

Handbuch
Rennwagentechnik

SCHAEFFLER

Michael Trzesniowski

Antrieb

EBOOK INSIDE

 Springer Vieweg

Handbuch Rennwagentechnik

Reihenherausgeber

Michael Trzesniowski, Institut für Fahrzeugtechnik, FH Joanneum, Graz, Österreich

Die anspruchsvolle Technik heutiger Fahrzeuge findet nicht selten mit ihrer Vorerprobung auf den Rennstrecken den Anfang, bevor sie in die Serienproduktion gelangt. Gegenüber den Autos im öffentlichen Straßenverkehr weisen die Rennfahrzeuge jedoch enorme Unterschiede auf. Beginnend bei dem Layout, der Konstruktion den verwendeten Materialien bis hin zur Fertigung der Rennfahrzeuge werden oft innovative Lösungen gefunden und stellen so einen enormen Fundus an Ideen für den Fahrzeugbau dar. Praxisnah und mit detaillierten Abbildungen wird im Handbuch Rennwagentechnik ein umfassender Überblick in 5 Bänden gegeben:

- Gesamtfahrzeug
- Antrieb
- Fahrwerk
- Datenanalyse, Abstimmung und Entwicklung
- Rennwagentechnik – Praxislehrgang Fahrdynamik

Neben den Grundlagen der Fahrwerktechnik bei Radaufhängung, Federung, Dämpfung, Antrieb und Lenkung widmet sich ein eigener Band dem Fahrwerk-Setup und der Optimierung. Auch der Motor kommt nicht zu kurz. So werden die wesentlichen Maßnahmen zur Leistungssteigerung gezeigt und auf die Besonderheiten einzelner Bauteile hingewiesen. Konstruktive Details wie Schnellverschlüsse, Querlenker, Antriebswellen oder Flügelprofile werden mit allen Auslegungskriterien dargestellt. Die Reihe beinhaltet vertikale Luftleiteinrichtungen, Berechnung der Abtriebskräfte, Dämpferauslegung/Radlastschwankung, effektiver Mitteldruck, Aufladung, Downsizing, variable Turbinengeometrie sowie Registeraufladung. Die immer wichtiger werdenden Themen wie Hybridantriebe, Energierückgewinnung, Speicherung, Nutzbremmung (Rekuperation), Grundlagen von Gleich- und Drehstrom- sowie Reluktanzmotor, e-drive und Elektroantriebe zeigen den Bezug zur aktuellen e-mobility. Die Entwicklungstätigkeit samt ihrer Werkzeuge inklusive Datenakquisition sowie Prüfeinrichtungen wird zur Abrundung des Themenangebots beschrieben. Damit stellt die Reihe nicht nur den Wissensspeicher dar, der für alle Beschäftigten mit Aufgabengebiet Rennfahrzeuge benötigt wird. Gleichzeitig machen die Querverbindungen zum Pkw die Unterschiede in der Technik und in den erzielten Fahrleistungen deutlich.

Weitere Bände dieser Reihe finden Sie unter
<http://www.springer.com/series/15212>

Michael Trzesniowski

Antrieb

Michael Trzesniowski
Institut für Fahrzeugtechnik
FH Joanneum
Graz, Österreich

Handbuch Rennwagentechnik
ISBN 978-3-658-15534-6
DOI 10.1007/978-3-658-15535-3

ISBN 978-3-658-15535-3 (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

Dieser Band „Antrieb“ wurde entwickelt aus dem Handbuch Rennwagentechnik von Michael Trzesniowski.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2017

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. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Reihenvorwort

Das Buch Rennwagentechnik war und ist ein großer Erfolg. Der über die Jahre anwachsende Umfang des Werks und der Verwendungszweck als Nachschlagwerk für unterwegs an der Rennstrecke oder im Fahrerlager ließen beim Verlag die Idee aufkommen, das Wissen in einzelne, für den maßgeblichen Anwender handhabbarer Bände zusammenzufassen, die leichter auf die Reise zur Rennstrecke mitgenommen werden können.

Das bot Gelegenheit an manchen Stellen in die Tiefe zu gehen, was in einem einzigen Buch schlicht aus Platzgründen nicht möglich war. Aktualisierungen können zeitnäher erfolgen, weil nicht auf Neuerungen in sämtlichen Bereichen des Fahrzeugs gewartet werden muss, sondern jeder Themenkreis für sich aktuell gehalten werden kann. Außerdem sind für die Zukunft weitere Bände mit speziellen Themenstellungen denkbar.

Dass die Inhalte dennoch wie in einem einzigen Buch zusammenpassen und einander ergänzen – eine der großen Stärken des Buchs Rennwagentechnik –, dafür sorgt der Herausgeber vergleichsweise wie bei einem großen Konstruktionsvorhaben der Projektleiter die Gesamtfunktion im Blick behält. Diese inhaltliche Zusammengehörigkeit verkörpert nach außen ein Schuber, in dem alle Bände attraktiv zusammengehalten werden.

Die Handbuchreihe Rennwagentechnik widmet sich dem Rennfahrzeug von der Konzeption über Entwurf und Berechnung bis zum Betrieb und dessen (Weiter-)Entwicklung.

So gibt es einen Band Gesamtfahrzeug, der Konzeptüberlegungen, Rahmen und Außenhautgestaltung, Sicherheitsaspekte, aerodynamische Einflüsse und die Cockpitauslegung beleuchtet.

Der Band „Antrieb“ behandelt sämtliche Formen von Antriebssystemen und deren Energiespeicher, geht im Sinne des Lastflusses weiter über Anfahrerelemente und Kennungswandler bis zu den Seitenwellen. Elektrische Systeme und elektronische Fahrhilfen haben ebenfalls in diesem Band ihren Platz gefunden.

Ein Band allein behandelt das Fahrwerk mit all seinen Komponenten, die Fahrverhalten und Fahrleistungen wesentlich bestimmen: Reifen und Räder, radführende Teile, Federn und Dämpfer, Lenkung und Bremse.

Der Band „Datenanalyse, Abstimmung und Entwicklung“ kann sich nun ganz der Abstimmung und Entwicklung eines Rennfahrzeugs widmen und dabei noch die wesentlichen Werkzeuge wie Datenerfassung samt -analyse, Simulation und Versuch behandeln.

Der Themenkreis Datenerfassung und -auswertung wird von einem Autor, der täglich mit dieser Tätigkeit konfrontiert ist, profund dargestellt.

Für den Band „Praxislehrgang Fahrdynamik“ konnten Autoren gewonnen werden, die jahrzehntelange Erfahrung als Renningenieur an bzw. Rennfahrer auf der Rennstrecke mitbringen. In ihrem Werk beschreiben sie die praktische Abstimmung von Rennfahrzeugen, untermauern das Präsentierte mit Rechenbeispielen und schlagen so auch die Brücke zu theoretischen Betrachtungen in den anderen Bänden.

Ich wünsche allen Leserinnen und Lesern, dass sie in der angebotenen Fülle „ihren“ Band ausfindig machen und bei der Lektüre wesentliche Impulse für Studium, Beruf und/oder Freizeit daraus erhalten, sei es weil sie ein Fahrzeug konstruieren, eines bauen, eines betreiben und verbessern oder weil sie eines wissensdurstig analysierend betrachten.

Graz, im Sommer 2017

Michael Trzesniowski

Grußwort

Liebe Leserinnen und Leser,

das Handbuch Rennwagentechnik spricht sowohl Studentinnen und Studenten als auch professionelle Rennteams an und ist eine wertvolle Hilfe im Alltag.

Schon vor 120 Jahren haben sich Automobilfabrikanten, Reifenhersteller und Zulieferer im Motorsport gemessen. Wettbewerb beschleunigt Innovationen auf und abseits der Strecke. Die emotionalen Fotos strahlender Sieger überdecken dabei häufig die Anstrengungen hinter den Kulissen: Fleiß und Mut bei Erfindungen, Ausdauer und Wissen in Konstruktion und Erprobung sowie ein strategisches und glückliches Händchen sind die Bedingungen für Erfolg. Sie alle kennen dies aus Ihrem Arbeitsalltag.

Schaeffler blickt auf eine lange Tradition im Motorsport zurück. Schon zu Beginn der DTM in den 1980er-Jahren hat sich das Unternehmen an der Seite der Besten engagiert. Seit den Titelerfolgen 2011 und 2013 ist der Audi in den Schaeffler-Farben zu einer Ikone geworden. In der FIA-Langstrecken-Weltmeisterschaft WEC tritt Schaeffler gemeinsam mit Porsche an und gewann in den beiden vergangenen Jahren jeweils den Titel sowie den Saisonhöhepunkt, die 24 Stunden von Le Mans. In der Formel E leistet unser Unternehmen technologische Pionierarbeit. Das Wissen aus der ersten Rennserie mit rein elektrischen Antrieben wird für die Elektromobilität im Alltag ausgewertet und wandert direkt in Produkte für Serienentwicklungen.

