

Handbuch
Rennwagentechnik

SCHAEFFLER

Michael Trzesniowski

Fahrwerk

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, Nutzbremse (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

Fahrwerk

Michael Trzesniowski
Institut für Fahrzeugtechnik
FH Joanneum
Graz, Österreich

Handbuch Rennwagentechnik
ISBN 978-3-658-15544-5
DOI 10.1007/978-3-658-15545-2

ISBN 978-3-658-15545-2 (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 „Fahrwerk“ 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 *Contents*

A	Reifen und Räder <i>Tyres and Wheels</i>	1
1	Begriffe <i>Terms</i>	2
2	Reifen <i>Tyres</i>	9
2.1	Anforderungen <i>Requirements</i>	9
2.2	Grundlagen <i>Basics</i>	10
2.3	Einfluss auf das Fahrverhalten <i>Influence on Driving Behaviour</i>	13
2.4	Wahl der Reifengröße <i>Choosing of Tyres</i>	45
2.5	Reifendaten <i>Specifications</i>	47
2.6	Reifenarten <i>Types of Tyres</i>	47
2.7	Ventil <i>Valve</i>	48
3	Räder <i>Wheels</i>	50
3.1	Anforderungen <i>Requirements</i>	50
3.2	Bezeichnungen von Rädern <i>Designation of Wheels</i>	50
3.3	Arten von Rädern <i>Types of Wheels</i>	52
3.4	Wahl der Radgröße <i>Choosing of Tyres</i>	55
4	Radbefestigung <i>Wheel Mounting</i>	58
	Literatur <i>References</i>	66
B	Radaufhängung <i>Suspension</i>	69
1	Funktion <i>Function</i>	69
2	Begriffe und kinematische Größen <i>Terms</i>	74
2.1	Begriffe	75
2.2	Entwicklungsziele <i>Design Goals</i>	93
3	Teile der Radaufhängung <i>Parts of a Suspension</i>	112
3.1	Radaufnehmende Elemente <i>Wheel Carrying Elements</i>	115
3.2	Verbindungsglieder <i>Linkage</i>	115
3.3	Gelenke <i>Joints</i>	118
3.4	Radlager <i>Wheel Bearing</i>	122
3.5	Berechnung <i>Calculation</i>	138
	Literatur <i>References</i>	143

C	Federn und Dämpfer <i>Springs and Dampers</i>	145
1	Federung <i>Springs</i>	145
1.1	Funktion und Auswahl <i>Function and Choice</i>	145
1.2	Betätigung der Feder <i>Spring Actuation</i>	153
1.3	Federberechnung <i>Spring Calculation</i>	155
2	Dämpfer <i>Damper</i>	160
2.1	Schwingungen <i>Oscillations</i>	160
2.2	Schwingungsdämpfer <i>Dampers, Shock Absorbers</i>	168
3	Stabilisatoren <i>Stabilisers, Anti-Roll Bars, AE: Sway Bars</i>	192
3.1	Berechnung <i>Calculation</i>	195
3.2	Gestaltung von Stabilisatoren <i>Design of Anti-Roll Bars</i>	202
3.3	Beispiele von Stabilisatoren <i>Examples of Anti Roll Bars</i>	208
	Literatur <i>References</i>	211
D	Bauformen von Achsen <i>Types of Suspensions</i>	213
1	Pkw-Achsen <i>Suspensions of Passenger Cars</i>	214
2	Achsen von Rennfahrzeugen <i>Racecar Suspensions</i>	215
2.1	Doppelquerlenkerachse <i>Double Wishbone Suspension</i>	215
2.2	Bauteile von Doppelquerlenkerachsen <i>Parts of Double Wishbone Axles</i>	227
2.3	McPherson-Achse <i>McPherson Axle</i>	267
2.4	Starrachse <i>Beam Axle</i>	270
3	Beispiele von Radaufhängungen von Rennfahrzeugen <i>Examples of Race Car Suspensions</i>	270
4	Daten <i>Data</i>	278
	Literatur <i>References</i>	279
E	Lenkung <i>Steering</i>	281
1	Anforderungen <i>Requirements</i>	281
2	Auslegung <i>Terms</i>	283
2.1	Lenkwinkel, Spurdifferenzwinkel <i>Steer Angle, Ackermann Angle</i>	284
2.2	Kenngrößen der Lenkgeometrie <i>Parameters of Steering Geometry</i>	290
2.3	Lenkübersetzung <i>Steering Ratio</i>	298
2.4	Lenkunterstützung <i>Steering Assistance</i>	302
3	Lenkwelle <i>Steering Shaft</i>	303
4	Lenkgetriebe <i>Steering Gear</i>	312
5	Übertragungseinrichtung und Achslager <i>Transmitting Devices and Axle Bearing</i>	322
6	Lenkungsschwingungen <i>Shimmy (Vibrations of the Steering System)</i>	338
7	Allradlenkung <i>Four Wheel Steering</i>	339
	Literatur <i>References</i>	340

F Bremsanlage <i>Braking System</i>	343
1 Allgemeines <i>General</i>	343
2 Anforderungen an Bremsanlagen <i>Brake System Requirements</i>	346
3 Physikalische Grundlagen <i>Physical Basics</i>	346
4 Bremsenbauarten und Anordnungen <i>Brake Constructions and Arrangements</i>	359
5 Kennwerte <i>Parameters</i>	362
6 Bauteile von Bremsanlagen <i>Parts of Braking Systems</i>	369
7 Bremseneinbau <i>Brake Installation</i>	395
8 Auslegungskriterien von Bremsanlagen <i>Dimensioning Criteria</i>	398
9 Normen <i>Standards</i>	399
Literatur <i>References</i>	399
Anhang – Glossar <i>Glossary</i>	401
Sachwortverzeichnis <i>Index</i>	419

