Fakultät Technik und Informatik
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Karosseriekonzepte

Grundlegende aerodynamische Anforderungen

Dipl.-Ing. Torsten Kanitz

KFI WS 2011/12 29.11.2011

Inhalt

Begriffe und Definitionen

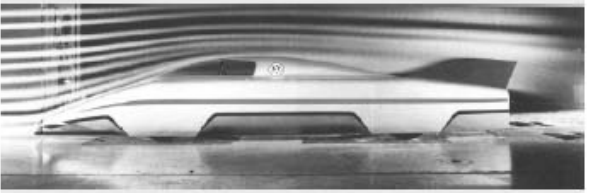
Bsp. Versuch im Windkanal

- Einführung / Versuchsgegenstand
- Zusammenfassung der Messergebnisse
- Der Windkanal des Instituts für Schiffbau
- Versuch und Auswertung
- Erkenntnisse für die Formoptimierung der Karosserie
- Versuchskritik

Resumeé: grundlegende aerodynamische Anforderungen

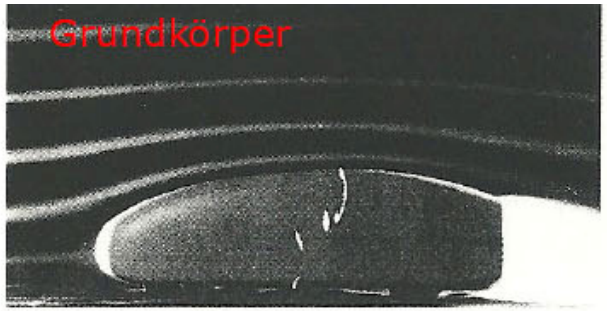
Aerodynamische Untersuchungen

Detailoptimierung
und Formoptimierung



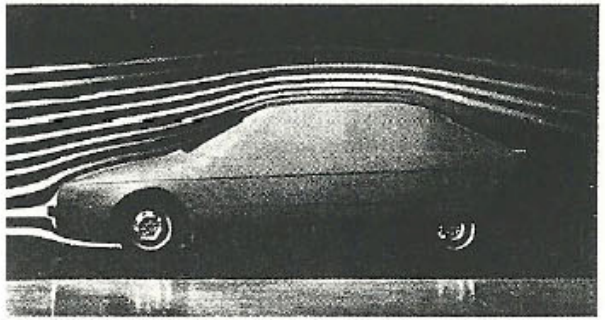
Grundkörper

Grundkörper	c_w	l/h	Bemerkung
	0,15	4,0	Räder angedeutet
	0,16	3,0	Räder angedeutet
	0,07 0,18	3,1	keine Räder mit Rädern
	0,05	3,9	keine Räder



Grundkörper $c_w = 0{,}16$

Grundform $c_w = 0{,}18$



Grundmodell $c_w = 0{,}24$

Stylingmodell $c_w < 0{,}30$

IAA 1981

Seriennah
VW 2000
cw = 0,25

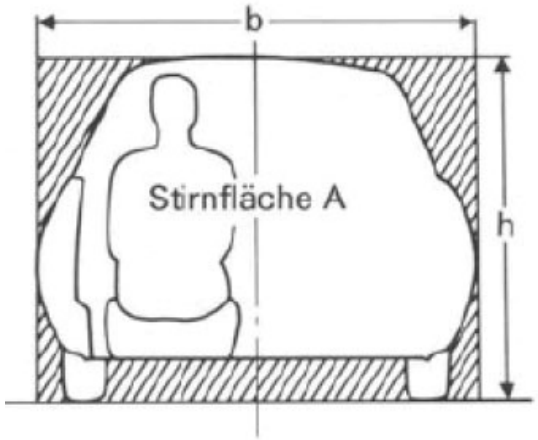
Serie
AUDI 100 C3 1982
erstes formoptimiertes
Serienfahrzeug
cw = 0,30

$$W = c_W \cdot A \cdot \frac{\varrho}{2} V_F^2$$

$$c_W = \frac{W}{A \cdot \frac{\varrho}{2} V_F^2}$$

$$P_W = W \cdot V_F = c_W \cdot A \cdot \frac{\varrho}{2} V_F^3$$

W = Luftwiderstand
c_W = Luftwiderstands-Beiwert
A = Fahrzeug-Projektionsfläche
ϱ = Luftdichte
V_F = Fahrgeschwindigkeit
P_W = Luftwiderstandsleistung



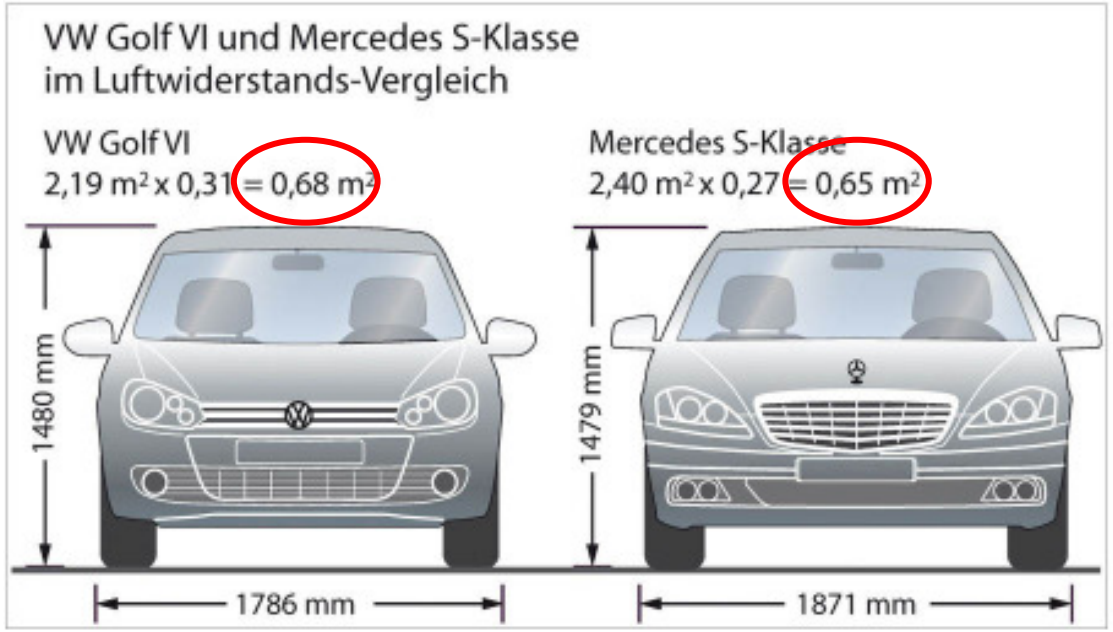
	Stirnfläche A [m²]
Kleinwagen	1,8
Untere Mittelklasse	1,9
Obere Mittelklasse	2,0
Oberklasse	2,1

$$A \approx 0{,}81 \cdot (b \cdot h)$$

unten:

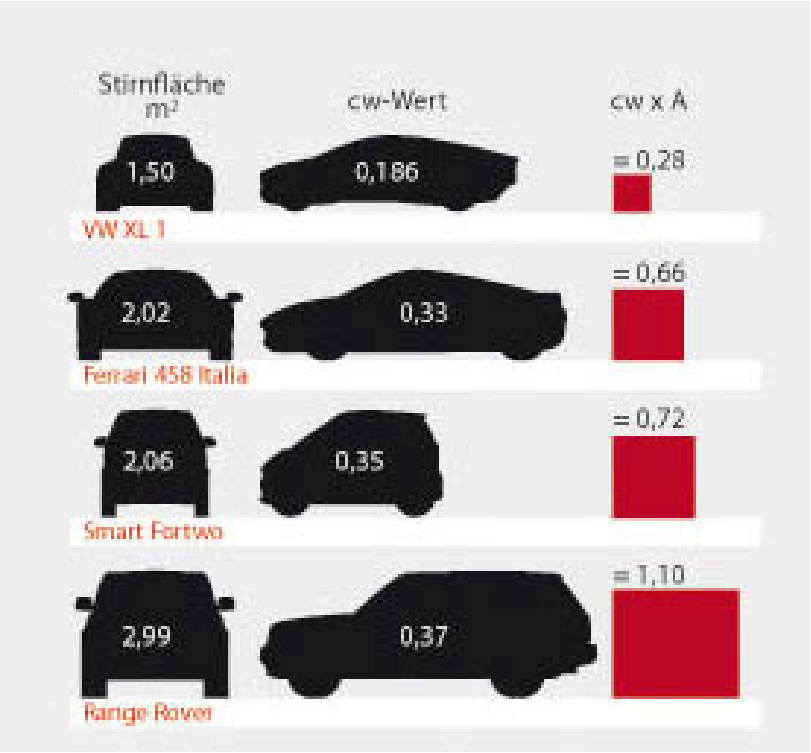
die S-Klasse hat einen geringeren

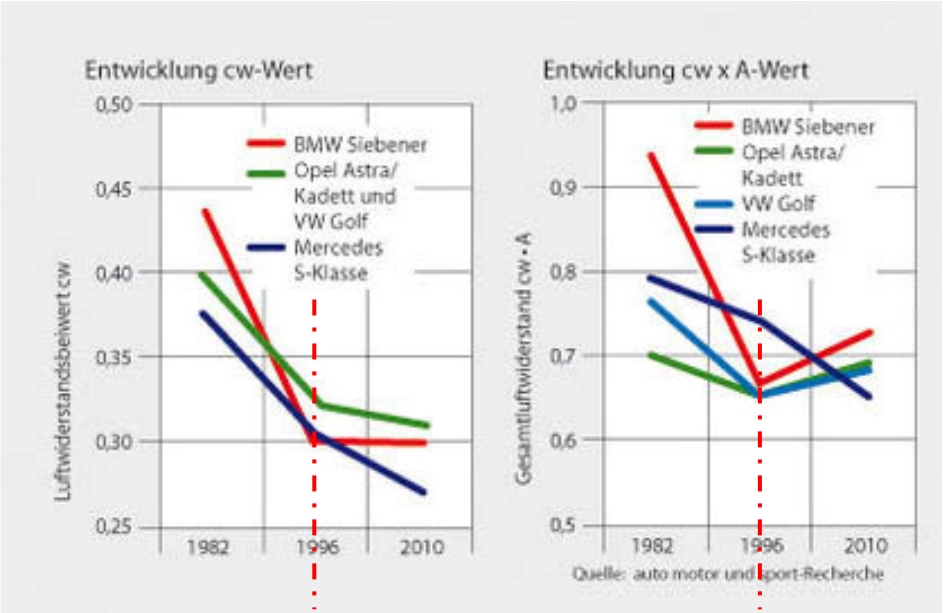
Luftwiderstand (cw x A maßgeblich)