Ich möchte Sie ermutigen, Ihre Träume zu leben, beherzte Entscheidungen zu treffen und dabei nie den Glauben zu verlieren, gewinnen zu können. Erfolge im Motorsport wie auch im Berufsalltag sind dabei immer das Ergebnis einer guten Teamleistung.

Prof. Dr.-Ing. Peter Gutzmer

Stellvertretender Vorsitzender des Vorstands und Vorstand Technologie, Schaeffler AG

Inhaltsverzeichnis

A	Verbrennungsmotoren <i>Combustion Engines</i>	1
1	Grundlagen <i>Fundamentals</i>	1
2	Motorenwahl <i>Choice of Engine</i>	13
3	Verluste <i>Losses</i>	22
4	Baugruppen <i>Modules</i>	28
4.1	Zylinderkopf <i>Cylinder Head</i>	31
4.2	Ventiltrieb <i>Valve Train</i>	52
4.3	Kurbeltrieb <i>Cranktrain</i>	67
4.4	Kurbelgehäuse <i>Crankcase</i>	84
4.5	Ansauganlage <i>Induction System</i>	88
4.6	Abgasanlage <i>Exhaust System</i>	122
4.7	Schmierölversorgung <i>Lubrication System</i>	132
4.8	Kühlung <i>Cooling System</i>	141
5	Besonderheiten von Rennmotoren <i>Specialities</i>	150
6	Betriebsstoffe <i>Fuels, Coolants and Lubricants</i>	152
6.1	Kraftstoffe <i>Fuels</i>	152
6.2	Schmierstoffe <i>Lubricants</i>	156
6.3	Kühlflüssigkeit <i>Coolant</i>	157
7	Beispiele von Motoren <i>Examples of Engines</i>	157
	Literatur <i>References</i>	166
B	Elektroantriebe <i>E-Drive</i>	169
1	Grundlagen <i>Fundamentals</i>	170
2	Antriebskonfigurationen <i>Layouts of Drive Lines</i>	173
3	Elektromotoren <i>Motors</i>	176
4	Energiespeicher <i>Energy Storage System</i>	193
5	Laden <i>Charging</i>	208
6	Leistungselektronik <i>Power Electronics</i>	209
7	Sicherheit <i>Safety</i>	212
	Literatur <i>References</i>	216

C	Hybridantriebe <i>Hybrid Drives</i>	219
1	Bauarten von Hybridantrieben <i>Types of Hybrid Drives</i>	219
2	Energierückgewinnung <i>Kinetic Energy Recovery System (KERS)</i>	223
3	Energiespeicher <i>Energy Store</i>	236
	3.1 Batterie <i>Battery</i>	239
	3.2 Kondensatoren <i>Capacitors</i>	239
	3.3 Schwungrad <i>Flywheel</i>	241
	3.4 Hydraulischer Speicher <i>Hydraulic Storage System</i>	241
4	Beispiele von Hybridantrieben <i>Examples of Hybrid Drives</i>	243
	Literatur <i>References</i>	246
D	Auslegung des Antriebsstrangs <i>Drive Line Calculation</i>	249
1	Leistungsbedarf <i>Power Demand</i>	249
2	Getriebeplan und Zugkraftdiagramm <i>Tractive Effort-Speed Characteristics</i>	259
3	Antriebsstrang Übersicht <i>Drivetrain Overview</i>	268
4	Übersetzungen <i>Gear Ratios</i>	269
	Literatur <i>References</i>	283
E	Kraftübertragung <i>Power Transmission</i>	285
1	Funktion <i>Function</i>	285
2	Kupplung <i>Clutch</i>	290
	2.1 Kupplungsbauarten <i>Types of Clutches</i>	292
	2.2 Auswahl der Kupplungsgröße <i>Choice of Clutch Size</i>	305
	2.3 Kupplungsbetätigung <i>Clutch Actuation</i>	308
3	Getriebe <i>Gearbox</i>	314
	3.1 Schaltgetriebe <i>Mechanical Gearbox</i>	316
	3.2 Stufenlosgetriebe (CVT) <i>Continuously Variable Transmission</i>	349
	3.3 Achsgetriebe <i>Final Drive</i>	352
4	Differenzial <i>Differential</i>	355
	4.1 Einleitung <i>Introduction</i>	355
	4.2 Bauarten <i>Types</i>	360
5	Wellen <i>Shafts</i>	374
	5.1 Antriebswellen <i>Prop(eller) Shafts AE: Drive Shafts</i>	375
	5.2 Seitenwellen <i>Half Shaft, AE: Axle Shafts</i>	383
	5.3 Wellengelenke <i>Universal Joints</i>	387
6	Allradantrieb <i>All-Wheel Drive</i>	400
	6.1 Grundlagen <i>Basics</i>	400
	6.2 Renneinsatz <i>Racing</i>	403
	6.3 Bauformen <i>Types</i>	404
7	Beispiele <i>Examples</i>	410
	Literatur <i>References</i>	411

F Kraftstoffsystem <i>Fuel System</i>	413
1 Anforderungen und Übersicht <i>Requirements and Overview</i>	413
2 Kraftstofftank <i>Fuel Tank</i>	416
2.1 Größe <i>Size</i>	416
2.2 Anordnung <i>Arrangement</i>	417
2.3 Bauformen <i>Designs</i>	418
3 Anschlüsse <i>Connections</i>	422
4 Kraftstoffleitungen <i>Fuel Lines</i>	427
5 Kraftstoffpumpe <i>Fuel Pump</i>	428
Literatur <i>References</i>	430
G Elektrik <i>Electrical System</i>	431
1 Verkabelung Übersicht <i>Wiring Overview</i>	431
2 Steuergerät <i>Electronic Control Unit (ECU)</i>	433
3 Batterie <i>Battery</i>	435
4 Generator <i>Alternator</i>	436
5 Leitungen und Verbindungen <i>Leads and Connectors</i>	437
6 Sicherungen <i>Fuses</i>	442
7 Schalter <i>Switches</i>	442
8 Schaltplan <i>Circuit Diagram</i>	443
Literatur <i>References</i>	445
H Elektronische Fahrhilfen <i>Electronic Driver Aids</i>	447
1 Einleitung <i>Introduction</i>	447
2 Aktive Systeme <i>Active Systems</i>	448
2.1 Manuelle Systeme <i>Manual Systems</i>	448
2.2 Automatische Systeme <i>Automatic Systems</i>	451
3 Passive Systeme <i>Passive Systems</i>	459
Literatur <i>References</i>	459
Anhang – Glossar <i>Glossary</i>	461
Sachwortverzeichnis <i>Index</i>	479

Abkürzungen, Formelzeichen und Einheiten

List of Symbols and Units

Im Text angeführte Gleichungen sind im Allgemeinen Größengleichungen. Die Größen können dabei in beliebigen Einheiten eingesetzt werden, vorzugsweise in den SI-Einheiten (Meter-Kilogramm-Sekunden-System). Die Einheit der auszurechnenden Größe ergibt sich dann aus den gewählten Einheiten der Variablen. Manchmal sind auch die in der Praxis gängigen Zahlenwertgleichungen angeführt. Bei diesen stimmt die Gleichung nur, wenn diese mit den angegebenen Einheiten gerechnet wird. Die Einheit der Ergebnisgröße wird demnach im Text ebenfalls angeführt.

Geometrische Punkte *Geometric Points*

<i>C</i> bis <i>G</i>	allg. Bezugspunkte <i>reference points, in general</i>
<i>M</i>	Mittelpunkt <i>centre point</i>

Indizes *Suffices*

Kommen mehrere Indizes vor, werden diese durch ein Komma getrennt. Die Reihenfolge von Indizes ist diese:

Bei Kräften gibt der erste Index den Ort bzw. Punkt an, an dem die Kraft angreift und der zweite Index die Krafrichtung, z. B. $F_{W,Z}$... Radaufstandskraft (Hochkraft im Reifenaufstandspunkt). Das benutzte fahrzeugfeste Koordinatensystem wird im Glossar definiert.

Zusätzliche Angaben, wie vorne, hinten, angetrieben usw., folgen als weitere Indizes.

