

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Kraftstoffverbrauch und Fahrwiderstände	11
2.1	Fahrwiderstände	12
2.1.1	Triebstrangverluste	13
2.1.2	Schlupfverluste	13
2.1.3	Rollwiderstandskraft	13
2.1.4	Steigungswiderstand	15
2.1.5	Beschleunigungswiderstand	15
2.1.6	Luftwiderstand	16
2.2	Kraftstoffverbrauch	16
2.3	Gesamtwiderstand	18
2.4	Höchstgeschwindigkeit	20
3	Grundgleichungen der Strömungsmechanik	23
3.1	Exakte Beschreibung der Strömungsmechanik	23
3.1.1	Kontinuitätsgleichung	23
3.1.2	Navier-Stokes-Gleichungen	25
3.1.3	Energiegleichung	29
3.1.4	Boltzmann-Gleichung	31
3.1.5	Strömungsformen und Turbulenz	33
3.1.6	Turbulenzmodelle und Wandgesetze	37
3.1.7	Druckintegral	43
3.2	Näherungsbestimmung und Abschätzungen	43
3.2.1	Bernoulli-Gleichung	44
3.2.2	Radiale Druckgleichung	44
3.2.3	Impulssatz	46
3.2.4	Grenzschichtgleichungen	47
4	Aerodynamische Grundlagen	51
4.1	Luftkräfte und deren Beiwerte	51

4.1.1	Beschreibung der Luftkräfte	51
4.1.2	Definition von Beiwerten	53
4.2	Anteile des Luftwiderstands	55
4.2.1	Formwiderstand	57
4.2.2	Induzierter Widerstand	59
4.2.3	Kühlluftwiderstand	60
4.2.4	Rauhigkeitswiderstand	72
4.2.5	Interferenzwiderstand	72
4.3	Karosserieheckformen und Grundkörper	75
4.3.1	Fahrzeugheckformen	75
4.3.2	Fahrzeugkonzepte	75
4.3.3	Grundkörper	79
4.4	Grundlagen der Aeroakustik	81
4.4.1	Schall und Schallfeldgrößen	81
4.4.2	Pegeldefinitionen	84
4.4.3	Grundzüge der Frequenzanalyse	84
4.4.4	Frequenzbewertung	85
4.4.5	Dämmung und Dämpfung	87
4.4.6	Windgeräusche und andere Geräuschquellen	87
4.4.7	Aeroakustische Geräuschestehung	88
5	Beeinflussung der Luftkräfte am Fahrzeug	93
5.1	Einfluss der Fahrzeugfront	95
5.2	Einfluss von Dach- und Seitenkontur	97
5.3	Einfluss des Fahrzeughecks	99
5.4	Einfluss der Unterbodengruppe	105
5.5	Einfluss sonstiger Aspekte	111
6	Weitere Aerodynamikaspekte	117
6.1	Besondere Pkw-Konzepte	117
6.1.1	Cabriolet	117
6.1.2	Geländewägen und SUVs	119
6.1.3	Rennsport	120
6.2	Aeroakustik	123
6.2.1	Leckagen	124
6.2.2	Außenspiegel	124
6.2.3	Scheibenwischer	125
6.2.4	Antennen	126
6.2.5	A-Säule	126
6.2.6	Hohlraumresonanzen	128
6.2.7	Radhäuser	130
6.2.8	Unterboden	130

6.2.9	Verglasungseinfluss	132
6.2.10	Aeroakustik bei Cabriolets	132
6.3	Verschmutzung	133
6.4	Bauteilbelastungen	136
6.5	Bremsenkühlung	138
7	Windkanaltechnik	143
7.1	Windkanalbauweisen	144
7.2	Konditionierung der Fahrzeugan- und -umströmung	145
7.2.1	Grenzschichtkonditionierung	146
7.2.2	Relativbewegung zwischen Fahrzeug und Fahrbahn	149
7.2.3	Darstellung der Raddrehung	157
7.2.4	Turbulenz	158
7.3	Windkanalinterferenzen	159
7.4	Windkanalanlagen der Fahrzeugindustrie	163
7.5	Modellwindkanäle	166
7.6	Messtechnik und Analyseverfahren	169
7.6.1	Staudruckbestimmung im Windkanal	169
7.6.2	Wägetechnik	170
7.6.3	Druck- und Geschwindigkeitsmessung	172
7.6.4	Stirnflächen- und Konturermittlung	176
7.6.5	Akustikmessungen	177
7.6.6	Verschmutzungsuntersuchungen	180
8	Numerische Berechnung der Fahrzeugaerodynamik	183
8.1	Diskretisierungsverfahren	183
8.1.1	Zeitdiskretisierung	185
8.1.2	Finite-Differenzen-Verfahren	185
8.1.3	Finite-Volumen-Verfahren	185
8.1.4	Finite-Elemente-Verfahren	187
8.2	CFD-Verfahren	188
8.2.1	Navier-Stokes-basierte Ansätze	188
8.2.2	Die Lattice-Boltzmann-Methode	190
8.3	Prozessanforderungen	193
8.4	Darstellung drehender Geometrien	195
8.5	Kommerzielle CFD-Software	196
8.6	Spezielle Analyseverfahren und Validierung	197
9	Der aerodynamische Entwicklungsprozess	203
	Literatur	209
	Sachverzeichnis	213