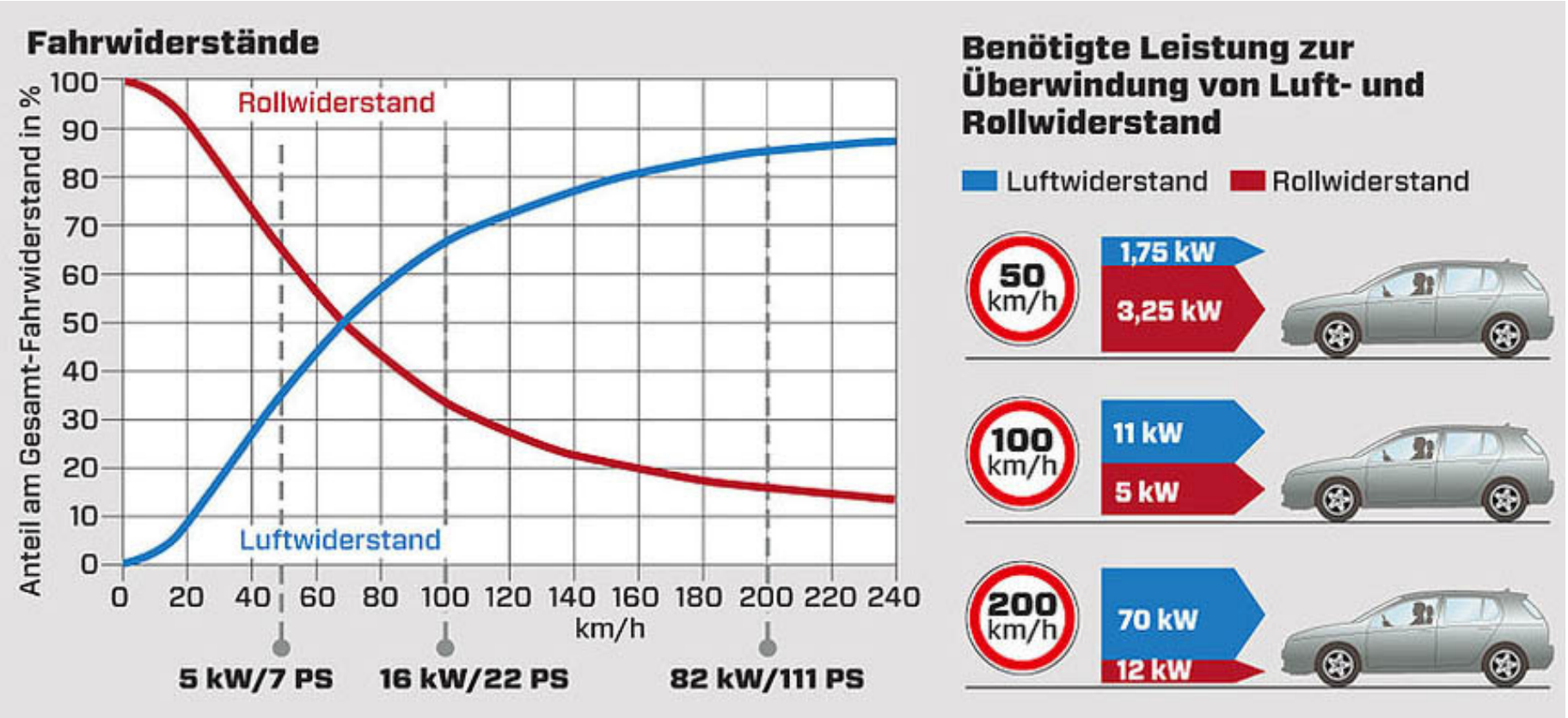
cw x A: effektiver Luftwiderstand [m^2]

cw Wert: Aussage über Formgüte

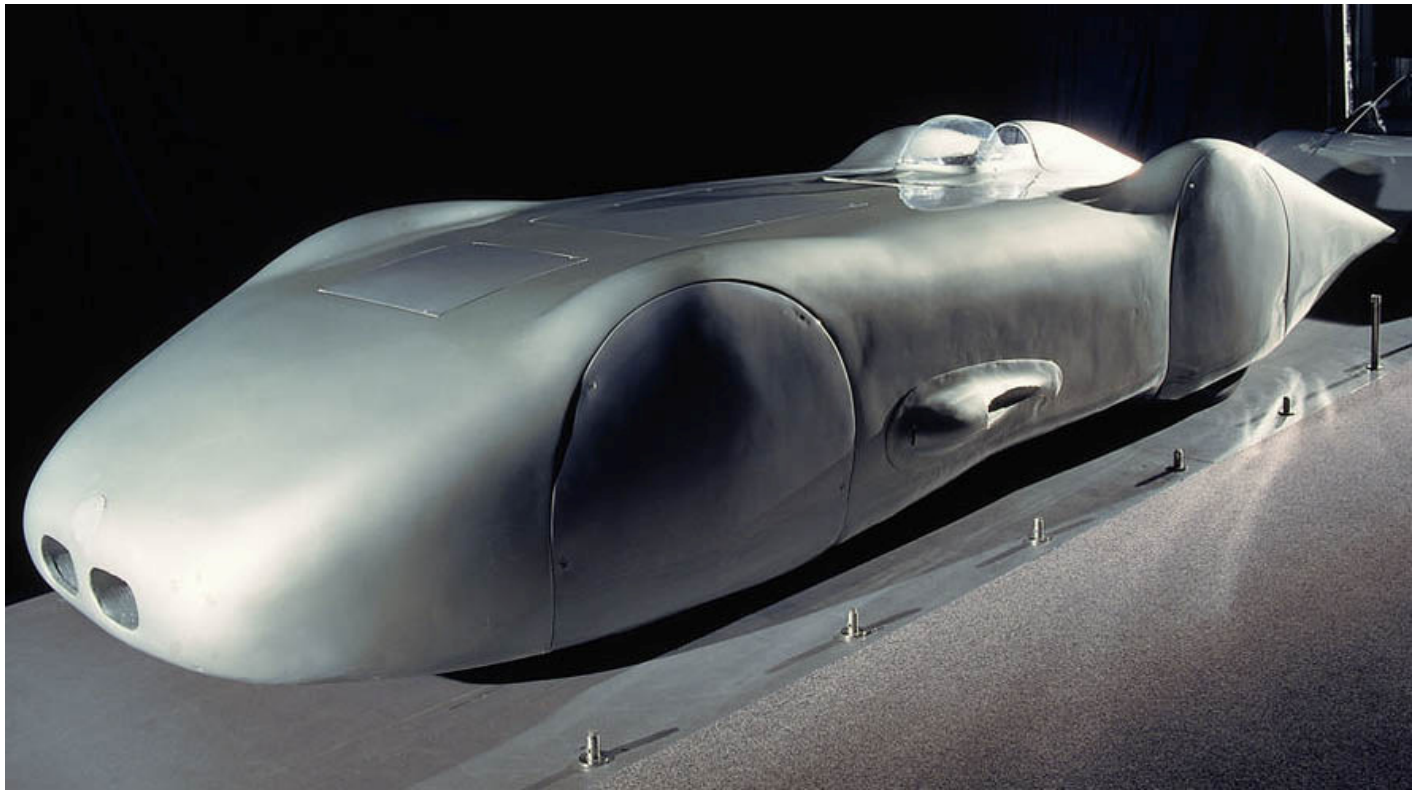




Durch die Einführung des neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) 1996 spielte die Aerodynamik für die Ermittlung der „offiziellen" Verbräuche keine wesentliche Rolle mehr. cw x A durfte wachsen, und tat es auch (z.B. SUVs) siehe links.