0	vorgegebene Nulllage bzw. Ausgangswert. Umgebung <i>zero-point position or starting point. Ambient</i>
1	vor dem Verdichter, ein <i>before the compressor, in</i>
2	nach dem Verdichter, aus <i>after the compressor, out</i>
α	Schräglauf- <i>side slip</i>
a	angetrieben (nur ein Rad) <i>driven, accelerating (one wheel only)</i>

A	anfahrend, angetrieben (eine Achse) <i>drive-off condition, accelerating (one axle)</i>
B	bremsend (eine Achse) <i>braking (one axle)</i>
Bt	Batterie <i>battery</i>
C	Kühlmittel <i>coolant</i>
C	(Elektro-)Motorsteuerung <i>motor controller</i>
Ca	Vergaser <i>carburettor</i>
cl	Kupplung <i>clutch</i>
co	Kurvenfahrt <i>cornering</i>
D bzw. d	Achsantrieb (Differenzial) <i>axle drive (differential)</i>
dr	Widerstand- <i>drag</i>
dyn	dynamisch <i>dynamic</i>
e (Motor)	effektiv <i>effective</i>
f	Ständer (Stator) <i>stator</i>
fr	Reibung <i>friction</i>
G	Getriebe <i>gearbox</i>
Ga	Gas <i>gas</i>
hyd	hydraulisch <i>hydraulic</i>
i	kurveninnen, innen <i>inner wheel, inner</i>
Ic	Ladeluftkühler <i>inter cooler</i>
id	idealer Wert <i>ideal value</i>
K	Kraftstoff <i>fuel</i>
krit	kritisch <i>critical</i>
L	Luft- <i>aerodynamic</i>
l	links <i>left, left side</i>
lim	Grenz- <i>limit</i>
lo	Gleiten bzw. Blockieren <i>slipping, lock resp.</i>
ls	Verlust <i>loss</i>
M	Motor <i>engine resp. motor</i>
m bzw. med	mittel <i>middle, mean</i>
max	maximal bzw. zul. Größtwert <i>maximum permissible</i>
min	minimal <i>minimum</i>
n	Nennwert <i>rated value</i>
N	Saugmotor <i>naturally aspirated engine</i>
No	Nocke <i>cam</i>
o	kurvenaußen, außen <i>outer wheel, outer</i>
Pi	Kolben <i>piston</i>
q	Steigung- <i>gradient-</i>
q	schnell <i>quick</i>
R	Rollen des Rades (Abrollen) <i>rolling (wheel)</i>
R	Rotor (Läufer) <i>rotor</i>
Rd	Stab bzw. Stange <i>rod, linkage resp.</i>

ref	Bezug- <i>reference</i> ~
rs	rechts <i>right, right side</i>
Rs	Restriktor <i>restrictor</i>
rsl	resultierend <i>resulting</i>
s	langsam <i>slow</i>
Sp	Feder <i>spring</i>
t	gesamt bzw. Nennwert <i>total, nominal value resp.</i>
T	turboaufgeladener Motor <i>turbocharged engine</i>
ts	Torsion- <i>torsional</i>
V	(Gesamt-) Fahrzeug <i>overall vehicle</i>
v	Ventil <i>valve</i>
W	Rad <i>wheel</i>
X bzw. x	Koordinatenrichtung längs allgemein <i>longitudinal direction in general</i>
Y bzw. y	Koordinatenrichtung quer (seitlich) <i>lateral direction</i>
Z (Motor)	Zylinderbuchse <i>cylinder liner</i>
Z bzw. z	Koordinatenrichtung vertikal (senkrecht) <i>vertical direction</i>

Strecken *Distances* (in mm)

a	Achsabstand (Getriebe) <i>centre distance (transmission)</i>
a bis p	Strecken und Längen (allg.) <i>distances and length (in general)</i>
B	Bohrung(sdurchmesser) <i>bore (diameter)</i>
C_R	Abrollumfang des Reifens bei 60 km/h <i>dynamic rolling circumference at 60 kph</i>
$C_{R,dyn}$	Abrollumfang des Reifens bei höheren Geschwindigkeiten <i>dynamic rolling circumference at top speed</i>
d bzw. D	Durchmesser (allgemein) <i>diameter, in general</i>
h bzw. H	Höhe bzw. Hubhöhe (allgemein) <i>height, in general</i>
L	Gesamtlänge <i>total length</i>
l_{Rd}	(Pleuel-)Stangenlänge <i>length of conrod</i>
r	Lenker-, Spurhebellänge bzw. Hebelarm (allg.) <i>effective control arm length or force lever in general</i>
R	Bahnradius <i>path radius</i>
r_{dyn}	dynamischer Reifenhalmmesser bei 60 km/h <i>force dynamic rolling radius of the tyre at 60 kph</i>
s	Weg bzw. Hub (allg.) <i>travel or stroke, in general</i>
t	Dicke, Wandstärke (wall) <i>thickness</i>

Winkel Angle (in °)

α	Steigungswinkel der Fahrbahn <i>angle of gradient of the road</i>
α_f bzw. α_r	Reifenschräglaufwinkel an einem Vorder- bzw. Hinterrreifen <i>slip angle of front or rear tyre</i>
β	Ventilsitzwinkel <i>valve seat angle</i>
β	Winkel allgemein <i>angle, in general</i>

Massen, Gewichte *Masses, Weights* (in kg)

m	Masse, Gewicht bzw. Last, allg. <i>mass, weight or load in general</i>
$m_{V,t}$	Gesamtgewicht des Fahrzeugs <i>gross vehicle weight</i>

Kräfte *Forces* (in N)

$F_{L,X}$	Luftwiderstandskraft <i>aerodynamic drag</i>
$F_{L,Z}$	aerodynamische Abtriebskraft <i>aerodynamic downforce</i>
F_R	Rollwiderstandskraft am Reifen <i>rolling resistance of the tyre</i>
F_{Sp}	Federkraft, bezogen auf eine Achsseite <i>spring force, one side of the axle</i>
F_{rsl}	resultierende Kraft <i>resulting force</i>
$F_{V,X,A}$	Zugkraft <i>traction force</i>
$F_{V,X,ex}$	Überschusskraft <i>excess force</i>
$F_{W,X,a}$ bzw. $F_{W,X,A}$	Antriebskraft am Aufstandspunkt eines Rades (a) bzw. beider Räder einer Achse (A) <i>accelerating force in the centre of tyre contact of one wheel (a) or both wheels (A)</i>
$F_{W,Y}$	Quer-(Seiten-)kraft am Radaufstandspunkt <i>lateral force at wheel</i>
$F_{W,Z}$	Hochkraft am Radaufstandspunkt (Radlast) <i>vertical force at the centre of tyre contact</i>

Momente *Torques and Moments* (in Nm)

M_M	Motormoment <i>engine torque</i>
T	Torsionsmoment allgemein <i>torsional moment in general</i>

Dimensionslose Kennzahlen

α_0	Anstrengungsverhältnis <i>factor representing different load cases</i>
λ	Luftzahl <i>air-fuel-ratio</i>
η	Gesamtwirkungsgrad Getriebe und Achsantrieb <i>total efficiency of geartrain and final drive</i>
η_{cl}	Wirkungsgrad der Energieumwandlung (Kupplung) <i>efficiency of energy transformation (clutch)</i>
λ_a	Luftaufwand <i>charging efficiency</i>
λ_{Rd}	(Pleuel-)Stangenverhältnis <i>stroke-to-conrod ratio</i>
η_e	effektiver Wirkungsgrad <i>effective efficiency</i>
Φ	Stufensprung der Getriebeübersetzung <i>gradation of ratio of speed</i>
Φ_L	Verhältnis der Einlassdauer zu einer Kurbelwellendrehung <i>ratio intake period to one revolution of crankshaft</i>
λ_l	Liefergrad <i>volumetric efficiency</i>
$\mu_{W,X}$	Haftreibungszahl in Längsrichtung <i>coefficient of friction in longitudinal direction</i>
$\mu_{W,Y}$	Haftreibungszahl in Querrichtung <i>coefficient of friction in lateral direction</i>
μ_{cl}	Reibungszahl der Kupplungsscheiben <i>friction coefficient of clutch discs</i>
ν	Antriebsmomentenverteilung vorne/hinten <i>bias of driving torque front/rear</i>
c_A	Abtriebsbeiwert <i>downforce coefficient</i>
c_W	Luftwiderstandsbeiwert <i>drag coefficient</i>
ε	Verdichtungsverhältnis <i>compression ratio</i>
i	Taktzahl <i>factor representing number of strokes of engine</i>
i_D	Übersetzung im Achsantrieb <i>axle ratio</i>
i_G	Getriebeübersetzung <i>gearbox ratio</i>
j	Anzahl allgemein <i>number in general</i>
k	Korrekturfaktor <i>correction factor</i>
k_{Ca}	Korrekturfaktor für Vergaser <i>correction factor for carburettor</i>
k_m	Drehmassenzuschlagfaktor <i>factor representing rotating masses</i>
k_R	Rollwiderstandszahl bei Geradeausfahrt <i>rolling resistance coefficient</i>
k_{dyn}	dynamischer Überhöhungsfaktor <i>dynamic amplifying factor</i>
k_v	Faktor für dynamischen Reifenabrollumfang <i>factor for dynamic rolling circumference</i>
k_α	Schräglaufwiderstandsbeiwert <i>factor for tyre slip resistance</i>
k_Φ	Progressionsfaktor für Stufensprung <i>factor for progressive ratio of speed</i>

L_{\min}	Luftbedarf <i>air requirement</i>
n	Zählindex <i>numbering index</i>
Re	Reynolds-Zahl <i>Reynolds number</i>
S	Umfangsschlupf des Reifens <i>longitudinal slip of tyre</i>
u	Zähnezahlverhältnis <i>gear ratio</i>
z	Anzahl der Zylinder <i>number of cylinders</i>