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>B_o</i>	Wagenkastenschwerpunkt <i>body centre of gravity</i>
<i>C</i> bis <i>G</i>	allg. Bezugspunkte <i>reference points, in general</i>
<i>M</i>	Mittelpunkt <i>centre point</i>
<i>O</i>	Nickpol <i>pitch centre</i>
<i>P</i>	Wank- bzw. Rollpol <i>Roll centre</i>
<i>R_o</i>	Wank- bzw. Rollzentrum <i>roll centre</i>
<i>T</i> und <i>U</i>	Spurstangen- und Gestänge-Gelenkpunkte <i>tie rod or linkage point</i>
<i>U_f</i> bzw. <i>U_r</i>	Radmittelpunkt, vorn bzw. hinten <i>wheel centre point, front or rear</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. $F_{W,Z}$... 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	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>
a	angetrieben (nur ein Rad) <i>driven, accelerating (one wheel only)</i>
A	Ackermannwinkel <i>Ackermann steering angle</i>
ax	axial <i>axial</i>
b	Biege-, Biegung <i>bending</i>
b	bremsend (nur ein Rad) <i>braking (one wheel only)</i>
B	bremsend (eine Achse) <i>braking (one axle)</i>
Ba	Stabilisatorrücken <i>stabiliser bar</i>
Bd	Bremsscheibe <i>brake disc</i>
Bl	Stabilisatorschenkel <i>blade of anti-roll bar</i>
Bo	Wagenkasten <i>body</i>
D	Dämpfung <i>damping</i>
dyn	dynamisch <i>dynamic</i>
e	elastizitätsbedingt <i>due to the elasticity (compliances)</i>
Ex	Überschuss- <i>excess</i>
f	vorn <i>front</i>
fr	Reibung <i>friction</i>
H	Lenkrad <i>steering wheel</i>
h	Haupt- <i>master-</i>
hyd	hydraulisch <i>hydraulic</i>
i	kurveninnen, innen <i>inner wheel, inner</i>
k	kinematisch (infolge Radhubkinematik) <i>kinematic (due to wheel travel)</i>
krit	kritisch <i>critical</i>
L	Luft- <i>aerodynamic</i>
l	links <i>left, left side</i>
lo	Gleiten bzw. Blockieren <i>slipping, lock resp.</i>
ls	Verlust <i>loss</i>

m bzw. med	mittel <i>middle, mean</i>
max	maximal bzw. zul. Größtwert <i>maximum permissible</i>
min	minimal <i>minimum</i>
o	kurvenaußen, außen <i>outer wheel, outer</i>
p	Fahrer <i>driver</i>
Pi	Kolben <i>piston</i>
pl	Konstruktionslage (teilbeladen) <i>design position (partial loaded)</i>
Pr	Kolbenstange <i>piston rod</i>
r	hinten <i>rear</i>
R	Rollen des Rades (Abrollen) <i>rolling (wheel)</i>
rad	radial <i>radial</i>
Rd	Stab bzw. Stange <i>rod, linkage resp.</i>
Re	Rest- <i>residual</i>
ref	Bezug- <i>reference ~</i>
rs	rechts <i>right, right side</i>
rsl	resultierend <i>resulting</i>
S	Lenken <i>steering</i>
S	Stabilisator <i>anti roll bar</i>
Sg	Lenkgetriebe <i>steering gear</i>
Sp	Feder <i>spring</i>
t	gesamt bzw. Nennwert <i>total, nominal value resp.</i>
T	turboaufgeladener Motor <i>turbocharged engine</i>
tan	tangential <i>tangent</i>
ts	Torsion- <i>torsional</i>
U	ungefederte Masse bzw. Achse <i>unsprung weight or axle</i>
V	(Gesamt-) Fahrzeug <i>overall vehicle</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 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>
Δb	Spurweitenänderung <i>track-change</i>
d bzw. D	Durchmesser (allgemein) <i>diameter, in general</i>
D_s	Spurkreisdurchmesser (vorn) <i>track circle diameter (front)</i>
e	Einpresstiefe Rad <i>wheel offset</i>

e_R	Vertikalkraftversatz am rollenden Reifen <i>offset of vertical force at rolling tyre</i>
f	Schrägfederungsweg <i>diagonal spring travel</i>
h bzw. H	Höhe bzw. Hubhöhe (allgemein) <i>height, in general</i>
h_{Bo}	Höhe des Wagenkastenschwerpunktes <i>height of body centre of gravity</i>
$h_{Ro,f}$ bzw. $h_{Ro,r}$	Höhe des Rollzentrums der Vorderachse bzw. der Hinterachse <i>height of roll centre at front or rear axle</i>
h_{ref}	Bodenabstand <i>ride height</i>
h_{Sg}	Hub des Lenkgetriebes (Zahnstangen-Lenkgetriebe) <i>travel of steering gear (rack and pinion)</i>
h_V	Höhe des Fahrzeugschwerpunkts <i>height of the vehicle center of gravity</i>
j	Abstand der Lenkachsen am Boden <i>distance between the two steering axis at the ground</i>
l	Radstand <i>wheelbase</i>
$l_{Bo,f}$ bzw. $l_{Bo,r}$	Abstand des Wagenkastenschwerpunkts zu Mitte Vorder- bzw. Hinterachse <i>distance of body centre of gravity to the middle of the front or rear axle</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>
n_τ	Nach- bzw. Vorlaufversatz <i>caster offset at wheel centre</i>
$n_{\tau,k}$	kinematischer Seitenkrafthebelarm bei Nachlauf <i>kinematic lateral force lever arm due to caster</i>
$n_{\tau,t}$	Seitenkrafthebelarm, insgesamt <i>lateral force arm, in total</i>
OD_T	Außendurchmesser des Reifens <i>outer diameter of the tyre</i>
q	Lenk- bzw. Hochkrafthebelarm, Radlasthebelarm <i>force lever of vertical force</i>
r	Lenker-, Spurhebellänge bzw. Hebelarm (allg.) <i>effective control arm length or force lever in general</i>
r_a	Stör-, Längs- bzw. Antriebskrafthebelarm <i>deflection force lever arm</i>
r_{dyn}	dynamischer Reifenhalmmesser bei 60 km/h <i>force dynamic rolling radius of the tyre at 60 kph</i>
r_{stat}	statischer Reifenhalmmesser (stehendes Fahrzeug) <i>static loaded radius of the tyre</i>
r_T	Seitenversatz in der Reifenaufstandsfläche kurveninnen (+) bzw. -außen (-) <i>force offset in the centre of tyre contact (+) inside or (-) outside of curve</i>
r_Δ	statische Vorspur eines Rades <i>static toe-in (one wheel only)</i>