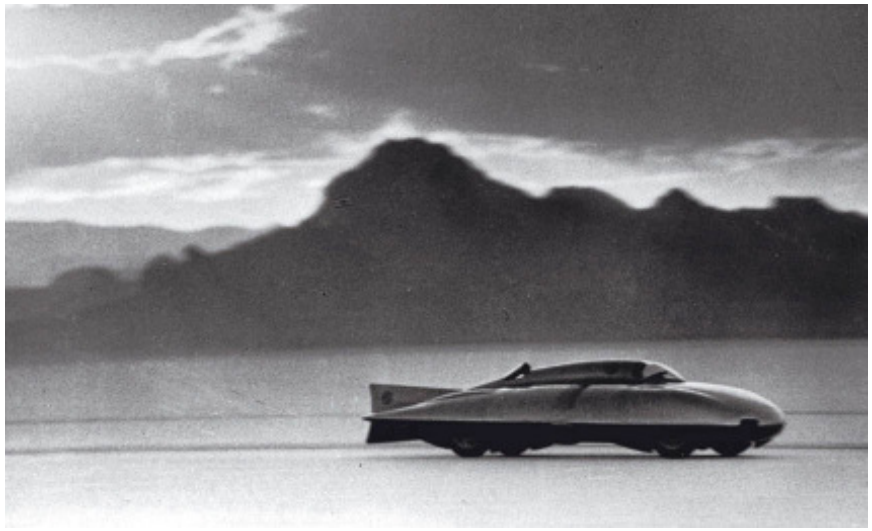
Bildquelle: auto motor und sport



Mercedes Rekordwagen,

Baujahr 1938,

cw = 0,12



MG EX 181, Bj. 1957, cw = 0,15

Panhard Dyna, Bj. 1954

cw = 0,26

Citroen DS 19, Bj. 1963, cw = 0,33

Mercedes C111,

Bauj. 1970, cw = 0,29

AUDI 100 C3, Bj. 1983, cw = 0,31

VW 1 Liter Auto,

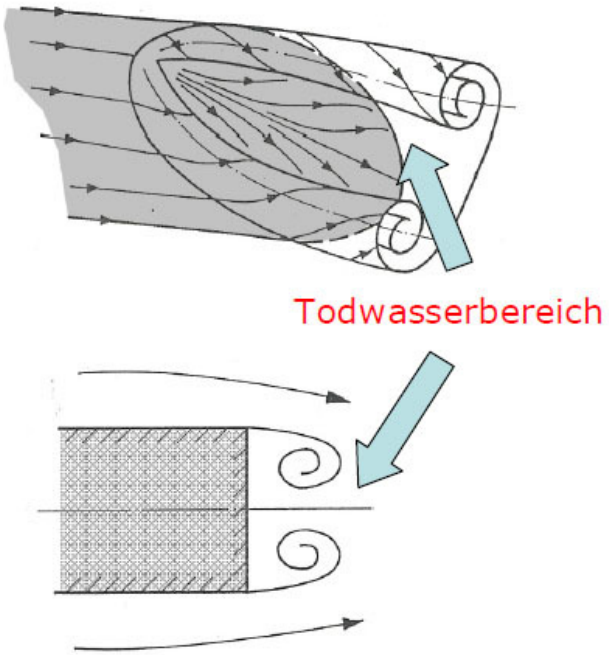
Bj. 2002

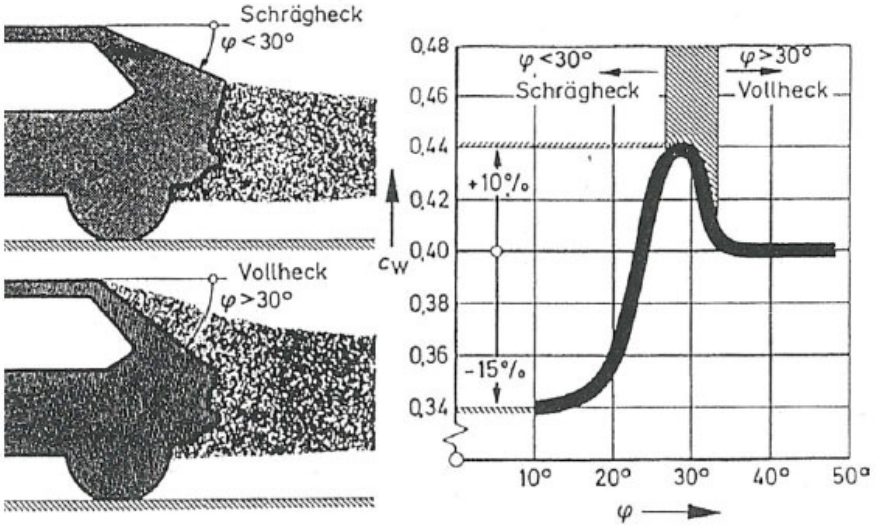
cw = 0,16

Strömungsablösung an einem Körper
mit schrägem Heck

erhöht den Luftwiderstand:
dreidimensionale Ablösung,
erzeugen Unterdrücke am Heck,
Unterdruckspitzen im Bereich der Wirbel

VW 2000
cw = 0,25





Einfluss des Heckwinkels Phi auf Widerstand und Form der Ablösung gemessen VW Golf 1

Strömungsablösung an einem Körper
mit stumpfem Heck

Quelle:
Hucho /4/ S. 71 ff.

1:4 Modell (Y_0 symmetrisch)
AUDI A3 Studie 1991

Plastillin + Dinoc Folie, lackiert

1:4

Hauptabmessungen in Maßstab 1:1:
L = 3936 mm
B = 1760 mm
H = 1380 mm
Radstand: 2472 mm

Bezeichnungen

V_∞	Strömungsgeschwindigkeit in der Meßstrecke	$\frac{m}{s}$
R_e	Reynoldszahl	ohne Dimension
φ	Versperrung	ohne Dimension
A_P	Projektionsfläche des 1:4 - Modells zuzüglich der Projektionsfläche des Aufnahmerohrs	m^2
A_N	Querschnittsfläche der Windkanaldüse	m^2
A_C	Querschnittsfläche des Auffangtrichters	m^2
p_V	statischer Druck in der Vorkammer	PA
p_∞	statischer Druck am Düsenaustritt	PA
q_∞	Staudruck	PA
k	Düsenfaktor	ohne Dimension
ρ	Luftdichte	$\frac{kg}{m^3}$

CD	Luftwiderstandsbeiwert, der während des Versuchs am Bildschirm angezeigt wurde und noch umgerechnet werden muß in C_W	ohne Dimension
CC	Seitenkraftbeiwert, der während des Versuchs am Bildschirm angezeigt wurde und noch umgerechnet werden muß in C_S	ohne Dimension
CL	Auftriebswiderstandsbeiwert, der während des Versuchs am Bildschirm angezeigt wurde und noch umgerechnet werden muß in C_A	ohne Dimension
CX	Luftwiderstand (gemessene Kraft in x-Richtung)	N
CY	Seitenkraft (gemessene Kraft in y-Richtung)	N
CZ	Auftriebskraft(gemessene Kraft in z-Richtung)	N
CMX	Rollmomentenbeiwert, der während des Versuchs am Bildschirm angezeigt wurde und noch umgerechnet werden muß in C_L	ohne Dimension
CMY	Nickmomentenbeiwert, der während des Versuchs am Bildschirm angezeigt wurde und noch umgerechnet werden muß in C_M	ohne Dimension

Bezeichnungen

CMZ	Giermomentenbeiwert, der während des Versuchs am Bildschirm angezeigt wurde und noch umgerechnet werden muß in C_N	ohne Dimension
W_L	Luftwiderstand	N
W_S	Seitenkraft	N
W_A	Auftriebs- (Abtriebs-) kraft	N
c_W	Luftwiderstandsbeiwert	ohne Dimension
c_S	Seitenkraftbeiwert	ohne Dimension
c_A	Auftriebs- (Abtriebs-) widerstandsbeiwert	ohne Dimension
c_L	Rollmomentenbeiwert	ohne Dimension
c_M	Nickmomentenbeiwert	ohne Dimension
c_N	Giermomentenbeiwert	ohne Dimension
L	Rollmoment	Nm
M	Nickmoment	Nm
N	Giermoment	Nm
l	Fahrzeuglänge	m

Indizes:

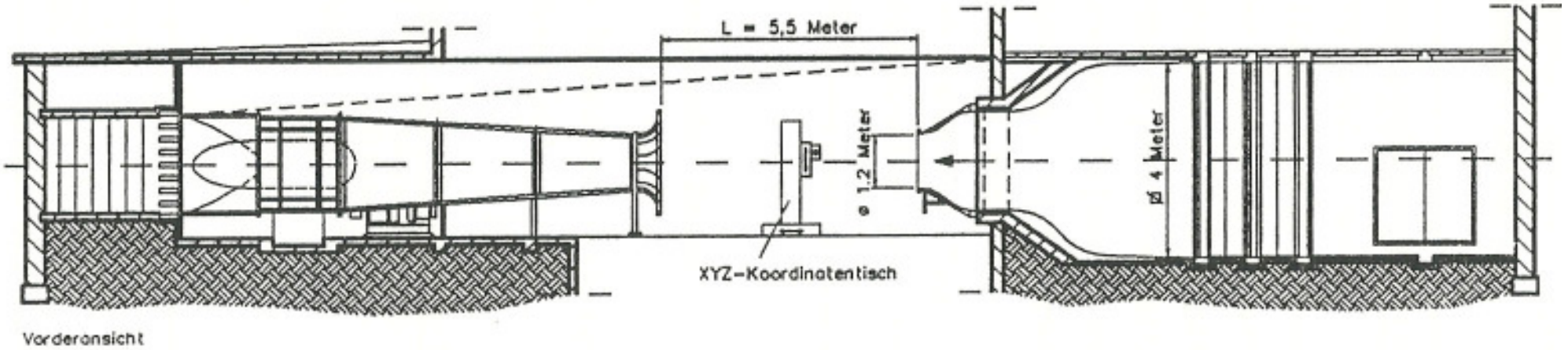
∞	Zum Anströmzustand gehörende Größe
D	für Beiwert: "D"... "drag"
C	für Beiwert: "C"... "cross"
L	für Beiwert: "L"... "lift"
*	für Werte, von denen in der Datenverarbeitung zunächst ausgegangen wurde, die aber noch umgerechnet werden mußten.