Sonstige Größen

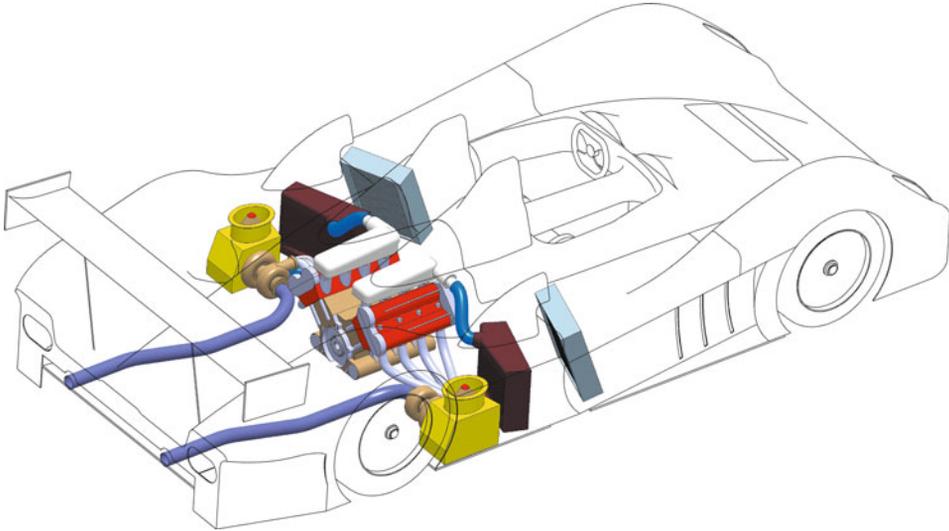
Δ	Änderung, Differenz <i>change, difference</i>
ρ	Dichte allgemein <i>density</i> (kg/m^3)
τ	Schubspannung <i>shear stress</i> (N/m^2)
ρ_L	Dichte der Luft <i>density of air</i> (kg/m^3)
ω	Kreisfrequenz, Winkelgeschwindigkeit <i>circular frequency</i> (s^{-1})
A	Fläche <i>area, cross-section area</i> (m^2)
a_x	Längsbeschleunigung allg. <i>longitudinal acceleration in general</i> (m/s^2)
b_e	spezifischer Kraftstoffverbrauch <i>specific fuel consumption</i> (kg/kWh)
B	magnetische Flussdichte <i>density of magnetic flux</i> (T)
c_B	Brenngeschwindigkeit <i>burn rate</i> (m/s)
c_F	Flammenfrontgeschwindigkeit <i>speed of flame front</i> (m/s)
c_s	Schallgeschwindigkeit <i>sonic speed</i> (m/s)
c_T	Transportgeschwindigkeit <i>speed of transport</i> (m/s)
f	Frequenz <i>frequency</i> (Hz)
g	Erdbeschleunigung <i>acceleration due to gravity</i> (m/s^2)
H_G	Gemischheizwert <i>calorific value of mixture</i> (J/m^3)
H_u	spezifischer (unterer) Heizwert <i>specific calorific value</i> (J/kg)
I	(elektrischer) Strom (<i>electric</i>) current (A)
$J_{\text{Bo},X}$	Massenträgheitsmoment <i>polar moment of inertia</i> (kg m^2)
n	Dreh- bzw. Schwingungszahl <i>revolutions per minute or vibration frequency</i> (min^{-1})
n	Polytropenexponent <i>polytropic exponent</i> (–)
n_{krit}	biegekritische Drehzahl <i>critical rotational speed for bending, whirling speed</i> (min^{-1})
$n_{\text{krit,ts}}$	verdrehtkritische Drehzahl <i>critical rotational speed for torsion</i> (min^{-1})
Leistung	<i>power</i> (W)
P_e	effektive Motorleistung <i>effective power of engine</i> (kW)
Druck	<i>pressure</i> ($\text{Pa} = \text{N/m}^2$)
P_{ls}	Verlustleistung <i>power loss</i> (W)

$p_{m,e}$	effektiver Mitteldruck <i>mean effective pressure</i> (bar ¹)
p_0	Umgebungsdruck (Luftdruck) <i>ambient pressure</i> (bar ¹)
q	Steigung <i>gradient</i> (%)
\dot{Q}	Wärmestrom <i>heat flow</i> (W)
R	elektrischer Widerstand <i>electrical resistance</i> (Ω)
R_e	Streckgrenze <i>yield strength</i> (N/m ²)
R_L	Gaskonstante der Luft <i>gas constant of air</i> (kJ/(kg K))
R_m	Zugfestigkeit <i>ultimate tensile strength</i> (N/m ²)
$R_{p0,2}$	0,2 %-Dehngrenze <i>0.2 % yield strength</i> (N/m ²)
T	Temperatur (absolute) <i>thermodynamic temperature</i> (K)
t	Zeit <i>time</i> (s)
U	(elektrische) Spannung (<i>electric</i>) <i>voltage</i> (V)
v_L	Anströmgeschwindigkeit der Luft <i>air flow velocity</i> (m/s)
v_V bzw. v_X	Fahrzeuggeschwindigkeit <i>longitudinal velocity</i> (m/s bzw. km/h)
v	Geschwindigkeit <i>velocity</i> (m/s)
V	Volumen <i>volume</i> (l = dm ³)
V_c	Kompressionsvolumen <i>compression volume</i> (l = dm ³)
V_h	Hubvolumen eines Zylinders <i>swept volume of one cylinder</i> (l = dm ³)
V_H	Hubvolumen des Motors <i>swept volume of engine</i> (l = dm ³)
v_m	mittlere Kolbengeschwindigkeit <i>mean piston velocity</i> (m/s)
v_W	Radumfangsgeschwindigkeit <i>circumferential tyre velocity</i> (m/s)
W	Arbeit <i>work</i> (J)

Sonstige Abkürzungen

UT	Unterer Totpunkt <i>bottom dead centre</i>
OT	Oberer Totpunkt <i>top dead centre</i>
Es	Einlass schließt <i>intake closes</i>
Eö	Einlass öffnet <i>intake opens</i>
As	Auslass schließt <i>exhaust closes</i>
Aö	Auslass öffnet <i>exhaust opens</i>
FVW	Faserverbundwerkstoff <i>fibre composite material</i>
Nfz	Nutzfahrzeug <i>commercial vehicle</i>
Pkw	Personenkraftwagen <i>passenger car</i>

¹ 1 bar = 100 kPa. Die gültige SI-Einheit für den Druck ist zwar Pascal (Pa), im Buch wird jedoch die in der Praxis „handlichere“ Einheit bar verwendet.



Der Motor macht ein Fahrzeug erst zum AUTOMobil, also fähig zum selbsttätigen Vorwärtskommen. Darüber hinaus strahlt der Verbrennungsmotor eine große, wenn nicht die größte Faszination von allen einzelnen Baugruppen aus und ist Sinnbild für die Leistung. Bei Rennfahrzeugen wird neben seiner Leistungsfähigkeit auch seinem akustischen Auftritt große Beachtung geschenkt.

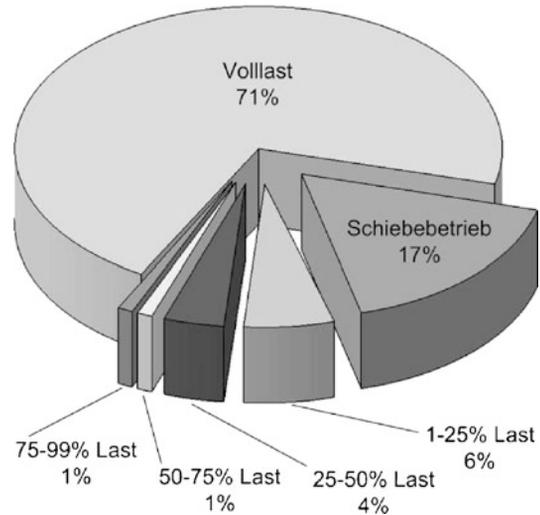
1 Grundlagen *Fundamentals*

Allgemein wird von Experten der Anteil des Motors an den Fahrleistungen von Rennfahrzeugen nicht hoch, verglichen mit anderen Baugruppen (Reifen, Fahrwerk), eingeschätzt¹. Dennoch ist er nicht unwichtig, schließlich gibt er der Sportart seinen Namen. Ein Motorenentwickler² fasst diese scheinbar paradoxe Situation so zusammen: Es ist schwer ein Rennen wegen des Motors zu gewinnen, aber leicht eines wegen des Motors zu verlieren. Der Motor muss standfest sein und vor allem einen stetigen Leistungsverlauf über der Drehzahl aufweisen. Das macht sein Verhalten für den Rennfahrer berechenbar, der im Grunde ohnedies nur zwei Stellungen des Fahrpedals oder Drehgriffs nutzt: Leerlauf und Volllast, d. h. der Motor wird sozusagen digital gefahren. Der Volllastanteil einer Runde

¹ Vgl. Handbuch Rennwagenteknik Bd. 1, Abschn. B.3.2.

