

Handbuch
Rennwagentechnik

SCHAEFFLER

Michael Trzesniowski

Gesamtfahrzeug

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, Nutzbremsung (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

Gesamtfahrzeug

 Springer Vieweg

Michael Trzesniowski
Institut für Fahrzeugtechnik
FH Joanneum
Graz, Österreich

Handbuch Rennwagentechnik
ISBN 978-3-658-15536-0
DOI 10.1007/978-3-658-15537-7

ISBN 978-3-658-15537-7 (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 „Gesamtfahrzeug“ 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 dürfen. 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 Anfahrelemente 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 Renntteams 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 Contents

A Einleitung	Introduction	1	
1	Arten von Rennfahrzeugen	Types of Race Cars	1
2	Vergleich Rennsport-Serie	Comparison Racing vs. Mass Production	9
3	Entwicklungsablauf	Development Process	13
Literatur	References	16	
B Fahrzeugkonzept und Entwurf	Vehicle Concept and Draft Design	19	
1	Entwicklungsablauf	Development Process	19
2	Auslegungsbereiche	Layout Sections	20
3	Konzeptmerkmale	Concept Characteristic	22
3.1	Aggregatlage und Antriebskonzept	Engine Position and Drive Layout	22
3.2	Konzeptvergleich	Concept Comparison	27
4	Konzeptionierung Gesamtfahrzeug	Layout of Overall Vehicle	48
5	Allgemeine Konstruktionsprinzipien beim Entwerfen	Principles of Embodiment Design in General	53
6	Werkstoffe	Materials	70
6.1	Übersicht gängiger Werkstoffe	70	
6.2	Werkstoffvergleich	Material Comparison	74
6.3	Werkstoffwahl	Material Selection	75
7	Kosten	Costs	77
Literatur	References	80	
C Sicherheit	Safety	83	
1	Fahrzeugaufbau	Vehicle Construction	84
2	Schalter	Switches	87
3	Schutzeinrichtungen	Protecting Device	88
4	Verbindungselemente	Fasteners	104
5	Prüfungen	Tests	108
Literatur	References	114	

D Cockpit Cockpit	115
1 Konzept Layout	115
2 Fahrerposition Driver's Posture	119
3 Sitz Seat	123
4 Lenkrad Steering Wheel	127
4.1 Lage des Lenkrades Position of Steering Wheel	127
4.2 Lenkradabmessungen und Ausführungen Steering Wheel, Dimensions and Types	128
5 Fußhebelwerk und Pedale Bracketry and Pedals	132
6 Schaltung Gear Linkage	143
7 Armaturenbrett Dashboard	147
8 Rückhaltesysteme Restraint Systems	148
9 Beispiele Examples	155
Literatur References	157
E Aerodynamik Aerodynamics	159
1 Einleitung Introduction	159
2 Luftwiderstand Aerodynamic Drag	162
3 Abtrieb Downforce	172
4 Flügelberechnung Calculation of Wings	205
5 Luftleitelemente Deflector Devices	210
6 Wärmeabfuhr und Entlüftung Heat Removal and Ventilation	212
7 Auslegung und Abstimmung Dimensioning and Setup	221
Literatur References	230
F Rahmen Chassis	231
1 Anforderungen Requirements	231
2 Bauarten Types	232
2.1 Gitterrohrrahmen Tubular Spaceframe	233
2.2 Kastenrahmen Sheet Metal Monocoque	251
2.3 Monocoques aus Faserverbundwerkstoffen Composite Monocoque Chassis	270
3 Festigkeit Strength	282
4 Anbauteile Add-on Parts	285
4.1 Konsolen und Halter Brackets and Mounts	285
4.2 Bergehilfen Towing Systems	290
Literatur References	291

G Außenhaut <i>Bodywork</i>	293
1 Begriffe <i>Terms</i>	293
2 Anforderungen <i>Requirements</i>	293
3 Gestaltung <i>Design</i>	295
4 Werkstoffe <i>Materials</i>	307
Literatur <i>References</i>	308
Anhang – Glossar <i>Glossary</i>	309
Sachwortverzeichnis <i>Index</i>	327

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>M</i>	Mittelpunkt <i>centre point</i>
<i>V</i>	Fahrzeugschwerpunkt <i>vehicle centre of gravity</i>
<i>W</i>	Rad- bzw. Reifenaufstandspunkt <i>centre of tyre resp. wheel contact</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 Kraftrichtung, z. B. $F_{W,Z}$... Radaufstandschaft (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	nach oben/in Druckrichtung/ein- <i>to the top/in jounce/in compression/in</i>
2	nach unten/in Zugrichtung/aus- <i>to the bottom/in rebound/out</i>

b	Biege-, Biegung <i>bending</i>
C	Kühlmittel <i>coolant</i>
co	Kurvenfahrt <i>cornering</i>
dr	Widerstand- <i>drag</i>
e	effektiv <i>effective</i> vorn <i>front</i>
i	kurveninnen, innen <i>inner wheel, inner</i>
krit	kritisch <i>critical</i>
L	Luft- <i>aerodynamic</i>
l	links <i>left, left side</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>
o	kurvenaußen, außen <i>outer wheel, outer</i>
r	hinten <i>rear</i>
Rd	Stab bzw. Stange <i>rod, linkage resp.</i>
rs	rechts <i>right, right side</i>
rsl	resultierend <i>resulting</i>
Sp	Feder <i>spring</i>
t	gesamt bzw. Nennwert <i>total, nominal value resp.</i>
ts	Torsion- <i>torsional</i>
T	Reifen <i>tyre</i>
tc	Wendekreis <i>turning circle</i>
V	(Gesamt-) Fahrzeug <i>overall vehicle</i>
X bzw. x	Koordinatenrichtung längs allgemein <i>longitudinal direction in general</i>
Y bzw. y	Koordinatenrichtung quer (seitlich) <i>lateral direction</i>
Z bzw. z	Koordinatenrichtung vertikal (senkrecht) <i>vertical direction</i>