$r_{\Delta,t}$	statische Vorspur beider Räder einer Achse <i>total static toe-in (both wheels of one axis)</i>
r_{σ}	Lenkrollhalbmesser (statisch) <i>scrub radius, static</i>
$r_{\sigma,t}$	gesamter Lenkrollhalbmesser <i>total transverse offset at ground</i>
$r_{\tau,e}$	elastokinematischer Nachlauf <i>elastokinematic caster offset at ground</i>
$r_{\tau,k}$	kinematische Nach- bzw. Vorlaufstrecke <i>kinematic caster offset at ground</i>
$r_{\tau,t}$	gesamte Nachlaufstrecke des Rades <i>total caster offset at ground</i>
$r_{\tau,T}$	Reifennachlauf <i>pneumatic trail</i>
R	Bahnradius <i>path radius</i>
s	Weg bzw. Hub (allg.) <i>travel or stroke, in general</i>
s_{Re}	Resthubweg beim Ein- bzw. Ausfedern eines Rades <i>residual wheel travel</i>
s_t	gesamter Radhubweg („Federweg“) <i>total wheel travel</i>
s_T	statische Reifeneindrückung <i>static tyre deflection</i>
s_1	Hubweg des Rades beim Einfedern <i>wheel travel in jounce</i>
s_2	Hubweg des Rades beim Ausfedern <i>wheel travel in rebound</i>
t	Dicke, Wandstärke (wall) <i>thickness</i>

Winkel *Angle (in °)*

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>
χ	Anfahrabstützwinkel bzw. Schrägfederungswinkel <i>acceleration reaction support resp. diagonal springing angle</i>
δ	Lenkwinkel <i>steered angle</i>
$\delta_{A,o}$	Lenkwinkel, kurvenaußen, Sollwert nach Ackermann <i>Ackermann steer angle, nominal value outer wheel</i>
δ_H	Lenkradwinkel <i>steering wheel angle</i>
δ_m	mittlerer Lenkwinkel <i>mean steer angle</i>
δ_i bzw. δ_o	Lenkwinkel, Istwert kurveninnen bzw. -außen <i>actual steer angle, inner or outer wheel</i>
δ_{Sg}	Drehwinkel des Lenkstockhebels <i>turn angle of steering-column stalk</i>
$\delta_{V,0,t}$	statischer Vorspurwinkel beider Räder <i>total static toe angle</i>
$\Delta\delta$	Lenk- bzw. Spurdifferenzwinkel (Istwert) <i>differential steer angle (actual value)</i>

$\Delta\delta_A$	Lenkdifferenzwinkel nach Ackermann (Sollwert) <i>differential steer angle according to Ackermann (nominal value)</i>
$\Delta\delta_F$	Lenkabweichung (Lenkfehler) <i>steering flaw</i>
$\Delta\delta_{H,e}$	Lenkwinkeländerung am Lenkrad durch Elastizitäten <i>part of steering-wheel angle due to compliances</i>
$\Delta\delta_H$	Lenkwinkelbereich am Lenkrad <i>range of steering wheel angle</i>
ε bzw. ε_W	Sturzwinkel eines Rades <i>camber angle</i>
ε	Bremsabstützwinkel <i>brake reaction support angle</i>
φ	Wankwinkel des Wagenkastens <i>body roll angle</i>
λ	Spurhebelwinkel <i>steering arm angle</i>
σ	Spreizung <i>kingpin inclination angle</i>
τ	Nach- bzw. Vorlaufwinkel der gelenkten Vorderräder <i>caster angle of the steered front wheels</i>

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

m	Masse, Gewicht bzw. Last, allg. <i>mass, weight or load in general</i>
m_{Bo}	Gewicht des Aufbaus <i>vehicle body weight</i>
$m_{Bo,f}$ bzw. $m_{Bo,r}$	Gewichtsanteil des Aufbaus über der Vorder- bzw. Hinterachse <i>part of body mass on front or rear</i>
$m_{U,f}$ bzw. $m_{U,r}$	Gewicht der (ungefederten) Achsmassen, vorn bzw. hinten <i>unsprung axle mass, front or rear</i>
m_V	Eigengewicht des fahrbereiten Fahrzeugs <i>weight of driveable vehicle</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>
m_W	Gewicht eines Rades <i>weight of one wheel</i>
$m_{1,Bo,f}$ bzw. $m_{1,Bo,r}$	Gewichtsanteil des Aufbaus über nur einer Achsseite, vorn bzw. hinten <i>part of body mass on one side of the front or rear axle</i>

Kräfte *Forces (in N)*

ΔF	Kraftänderung <i>change of force</i>
F_D	Dämpfungskraft <i>damping force</i>
F_H	Lenkradkraft <i>steering-wheel force</i>
$F_{L,Z}$	aerodynamische Abtriebskraft <i>aerodynamic downforce</i>
F_O	Kraft am Nickpol <i>force at pitch centre</i>
F_{Pi}	Kolbenstangen-Ausfahr- bzw. Hilfskraft <i>piston rod extensive or aid force</i>
F_{rsl}	resultierende Kraft <i>resulting force</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_T	Spurstangen- bzw. Stabkraft <i>tie rod or push rod force</i>
$F_{V,X,B}$	Bremskraft, angreifend im Schwerpunkt des Gesamtfahrzeugs <i>brake force at the centre of gravity of the vehicle</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>
$F_{W,X,b}$	Bremskraft am Aufstandspunkt eines Rades <i>brake force in the centre of tyre contact of one wheel</i>
$F_{W,X,B,f}$ bzw. $F_{W,X,B,r}$	Bremskraft beider Räder vorne bzw. hinten <i>brake reaction force to the front or rear axle</i>
$F_{T,Y,\varepsilon}$	Sturzseitenkraft <i>lateral force due to camber</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>
$\Delta F_{V,Z}$	dynamische Achskraft- bzw. Achslastverlagerung (beide Räder) <i>axle load transfer</i>
$F_{V,Z,f}$ bzw. $F_{V,Z,r}$	Achslast vorn bzw. hinten <i>axle load front or rear</i>
$F_{V,Z,t}$	Gewichtskraft des Gesamtfahrzeugs <i>cross vehicle weight</i>
$F_{W,Z}$	Hochkraft am Radaufstandspunkt (Radlast) <i>vertical force at the centre of tyre contact</i>
$\Delta F_{W,Z}$	Radlaständerung (nur ein Rad) <i>change of vertical force at one wheel</i>