² Luca Marmorini, ehemaliger Technischer Direktor der F1-Motorenabteilung Toyota Motorsport: „It’s hard to win a race because of the engine but it’s easy to lose a race because of it.“

Abb. A.1 Lastanteile beim 24-Stunden-Rennen von Le Mans, nach [28]. Eine typische Aufteilung von Drosselklappenstellungen. Der Volllastanteil überwiegt als das eine Extrem und das andere folgt an zweiter Stelle, nämlich der Betrieb mit geschlossener Drosselklappe



beträgt in der Formel 1 je nach Strecke zwischen 35 % (Monaco) und 70 % (Monza) [10]. Auch bei Langstreckenrennen wird von einem solchen Höchstwert für die Motorentwicklung ausgegangen, Abb. A.1. Mit abnehmendem Hubraum nimmt der Volllastanteil auf derselben Strecke zu. Bei Bergrennen kann der Volllastanteil aber durchaus unter 15 % liegen.

Im grundsätzlichen Aufbau unterscheiden sich Rennmotoren von Serienmotoren nicht. Gegenüber Motoren in Alltagsfahrzeugen sind Rennmotoren jedoch größeren Längs- und Querschleunigungen ausgesetzt, was z. B. für das Schmiersystem von Bedeutung ist. Die erwünschte hohe Leistung wird u. a. über eine hohe Drehzahl erzielt. Das führt zu größeren Massenkräften mit entsprechend höheren Bauteilbelastungen und der Ventiltrieb wird zum kritischen System. Schaltfehler der Fahrer können ohne elektronische Schutzsysteme zum Zerstören des Motors führen [18]. Die Lebensdauer eines Motors ist im Vergleich zu Gebrauchsmotoren wesentlich geringer, die freigesetzte Leistung dabei erheblich höher. Es werden spezifische Leistungen bis zu 500 kW/l Hubraum erreicht. Entsprechende Werte von Serienmotoren liegen für aufgeladene Ottomotoren bei 50 bis 100 kW/l.

Für hohe Fahrleistungen muss der Rennmotor physikalisch betrachtet bei zwei Kenngrößen möglichst hohe Werte aufweisen. Ein kräftiges Drehmoment ist für große Beschleunigungen erforderlich und eine hohe Leistung ist für hohe Endgeschwindigkeiten notwendig.

Die Leistung eines Verbrennungsmotors beschreibt folgende Zahlenwertgleichung.

$$P_e = \frac{i}{600} \cdot z \cdot n_M \cdot p_{m,e} \cdot V_h \quad (\text{A.1})$$

P_e	effektive Leistung, kW
i	Taktzahl, –. $i = 0,5$ für 4-Takter und $i = 1$ für 2-Takter
z	Anzahl der Zylinder, –
n_M	Drehzahl des Motors, min^{-1}
$p_{m,e}$	effektiver Mitteldruck, bar. Maximalwerte für $p_{m,e}$ bei Rennmotoren etwa 12 bis 35 bar, bei Serienottomotoren zwischen 8 und 13 bar, bei Pkw-Dieselmotoren 7 bis 14 bar
V_h	Hubvolumen eines Zylinders, l

Für das Drehmoment gilt:

$$M_M = \frac{100}{2\pi} \cdot i \cdot z \cdot p_{m,e} \cdot V_h$$

M_M Motormoment, Nm

Aus der Betrachtung der Gleichungen folgen unmittelbar die grundsätzlichen Möglichkeiten zur Hebung von Leistung und Drehmoment eines Verbrennungsmotors:

Taktzahl *Number of Strokes*. Theoretisch weist ein Zweitaktmotor bei sonst gleichen Parametern die doppelte Leistung eines Viertakters auf. Praktisch erreicht er jedoch nicht denselben Mitteldruck. Abgesehen davon stehen seinem Einsatz oft (Tendenz steigend) Reglementforderungen entgegen.

Anzahl der Zylinder *Cylinder Number*. Eine große Zylinderzahl führt bei gegebenem Einzelzylinderhubraum zu großem Gesamthubvolumen und damit zu entsprechend mehr Leistung. Einer sehr großen Zylinderzahl stehen allerdings Nachteile durch ein entsprechend geringes Einzelzylindervolumen bei konstantem Hubraum und durch die große Teilezahl entgegen. Geringe Zylinderhubvolumina ermöglichen aber auch prinzipiell höhere Drehzahlen wegen der höheren Eigenfrequenz des gasdynamischen Systems Ansaugrohr – Zylinder.

Drehzahl *Speed*. Bei feststehendem Hubraum und Mitteldruck bleibt praktisch nur noch eine Drehzahlsteigerung zur Erhöhung der abgegebenen Motorleistung, Abb. A.2. Formel-1-Saugmotoren erreichen so weit mehr als die doppelte Nenndrehzahl von Serienottomotoren.

Die Grenzen für eine Drehzahlsteigerung geben in erster Linie drei Bereiche einzeln vor, d. h. wenn bereits ein Bereich nicht mehr gesteigert werden kann, ist das Drehzahllimit erreicht:

- Gasdurchsatz
- Verbrennungsgeschwindigkeit
- Bauteilfestigkeit.

Abb. A.2 Leistungsvergleich der 3,0l Saugmotoren von 1980 und 1995 [2]. Der Leistungszuwachs entstand nur durch die höhere Drehzahl. Der Mitteldruck und damit das Drehmoment blieben praktisch unverändert

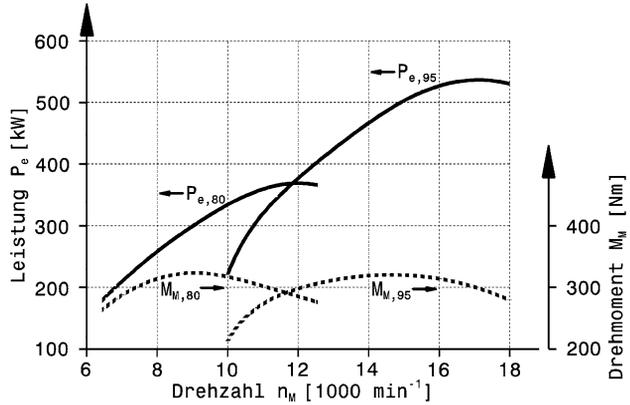
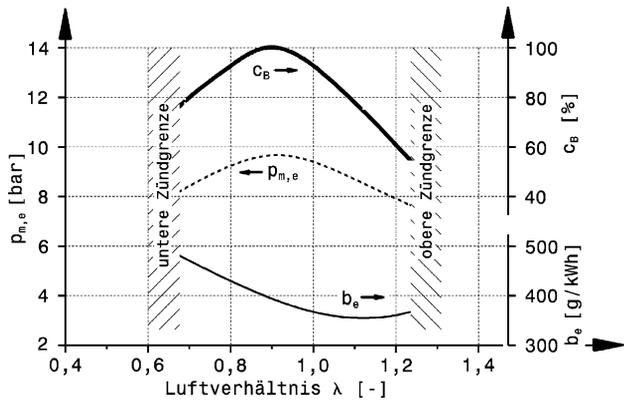


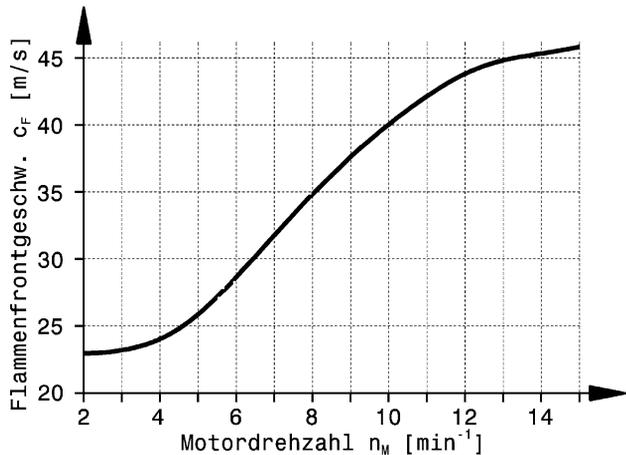
Abb. A.3 Einfluss von Luftverhältnis λ auf Brenngeschwindigkeit c_B , Mitteldruck $p_{m,e}$ und spezifischem Kraftstoffverbrauch b_e eines Ottomotors. Das Luftverhältnis beeinflusst die Brenngeschwindigkeit und damit Mitteldruck und Kraftstoffverbrauch eines Verbrennungsmotors



Gasdurchsatz *Mixture Flow*. Der Gasdurchsatz durch den Motor stößt mit steigender Drehzahl an physikalische Grenzen, weil die Ventilöffnungsflächen nicht beliebig vergrößert werden können. Ist das kritische Druckverhältnis im Ventilbereich erreicht, übersteigt die Gasgeschwindigkeit auch bei weiterer Drehzahlsteigerung die lokale Schallgeschwindigkeit nicht. Die Vergrößerung der Ventilöffnungsfläche ist daher ein wichtiges Kriterium bei der Festlegung des Motorkonzepts. Siehe auch Abschn. A.4.1 *Zylinderkopf*.