Strecken Distances (in mm)

a bis p	Strecken und Längen (allg.) <i>distances and length (in general)</i>
b_f bzw. b_r	Spurweite, vorn bzw. hinten <i>track width, front or rear</i>
B_t	Fahrzeuggesamtbreite <i>overall width of the vehicle</i>
c	Sehnenlänge eines Flügels <i>chord length of a wing</i>
d bzw. D	Durchmesser (allgemein) <i>diameter, in general</i>
D_s	Spurkreisdurchmesser (vorn) <i>track circle diameter (front)</i>
$D_{S,r}$	Spurkreisdurchmesser, hinten <i>track circle diameter, rear</i>
D_{tc}	Wendekreisdurchmesser <i>turning circle diameter, wall to wall</i>
f	Wölbung eines Flügels <i>convexity</i>

h bzw. H	Höhe bzw. Hubhöhe (allgemein) <i>height, in general</i>
H_t	Fahrzeug-Gesamthöhe <i>overall height of the vehicle</i>
h_V	Höhe des Fahrzeugschwerpunkts <i>height of the vehicle center of gravity</i>
l	Radstand <i>wheelbase</i>
l_f bzw. l_r	Abstand des Fahrzeugschwerpunkts zu Mitte Vorder- bzw. Hinterachse <i>distance of vehicle centre of gravity to middle of front or rear axle</i>
L_t	Fahrzeuggesamtlänge <i>total length of the vehicle</i>
r	Lenker-, Spurhebellänge bzw. Hebelarm (allg.) <i>effective control arm length or force lever in general</i>
R	Bahnradius <i>path radius</i>
s	Weg bzw. Hub (allg.) <i>travel or stroke, in general</i>
s	Spannweite eines Flügels <i>span of a wing</i>
s_t	gesamter Radhubweg („Federweg“) <i>total wheel travel</i>
t	Dicke, Wandstärke (<i>wall</i>) <i>thickness</i>
t	Profildicke eines Flügels <i>maximum thickness airfoil</i>

Winkel Angle (in ° bzw. rad)

α	Anstellwinkel eines Flügels <i>angle of attack</i>
α_f bzw. α_r	Reifenschräglaufwinkel an einem Vorder- bzw. Hinterreifen <i>slip angle of front or rear tyre</i>
β	Winkel allgemein <i>angle, in general</i>
β	Schwimmwinkel <i>sideslip angle (attitude angle)</i>
δ	(Rad-)Lenkwinkel <i>steer angle</i>
δ_i bzw. δ_o	Lenkwinkel, Istwert kurveninnen bzw. -außen <i>actual steer angle, inner or outer wheel</i>

Massen, Gewichte Masses, Weights (in kg)

m	Masse, Gewicht bzw. Last, allg. <i>mass, weight or load in general</i>
$m_{V,f}$ bzw. $m_{V,r}$	gewogene Achslast, vorn bzw. hinten <i>axle load, front or rear</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>

$F_{W,X,a}$ 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>
$F_{V,Y}$	Quer-(Seiten-)kraft am Fahrzeugschwerpunkt <i>lateral force at vehicle</i>
$F_{W,Y}$	Quer-(Seiten-)kraft am Radaufstandspunkt <i>lateral force at wheel</i>
$F_{W,Z}$	Radaufstandschaft (Radlast) <i>corner weight (wheel load)</i>
$F_{V,Z,t}$	Gewichtskraft des Gesamtfahrzeugs <i>cross vehicle weight</i>

Momente *Torques and Moments (in Nm)*

M_b Biegemoment *bending moment*

Federraten *Spring Rates (in N/mm)*

c_f bzw. c_r	Rate der Aufbaufeder bei gleichseitiger Federung, bezogen auf den Radaufstandspunkt einer Achsseite, vorn bzw. hinten <i>rate of the body supporting spring at parallel springing, related to the center of tyre contact of one axle side, front or rear</i>
------------------	--

Dimensionslose Kennzahlen

c_A	Abtriebsbeiwert <i>downforce coefficient</i>
c_W	Luftwiderstandsbeiwert <i>drag coefficient</i>
i_m	Achslastverhältnis vorne/hinten <i>axleload ratio front/rear</i>
k_A	Flächenverhältnis eines Diffusors <i>area ratio of a diffuser</i>
S	Sicherheitsfaktor <i>safety factor</i>
η	Gesamtwirkungsgrad Getriebe und Achsantrieb <i>total efficiency of geartrain and final drive</i>
Φ_{Sp}	Verhältnis der radbezogenen Federraten vorne/hinten <i>ratio of wheel spring rates front/rear</i>
Λ	Seitenverhältnis eines Flügels <i>aspect ratio of a wing</i>
$\mu_{W,Y}$	Haftriebungszahl in Querrichtung <i>coefficient of friction in lateral direction</i>

Sonstige Größen

Δ	Änderung, Differenz <i>change, difference</i>
ρ	Dichte allgemein <i>density</i> (kg/m^3)
σ	(Normal)Spannung <i>stress</i> (N/m^2)
ρ_L	Dichte der Luft <i>density of air</i> (kg/m^3)
A	Fläche <i>area, cross-section area</i> (m^2)
a_x	Längsbeschleunigung allg. <i>longitudinal acceleration in general</i> (m/s^2)
a_y	Querbeschleunigung <i>lateral acceleration</i> (m/s^2)
E	Elastizitätsmodul, E -Modul <i>modulus of elasticity, Young's modulus</i> (N/mm^2)
g	Erdbeschleunigung <i>acceleration due to gravity</i> (m/s^2)
I	axiales Flächenträgheitsmoment <i>area moment of inertia</i> (mm^4)
$J_{V,Z}$	Massenträgheitsmoment des Gesamtfahrzeugs um die Z-Achse <i>dynamic moment of inertia of vehicle around the vertical axis</i> (kg m^2)
k	Wärmedurchgangszahl <i>heat transfer coefficient</i> ($\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$)
P	Leistung <i>power</i> (W)
P_e	effektive Motorleistung <i>effective power of engine</i> (kW)
p_0	Umgebungsdruck (Luftdruck) <i>ambient pressure</i> (bar) ¹
\dot{Q}	Wärmestrom <i>heat flow</i> (W)
R_e	Streckgrenze <i>yield strength</i> (N/m^2)
R_L	Gaskonstante der Luft <i>gas constant of air</i> ($\text{kJ}/(\text{kg K})$)
R_m	Zugfestigkeit <i>ultimate tensile strength</i> (N/m^2)
T	Temperatur (absolute) <i>thermodynamic temperature</i> (K)
t	Zeit <i>time</i> (s)
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)
W	axiales Widerstandsmoment <i>section modulus under bending</i> (m^3)
W	Arbeit <i>work</i> (J)

Sonstige Abkürzungen

FVW	Faserverbundwerkstoff <i>fibre composite material</i>
Nfz	Nutzfahrzeug <i>commercial vehicle</i>
Pkw	Personenkraftwagen <i>passenger car</i>
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff <i>carbon fiber reinforced plastic (CFRP)</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.