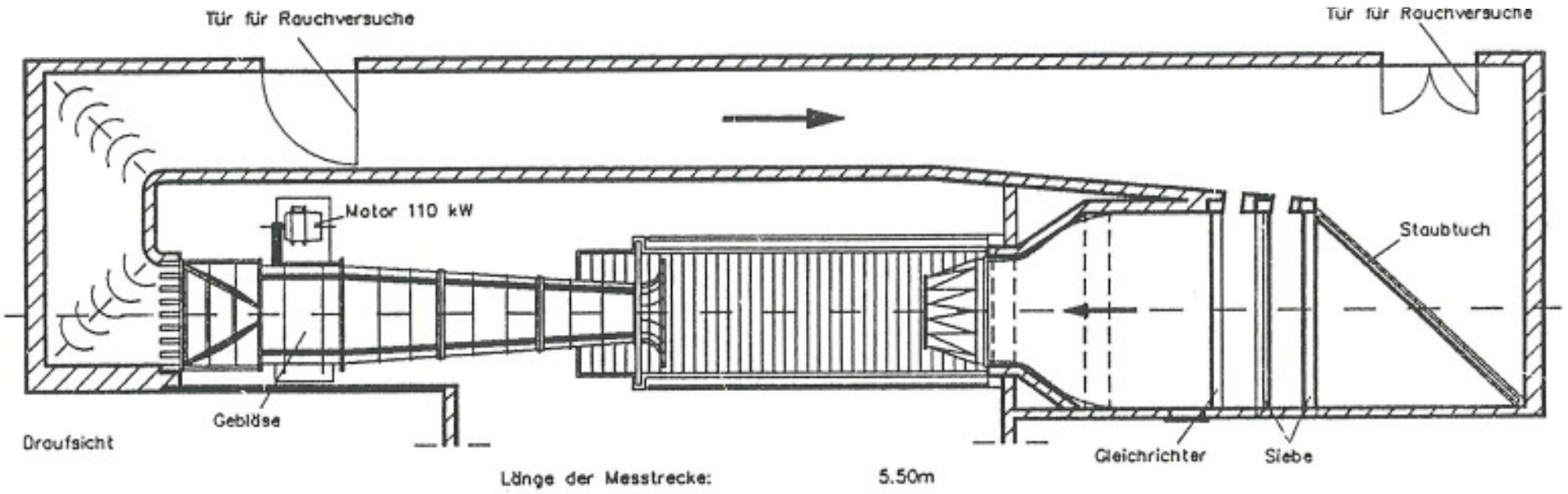
Zusammenfassung der wichtigsten Messergebnisse

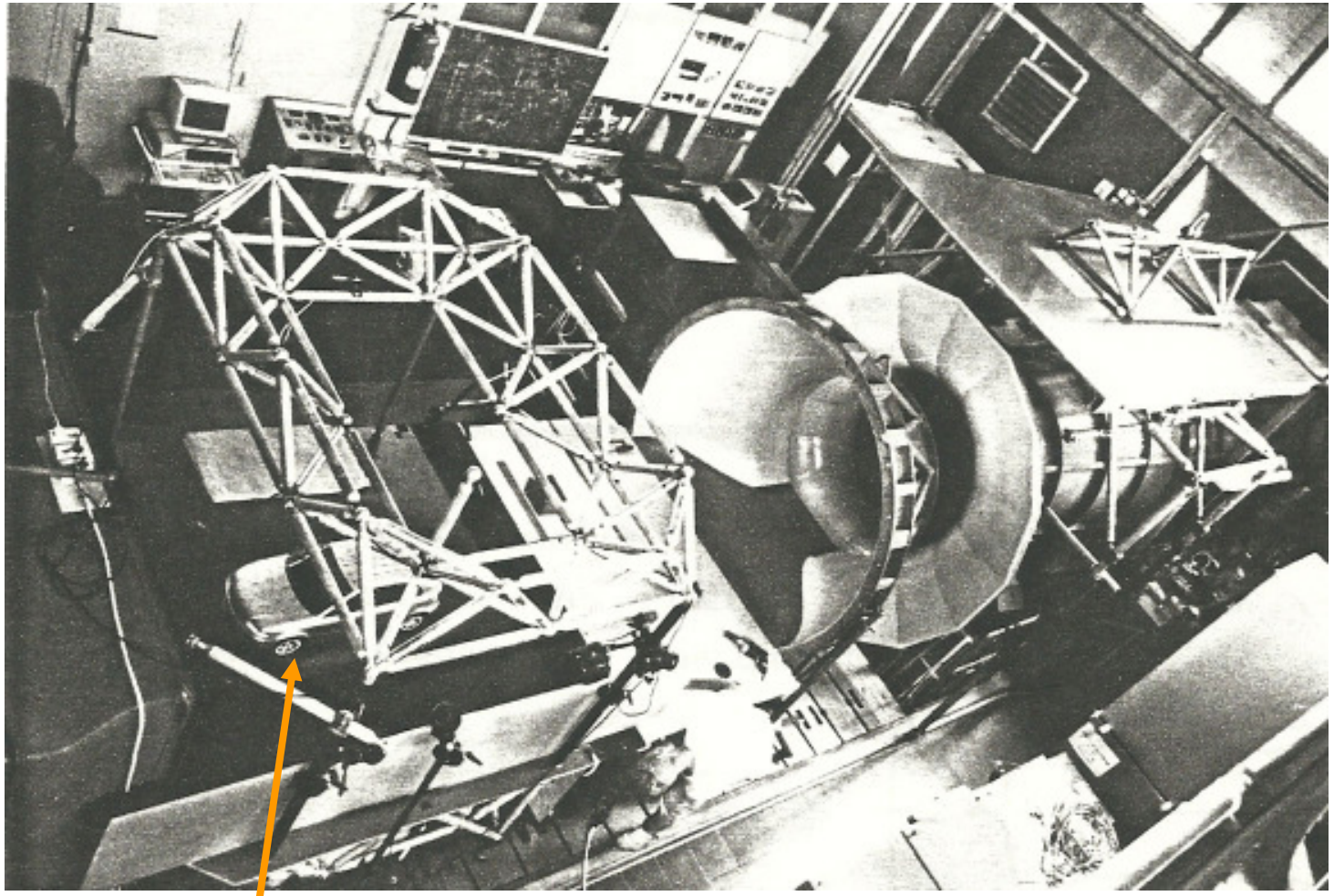
Die wichtigsten Meßergebnisse:

ß [°]	CW	CS	CA	CL	CM	CN	v_∞ [m/s]	Re
-2,5	0,375	-0,109	0,289	-0,015	-0,129	-0,008	25,5	$1{,}65 \cdot 10^6$
0,0	**0,367**	-0,039	0,289	0,000	-0,129	0,008	25,5	$1{,}65 \cdot 10^6$
2,5	0,375	0,023	0,281	0,008	-0,129	0,023	25,6	$1{,}67 \cdot 10^6$
5,0	0,391	0,094	0,250	0,015	-0,129	0,030	25,5	$1{,}65 \cdot 10^6$
7,5	0,406	0,156	0,226	0,023	-0,129	0,045	25,6	$1{,}66 \cdot 10^6$
10,0	0,437	0,211	0,226	0,030	-0,129	0,053	25,6	$1{,}66 \cdot 10^6$
12,5	0,469	0,273	0,234	0,045	-0,121	0,068	25,6	$1{,}67 \cdot 10^6$
15,0	0,492	0,328	0,250	0,053	-0,106	0,083	25,6	$1{,}66 \cdot 10^6$
17,5	0,531	0,344	0,281	0,061	-0,083	0,083	25,6	$1{,}66 \cdot 10^6$

Windkanal „Göttinger Bauart"





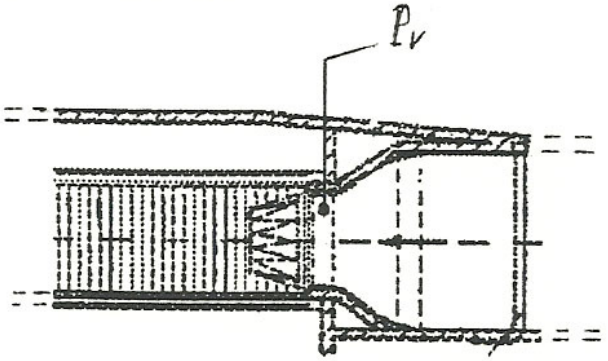


Windkanal des
Instituts für Schiffbau
Ort: Lämmersieth 90
22305 Hamburg

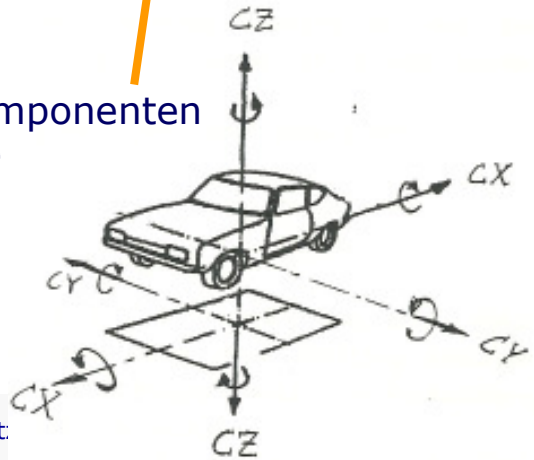
Messstreckenlänge: L = 5,50 m

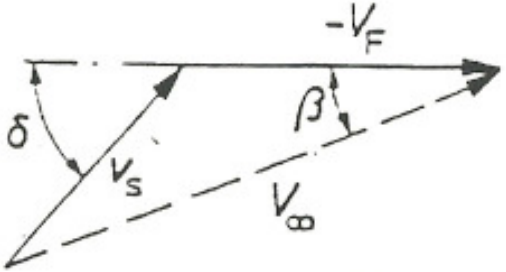
Düsenquerschnitt A_N = 1,84 m^2

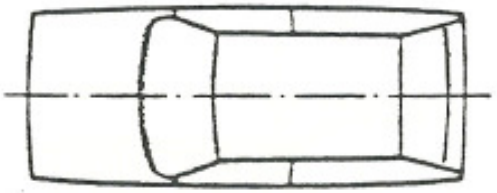
Versperrung $\varphi = A_P / A_N$ = 0,071