Verbrennungsgeschwindigkeit, Kolbengeschwindigkeit *Combustion Velocity, Piston Speed*. Das Brennverfahren muss im Stande sein, möglichst rasch das pro Arbeitsspiel zugeführte Gemisch vollständig zu verbrennen. Die Flammenfrontgeschwindigkeit c_F setzt sich zusammen aus der Brenngeschwindigkeit c_B (relativ zum unverbrannten Gemisch) und der Transportgeschwindigkeit c_T , mit der die Flammenfront durch Eigenbewegung des Gasgemisches transportiert wird: $c_F = c_B + c_T$. Motordrehzahl und Brennraumgeometrie beeinflussen die Transportgeschwindigkeit c_T . Die Brenngeschwindigkeit c_B wird bestimmt vom Zustand des Gemischs, der chemischen Zusammensetzung des Kraftstoffs und dem Luftverhältnis λ , s. Abb. A.3.

Abb. A.4 Flammenfrontgeschwindigkeit c_F bei 4-Ventil-Ottomotoren mit handelsüblichem Kraftstoff. Bei geringen Drehzahlen ist die Flammenfrontgeschwindigkeit praktisch gleich der Brenngeschwindigkeit von 24 bis 25 m/s. Mit steigender Drehzahl nimmt die Transportgeschwindigkeit und damit die Geschwindigkeit der Flammenfront zu. Bei 45 m/s nähert sich die Flammenfrontgeschwindigkeit einem oberen Grenzwert



Der maximale Mitteldruck $p_{m,e}$ wird bei Benzin bei einem Luftverhältnis von 0,85 bis 0,9 (Kraftstoffüberschuss) erreicht, wo die größte Brenngeschwindigkeit c_B auftritt. Der effektive Wirkungsgrad dagegen wird in erster Linie von der Vollkommenheit der Verbrennung und weniger von der Brenngeschwindigkeit bestimmt. Bei $\lambda = 1,1$ (10% Luftüberschuss) wird daher das Verbrauchsminimum erreicht. Dadurch dass durch die gesellschaftliche Wahrnehmung auch bei Rennmotoren der Kraftstoffverbrauch ein Thema geworden ist, rückt die Magerlauffähigkeit von Motoren in den Fokus der Entwickler. So ist u. a. die Benzindirekteinspritzung bei modernen Rennmotoren Standard.

Die Transportgeschwindigkeit kann durch den Einlassvorgang und die Brennraumgeometrie beeinflusst werden. Die Gestaltung des Brennraums und des Kolbenbodens sowie die Zündkerzenlage sind somit ebenfalls leistungsbestimmend.

Dabei muss der Motorenentwickler einen klassischen Kompromiss lösen: Stärkere Ladungsbewegungen und damit kurze Brenndauern werden mit Einlasskanälen erzielt, die geringere Durchflüsse aufweisen und somit die Leistungsausbeute begrenzen.

Wie sich die resultierende Flammenfrontgeschwindigkeit (*flame front velocity*) c_F über der Drehzahl ändert, zeigt Abb. A.4.

Will man den Grenzwert der Geschwindigkeit der Flammenfront weiter nach oben schieben, muss die Kraftstoffzusammensetzung geändert werden. Das ist nur bei wenigen Reglements möglich. Deshalb ist eine Verkürzung der Flammenwege im Brennraum zielführender. Dies geschieht durch kleinere Bohrung oder mehr Zündkerzen pro Zylinder.

Die Schnelligkeit der ottomotorischen Verbrennung wird also maßgeblich durch die vorhandene Turbulenzintensität bestimmt. Die Konsequenz ist, dass die Brenndauer – ausgedrückt in Grad Kurbelwinkel – bei gleich bleibender Last praktisch unabhängig ist von der Motordrehzahl. Die Motordrehzahl ist folglich nicht die bestimmende Ähnlichkeitsgröße bei Ottomotoren, sondern die mittlere Kolbengeschwindigkeit v_m . Diese charakterisiert die wichtigsten tribologischen und strömungsmechanischen Prozesse. Man beobachtet, dass ungefähr bei $v_m > 18$ m/s die Druckabfälle so stark zunehmen, dass kei-

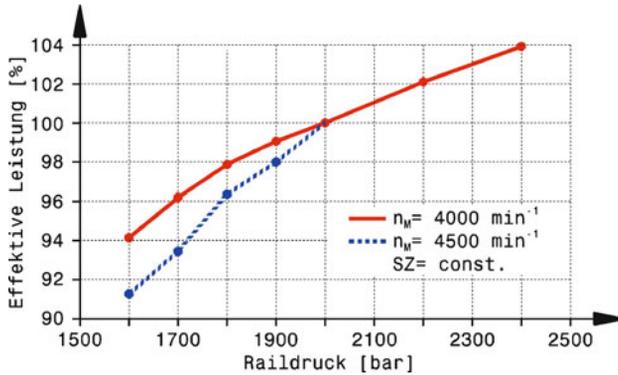


Abb. A.5 Einfluss des Raildrucks auf die Motorleistung von Dieselmotoren [49]. SZ Bosch Schwärzungszahl, ein Maß für den Dieselrauch *FSN filter smoke number*. n_M Motordrehzahl. Mit zunehmendem Einspritzdruck steigt die Motorleistung an. Zugleich spiegelt der Verlauf die zeitliche Entwicklung der Leistung wider. Die Daten bis 2000 bar Raildruck stammen vom ersten Renndieselmotor R10 V12 TDI und zeigen seine Entwicklung über drei Jahre. Der jüngere R15 V10 TDI fährt inzwischen mit 2400 bar

ne gute Zylinderfüllung mehr gewährleistet ist [29]. Die Lebensdauer des Motors leidet ebenfalls merklich, wenn die mittlere Kolbengeschwindigkeit diesen Wert überschreitet. Aus der Beziehung für v_m folgt, dass bei einer Drehzahlsteigerung der Hub verkleinert werden muss, wenn die bekannte Grenze für v_m nicht überschritten werden soll.

$$v_m = \frac{s \cdot n_M}{30.000} \quad (\text{A.2})$$

Zahlenwertgleichung:

v_m mittlere Kolbengeschwindigkeit, m/s

s Hub, mm

n_M Motordrehzahl, min^{-1}

Werte für maximale mittlere Kolbengeschwindigkeiten:

$v_{m,\max} < 20 \text{ m/s}$ Erfahrungswert für Serienottomotoren Pkw

$v_{m,\max} = 19 \text{ bis } 21 \text{ m/s}$ für Langstrecken-Motoren (Le Mans etc.)

$v_{m,\max} \approx 25 \text{ bis } 27,3 \text{ m/s}$ bei Formel-1-Motoren.

Bei Dieselmotoren mit Direkteinspritzung lässt sich ein Einfluss des Einspritzdrucks auf die Gemischbildung feststellen. Mit zunehmendem Kraftstoffdruck verfeinert sich die Kraftstoffzerstäubung. Dadurch wird die Leistungsausbeute des Motors gesteigert, eine angepasste Kanalgestaltung für Zylinderluftbewegung und -füllung samt optimierter Kolbenmuldenform vorausgesetzt. Der Leistungsgewinn nimmt mit steigendem Raildruck allerdings wegen des knapper werdenden Luftverhältnisses ab. Abb. A.5 zeigt den Einfluss

des Raildrucks auf die Motorleistung am Beispiel der Audi TDI-Motoren für Le Mans. Für die Kraftstoffeinspritzung sorgt bei diesen aufgeladenen Dieselmotoren ein Common-Rail-System.

Bauteilfestigkeit *Components Strength*. Die Bauteile, die die Grenzen einer Drehzahlsteigerung vorgeben, sind der Kolben, das Pleuel, die Kurbelwelle und die Hauptlager. Mit steigender Drehzahl steigen die Reibungsverluste stark an und überquadratische Hub-Bohrungsverhältnisse (s. Anhang), also $s/B < 1$, sind gegenüber anderen Auslegungen auch in dieser Hinsicht im Vorteil. Der Reibleistungsgewinn überwiegt die höheren Wärmeverluste. Bei einem kleineren Hub ergibt sich bei gegebenem Hubraum ein größerer Bohrungsdurchmesser. Dieser ermöglicht größere Ventildurchmesser, was gerade bei hohen Drehzahlen den Liefergrad heben hilft. Bei kleinem Hub bleiben auch die oszillierenden und rotierenden Massenkräfte kleiner. Hochdrehzahlmotoren profitieren also mehrfach von überquadratischen Hub-Bohrungsverhältnissen.

Neben dieser Überlegung sind weitere Kriterien, die für eine Drehzahlsteigerung betrachtet werden müssen die mechanische (Warm-)Festigkeit von Bauteilen, die Aufrechterhaltung der Schmierung und Schwingungen im Ventiltrieb.