Momente *Torques and Moments (in Nm)*

M_a bzw. M_A	Antriebsmoment an einem Rad (a) bzw. einer Achse (A) <i>driving torque to one wheel (a) or axle (A)</i>
M_b bzw. M_B	Bremsmoment an einem Rad (b) bzw. einer Achse (B) <i>braking torque applied to one wheel (b) or axle (B)</i>
M_H	Lenkradmoment <i>steering wheel torque</i>
M_W	Reifenrückstellmoment (durch Seitenkraft) <i>self-aligning torque</i>
M_{fr}	Reibmoment <i>moment of friction</i>
M_{Sg}	Moment am Lenkgetriebe <i>torque at steering gear</i>
T	Torsionsmoment allgemein <i>torsional moment in general</i>

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>
c_S	Rate des Stabilisators selbst, bei wechselseitiger Federung <i>rate of the anti roll bar at reciprocal springing</i>
c_{SP}	Federrate <i>static rate of the spring</i>
c_T	Reifenfederrate <i>tyre rate</i>

(in Nm/°)

c_α	Federrate einer Drehstabfeder allgemein <i>rate of torsional bar</i>
$c_{Ro,S,f}$	auf die Vorderachse bezogene Wanksteifigkeit des Stabilisators vorne <i>roll stiffness of anti roll bar acting on front axle</i>
$c_{Ro,Sp,f}$	auf die Vorderachse bezogene Wanksteifigkeit der Aufbaufeder vorne <i>roll stiffness of suspension springs acting on front axle</i>
$c_{Ro,f}$	gesamter Wankwiderstand der Vorderachse <i>roll stiffness front axle</i>

Dimensionslose Kennzahlen

c_A	Abtriebsbeiwert <i>downforce coefficient</i>
c_W	Luftwiderstandsbeiwert <i>drag coefficient</i>
D	Dämpfung <i>damping ratio</i>
i_m	Achslastverhältnis vorne/hinten <i>axleload ratio front/rear</i>
i_S	kinematische Lenkübersetzung <i>overall kinematic steering ratio</i>
i_{Sg}	Übersetzung im Lenkgetriebe selbst <i>steering gear ratio</i>
i_{Sp}	Übersetzung Rad zu Feder <i>ratio of spring to wheel</i>
i_T	Lenkgestängeübersetzung <i>ratio of steering linkage</i>
j	Anzahl allgemein <i>number in general</i>
k	Korrekturfaktor für Reifensteifigkeit <i>correction factor for tyre stiffness</i>
k_B	Bremsenkennwert <i>brake coefficient</i>
k_p	Korrekturfaktor für Reifenfülldruck wegen Radsturz <i>correction factor for tyre pressure because of camber</i>
k_Q	Korrekturfaktor für Tragfähigkeit wegen Radsturz <i>correction factor for load capacity because of camber</i>

k_R	Rollwiderstandszahl bei Geradeausfahrt <i>rolling resistance coefficient</i>
$k_{R,0}$	Rollwiderstandsbeiwert auf der Prüfstandstrommel <i>rolling resistance coefficient measured on a tyre test rig</i>
k_χ	Anfahrickausgleich <i>anti-squat coefficient</i>
$k_{\varepsilon,f}$ bzw. r	Bremsnickausgleich vorne bzw. hinten <i>anti-dive coefficient</i>
$S_{W,X,a}$ bzw. $S_{W,X,b}$	Umfangsschlupf beim Beschleunigen bzw. Bremsen <i>longitudinal slip under accelerating or braking</i>
u	Zähnezahlverhältnis <i>gear ratio</i>
z	Abbremsung <i>braking factor</i>
η_G	Gütegrad der Seitenkraftverteilung <i>efficiency of lateral force proportioning</i>
Φ_f bzw. Φ_r	Vorder- bzw. Hinterachsbremskraftanteil <i>brake force fraction front or rear</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>

Sonstige Größen

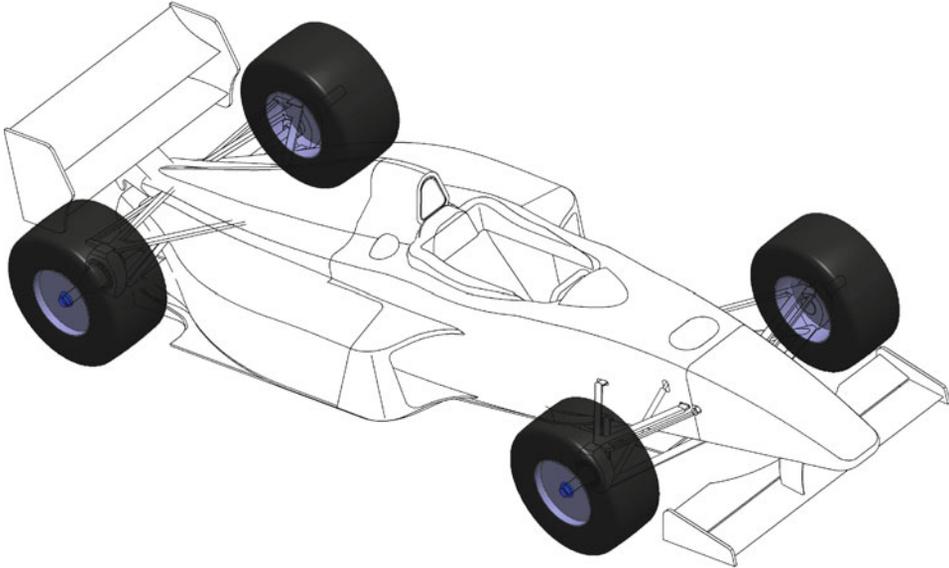
θ	Celsius-Temperatur <i>Celsius temperature</i> ($^{\circ}\text{C}$)
ω	Kreisfrequenz, Winkelgeschwindigkeit <i>circular frequency</i> (s^{-1})
ρ	Dichte allgemein <i>density</i> (kg/m^3)
ρ_L	Dichte der Luft <i>density of air</i> (kg/m^3)
σ	(Normal)Spannung <i>stress</i> (N/m^2)
τ	Schubspannung <i>shear stress</i> (N/m^2)
Δ	Differenz <i>difference</i>
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, <i>E</i> -Modul <i>modulus of elasticity, Young's modulus</i> (N/mm^2)
f	Frequenz <i>frequency</i> (Hz)
g	Erdbeschleunigung <i>acceleration due to gravity</i> (m/s^2)
G	Schubmodul <i>shear modulus</i> (N/m^2)
I	axiales Flächenträgheitsmoment <i>area moment of inertia</i> (mm^4)
J	Massenträgheitsmoment <i>dynamic moment of inertia</i> (kgm^2)
k_{ap}	aperiodische Dämpfung <i>critical damping</i> (Ns/m)