6 - Komponenten
Waage







Teil A: Versuch mit Rauch:

Untersuchung anliegender und abgelöster Strömungsfelder
bei v_∞ = 9,6 m/s = 34,6 km/h ≅ konst.,
Kanaldruck q_∞ = 55,7 PA ,
Anströmwinkel ß = 0,0° bis +30,0° ;

Teil B: Versuch mit den Wollfäden:

Untersuchung anliegender und abgelöster Strömungsfelder
bei v_∞ = 25,2 m/s = 90,7 km/h ≅ konst.,
Kanaldruck q_∞ = 380,4 PA ,
Anströmwinkel ß = 0,0° bis +30,0° ;

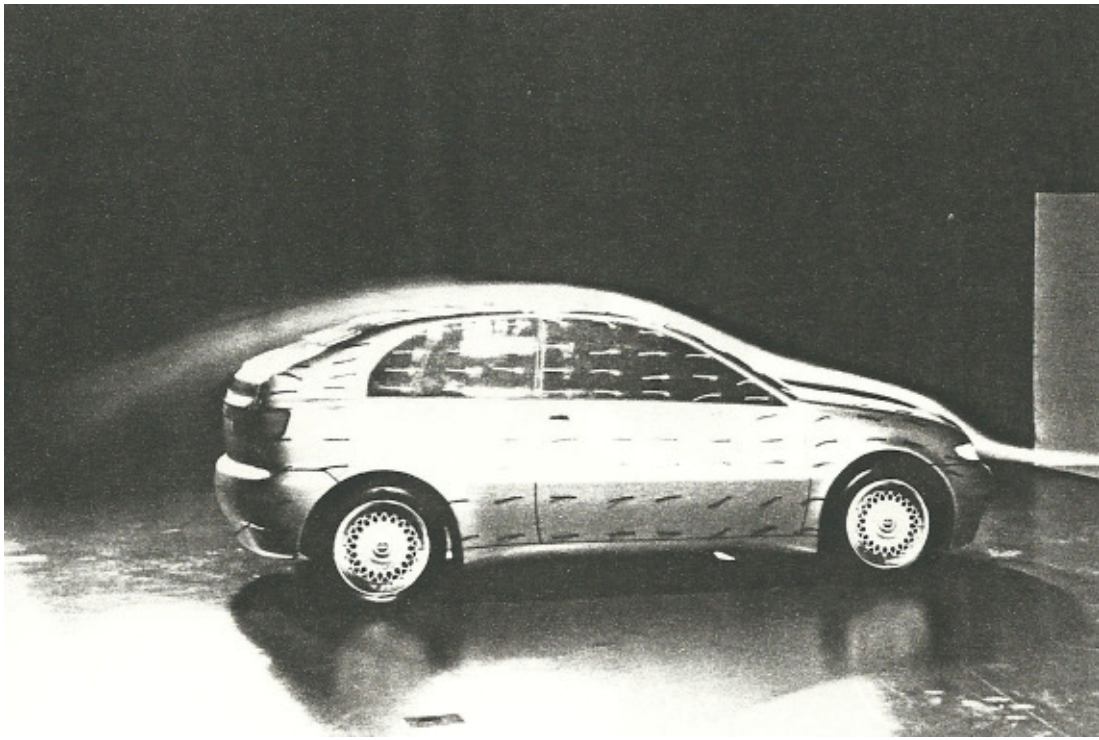
Teil C: Messen der einzelnen Widerstandsbeiwerte und Momentenbeiwerte

bei v_∞ = 25,6 m/s = 92,2 km/h ≅ konst.,
Kanaldruck q_∞ = 391,0 PA ,
Anströmwinkel ß = -2,5° bis +17,5° ;

t min,sek.	
00:40	Beginn **Versuchsteil A:** Untersuchung anliegender und abgelöster Strömungsfelder, Sichtbarmachung durch Rauch, v_∞ = 34,6 km/h
01:40	(ß = 0°) Ablösung der Strömung am Heck
02:30	Invertieren der sichtbar gemachten Ablösezone: Rauchsonde im Todwasserbereich; Aufwirbelung von Schmutz der Fahrbahn auf das Karosserieheck
02:50	Simulation der Verschmutzung am Fahrzeugheck
03:30	Druckspitze an C-Säule ist zu beobachten
05:40	Modell fängt an, sich zu drehen (ß = 0°→ +30°)
06:20	Hecklängswirbel ist zu erkennen
06:30	ß = 30°
07:00	ß wieder 0°, nocheinmal Drehung 0°→ +30°
07:10	Ablösezone an Unterkante großes Heckfenster gut zu sehen
08:00	ß = 30°
08:40	wieder ß = 0°

08:50	Beginn **Versuchsteil B:** Versuch mit den Wollfäden: Untersuchung anliegender und abgelöster Strömungsfelder mit Hilfe der Wollfäden, v_∞ wird erhöht auf 25,2 m/s = 90,7 km/h, ß ist zunächst 0°
09:20	Stoßfänger hinten/Seite: zitternde Wollfäden durch abgelöste Strömung
09:40	unruhige Wollfäden (in Strömungsrichtung) hinter den vorderen Radwülsten
10:00	ß jetzt 30°, Fzg. wird wieder zurückgeschwenkt
10:40	ß = 0°
10:50	Versuch mit einem großen Wollfaden zur Analyse der Strömungsrichtungen
	----------
13:20	Beginn **Versuchsteil C:** Messen der einzelnen Widerstands- und Momentenbeiwerte, v_∞ = 25,6 m/s = 92,2 km/h, Anströmwinkel ß = -2,5° bis +17,5°

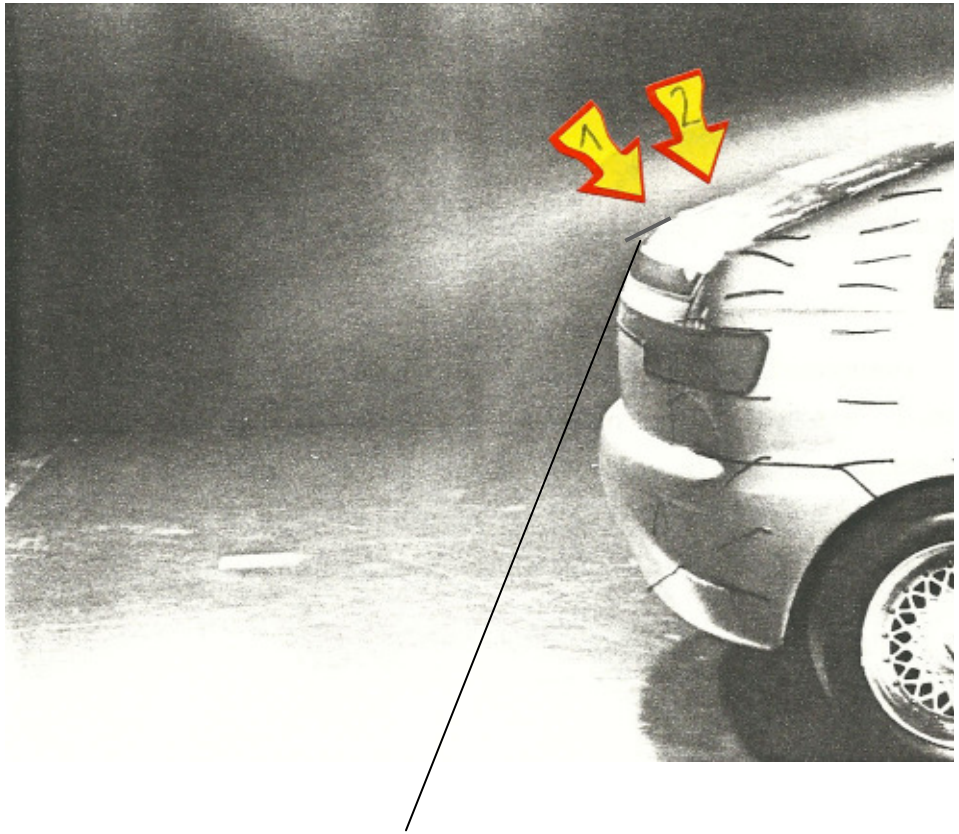
Analyse: anliegende Strömung



++ Strömung reißt nicht am hinteren Teil des Dachs ab.

Verschmutzung des Heckfensters fällt geringer aus.

Größe des Todwasserbereiches verringert sich.



++ Wollfäden aufgestellt
im Todwasserbereich;
aber kein Flattern;

Ablösung erst am hinteren Teil
des Heckfensters.

Am Ende der Heckscheibe nimmt die Geschwindigkeit in der Grenzschicht ab (Pfeil 2), es kommt zu einem Druckanstieg.
Die Grenzschicht ist eine wenige Millimeter dünne Luftschicht in Nähe der Karosseriewand. Sie ist die Übergangsschicht (Bild 12 b) in der die an der Wandung haftenden Luftmoleküle (u = 0) von der äußeren Luftströmung "mitgerissen" werden, um schließlich die Geschwindigkeit der Außenströmung zu erreichen (u = U).

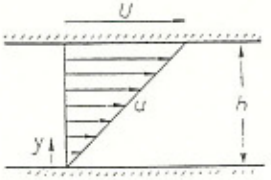


Bild 12 b) aus /5/

u ... Geschwindigkeitskomponente in x - Richtung

Wenn die zuvor anliegende Grenzschichtströmung die Karosseriewand verläßt, kommt es zur Ablösung.