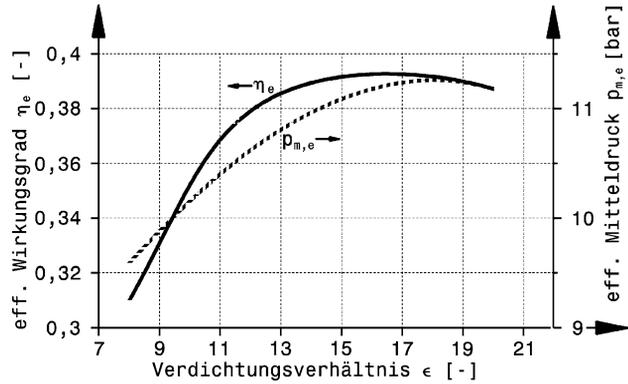
Mitteldruck *Mean Effective Pressure*. Je höher der effektive Mitteldruck $p_{m,e}$, desto größer die vom Motor entfaltete Leistung und das Moment. Der Mitteldruck stellt überhaupt eine praktische Vergleichsgröße von Motoren unterschiedlichen Hubraums dar. Er ist das auf den Gesamthubraum bezogene Drehmoment. Mit einem hohen Mitteldruck ist es auch möglich hohe Leistung bei relativ geringen Drehzahlen zu erzielen. Das verbessert die Fahrbarkeit und den Kraftstoffverbrauch. Außerdem muss bei einem vorgeschriebenen Luftmengenbegrenzer die Drehzahl unterhalb der Grenzdrehzahl bleiben, soll der Motor nicht ersticken (s. auch Abschn. A.4.5). Ein geringer Kraftstoffverbrauch bietet den Vorteil des geringeren Startgewichts und auch während des gesamten Rennens ein günstigeres Leistungsgewicht.

Die Wirkung der Gaskraft auf den Kolben kann auch dadurch erhöht werden, dass der Gegendruck auf der Kolbenunterseite reduziert wird. Senkt man den Druck im Kurbelraum ab, erhöht sich die Leistung entsprechend (A.1):

$$\Delta P_e = \frac{i}{600} \cdot z \cdot n_M \cdot \Delta p_{m,e} \cdot V_h$$

Wird der Kurbelraum eines Saugmotors evakuiert, so ist die Mitteldruckzunahme etwa 1 bar (das entspricht dem sonst an der Kolbenunterseite wirkenden Umgebungsdruck). Bei einem 3l-Motor führt das bei 10.000 min^{-1} zu einer Leistungszunahme von $\Delta P_e = 25 \text{ kW}$. Natürlich geht davon ein Teil für die Vakuumpumpe verloren. Nebenbei werden die durch Luftreibung hervorgerufenen Widerstände der bewegten Kurbeltriebsteile beinahe vollständig reduziert. Der Mitteldruck wird maßgebend bestimmt vom Luftaufwand

Abb. A.6 Einfluss des Verdichtungsverhältnisses auf effektiven Mitteldruck und effektiven Wirkungsgrad bei Volllast eines Ottomotors [26]. Über einem Verdichtungsverhältnis von 17:1 fällt der Wirkungsgrad ab. Bedingt durch zunehmende Reibungskräfte und durch Auswirkungen der Brennraumform



und vom Gemischheizwert.

$$p_{m,e} = \eta_e \cdot \lambda_a \cdot H_G \quad (\text{A.3})$$

η_e effektiver Wirkungsgrad, –

Ist das Verhältnis der geleisteten Arbeit zur eingesetzten Brennstoffenergie. Bestwerte für η_e bei Rennmotoren bis etwa 0,3 (also 30 %), bei Serienottomotoren zwischen 0,25 und 0,35. Diese Werte werden nur in bestimmten Betriebspunkten erreicht

λ_a Luftaufwand, –

Ist das Verhältnis der tatsächlichen zugeführten Frischladung zur theoretisch möglichen, d. h. ohne Verluste eingebrachten, Ladungsmasse im Zylinder

H_G Gemischheizwert, kJ/m^3

Ist die auf das Volumen der Frischladung bezogene Brennstoffenergie

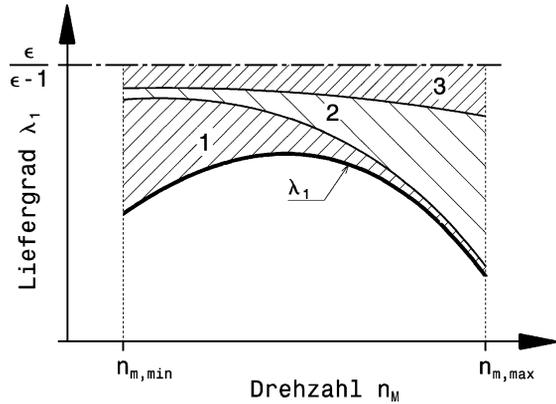
Aus dieser Beziehung folgen weitere Maßnahmen zur Erzielung möglichst großer Leistungen und Momente:

Wirkungsgrad Efficiency. Der effektive Wirkungsgrad muss hoch sein, d. h. sämtliche Verluste (Reibung, Antrieb von Nebenaggregaten, ...) müssen klein gehalten werden. Bei Rennserien mit einem vorgeschriebenen Einheitskraftstoff und limitiertem Kraftstoffmassenstrom bleibt das die einzige Möglichkeit die effektive Motorleistung zu erhöhen.

Das Verdichtungsverhältnis (*compression ratio*) stellt eine leicht zu beeinflussende Größe dar, mit der der Wirkungsgrad gehoben werden kann, s. Abb. A.6.

Beim Ottomotor wird das praktisch nutzbare Verdichtungsverhältnis durch Klopfen und Glühzündung begrenzt. Um die Grenze möglichst weit hinauszuschieben müssen Brennräume kompakt (kleines Oberflächen-Volumen-Verhältnis hält die Wandwärmeverluste klein) und wenig zerklüftet sein. Eine gezielte Brennraumdachkühlung ist in dem Zusammenhang von großem Wert. Die Kraftstoffzusammensetzung stellt ebenfalls eine Maßnahme zur Beseitigung des Klopfens dar. Die Oktanzahl ist ein Maß für die Klopfestigkeit. Von diesem Mittel lässt sich allerdings nur Gebrauch machen, wenn es das Reglement gestattet. Selbst in der Formel 1 werden (mittlerweile) nur Kraftstoffe zuge-

Abb. A.7 Liefergrad λ_1 über der Motordrehzahl n_M . Der Liefergrad setzt sich aus folgenden Anteilen zusammen: 1 Anteil Spülverluste, 2 Anteil Strömungsverluste, 3 Anteil Aufheizverluste. Der theoretische Maximalwert des Liefergrads liegt mit $\varepsilon/(\varepsilon - 1)$ fest



lassen, die praktisch dem bleifreien Superkraftstoff mit ROZ 98 (**R**esearch-**O**ktanzahl) an der Tankstelle entsprechen. Die Oktanzahl lässt sich in dem Fall nur in engen Grenzen (ROZ 95 bis 102, [34]) durch gefinkelte Verschnittverfahren, wie sie im benötigten Ausmaß nur den Kraftstoffherstellern möglich sind, steigern.

Luftaufwand *Mass of Air Corresponding to Cylinder Volume.* Der Luftaufwand soll möglichst groß sein. Eine Möglichkeit dazu bietet die Aufladung. Dabei wird mehr Ladung in den Brennraum geschafft, als es theoretisch der Saugmotor schafft, d. h. der Luftaufwand ist größer als 1. Man kann die Wirkung einer Aufladung somit auch mit einer Hubraumvergrößerung des Saugers vergleichen. Der Luftaufwand wird auch größer bei strömungsgünstig gestalteten Ansaugbereichen und Erzielung von Aufladeeffekten durch gasdynamische Phänomene, die zumindest in einem schmalen Drehzahlbereich wirken.

Die Ladungstemperatur soll möglichst niedrig sein. Eine hohe Temperatur der Frischladung bewirkt eine kleinere Ladungsmasse im Zylinder als es möglich wäre, wegen der geringeren Dichte der ausgedehnten Ladung. Eine andere Vergleichsgröße für den Erfolg des Ladungswechsels ist der Liefergrad (*charging efficiency*) λ_1 . Dabei wird die tatsächlich im Zylinder befindliche Masse an Frischgas mit der theoretisch möglichen (= Hubvolumen mal Luftdichte) verglichen. Für 4-Takt Saugmotoren liegen die Bestwerte im Bereich 0,8 bis 0,9 und darüber. Aufgeladene Motoren erreichen Werte von 1,2 bis 1,6. Den grundsätzlichen Verlauf des Liefergrads über der Drehzahl zeigt Abb. A.7. Der Liefergrad setzt sich zusammen aus den Spül- (1), Strömungs- (2) und Aufheizverlusten (3).

Die Drosselverluste ergeben sich durch die Strömungswiderstände im Ansaugsystem und an den Ventilen. Aufheizverluste entstehen durch Wärmeaustausch der Luft mit den Saugrohrwänden und den Zylinderwänden. Spülverluste sind die Folge von Ventilüberschneidung und zu geringem Abgasgedruck. Mit steigender Drehzahl nehmen Drossel- und Aufheizverluste zu, bei geringen Drehzahlen überwiegen die Spülverluste, so dass der Liefergrad λ_1 im mittleren Drehzahlbereich ein Maximum besitzt. Die Lage dieses Maximums kann durch die Wahl der Steuerzeiten und durch Abstimmung von Saugrohr-längen und Durchmesser beeinflusst werden.