Einleitung *Introduction*

A



1 Arten von Rennfahrzeugen *Types of Race Cars*

Unter Motorsport werden alle mit motorgetriebenen Land- oder Wasserfahrzeugen betriebenen Sportarten (Automobil-, Motorrad-, Motorbootsport) verstanden. Zum Automobilsport u. a. Straßenrennsport (Racing), Rallye- und Tourenwagensport, Auto- und Rallyecross und Kfz-Veteranensport; zum Motorradsport gehören u. a. Straßenrennsport (Racing), Leistungsprüfungssport (Enduro), Speedway und Eisspeedway; zum Motorbootsport Motorbootrennsport (Regatten auf einem durch Wendebojen markierten Rundkurs von 1500 bis 2000 m Länge in mehreren Läufen) und Offshoresport, im weiteren Sinn auch der Wasserskisport. Im Folgenden sollen mehrspurige Wettbewerbsfahrzeuge im Mittelpunkt der Betrachtungen stehen, Abb. A.1.

Eine allgemeingültige Einteilung der Wettbewerbsfahrzeuge allein nach Bewerben oder Fahrzeugtypen lässt sich nicht darstellen. Zu vielfältig sind die Starterfelder bzw. die technischen Vorgaben einzelner Reglements. Es lassen sich jedoch unabhängig von Bewerbsarten einige typische Fahrzeuge nach technischen Gesichtspunkten kategorisieren, Abb. A.2. Cupfahrzeuge auf Straßenfahrzeubasis, Rallyefahrzeuge auf Straßenfahrzeubasis, zweisitzige Sportprototypen, die nur zu Rennzwecken gebaut werden, einsitzige Rennfahrzeuge (Monoposti) mit offenem Cockpit sowie freistehenden Rädern und Tourenwagen.

Diesen Fahrzeugen können einzelne Bewerbe zugeordnet werden:

Cup-Fahrzeuge: Caterham Hankook, Clio Cup, Ford Fiesta Cup, GTM Serien, Lupo Cup, Mini Challenge, Polo Cup, Porsche Cup, Porsche Super Cup, Seat Leon SC, Yaris Cup etc.

Rallyefahrzeuge: Bergrallye, nationale Meisterschaften, HJS Rallye, Weltmeisterschaft, etc.

Sportprototypen: 24 Stunden von Le Mans, WEC (World Endurance Championship), ALMS (American Le Mans Series), FIA GT, Radical Race Cup, Rhino's GT Serie, Sebring etc.

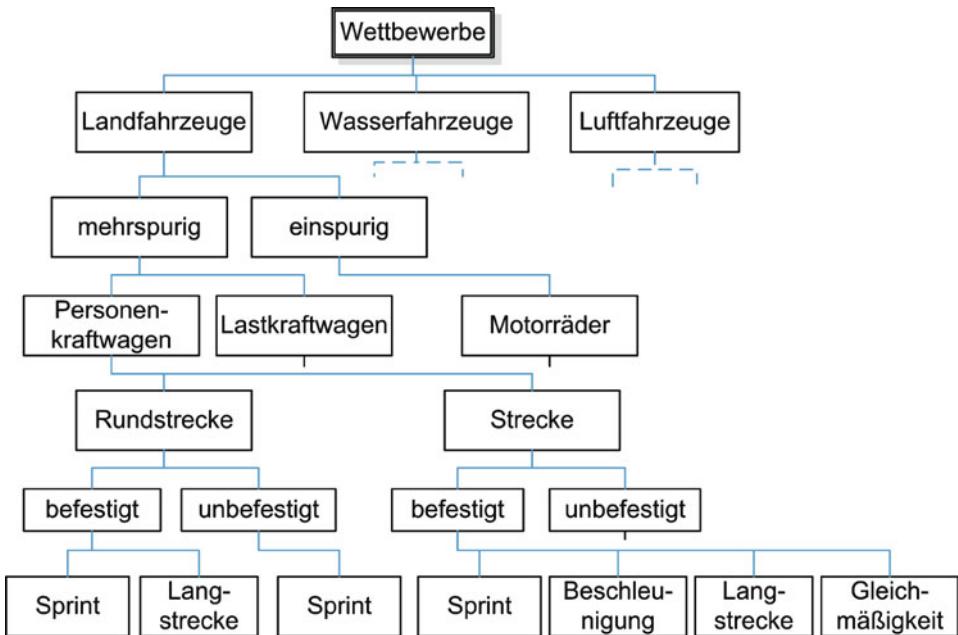


Abb. A.1 Einteilung der Motorsportarten (Auswahl)

Formelwagen: A1 GP Serie, F3 Euro Series, Formel 1, Formel 2000 (ehemals Easter), Formel 3, Formel BMW (ehemals ADAC), Formel Ford, Formel König (Serie beendet), Formel Opel, Formel Renault, Formel Renault EM, Formel Renault V6, Formula Student, Formel V, Lista Formel Junior, Recaro F3 Cup etc.

Tourenwagen: 24 Stunden Nürburgring, ADAC Procar, Castrol Haug Cup, Divinol Cup, DTM (Deutsche Tourenwagen Masters), FIA ETCC, FIA WTCC, Langstrecke Nürburgring, STT etc.