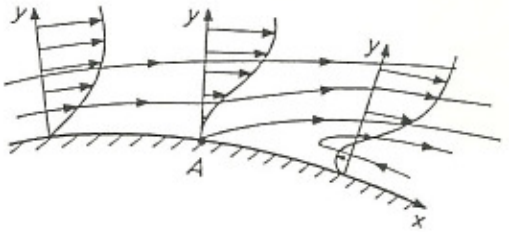
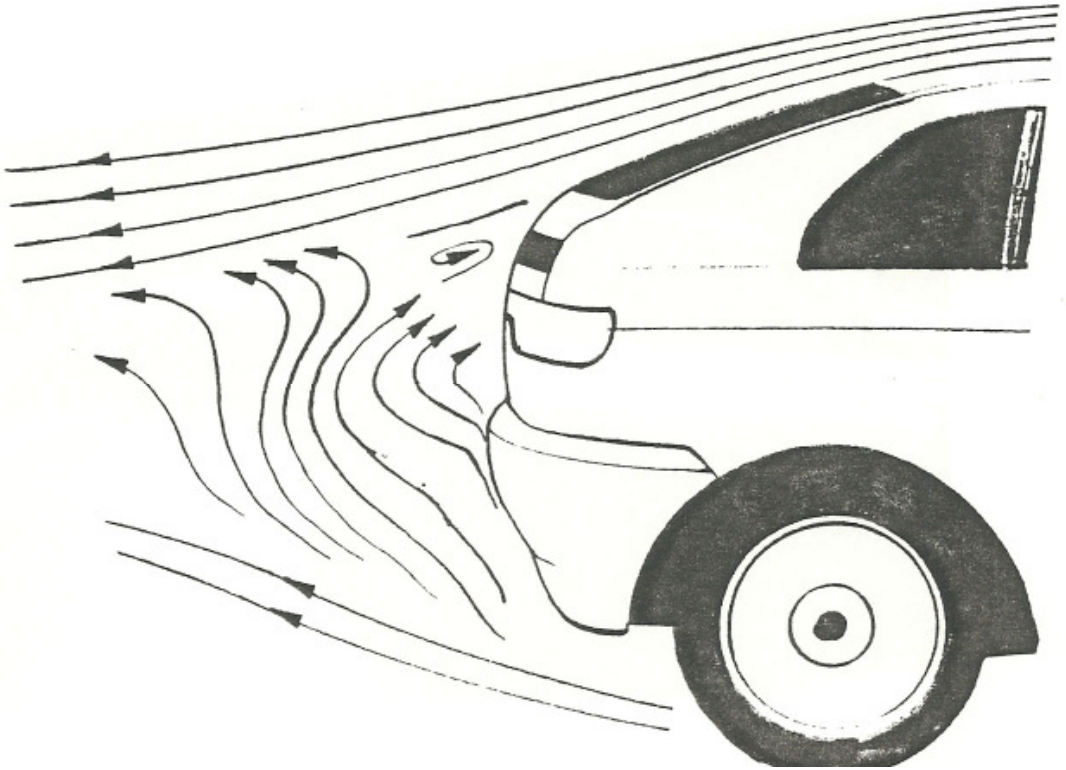


Bild 12 c) *Ablösung der Grenzschichtströmung* nach /3/

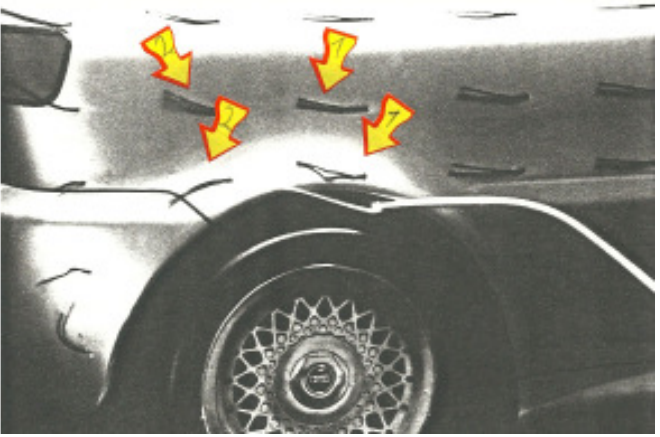
Analyse Todwasserbereich

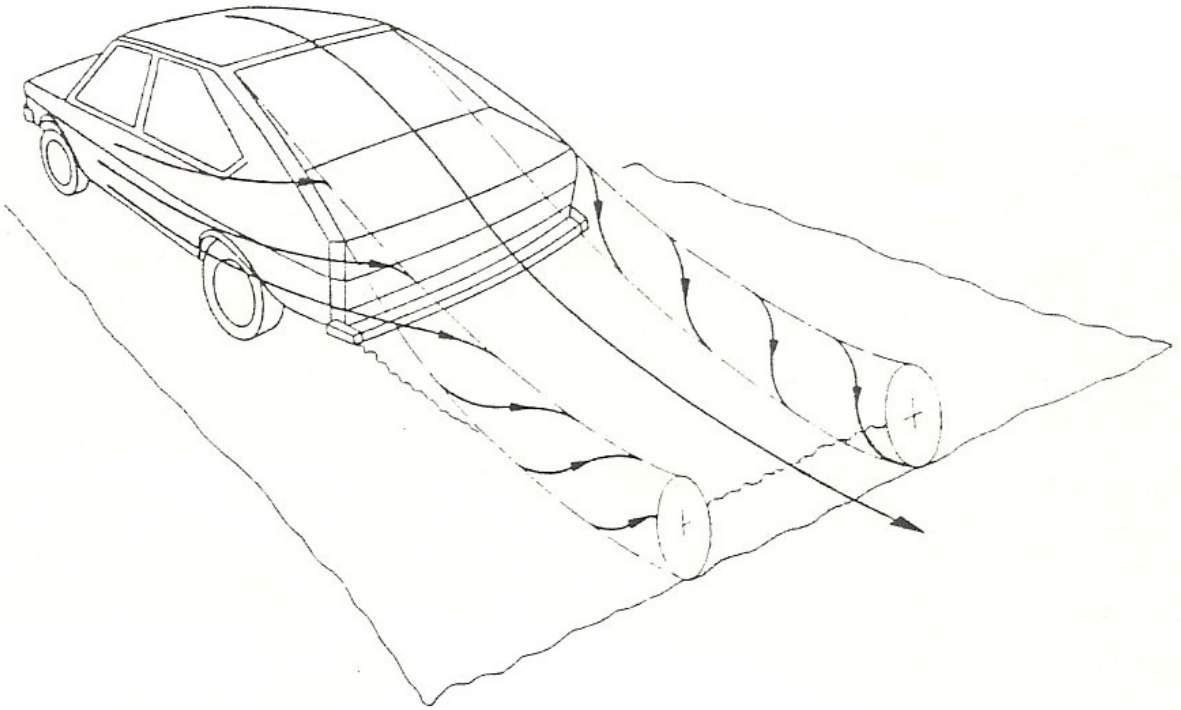


Am Fahrzeug Heck reißt die Luftströmung (möglichst definiert) ab
und erzeugt einen Unterdruck (Sog).
In diesem Sog entsteht eine Luftwalze (Todwasserbereich).
Ein Kombiheck erzeugt tendenziell mehr Unterdruck als ein niedriges Stufenheck.

Analyse: Heckeinzug / C-Säule

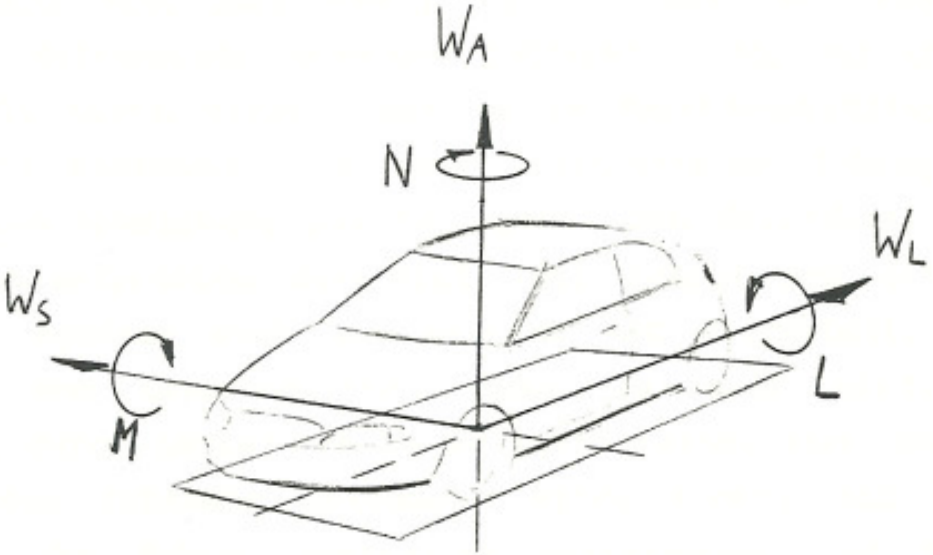
- - Druckspitze an der C-Säule:
gegenläufig gedrehte Wirbel, die von der Überströmung des Fahrzeugs nach unten gedrückt werden;
(Zu früh einsetzende Strömungsablösung/Druckerhöhung)