k_D	Dämpfungsfaktor <i>damping value</i> (Ns/m)
N	spezifische Bremsleistung <i>specific stopping power</i> (kW/cm ²)
n	Dreh- bzw. Schwingungszahl <i>revolutions per minute or vibration frequency</i> (min ⁻¹)
P	Leistung <i>power</i> (W)
p	Druck <i>pressure</i> (N/cm ²)
P_e	effektive Motorleistung <i>effective power of engine</i> (kW)
P_{1s}	Verlustleistung <i>power loss</i> (W)
p_T	Luftdruck im Reifen <i>tyre pressure</i> (bar ¹)
p_0	Umgebungsdruck (Luftdruck) <i>ambient pressure</i> (bar)
R_e	Streckgrenze <i>yield strength</i> (N/m ²)
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)
V	Volumen <i>volume</i> (l = dm ³)
v_D	Kolbengeschwindigkeit im Stoßdämpfer <i>piston velocity in shock absorber</i> (m/s)
v_V bzw. v_X	Fahrzeuggeschwindigkeit <i>longitudinal velocity</i> (m/s bzw. km/h)
v_W	Radumfangsgeschwindigkeit <i>circumferential tyre velocity</i> (m/s)
W	Arbeit <i>work</i> (J)

Sonstige Abkürzungen

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.



Während Räder noch wegen ihrer ästhetischen Wirkung im allgemeinen Blickfeld stehen, wird den Reifen von den Zuschauern an der Rennstrecke kaum Beachtung geschenkt. Auch bei Serienfahrzeugen sind die Verhältnisse nicht anders. Untersuchungen haben gezeigt, dass kaum ein Lenker den Fülldruck seiner Reifen regelmäßig kontrolliert. Dabei zählen beide Teile zu den ungedeckelten Massen, sind sicherheitsrelevant und der Reifen ist mit Abstand das wichtigste (mechanische) Einzelbauteil an einem Fahrzeug und besonders an einem Wettbewerbsfahrzeug. Die Reifen übertragen sämtliche Kräfte auf den Wagen, die seine gewünschte Lage zur Fahrbahn sicherstellen (die aerodynamischen Kräfte unterstützen ihn hierbei bloß bzw. wirken sogar störend in Fall eines Auftriebs an den Achsen oder bei Seitenwind), und sind somit das begrenzende Glied im Gesamtsystem Rennfahrzeug. Abgesehen davon sind die Reifen zugleich das am schwierigsten zu beherrschende Bauteil, weil es großen Deformationen unterworfen ist und zusätzlich seine Eigenschaften stark mit der Temperatur und mit dem Verschleißzustand, also bereits während eines Rennens, ändert.

1 Begriffe *Terms*



Reifen werden durch den Außendurchmesser, die Querschnittsbreite, den Felgendurchmesser und in vielen Fällen durch die Querschnittshöhe charakterisiert, Abb. A.1. Die Betriebsbreite $b_{T,max}$ kann bis zu 6 % größer als die Querschnittsbreite sein. Unter Last federt der Reifen ein (statische Reifeneindrückung). Deshalb ist der statische Halbmesser etwas kleiner als die Hälfte des Außendurchmessers. Beim raschen Rotieren des Reifens im Betrieb wächst der Halbmesser an, vgl. Abb. A.11. Bei 60 km/h wird dieser Wert als Vergleichsgröße herangezogen und dynamischer Rollradius genannt. Er wird direkt aus der Anzahl der Radumdrehungen und der zurückgelegten Strecke bestimmt.¹

Reifenbezeichnungen *Tyre Designation*. Die Reifenkennzeichnung nach europäischen Normen und Gesetzen gilt für Pkw- und Lkw-Reifen bis 270 km/h und wird auf der Seitenwand des Reifens ausgewiesen, Abb. A.2.

Bezeichnungsbeispiel für die Größenangabe und Tragfähigkeit eines Radialreifens:

245/40 R 18 88 Y mit: 245 = Breite b_T des Neureifens in mm auf der Messfelge bei einem Fülldruck von 1,8 bar
 40 = Querschnittsverhältnis in %
 R = Reifenbauart: R = Radialreifen/2
 = Diagonalreifen/D = Notrad
 18 = Felgendurchmesser d_{nenn} in Zoll
 88 = Lastindex, legt die Tragfähigkeit fest, siehe Tab. A.1: max. 560 kg bei 2,5 bar Fülldruck
 Y = Geschwindigkeitssymbol, siehe Tab. A.2: Bis 300 km/h.

¹ Genaueres siehe Handbuch Rennwagentechnik, Bd. 2, Kap. D Auslegung des Antriebsstrangs.