Eine weitere Unterteilung bietet das internationale Sportgesetz der FIA (Anhang J Artikel 251) (s. Anhang). Demnach werden mehrspurige Wettbewerbsfahrzeuge in Kategorien und Gruppen eingeteilt. Unterschieden werden Kategorie I („homologierte Produktionswagen“), Kategorie II („Rennwagen“) und Kategorie III (Lkw). Im Einzelnen werden dabei unterschieden:

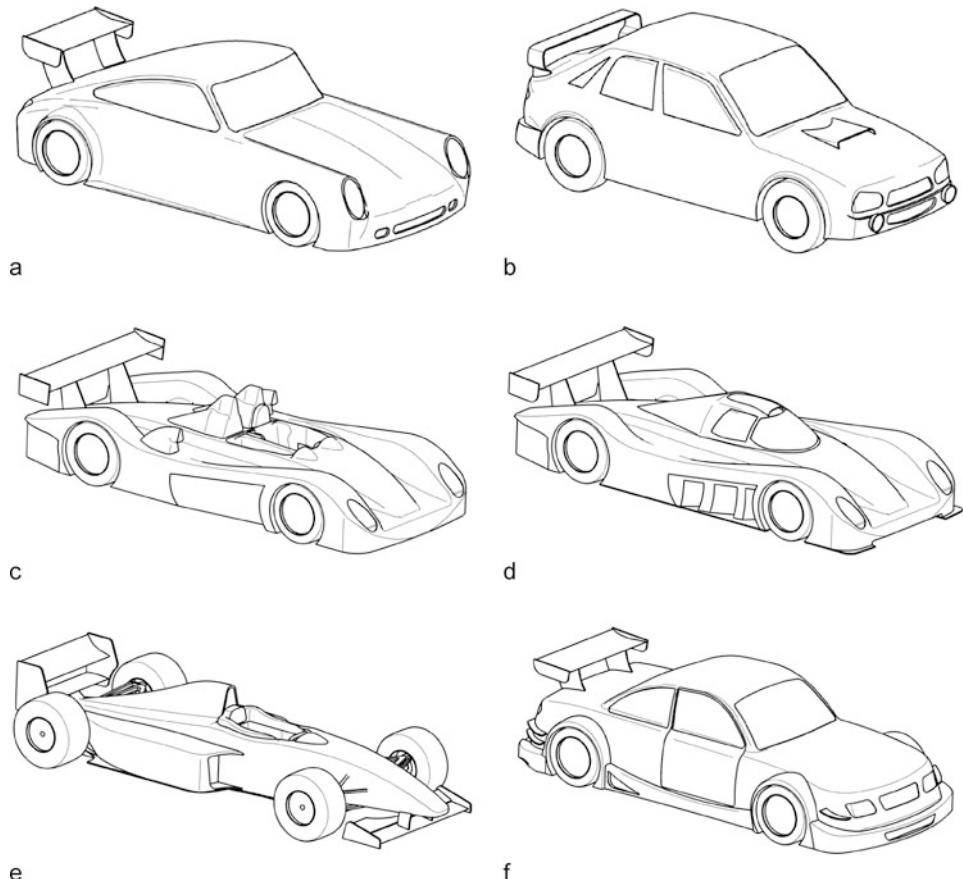


Abb. A.2 Typische Rennfahrzeuge *typical racecars*. **a** Cup-Fahrzeug *cup vehicle*, **b** Rallyefahrzeug *rally vehicle*, **c** Offener Sportprototyp *sport car, open*, **d** Geschlossener Sportprototyp *sport car, closed*, **e** Formelwagen *formula car*, **f** Tourenwagen *touring car*

Kategorie I

Gruppe A: Viersitzige Tourenwagen (*touring cars*) mit serienmäßiger Karosserie, Produktion mindestens 2500 Stück im Jahr. WRC (*World Rally Car*) gehören ebenso dazu.

Gruppe B: Zweisitzige GT-Fahrzeuge (*grand touring cars*). Das sind straßentaugliche Rennwagen, Produktionsvolumen mindestens 200 Stück im Jahr.

Gruppe N: Produktionswagen (*production cars*). Das sind viersitzige Serienwagen mit geringfügigen Änderungen, Produktionsvolumen mindestens 2500 Stück im Jahr.

Gruppe SP: Super-Produktionswagen (*super production cars*). Produktionsvolumen mindestens 2500 Stück im Jahr.

Gruppe T2: Serien-Geländewagen (*series cross-country cars*).

Kategorie II

Gruppe CN: Produktionssportwagen (*production sports cars*). Das sind zweisitzige Prototypen mit einem seriennahen Motor mit höchstens 3000 cm^3 Hubraum. Kraftstofftankvolumen unter 100 l. Mindestgewicht vom Hubraum abhängig, z. B. 625 kg bei 3000 cm^3 .

Gruppe D: Internationale Formelrennwagen (*international racing formula racing cars*).

Formel 1: Monoposto mit V6-Motor, Hubraum 1600 cm^3 , mit Turbolader, Energierückgewinnungssysteme, Mindestgewicht 690 kg.

Formel 3: Monoposto, Motor von einem Großserienaggregat abgeleitet, Hubraum höchstens 2000 cm^3 .

Formel 3000: Monoposto, Hubraum bis 3000 cm^3 , Mindestgewicht 625 kg.

Formel 4: 4-Zylinder-1,6-l-Motor, Mindestgewicht 570 kg, Einsteigerreihe mit Kostenlimits.

Formel E: elektrisch angetriebene Formelwagen, max. Leistung 200 kW, Mindestmasse mit Fahrer 800 kg (davon 200 kg Batterie), 18"-Räder mit profilierten Einheitsreifen.

Gruppe E: Formelfreie Rennwagen (*free formula racing cars*).

Gruppe GT1: Grand-Touring-Sportwagen (*grand touring cars*). Das sind straßentaugliche Fahrzeuge mit offenem oder geschlossenem Cockpit, Zweisitzer mit max. zwei Türen.

Gruppe GT2: Serien-Grand-Touring-Sportwagen (*series grand touring cars*). Das sind straßentaugliche Fahrzeuge mit Saugmotoren von max. 8000 cm^3 oder aufgeladene Motoren mit max. 4000 cm^3 Hubvolumen. Bei beiden Motorarten sind Luftmengenbegrenzer vorgeschrieben.

Gruppe GT3: Cup-Grand-Touring-Sportwagen (*cup grand touring cars*). Welche Fahrzeuge zu dieser Gruppe gehören, ist einer Liste zu entnehmen, die von der FIA geführt wird. Diese Fahrzeuge werden einzeln von der FIA homologiert.

Gruppe SR: Sportwagen (*sports car*). Zweisitzige, reine Rennfahrzeuge mit offenem oder geschlossenem Cockpit. Im zweiten Fall mit zwei Türen. Mindestgewicht 750 kg (SR2) und 900 kg (SR1). Motoren: SR1: Freisaugende Ottomotoren bis 6000 cm^3 , aufgeladene Ottomotoren bis 4000 cm^3 und aufgeladene Dieselmotoren bis 5500 cm^3 ; SR2: Freisaugende Ottomotoren bis 4500 cm^3 , aufgeladene Ottomotoren bis 2700 cm^3 . Kraftstofftankvolumen 90 l. Scheinwerfer vorne und Heckleuchten hinten vorgeschrieben.

