .....	172
6.10.4	Alternativen zu Selbstsperrdifferentialen .....	173
<b>7</b>	<b>Auslegung von Zahnradgetrieben für Fahrzeuge .....</b>	<b>174</b>
7.1	Leistungsgrenzen von Zahnradern .....	174
7.1.1	Schadensarten und ihre Ursachen .....	175
7.1.2	Berechnung der Leistungsgrenze "Zahnbruch" .....	179
7.1.3	Berechnung der Leistungsgrenze "Grübchenbildung" .....	180
7.1.4	Berechnung der Leistungsgrenze "Freßverschleiß" .....	181
7.2	Überschlägige Berechnung des Achsabstands .....	181
7.3	Überschlägige Berechnung der Zahnbreiten (Breitentragen) .....	184
7.4	Betriebsfestigkeit und Lebensdauer .....	185
7.4.1	Die Wöhlerlinie .....	186
7.4.2	Lastkollektiv und Zählverfahren .....	188
7.4.3	Schadensakkumulationshypothese .....	190
7.5	Entwicklung geräuscharmer Getriebe .....	196
7.5.1	Getriebegeräusche und ihre Ursachen .....	196
7.5.2	Weg der Geräusche vom Entstehungsort zum Ohr .....	200
7.5.3	Beurteilungsmaßstäbe .....	200
7.5.4	Gegenmaßnahmen .....	203
<b>8</b>	<b>Auslegung und Gestaltung von Wellen .....</b>	<b>206</b>
8.1	Fahrzeuggetriebetypische Probleme .....	206
8.1.1	Anordnung von Wellen in Fahrzeuggetrieben .....	206
8.1.2	Beanspruchung und Festigkeitsauslegung .....	206
8.1.3	Durchbiegung .....	208
8.1.4	Schwingungsprobleme .....	208
8.2	Allgemeine Gestaltungshinweise .....	209
8.3	Festigkeitsauslegung einer Getriebeantriebswelle .....	210
8.3.1	Belastung .....	210
8.3.2	Lagerreaktionen .....	213
8.3.3	Die räumliche Balkenbiegung .....	213
8.3.4	Kraft- und Momentenverläufe .....	214
8.3.5	Kritischer Querschnitt .....	216
8.3.6	Spannungen .....	217
8.3.7	Vorauslegung des Wellendurchmessers .....	220

8.3.8	Auslegung auf Dauerfestigkeit .....	220
8.3.9	Auslegung auf Betriebsfestigkeit .....	221
8.3.10	Gebräuchliche Wellenwerkstoffe .....	222
8.4	Berechnung der Verformung .....	222
8.5	Ablaufdiagramm für die Auslegung von Getriebewellen .....	223
<b>9</b>	<b>Schalteinrichtungen, Auslegung und Gestaltung von Synchronisierungen ....</b>	<b>226</b>
9.1	Systematik der Schaltelemente .....	228
9.1.1	Schaltelemente für Stufengetriebe mit Zugkraftunterbrechung .....	228
9.1.2	Schaltelemente für Stufengetriebe ohne Zugkraftunterbrechung .....	231
9.1.3	Parksperre .....	232
9.2	Anforderungen an Synchronisierungen .....	233
9.2.1	Schaltvorgang .....	234
9.2.2	Haupt- und Nebenfunktionen .....	237
9.2.3	Drehzahlanpassung mit rutschender Reibkupplung .....	237
9.2.4	Abmessungen von Synchronisierungen .....	238
9.3	Ablauf des Synchronisiervorgangs .....	238
9.3.1	Schaltkomfort .....	241
9.4	Auslegung von Synchronisierungen .....	243
9.4.1	Leistungsgrenzen von Synchronisierungen .....	243
9.4.2	Grundlagen der Auslegungsrechnung .....	246
9.4.3	Praktische Auslegung auf zulässige thermische Beanspruchung .....	247
9.4.4	Auslegung der Sperrverzahnung auf Sperrwirkung .....	251
9.5	Tribologisches System .....	255
9.5.1	Werkstoffe .....	256
9.6	Konstruktive Ausführungen .....	256
9.6.1	Detailfragen .....	260
9.7	Alternative Getriebesynchronisierungen .....	261
<b>10</b>	<b>Hydrodynamische Kupplungen und Drehmomentwandler .....</b>	<b>263</b>
10.1	Grundlagen .....	264
10.2	Hydrodynamische Kupplungen und ihre Kennlinien .....	267
10.3	Hydrodynamische Wandler und ihre Kennlinien .....	268
10.3.1	Der Trilok-Wandler .....	269
10.4	Zusammenarbeit Motor und hydrodynamischer Wandler .....	270
10.4.1	Wandlerversuchsdiagramm, Zusammenarbeit Motor und Trilok-Wandler .....	273
10.5	Praktische Auslegung von hydrodynamischen Wandlern .....	274
10.6	Konstruktive Ausführungen .....	275
10.7	Konstruktionsprinzipien zur Wirkungsgradverbesserung .....	277
10.7.1	Wandlerüberbrückungskupplung .....	277
10.7.2	Leistungsverzweigung .....	277