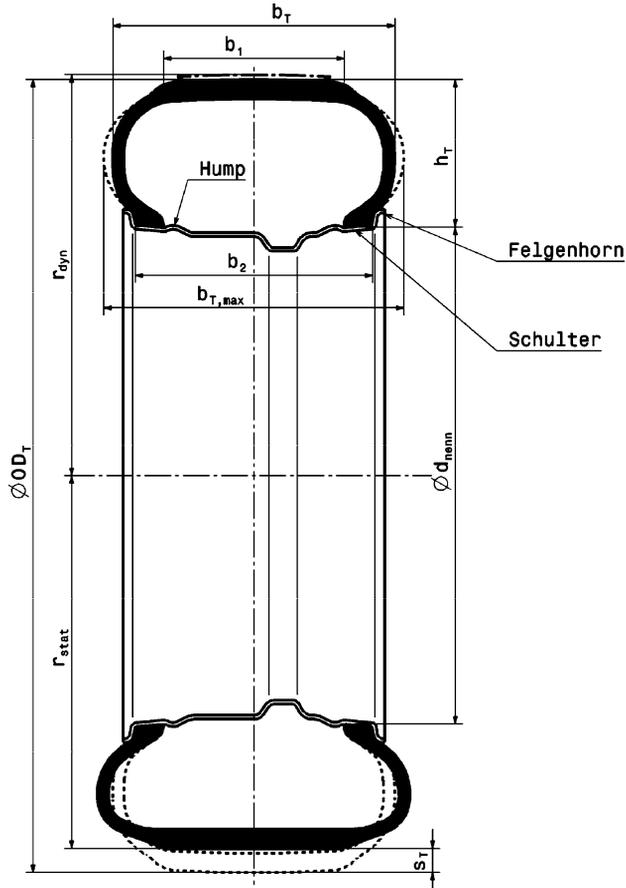


Abb. A.1 Rad- und Reifenhauptmaße nach DIN 70 020 T5. Felge rim: d_{nenn} Felgendurchmesser rim diameter, b_2 Maulweite rim width, Reifen tyre, AE: tire: Nenndurchmesser nominal diameter, b_T Querschnittsbreite section width, ermittelt auf Messfelge bei 1,8 bar (bzw. 2,3 bar bei V-, W- und ZR-Reifen) Fülldruck, b_1 Laufstreifenbreite tread width, $b_{T,\text{max}}$ Betriebsbreite overall width, OD_T Außendurchmesser outside diameter, ermittelt auf Messfelge bei 1,8 bar (bzw. 2,3 bar bei V-, W- und ZR-Reifen) Fülldruck, h_T Querschnittshöhe section height, s_T statische Reifeneindrückung static tyre deflection, r_{stat} statischer Reifenhalfmesser static loaded radius, r_{dyn} dynamischer Rollradius dynamic rolling radius, s. auch DIN 70 020: Reifen Begriffe, DIN 7803 Teil 5: Radialreifen Kennzeichnung, DIN 74 361 Teil: Scheibenräder, DIN 74 361 Teil 2: Räder Befestigung, DIN 7829: Felgen Kennzeichnung

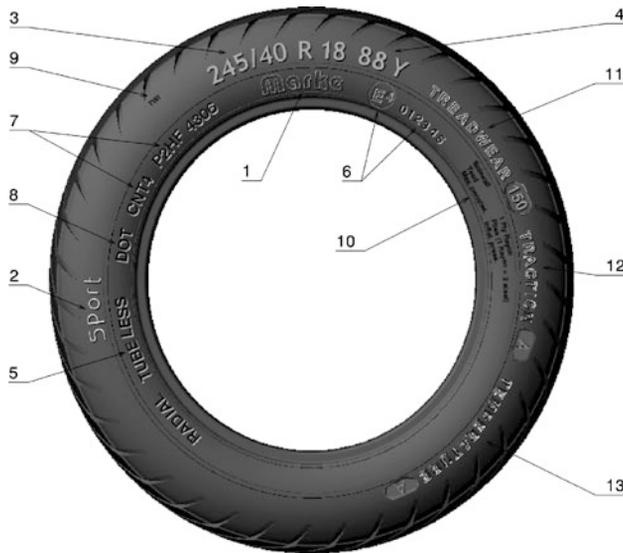


Abb. A.2 Einige gesetzliche und genormte Angaben für Straßenfahrzeugreifen. 1 Hersteller, 2 Produktname, 3 Größenbezeichnung, siehe unten, 4 Angaben zu Tragfähigkeit und Geschwindigkeit, siehe unten, 5 Tubeless = schlauchlos, 6 Genehmigung nach internationalen Vorschriften mit Prüfnummer (E = ECE R 30 Sollwerte, 4 = Land, das Genehmigung erteilt hat), 7 Herstellercode: Fabrik, Reifenausführung, Herstelldatum (Produktionswoche/Jahr: 43 Woche 2006), 8 Department of Transportation (US-Verkehrsministerium), 9 T.W.I. = Tread Wear Indicator (Profilabnutzungsanzeiger, Querstege in Profillinien, die bei 1,6 mm Restprofilhöhe auftauchen), 10 Angaben zum Reifenaufbau und max. Fülldruck, 11 Treadwear: relative Lebensdauer des Reifens bezogen auf einen US-spezifischen Standardtest, 12 Traction: A, B oder C. Nassbremsvermögen des Reifens, 13 Temperature: A, B oder C. Temperaturfestigkeit des Reifens bei höheren Geschwindigkeiten

Bezeichnungsbeispiel für die Größenangabe eines Diagonalreifens:

5.60–15/4 PR mit: 5.60 = Reifenbreite in Zoll
 15 = Felgendurchmesser in Zoll
 4 PR = Anzahl der Lagen (ist in dem Fall 4). Angabe zur Kar-
 kassenfestigkeit, PR steht für *ply rating*

Der Mindestfülldruck von Pkw-Reifen wird bestimmt von der Radlast und der Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs, siehe Tab. A.1 und A.2.