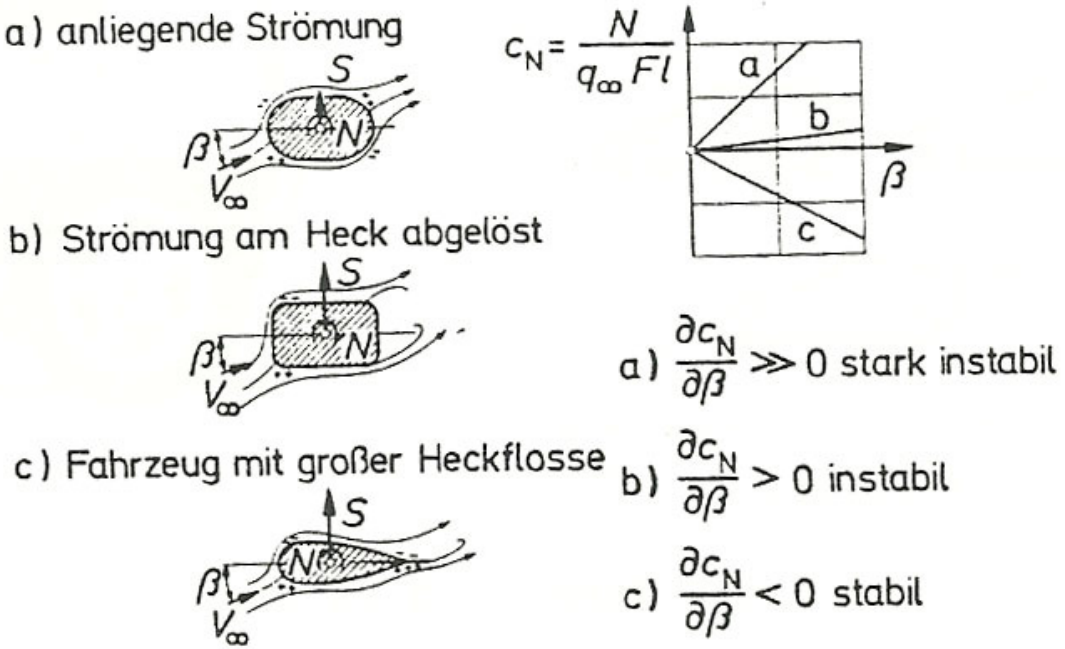


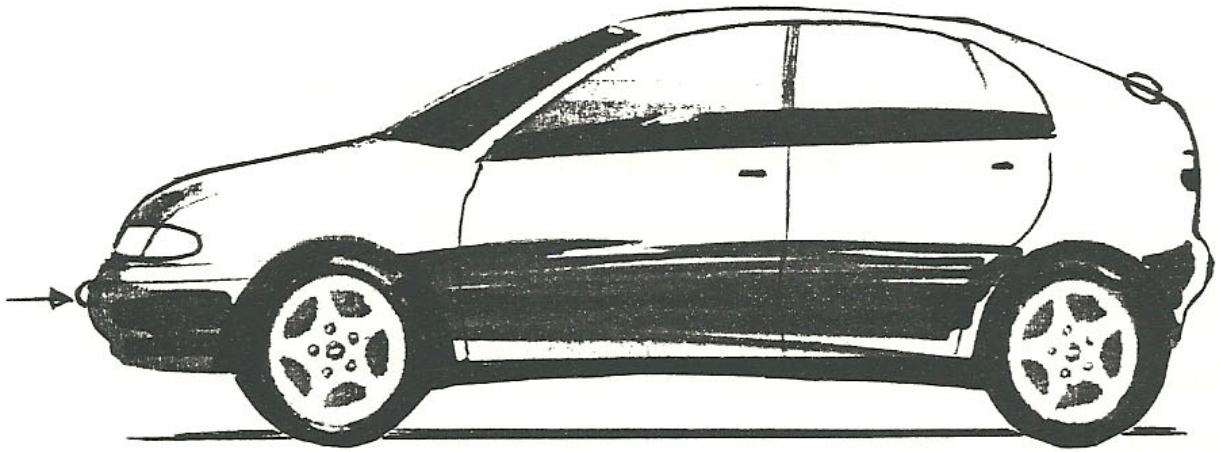


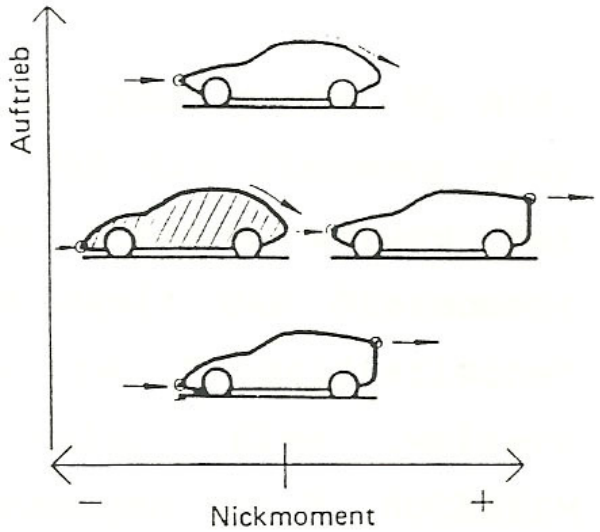
Hecklängswirbel (bei jedem Pkw mehr oder weniger) aufgrund der Druckdifferenz:
Seite: hohe Drücke, niedrige Geschwindigkeit
Dach: niedrige Drücke, hohe Geschwindigkeit

- - Form der Radwülste führen zu vorzeitiger Strömungsablösung

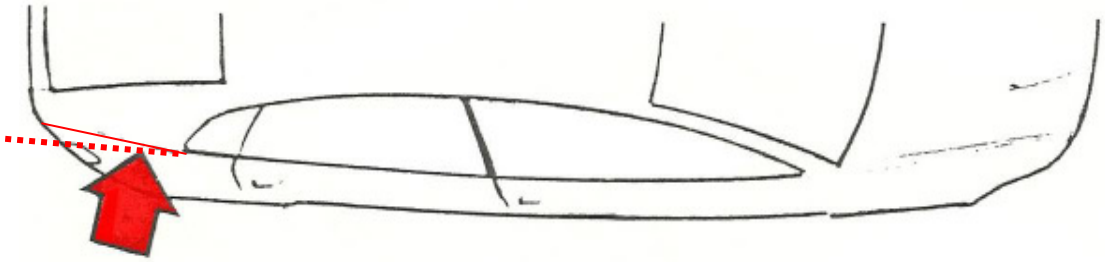

W_A
N
W_L
W_S
L
M


a) anliegende Strömung
S
N
β
V_∞
b) Strömung am Heck abgelöst
S
N
β
V_∞
c) Fahrzeug mit großer Heckflosse
S
N
β
V_∞
$c_N = \frac{N}{q_\infty F l}$
a
b
c
β
a) $\frac{\partial c_N}{\partial \beta} \gg 0$ stark instabil
b) $\frac{\partial c_N}{\partial \beta} > 0$ instabil
c) $\frac{\partial c_N}{\partial \beta} < 0$ stabil