<b>11 Hinweise zur Auslegung und Gestaltung weiterer Konstruktionselemente von Fahrzeuggetrieben .....</b>	<b>280</b>
11.1 Lager .....	280
11.1.1 Lagerauswahl .....	281
11.1.2 Lagerauslegung .....	281
11.1.3 Gestaltung von Wälzlagerungen .....	285
11.2 Schmierung von Getrieben, Getriebschmierstoffe .....	287
11.2.1 Schmierung von Lagern .....	288
11.2.2 Grundlagen der Schmierung von Zahnradgetrieben .....	288
11.2.3 Wahl des Schmierstoffs .....	291
11.2.4 Wahl der Schmierstoffeigenschaften .....	291
11.2.5 Lebensdauerschmierung bei Fahrzeuggetrieben .....	294
11.2.6 Prüfung der Freßtragfähigkeit von Getriebschmierstoffen .....	295
11.3 Getriebegehäuse .....	296
11.3.1 Gestaltung von Getriebegehäusen .....	296
11.3.2 Entlüftung von Getrieben .....	298
11.4 Abdichtung von Getrieben .....	303
11.4.1 Dichtungen für ruhende Bauteile .....	303
11.4.2 Dichtungen für rotierende Bauteile .....	306
11.4.3 Dichtungen für hin- und hergehende runde Bauteile .....	307
11.4.4 Einbaubeispiele .....	308
11.5 Fahrzeugdauerbremsen .....	309
11.5.1 Definitionen .....	310
11.5.2 Motorbremssysteme .....	311
11.5.3 Retarder .....	311
11.5.4 Betätigung und Einsatz .....	315
 <b>12 Beispiele ausgeführter Konstruktionen von Fahrzeuggetrieben .....</b>	 <b>316</b>
12.1 Handschaltgetriebe .....	317
12.1.1 Pkw-Handschaltgetriebe .....	317
12.1.2 Nkw-Handschaltgetriebe .....	323
12.2 Teilautomatisierte Schaltgetriebe .....	327
12.2.1 Teilautomatisierte Pkw-Schaltgetriebe .....	327
12.2.2 Teilautomatisierte Nkw-Schaltgetriebe .....	328
12.3 Vollautomatisierte Schaltgetriebe .....	330
12.3.1 Pkw-Automatgetriebe .....	330
12.3.2 Nkw-Automatgetriebe .....	333
12.4 Weitere Beispiele .....	335
12.5 Endantriebe .....	340
12.5.1 Konstruktionsbeispiele, Pkw .....	340
12.5.2 Konstruktionsbeispiele, Nkw .....	343
12.6 Differentialgetriebe, Sperrdifferentiale .....	346
12.7 Allradantrieb, Verteilergetriebe .....	352

<b>13 Motor-/Getriebemanagement, Elektronik und Informationsvernetzung .....</b>	<b>360</b>
13.1 Übersicht über verwirklichte elektronische Systeme .....	360
13.2 Motorsteuerung .....	362
13.3 Getriebesteuerung .....	362
13.3.1 Automatisierte Anfahr-/Schaltkupplung .....	362
13.3.2 Teilautomatisierte Schaltgetriebe, automatisierte Gangwahl .....	363
13.3.3 Vollautomatisierte Schaltgetriebe, adaptive Schaltstrategie .....	363
13.3.4 Stufenlosgetriebe .....	365
13.4 Elektronisch gesteuerte Brems- und Traktionssysteme .....	365
13.5 Sicherheitskonzepte .....	366
<b>14 Übersicht über Entwicklungsablauf, Produktplanung und Methodisches Konstruieren .....</b>	<b>367</b>
14.1 Produktlebensphasen .....	368
14.2 Produktplanung .....	370
14.3 Entwicklungsablauf .....	373
14.4 Methodisches Konstruieren .....	376
14.5 Verknüpfen von Entwicklungsablauf und Fertigung .....	382
<b>15 Rechnerunterstützte Getriebeentwicklung, Fahrsimulation .....</b>	<b>384</b>
15.1 Fahrsimulation .....	386
15.1.1 Umwelt-Störgrößen .....	387
15.1.2 Streckendatensatz, Streckendatenerfassung .....	388
15.2 Fahrsimulationsprogramme .....	389
15.2.1 Einteilung .....	389
15.2.2 Modularer Aufbau .....	390
15.3 Anwendungen der Fahrsimulation .....	391
<b>16 Zuverlässigkeit und Erprobung von Fahrzeuggetrieben .....</b>	<b>394</b>
16.1 Grundlagen der Zuverlässigkeitstheorie .....	395
16.1.1 Definition der Zuverlässigkeit .....	395
16.1.2 Statistische Beschreibung und Darstellung des Ausfallverhaltens von Bauteilen .....	395
16.1.3 Mathematische Beschreibung des Ausfallverhaltens durch die Weibull-Verteilung .....	399
16.1.4 Zuverlässigkeit bei Systemen .....	404
16.1.5 Verfügbarkeit von Systemen .....	405
16.2 Zuverlässigkeitsanalyse von Fahrzeuggetrieben .....	406
16.2.1 Systemanalyse .....	406
16.2.2 Qualitative Zuverlässigkeitsanalyse .....	409
16.2.3 Quantitative Zuverlässigkeitsanalyse .....	412



16.3 Erprobung zur Sicherstellung der Zuverlässigkeit .....	415
16.3.1 Klassifizierung der Erprobungsprogramme von Fahrzeuggetrieben .....	417
16.3.2 Prüfstände für die Erprobungsprogramme .....	419
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>423</b>
<b>Firmen-/Getriebeverzeichnis .....</b>	<b>436</b>
<b>Namenverzeichnis .....</b>	<b>438</b>
<b>Sachverzeichnis .....</b>	<b>439</b>