Die in den Tab. A.1 und A.2 angeführten Fülldruckwerte sind Mindestwerte. Die tatsächlichen Drücke für optimales Fahrverhalten können höher liegen. Außerdem müssen die Drücke z. B. wegen höherer Fahrgeschwindigkeit oder abweichender Sturzwinkel erhöht werden. Die in Tab. A.3 angeführten Maximalwerte dürfen dabei jedoch keinesfalls überschritten werden.

Tab. A.1 Tragfähigkeitskennzahlen (Lastindex)

Last-index	Reifentragfähigkeit ^a [kg] bei Fülldruck ^b [bar]										
	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
69	215	225	240	250	260	270	285	295	305	315	325
70	225	235	245	260	270	280	290	300	315	325	335
71	230	240	255	265	275	290	300	310	325	335	345
72	235	250	260	275	285	295	310	320	330	345	355
73	245	255	270	280	295	305	315	330	340	355	365
74	250	260	275	290	300	315	325	340	350	365	375
75	255	270	285	300	310	325	335	350	360	375	387
76	265	280	295	310	320	335	350	360	375	385	400
77	275	290	305	315	330	345	360	370	385	400	412
78	280	295	310	325	340	355	370	385	400	410	425
79	290	305	320	335	350	365	380	395	410	425	437
80	300	315	330	345	360	375	390	405	420	435	450
81	305	325	340	355	370	385	400	415	430	445	462
82	315	330	350	365	380	395	415	430	445	460	475
83	325	340	360	375	390	405	425	440	455	470	487
84	330	350	365	385	400	420	435	450	470	485	500
85	340	360	380	395	415	430	450	465	480	500	515
86	350	370	390	410	425	445	460	480	495	515	530
87	360	380	400	420	440	455	475	490	510	525	545
88	370	390	410	430	450	470	485	505	525	540	560
89	385	405	425	445	465	485	505	525	545	560	580
90	400	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600

^a Die Lastindizes sind für alle Pkw-Reifen bis zum Geschwindigkeitssymbol „W“ gültig.

^b Der Fülldruck bezieht sich auf eine Geschwindigkeit von 160 km/h und Sturzwinkel bis zu 2°. Für die tatsächlich am Fahrzeug anzuwendenden Drücke sind andere Kriterien wichtig, wie Höchstgeschwindigkeit, Fahrverhalten usw.

Über 160 km/h müssen die Fülldrücke linear um Δp_T erhöht werden bzw. die Tragfähigkeit reduziert sich bei gleichem Druck entsprechend einer Absenkung um Δp_T :

Geschwindigkeit, km/h	160	170	180	190	200	210
Δp_T , bar	0	0,06	0,12	0,18	0,24	0,3

Die Maximaldrücke nach Tab. A.3 dürfen nicht überschritten werden.

Bei Sturzwinkel ε über 2° müssen die Fülldrücke mit folgendem Faktor k_p korrigiert d. h. multipliziert werden:

Sturzwinkel ε , °	2	2,5	3	3,5	4
Korrekturfaktor k_p , –	1	1,03	1,07	1,1	1,14

(Zwischenwerte sind linear zu interpolieren)

bzw. die Tragfähigkeit muss mit folgendem Faktor k_Q korrigiert werden:

Sturzwinkel ε , °	2	3	4
Korrekturfaktor k_Q , –	1	0,95	0,90

(Zwischenwerte sind linear zu interpolieren)

Tab. A.2 Geschwindigkeitssymbol und Tragfähigkeit

Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs, km/h	Geschwindig- keitssymbol	Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs, km/h	Geschwindigkeitssymbol und Korrekturfaktor, –		
			V	W	Y
120	L	210	1	1	1
130	M	220	0,97	1	1
140	N	230	0,94	1	1
150	P	240	0,91	1	1
160	Q	250	–	0,95	1
170	R	260	–	0,90	1
180	S	270	–	0,85	1
190	T	280	–	–	0,95
200	U	290	–	–	0,90
210	H	300	–	–	0,85
über 240	ZR				

Bei V, W und Y gilt: Bei höheren Geschwindigkeiten müssen geringere Tragfähigkeiten in Kauf genommen werden. Die zulässigen Tragfähigkeiten ergeben sich durch Multiplikation der Werte aus Tab. A.1 mit den angeführten Korrekturfaktoren. Bei den nicht mehr hergestellten ZR-Reifen wurden diese Werte von Fahrzeug- und Reifenhersteller gemeinsam festgelegt.

Bei höheren Geschwindigkeiten sind die angegebenen Mindestfülldrücke (Tab. A.1) aus Sicherheitsgründen um die angeführten Werte [bar] zu erhöhen:

Geschwindigkeit, km/h	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	300
Geschwindigkeits- symbol	H	0	0,06	0,12	0,18	0,24	0,3	–	–	–	–	–	–
	V	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,3	–	–	–	–
	W	0	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,5	–
	Y	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5

Die Maximaldrücke nach Tab. A.3 dürfen nicht überschritten werden.

Tab. A.3 Grenzwerte für den Fülldruck

Geschwindigkeitssymbol	max. Fülldruck ^a , bar
bis einschließlich T	3,2
H, V, W, Y, ZR	3,5

^a bei kaltem Reifen bei Betriebsbeginn. Die durch die Walkarbeit hervorgerufene Druckerhöhung darf nicht durch Ablassen von Luft ausgeglichen werden.

Die Bezeichnung für Rennreifen unterscheidet sich von jener der Straßenreifen. Sie ist folgendermaßen aufgebaut: Reifenbreite/Außendurchmesser–Felgendurchmesser
Bezeichnungsbeispiele Rennreifen:



250/530–13

250 = Reifenbreite in mm

530 = Außendurchmesser in mm

13 = Felgendurchmesser in Zoll

10.0/20.0–13

10.0 = Reifenbreite in Zoll

20.0 = Außendurchmesser in Zoll

13 = Felgendurchmesser in Zoll

Höhen-Breitenverhältnis (Querschnittsverhältnis) Aspect Ratio. Das für die Reifeneigenschaften einflussreiche Verhältnis ist definiert als:

$$\text{Querschnittsverhältnis} = \frac{\text{Höhe}}{\text{Breite}} = \frac{h_T}{b_T} \cdot 100\%$$

Bei einem Höhen-Breitenverhältnis von beispielsweise 50 % spricht man von einem Reifen der Serie 50 oder einem 50er-Reifen.