Gruppe T1: Geländewagen-Prototypen (*modified cross-country cars*).

Kategorie III

Gruppe F: Renn-Lkw (*racing trucks*).

Gruppe T4: Raid-Rallye-Lkw (*cross-country trucks*).

Für das berühmte 24-Stunden-Rennen in Le Mans gibt der Veranstalter ACO (s. Anhang) ein eigenes Reglement heraus. Es gibt mehrere Fahrzeugkategorien, deren Motoren alleamt einen Luftmengenbegrenzer aufweisen:

Le Mans Prototyp: LM P1 (offen oder geschlossen), LM P2 (offen oder geschlossen)

LM Grand Tourismo: LM GTE Pro (Professional), LM GTE Am (Amateur)

Daneben gibt es noch weitere Spezialfahrzeuge für andere Wettbewerbe, z. B. Dragster für Beschleunigungsrennen oder Auto- und Ralleycrossfahrzeuge.

Aus obigen Ausführungen wird ersichtlich, will man eine allgemeine, über alle Bewerbe hinweg geltende grobe Einteilung von Rennfahrzeugen vornehmen, bleibt nur jene in Fahrzeuge mit freistehenden und solche mit umschlossenen Rädern.

Im Grunde genommen ist eine Einteilung der Rennfahrzeuge für deren Konstruktion gar nicht erforderlich. Die Konstruktion eines Rennfahrzeugs orientiert sich technisch in erster Linie am Einsatzzweck allerdings nur innerhalb der von diversen Bestimmungen vorgegebener Grenzen. Dennoch werden in diesem Buch keine Reglements detailliert vorgestellt. Ein Reglement hat unter anderem die Aufgabe eine Wettbewerbsgleichheit sicherstellen („Spielregeln“) und wird oftmals geändert. Bei diesen Angaben ist daher in erster Linie wesentlich, dass sie leicht messbar bzw. überprüfbar sind. Viele weitere Reglementvorgaben sind für den Konstrukteur aber allgemein insofern beachtenswert, als dass sie durch Unfälle und Vorkommnisse in der Vergangenheit entstanden sind und so einen gewaltigen Erfahrungsschatz darstellen. Gewisse Passagen finden sich demnach auch bei nahe in allen Bestimmungen. Im vorliegenden Werk wollen wir nur dann auf einzelne Reglementaussagen zurückgreifen, wenn diese für die Sicherheit oder für das Verständnis einer gewählten Lösung relevant sind. Bei der Konstruktion eines Fahrzeugs muss ohnedies das aktuell (!) gültige Reglement herangezogen werden, will man vermeiden, dass der neue „Wunderwagen“ schon bei seinem ersten öffentlichen Auftritt eine schlechte Figur macht, weil er die technische Abnahme nicht schafft. Die FIA-Bestimmungen können im Einzelnen unter anderem über das Internet [2] gelesen oder heruntergeladen werden.

Die Abb. A.3–A.12 zeigen in loser Reihenfolge einige Beispiele von unterschiedlichen Rennfahrzeugen.

Abb. A.3 Indy-Car: Hochgeschwindigkeitsfahrzeug für Ovalkurse



Abb. A.4 FIA GT Fahrzeug



Abb. A.5 Tourenwagen: Fahrzeug basierend auf Serienteilen



Abb. A.6 Formel-1-Wagen: Monoposto mit freistehenden Rädern und offenem Cockpit



Abb. A.7 LMP1-Fahrzeug:
Langstreckenfahrzeug mit
offenem, zweisitzigen Cockpit
und umschlossenen Rädern



Abb. A.8 Kart: Monopo-
sto, keine beweglichen Teile
bei der Radaufhängung, kein
Differenzial, asymmetrischer
Aufbau



Abb. A.9 Seriennahes Cup-
Fahrzeug



Abb. A.10 Rallyefahrzeug:
Rallyefahrzeuge bewegen sich
auf befestigter und unbefestig-
ter Fahrbahn



Abb. A.11 Rennmotorrad



Abb. A.12 Raid-Lkw: Auch
Nutzfahrzeuge werden auf der
Rundstrecke und wie das abge-
bildete Fahrzeug im Gelände
für Wettbewerbe eingesetzt



2 Vergleich Rennsport-Serie *Comparison Racing vs. Mass Production*

Rennfahrzeuge sind praktisch gleich alt wie die Fahrzeuge selbst. Sobald der Mensch ein Fahrzeug erfunden hatte, fuhr er damit auch um die Wette. Damals waren Renn- und Alltagsfahrzeug baugleich. Im Laufe der Geschichte wurden jedoch Fahrzeuge speziell für Wettfahrten gebaut. Diese Rennfahrzeuge haben nur einen Zweck, nämlich Rennen zu gewinnen. Das bedeutet, eine bestimmte Strecke innerhalb von Reglementvorgaben möglichst schnell zu durchfahren und dabei nötige und erlaubte Wartungs- und/oder Reparaturarbeiten ebenso rasch zu bewältigen. Das Fahrzeug muss daher hohe Fahrleistungen bringen können (siehe Kap. B *Konzept*) sowie einfach und rasch zu reparieren sein. Tab. A.1 zählt einige Unterschiede zwischen Gebrauchsfahrzeugen und Rennfahrzeugen auf.

Bei Rennfahrzeugen werden einfache Lösungen angestrebt. Das Fahrzeug muss auch mit relativ einfachen Mitteln auf verschiedene Strecken- und Witterungsverhältnisse einstellbar sein. Erstere betreffen beispielsweise Bremsenkühlung und -verschleiß, Balance zwischen Luftwiderstand und Abtrieb, letztere Umgebungstemperaturen und Niederschlag.

Durch die unterschiedlichen Anforderungen ergeben sich zwangsläufig andere Arbeitsbedingungen für die Beteiligten im Motorsport im Vergleich zu ähnlichen Positionen in der Serienentwicklung. Von diesen werden unkonventionelle Arbeitszeiten, direktere Verantwortung und absolute Hingabe erwartet [5]. Entscheidungen müssen oft rasch getroffen werden und sind manchmal für Ingenieure von Serienherstellern nicht ganz nachzuvollziehen, weil sie aus der Erfahrung und aus dem Gefühl heraus kommen [5]. Viele große Automobilkonzerne stehen dennoch mit dem Motorsport in mehr oder weniger direkter Verbindung. Der Grund liegt u. a. in dem Marketingnutzen einer Motorsportbeteiligung. So stiegen die Absatzzahlen der damaligen DaimlerChrysler AG von 21,3 auf 36,3 %, seit dem das Formel-1-Team offiziell McLaren-Mercedes hieß [5].