Gemischheizwert *Mixture Heat Value*. Die Größe des Gemischheizwerts H_G wird von der im Kraftstoff chemisch gespeicherten Energie bestimmt. Die Kraftstoffzusammensetzung erlaubt also ebenfalls eine Beeinflussung der Leistung. Davon können allerdings nur wenige Rennklassen merkbar Gebrauch machen. Ein klassisches Beispiel für enorme Leistungssteigerung (und zugleich auch eine der wenigen Ausnahmen) durch entsprechende Kraftstoffzusammensetzung stellen Dragster dar. Bei Beschleunigungsrennen sorgen exotische Treibstoffe von Nitromethan bis Di-Olefine für Literleistungen bis zu 500 kW/l. Der Gemischheizwert errechnet sich wie folgt:

$$\begin{aligned}
 H_G &= \frac{H_u \rho_L}{\lambda L_{\min}} && \text{für } \lambda \geq 1 \\
 H_G &= \frac{H_u \rho_L}{L_{\min}} && \text{für } \lambda \leq 1 \\
 \lambda &= \frac{m_L}{m_K \cdot L_{\min}} && \text{(A.4)}
 \end{aligned}$$

- H_u spezifischer Heizwert des Kraftstoffs, J/kg
 Superbenzin $H_u = 43.170 \text{ kJ/kg}$, Dieselmotorkraftstoff $H_u = 42.500 \text{ kJ/kg}$, Methanol $H_u = 19.600 \text{ kJ/kg}$
- ρ_L Luftdichte, kg/m^3
- L_{\min} Luftbedarf für stöchiometrische Verbrennung, kg Luft/kg Kraftstoff
 Superbenzin $L_{\min} = 14,7 \text{ kg/kg}$, Dieselmotorkraftstoff $L_{\min} = 14,5 \text{ kg/kg}$, Methanol $L_{\min} = 6,4 \text{ kg/kg}$
- λ Luftverhältnis, – (s. auch Anhang)
- m_L tatsächlich im Zylinder vorhandene Luftmasse, kg
- m_K im Zylinder vorhandene Kraftstoffmasse, kg

Hubraum *Displacement*. Je größer der Hubraum, desto größer die maximale Leistung. Die Grenzen einer Hubraumvergrößerung zieht einerseits das Reglement, andererseits schränken thermodynamische Erkenntnisse das Einzelzylindervolumen auf einen brauchbaren Bereich ein (s. unten). Zu große Brennräume haben den Nachteil, dass die Flammwege zu groß werden und die Ladung bei großen Drehzahlen nicht mehr vollständig durchbrennt.

Zusammenfassend gibt Abb. A.8 die spezifischen Leistungen unterschiedlicher Motoren über der Drehzahl wieder. Die maximale Literleistung von Renn-Dieselmotoren liegt vergleichsweise bei 90 kW/l.

Stabilität der Verbrennung *Stability of combustion*. Die Unterschiede der Verbrennung einzelner Zylinder bei Mehrzylindermotoren sollen möglichst klein sein. Große Unterschiede treten beispielsweise durch stark abweichende optimale Zündwinkel einzelner Zylinder zu Tage. Hervorgerufen werden solche Unterschiede durch Fehlverteilung von Luft und/oder Kraftstoff auf die einzelnen Zylinder [57]. Als äußerst wirkungsvolle Maßnahmen um das zu vermeiden erweisen sich individuelle Drossleinrichtungen

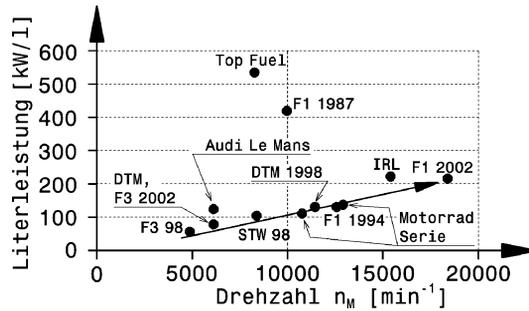


Abb. A.8 Literleistung von Motoren, nach [42]. Die eingezeichnete Ausgleichsgerade bestätigt die praktische Gültigkeit von (A.1). Bei gegebenem Mitteldruck wird die Leistung mit der Drehzahl gesteigert. Eine weitere Steigerung erreicht man mit einer Erhöhung des Liefergrads (z. B. Aufladung: F1 1987 = Formel 1 1987) oder durch einen anderen Kraftstoff (Top Fuel). Die stärksten Motoren haben die Dragster (Top Fuel). Die Literleistungen der aufgeladenen 1,5-l-Formel-1-Motoren der 1980er-Jahre kommen an zweiter Stelle. Die Fahrzeuge der Indy Racing League (IRL) haben die stärksten Triebwerke auf der Rundstrecke, dicht gefolgt von den zeitgenössischen Formel-1-Motoren

und Einspritzsysteme sowie Saugrohre. Viele Serienmotoren sind im Gegensatz dazu aus Kostengründen mit Verteilersaugrohren und Zentraleinspritzung (Single-point Injection) ausgerüstet.

Außerdem sollen die zyklischen Schwankungen der zylinderindividuellen Verbrennung möglichst klein sein. Zyklische Schwankungen (*combustion variability*) sind bei konstanter Last und Drehzahl stochastisch auftretende Unterschiede im Zylinderdruckverlauf, die sich je nach Ausprägung unter anderem in einem rauen Motorlauf, eingeschränkter Leistung und schlechterem Kraftstoffverbrauch bemerkbar machen. Beeinflusst werden zyklische Schwankungen durch [57]:

- Ladungsbewegung an der Zündkerze und zum Zündzeitpunkt
- Unterschiede der Luft und/oder Kraftstoffmenge, die pro Zylinder eingebracht wird
- Vermischung des Kraftstoffs mit Restgasanteilen
- Gemischaufbereitung (Tröpfchengröße, Spritzwinkel, Strahlführung (*targeting*), Drallströmungen)
- Übermäßige Verdünnung durch Abgasrückführung (Ventilüberschneidung) oder Luft
- Lange Brenndauer wegen ungünstiger Brennraumgestaltung
- Niedrige Zündenergie oder kleiner Elektrodenabstand der Zündkerze.

Im Allgemeinen nimmt die Stabilität der Verbrennung zu bei:

- Steigender Drehzahl und Last
- Höherem Verdichtungsverhältnis
- Geringerer Ventilüberschneidung

- Höherer Zündenergie an den Elektroden
- Höheren Temperaturen
- Geringerer Luftfeuchtigkeit.

Weitere Maßnahmen um die Stabilität zu erhöhen sind:

- Exakt gleiche Brennraumgestalt in sämtlichen Zylindern
- Gleiche Längen von Einlass- und Auslasskanälen sowie den daran angeschlossenen Leitungen
- Aktive Kurbelgehäuseentlüftung bzw. -evakuierung
- Einspritzventile, die kleine Tröpfchendurchmesser liefern und deren Strahlen so ausgerichtet sind, dass die (Saugrohr-)Wandbenetzung minimal bleibt
- Hochspannungskabel der Zündanlage mit niedrigem Widerstand
- Größter fahrbarer Elektrodenabstand der Zündkerze.

Die abhängig vom Einsatzzweck gewünschten Eigenschaften werden bei ausgeführten Motoren im Allgemeinen durch folgende von den denkbaren – oben abgeleiteten – Maßnahmen erreicht [9]:

- Hohe Drehzahl bzw. großer Drehzahlbereich, wobei der Dauerbetrieb bei Drehzahlen von über 19.000 min^{-1} , z. B. Formel 1 bis Anfang 2009, wesentlich durch den Einsatz von pneumatischen Ventilbetätigungen ermöglicht wird
- Größtmögliche Entdrosselung des Ansaugweges
- Leistungsoptimale Bauelemente wie Saugrohr, Abgaskrümmen und Abgasführung
- Großer Ventilhub und vier Ventile pro Zylinder, wobei das Ventilmaterial meist Titan ist (geringere Masse bei etwa ähnlicher Festigkeit wie Stahl)
- Verbesserte Kühlung, besonders des Zylinderkopfes
- Trockensumpfschmierung wegen extremer Beschleunigungen des Fahrzeugs
- Bei Ottomotoren möglichst klopfeste Brennräume, das bedeutet relativ kleine Ventiltwinkel, mittige Kerzenlage und moderate Verdichtungsverhältnisse und Kolben mit möglichst ebenem Kolbenboden
- Durch höhere thermische und mechanische Belastung Anpassung der Struktur, der Werkstoffe und der Verbindungselemente (Verschraubung) an die gestiegenen Anforderungen
- Möglichst geringe Masse der verwendeten Bauteile (z. B. Titan, Keramik, kohlefaserverstärkte Kunststoffe). Ein leichter Motor führt zu einem leichten Fahrzeug und führt bei einem geforderten Mindestgewicht zur freien Wahl der Lage von Zusatzmassen zur Verbesserung der Fahrzeugbalance
- Lebensdauer angepasst an den Rennbetrieb (Abb. A.9), besondere Maßnahmen zur Qualitätssicherung der verbauten Teile (Einzelprüfung) und routinebestimmter Austausch von Teilen nach bestimmter Laufleistung.