Die etwa hundertjährige Entwicklungsgeschichte des Pkw-Reifens zeigt eine eindeutige Abnahme des Querschnittsverhältnisses von 113 % auf mittlerweile bis zu 25 % [15], d.h. die Reifen wurden immer breiter bei gleichzeitig abnehmender Seitenwandhöhe. Auch bei Rennreifen ist diese Entwicklung zu beobachten [10]. Breitere Reifen übertragen (Seiten-)Kräfte besser und kurze Seitenwände führen zu steiferen Reifen (allerdings mit Komforteinbußen, die das Fahrwerk wieder wettmachen muss). Ein Reifen mit kleinem Querschnittsverhältnis erlaubt auch bei gleichem Außendurchmesser eine größere Felge zu verwenden. Diese wiederum bietet mehr Platz für größere Bremscheiben und weitere Wirkabstände von Fahrwerksgelenken, Abb. A.3.

Formel-1-Reifen sind keine typischen Niederquerschnittreifen, ganz im Gegenteil Balloonreifen. Das hat aber kaum technische Gründe. Es kommt vielmehr vom Reglement (es sind max. 13"-Felgen erlaubt und bei den erlaubten Außendurchmessern ergibt sich

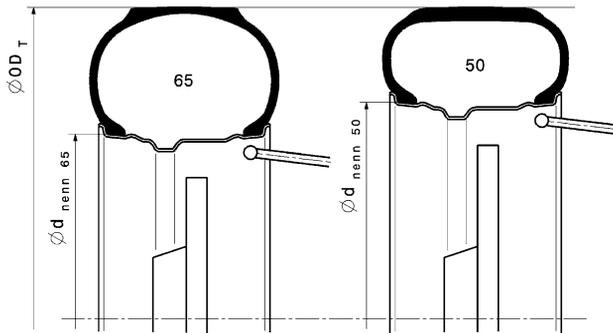


Abb. A.3 Auswirkung eines kleineren Querschnittsverhältnisses bei konstantem Außendurchmesser. Der Außendurchmesser OD_T sei vorgegeben. Der Reifen der Serie 50 führt zu einem größeren Felgendurchmesser $d_{nenn\ 50}$ und erlaubt den Einbau einer Bremsscheibe mit größerem Durchmesser sowie ein Anbringen der Gelenke weiter außen am Radträger

der hohe Querschnitt) und die Zuseher sind seit Jahrzehnten diese voluminösen Reifen gewöhnt.

Die Querschnittshöhe lässt sich aus den Angaben der Reifenbezeichnung errechnen:

$$h_T = 0,5 \cdot (OD_T - 25,4 \cdot d_{nenn}) \quad (\text{A.1})$$

mit:

h_T und OD_T in mm

d_{nenn} in Zoll (1 Zoll = 25,4 mm)

Bezeichnungen von Felgen und Rädern *Designation of Rims and Wheels.* Räder werden durch den Felgendurchmesser und die Maulweite der Felge festgelegt. Weitere wichtige Größen ergeben sich durch die Ausführung des Bereiches der die Reifenwulst aufnimmt.

Felgen werden, soweit sie lose ohne Radscheiben geliefert werden, in der Nähe des Ventillochs gekennzeichnet, Abb. A.4.

Abb. A.4 Kennzeichnung von Felgen nach DIN 7829. 1 Hersteller, 2 Felgen-Nummer, 3 Größenbezeichnung, siehe Abschn. A.3.2, 4 Herstellungsdatum: Produktionswoche/Jahr



Abb. A.5 Kennzeichnung von Rädern nach DIN 7829, 1 Felgenreiße (Breite \times Durchmesser), 2 Hump- und Felgenbettausführung, 3 Einpresstiefe 45 mm, 4 Hersteller, Teile-Nummer und Herstelldatum (Wochen-/Jahresstempel)



Räder erhalten auf ihrer Außenseite zwischen den Befestigungslöchern eine entsprechende Kennzeichnung, Abb. A.5. Näheres siehe Abschn. A.3.2.

2 Reifen Tyres

Die Reifen sind bezogen auf den Einfluss auf Fahrleistungen das wichtigste Einzelteil eines Fahrzeugs. Sie übertragen sämtliche Kräfte und Momente auf die Fahrbahn über vier relativ kleine Flächen – Latsch (*contact patch*) genannt – und andere Baugruppen, wie Radaufhängung und aerodynamische Hilfen, unterstützen die Reifen bloß in dieser Funktion. Außerdem übernehmen sie die Abfederung der Räder und der mit ihnen bewegten Fahrwerksteile. Die Reifen beeinflussen somit neben Komfort (mechanisch und akustisch) und Wirtschaftlichkeit (Laufleistung, Kraftstoffverbrauch) vor allem das Fahrverhalten und die Fahrsicherheit eines Fahrzeugs (Eigenlenkverhalten, Lenkpräzision, Fahrstabilität, Kraftschluss). Folgende, für Rennfahrzeuge wichtige Bewertungskriterien zur Beurteilung von Reifen ergeben sich daraus [15]:

- basierend auf dem Kraftschluss: Traktion, Bremsweg, Rundenzeit, Aquaplaning,
- zu Fahrstabilität: Geradeausstabilität, Kurvenstabilität, Bremsen in Kurven,
- das Lenkverhalten im 0°-Bereich und im Grenzbereich, sowie die Lenkpräzision,
- zu Haltbarkeit: Strukturelle Haltbarkeit, Hochgeschwindigkeitstüchtigkeit, Durchschlagsfestigkeit.

2.1 Anforderungen Requirements

Die Anforderungen, die an einen Rennreifen gestellt werden, können knapp formuliert werden: Maximale Haftwerte bei minimaler Abnutzung und ausreichender Gestaltfestigkeit. Der ideale Reifen ändert sein Verhalten im Gegensatz zu seinem realen Ebenbild während des Rennens auch nicht.