Der Motorsport bietet je nach Formel auch die Möglichkeit neue Werkstoffe und Systeme einzusetzen und zu erproben. Die üblichen Zwänge der Serienentwicklung, wie Kostendruck, Einschränkung auf vorhandene oder bestimmte Fertigungseinrichtungen, stehen oftmals der Einführung neuer Techniken und Werkstoffen entgegen. Und nicht selten ist der Rennsport Triebfeder einer Entwicklung, die später in Serienfahrzeugen Eingang findet, Tab. A.2. Die oft gestellte Frage nach dem Einfluss des Motorsports auf den Fortschritt in der Serienentwicklung kann also nicht einfach beantwortet werden. Die Motorsportabteilungen auch großer Automobilkonzerne sind meist organisatorisch und geografisch losgelöst vom Einfluss des Werks. Die Arbeiten werden von Spezialisten durchgeführt und der direkte Einfluss des namensgebenden Herstellers ist in erster Linie finanzieller Natur. Andere Rennsportfirmen sind ohnedies kleine Hersteller, die völlig unabhängig von großen Autokonzernen arbeiten. Die Konstruktionen sind Sonderkonstruktionen, die ja gar nicht auf eine große Stückzahl abzielen. Dass dasselbe Personal Serien- und Motorsportprojekte vorantreibt kommt selten, aber doch vor. Die Baugruppe Motor liefert erfolgreiche Beispiele dafür. Wahrscheinlich allein deshalb, weil viele

Tab. A.1 Unterschiede in den Anforderungen von Straßenfahrzeugen zu Rennfahrzeugen

Anforderung	Straßenfahrzeug	Rennfahrzeug	Bem.
Sicherheit	hoch, Verkaufsargument	reglementbedingt	a
Komfort	hoch, Verkaufsargument	unwichtig; teilweise sogar unerwünscht	b
Styling	wichtig, Verkaufsargument	eher unwichtig, Bedeutung für Sponsoren und Privatfahrer	
Lebensdauer	10 bis 15 Jahre	1–3 Jahre, je nach Kategorie und Eigentümer	
Kosten	wichtig, Wirtschaftlichkeit	eher unwichtig, abhängig von Eigentümer	
Termine	wichtig, aber nicht fest	wichtig und unverschiebbar	c
Gesetzliche Anforderungen	viele, länderspezifisch	ein Reglement für jede Kategorie	
Planungszeitraum	3–5 Jahre und mehr	oft unter einem Jahr	
Produktionsvolumen	sehr hoch	Einzelstücke, Kleinstserien	
Wartung	ehrer selten, gesetzesbedingt	sehr häufig, praktisch vor und nach jedem Lauf	
Reparatur	in Fachwerkstätte unter relativ geringem Zeitdruck mit allen Werkzeugen und Maschinen, die erhältlich sind	an der Rennstrecke unter hohem Zeitdruck und nur mit den Mitteln, die erlaubt bzw. vorhanden sind	
Benutzer	Allgemeinheit, nicht speziell geschult	ausgewählter Personenkreis, meist professionelle Nutzer	
Bauartgeschwindigkeit	teilweise bis max. 250 km/h; durchschnittliche Einsatzgeschwindigkeit wesentlich geringer	über 350 km/h; höchste Einsatzgeschwindigkeiten angestrebt	
Nachtauglichkeit	wichtig: Beleuchtung, Instrumentenbeleuchtung	nur bei Rallyefahrzeugen und Langstreckenrennwagen	
Wintertauglichkeit	wichtig: Startverhalten, Heizung, Belüftung, Reifen, Schneeketten ...	außer bei Rallyefahrzeugen nicht erforderlich	

Bemerkungen:

- a) Vom Reglement geforderter Nachweis sicherheitsrelevanter Merkmale – Tendenz steigend
- b) Ein Rennfahrer möchte „das Fahrzeug spüren“, d. h. ein weich gepolsterter Sitz beispielsweise hindert den Piloten eines Formelwagens daran, den Grenzbereich zu erfahren.
- c) Der Produktionsbeginn (SOP: Start of Production) wird eventuell verschoben, das Rennwochenende nicht

Rennmotoren zunächst von vorhandenen Serienmotoren abgeleitet wurden und werden. Trotz dieser geringen direkten Beeinflussung der Serie durch den Motorsport, lassen sich indirekte Beeinflussung und Übernahme von Techniken nicht leugnen.

Tab. A.2 Der Motorsport als Schrittmacher für neue Werkstoffe und Technologien [7]

Jahr	Firma/Fahrzeug	Bemerkung
1895	Michelin	Fahrzeug mit Luftbereifung im Rennen Paris-Bordeaux-Paris
1899	Dürrkopp	Entwicklung eines kleinen Sportwagens, der zur Gewichtsreduzierung eine Aluminium-Karosserie besaß
1900	Maybach/Daimler	Für Jellinek gelieferter Daimler, den dieser dann nach seiner Tochter ‚Mercedes‘ nannte, hatte einen weitgehend aus Aluminium und Magnesium hergestellten Motor sowie einen Bienenwabenkühler aus Messing
1934	Auto-Union	Kurbelgehäuse und Zylinderköpfe aus Aluminiumguss gefertigt beim l6-Zylinder Motor
1962	Porsche	Titan für die Pleuel des Formel-1-Motors
1963	Porsche 904 GTS	Erstes deutsches Serienfahrzeug mit GFK-Außenhaut
1967	Porsche 910/8	Verwendung eines Aluminium-Gitter-Rohrrahmens mit partieller Sekundärfunktion der Rohre als Ölleitung
1971	Porsche 917	Verwendung von Magnesium für Gitter-Rohrrahmen
1981	Hercules/McLaren/Lotus	Tragende Struktur von Formel-1-Fahrzeugen erstmals aus kohlefaser verstärkten Kunststoffen (CFK)

Die tragende Struktur von zwei Seriensportwagen hat deutliche Anleihen aus dem Rennsport genommen.

So weisen der Porsche GT und der Mercedes McLaren CFK-Rahmen auf. Das Produktionsvolumen solcher CFK-Hohlprofilrahmen könnte auch gesteigert werden, so dass es zumindest für Nischenfahrzeuge wirtschaftlich interessant wird [10].

Das Kernpaketverfahren zum Gießen von Metallteilen wurde zunächst nur für Sondermodelle und Rennsport eingesetzt. Mittlerweile wurde es auch für Großserien weiterentwickelt.

Die Eigenschaften, die Schmierölen von Rennmotoren abverlangt werden, kommen nun in Pkw-Start-Stopp-Systemen zu Gute [12].

Sogar aus dem Bereich der naturgemäß kosten- und verwendungsorientierten Nutzfahrzeuge lassen sich Beispiele aufzählen. Volvo stellte 2014 mit dem I-Shift ein Doppelkupplungsgetriebe für schwere Lkw und MAN im selben Jahr mit seinem TGX-Motor ein Aggregat mit Top-Down-Kühlung vor.

In [6] werden auch dieselben Tendenzen bei Renn- und Serienfahrzeugentwicklung festgestellt:

- Mehrventilmotoren mit zunehmenden Marktanteilen,
- Aufgeladene Motoren ebenfalls mit zunehmenden Marktanteilen,
- Drehmoment/Leistung nimmt zu,
- Hubraum nimmt ab: Leistungsdichte wird besser,
- Aus kleiner werdenden leichteren Motoren wird mehr Drehmoment/Leistung erzielt,
- Verdichtungsverhältnis nimmt zu,

- Nenndrehzahl nimmt ab,
- Mitteldrücke steigen,
- Elektronik hat hohen Stellenwert auf breiter Front: Motor, Getriebe, Bremsen etc. und neuerdings die ganzheitliche Vernetzung von Systemen zu einem Gesamtsystem,
- Seit der Einführung von begrenzter Kraftstoffmenge und limitiertem Kraftstoffmassenstrom in einigen Rennserien (z. B. WEC, Formel 1) liegt der Fokus auch im Rennsport auf der Wirtschaftlichkeit des Antriebsstrangs.

Allgemein lässt sich feststellen, dass der Nutzen des Motorsports für die Serienentwicklung wohl im großen Maße vom Reglement abhängt und von der Organisation des Unternehmens. Reglements, die den Einsatz von Systemen verbieten, die in Serienfahrzeugen eingesetzt werden, verhindern einen vom Motorsport verursachten Fortschritt. Andererseits verbessert die gleichzeitige Entwicklung von Serien- und Motorsportaggregaten durch ein Team gleichermaßen die Zuverlässigkeit wie die Rennsporttauglichkeit [8]. Man stellt auch fest, dass mit der zunehmenden Forderung nach Zuverlässigkeit, z. B. für Langstreckenrennen, sich die Lösungen deutlich an die Serienlösungen annähern, was natürlich einen größeren Nutzen für beide Seiten nach sich zieht.

Das jüngste Beispiel dafür, wie ein Transfer zwischen Motorsport und Serienentwicklung bewusst forciert wurde liefert der Le Mans Sieger 2006: Audi R10 TDI. Aus Marketinggründen und aus dem einfachen Grund, weil es bis dato äußerst wenig Erfahrung mit Dieselrennmotoren gibt, lieferte die Serienentwicklung maßgebliche Inputs bei der Konzeption des Rennmotors [11].

Dass sich nicht alle Lösungen direkt aus dem Rennsport für die Serie übernehmen lassen, liegt vielfach auch daran, dass die Entwicklungsziele nicht dieselben sind. Bei einem Serienprodukt steht am Anfang zwar auch die Optimierung der Funktion im Vordergrund und wird später abgelöst durch die Suche nach der besten Gestalt (Festigkeit und Materialverbrauch), aber letztendlich steht die wirtschaftliche Herstellung und ein ebensolcher Betrieb im Vordergrund. Die geforderte Alltagstauglichkeit verlangt von Serienprodukten auch eine einfache und sichere Bedienung ohne Spezialausbildung.

Für die Zukunft ergibt sich wahrscheinlich ein neues Betätigungsfeld auf der Seite des Rennsports, das in der Serienentwicklung schon alltäglich ist, nämlich durch den Gedanken des Umweltschutzes. Wettbewerbe, bei denen ein minimaler Kraftstoffverbrauch im Vordergrund steht, gibt es bereits. Wettbewerbe, bei denen Fahrzeuge mit alternativen Antrieben konkurrieren sind in Diskussion. Energie-Rückgewinnungssysteme (KERS *kinetic energy recovery systems*), mit denen die Bremsenergie für nachfolgende Beschleunigung genutzt werden kann, sind bereits entwickelt und bei einigen großen Rennserien im Einsatz (Formel 1, WEC). Solche Systeme zur Rekuperation (Rückgewinnung) der Bremsenergie sind insbesondere für Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb interessant, helfen sie doch den Energiebedarf der Batterien zu verringern. In den Rennserien, in denen die Wirtschaftlichkeit des Antriebsstrangs über Sieg oder Niederlage entscheidet, profitieren Verbrennungsmotoren, elektrische Maschinen und Energiespeicher gleichermaßen vom Entwicklungsziel „Verluste verringern“. Hybridantriebe, also solche Antriebssträn-

ge bei denen Verbrennungsmotoren und elektrische Maschinen zusammenwirken, haben anfangs in der Formel 1 und WEC sogar umgekehrt von den Erfahrungen aus der Pkw-Serienentwicklung profitiert. Jetzt, wo in der Formel E einzelne Teams die Entwicklung eigener Antriebskonzepte in Angriff nehmen, werden bestimmt die Leistungsgrenzen von solchen Systemen inklusive Energiespeicher (Batterie, Supercaps,...) verschoben werden. Die Vehemenz und Zielstrebigkeit, mit der im Motorsport Entwicklungen vorangetrieben werden, ist sicher für die Serie von unschätzbarem Wert.

3 Entwicklungsablauf *Development Process*

Der zeitliche Ablauf der Fahrzeugentwicklung ist gänzlich durch den Veranstaltungskalender und der – mit Ausnahme von Rallye- und Raid-Fahrzeugen – durch die warme Jahreszeit bestimmt.

Ein Formel-1-Team entwickelt und baut jährlich ein neues Fahrzeug, das kaum mehr als 5 bis 10 Prozent der Komponenten des Vorgängerwagens enthält (Abb. A.13). Dies ergibt sich durch Optimierungen und das Reglement kann gegenüber dem Vorjahr stark geändert worden sein. Ein Formel-1-Fahrzeug besteht aus mehr als 3500 Komponenten [4]. Tab. A.3 fasst typische Eckdaten verschiedener Fahrzeugentwicklungen zusammen.

Die wichtigsten Baugruppen eines mehrspurigen Rennfahrzeugs finden sich bei allen Typen und im Wesentlichen ist auch kein Unterschied im Aufbau festzustellen, wenn man Fahrzeuge mit freistehenden und umschlossenen Rädern betrachtet, Abb. A.14 und A.15. An das hintere Chassisende schließt sich der Motor an, an dem wiederum das Getriebe befestigt ist. Beide bilden die tragende Struktur des Fahrzeughecks, das das Fahrwerk hinten

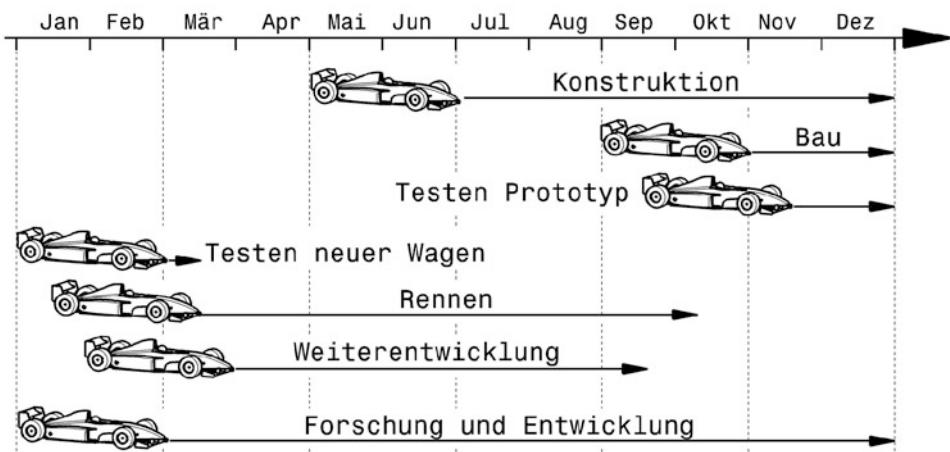


Abb. A.13 Aktivitäten eines Formel-1-Teams im Jahreslauf, nach [4]. Die Konstruktion und der Bau eines neuen Fahrzeuges beanspruchen kaum sechs Monate

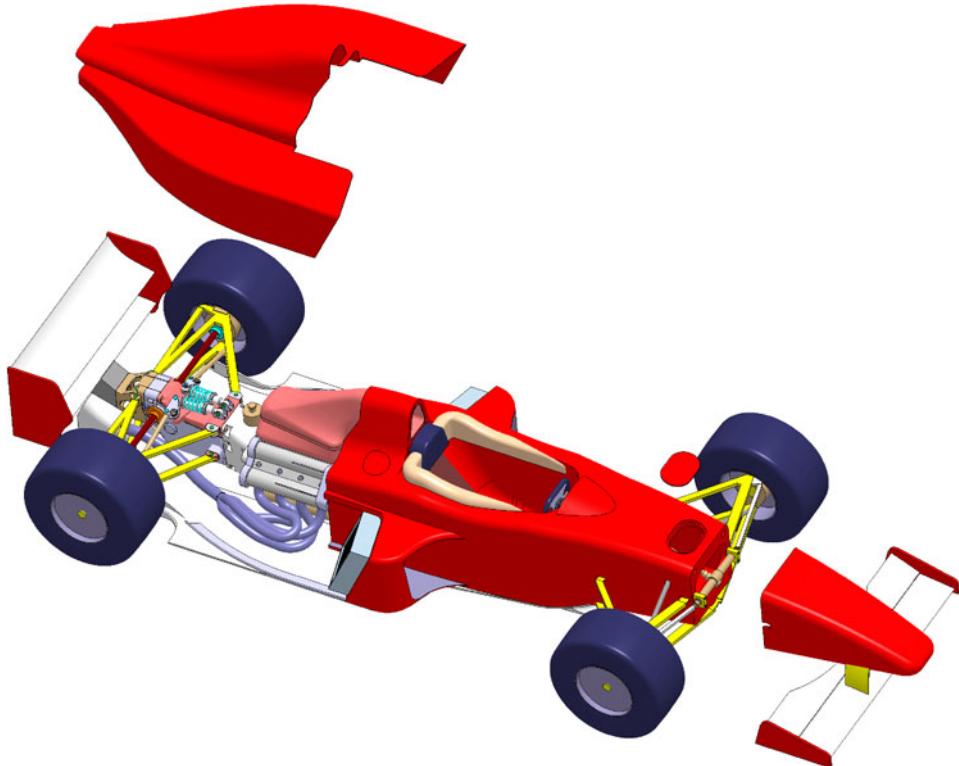


Abb. A.14 Aufbau eines Formel-Wagens. Das mittig angeordnete Cockpit schmiegt sich im Bereich der Beine möglichst eng an den Fahrer an. Zwischen Fahrer und Motor ist der Tank untergebracht. Anschließend an den Motor ist das Getriebe angeflanscht, das auch Teile der Hinterradaufhängung aufnimmt. Die Wärmetauscher befinden sich in seitlichen Kästen neben dem Cockpit. Den Fahrzeugbug bildet eine an das Cockpit angesetzte Nase, an die der Frontflügel angebracht ist. Ein Unterboden schließt den Wagen nach unten ab und erzeugt einen Teil des aerodynamischen Abtriebs

aufnimmt. Seitlich neben dem Cockpit befinden sich Wärmetauscher für Motorkühlung und eventuell Ladeluftkühlung. Das vordere Chassisende bildet ein nasenförmiger Bug, der das Crashelement darstellt. Unterschiede zwischen Formelwagen und Sportwagen ergeben sich durch Abmessungen und Ausführungen des Cockpits (einsitzig, zweisitzig, offen, geschlossen) und durch die Gestalt der Außenhaut.

Die wesentlichen Baugruppen von Rennfahrzeugen sind im Einzelnen:

- Cockpit: Nimmt den Fahrer auf und schützt ihn bei Unfällen.
- Rahmen (Chassis): Beherbergt das Cockpit, nimmt sämtliche Kräfte auf und verbindet weitere Hauptbaugruppen miteinander.