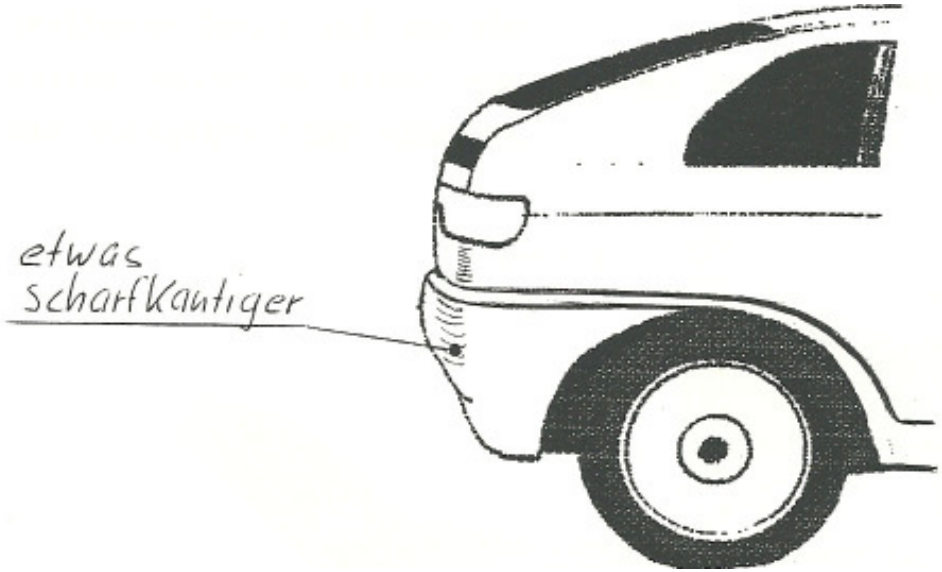



Auftrieb
Nickmoment
−
+

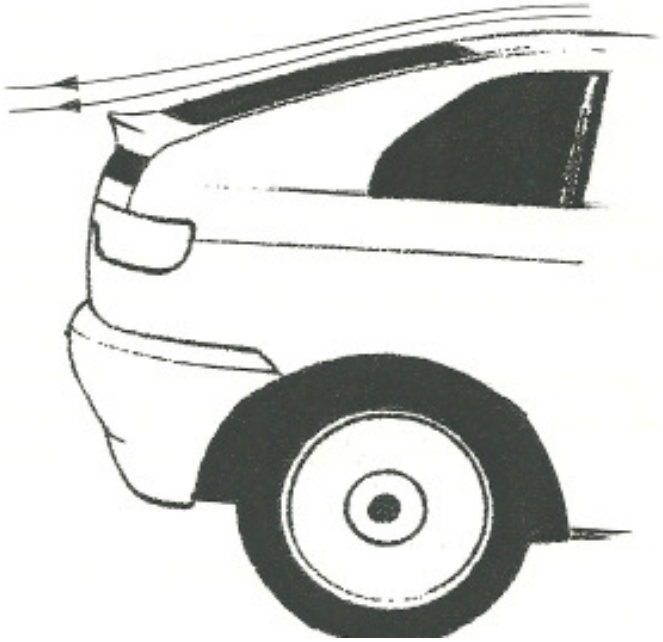
Detailoptimierung Maßnahme 1

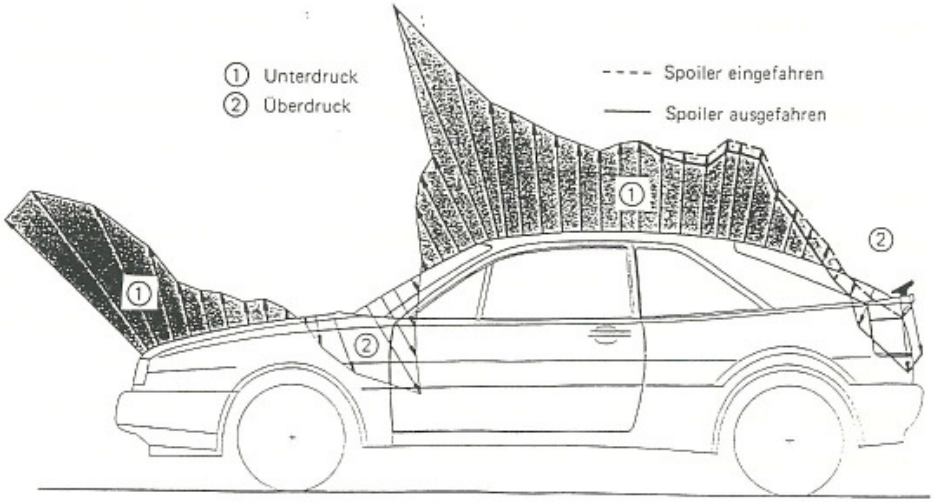


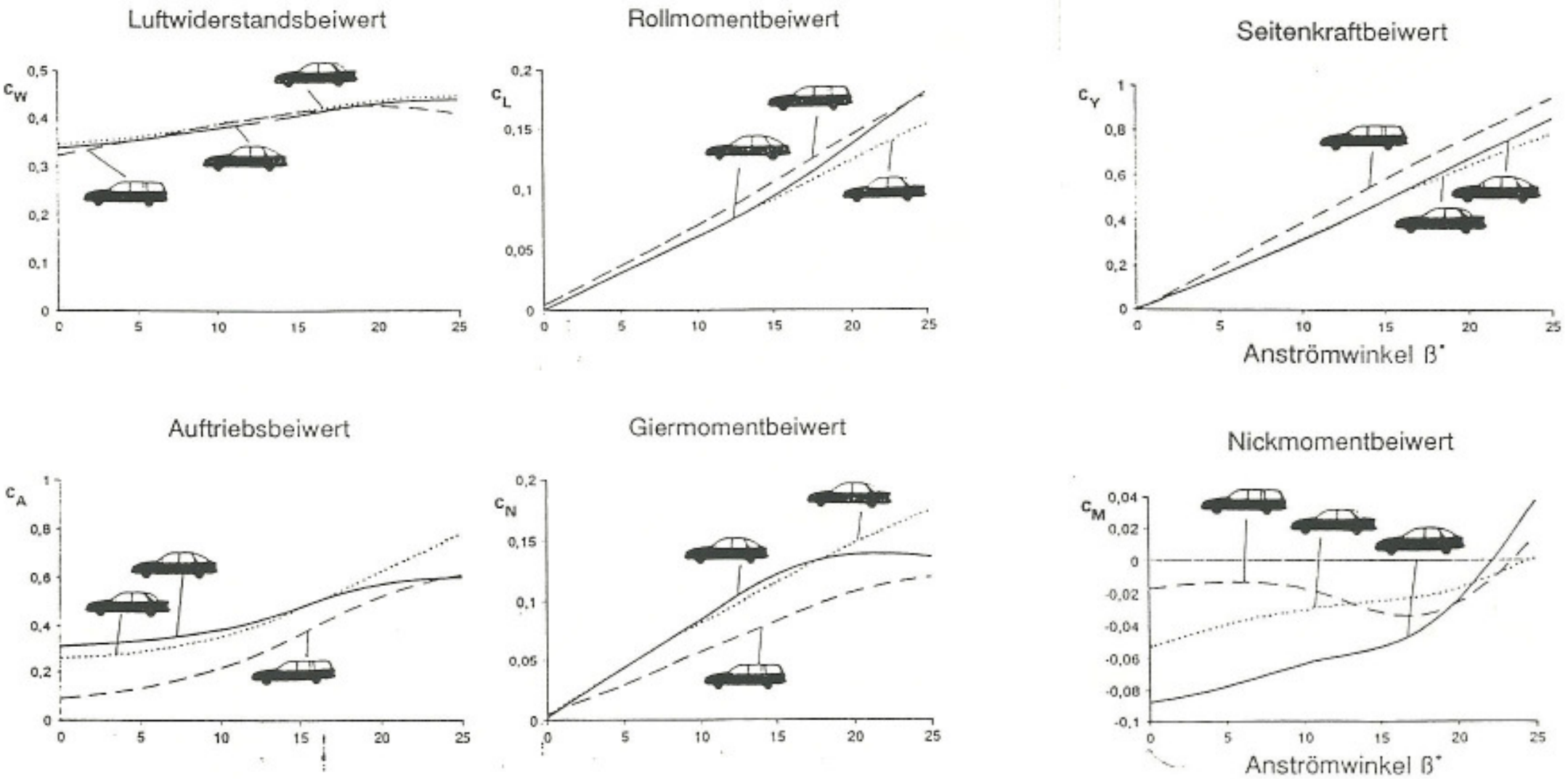
Detailoptimierung Maßnahme 2



Detailoptimierung Maßnahme 3






Luftwiderstandsbeiwert
c_W
Rollmomentbeiwert
c_L
Seitenkraftbeiwert
c_Y
Anströmwinkel β°
Auftriebsbeiwert
c_A
Giermomentbeiwert
c_N
Nickmomentbeiwert
c_M
Anströmwinkel β°

Luftwiderstandsbeiwert cw in Abhängigkeit von ß:

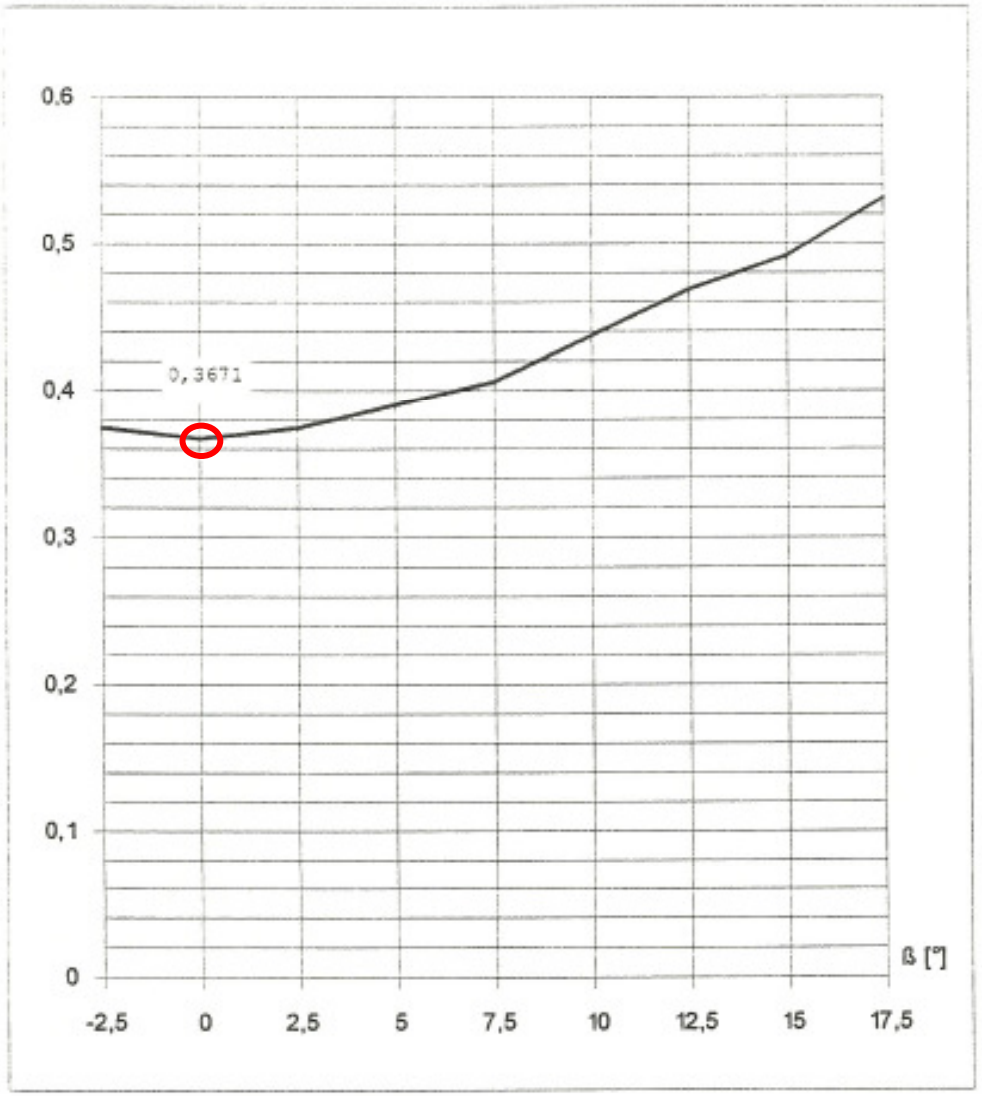


Bild A 1

ß [°]	- 2,5	0,0	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5
CW	0,375	0,367	0,375	0,391	0,406	0,437	0,469	0,492	0,531

Tab. A 1

WL und WA in Abhängigkeit von v_∞ bei ß = 0°:

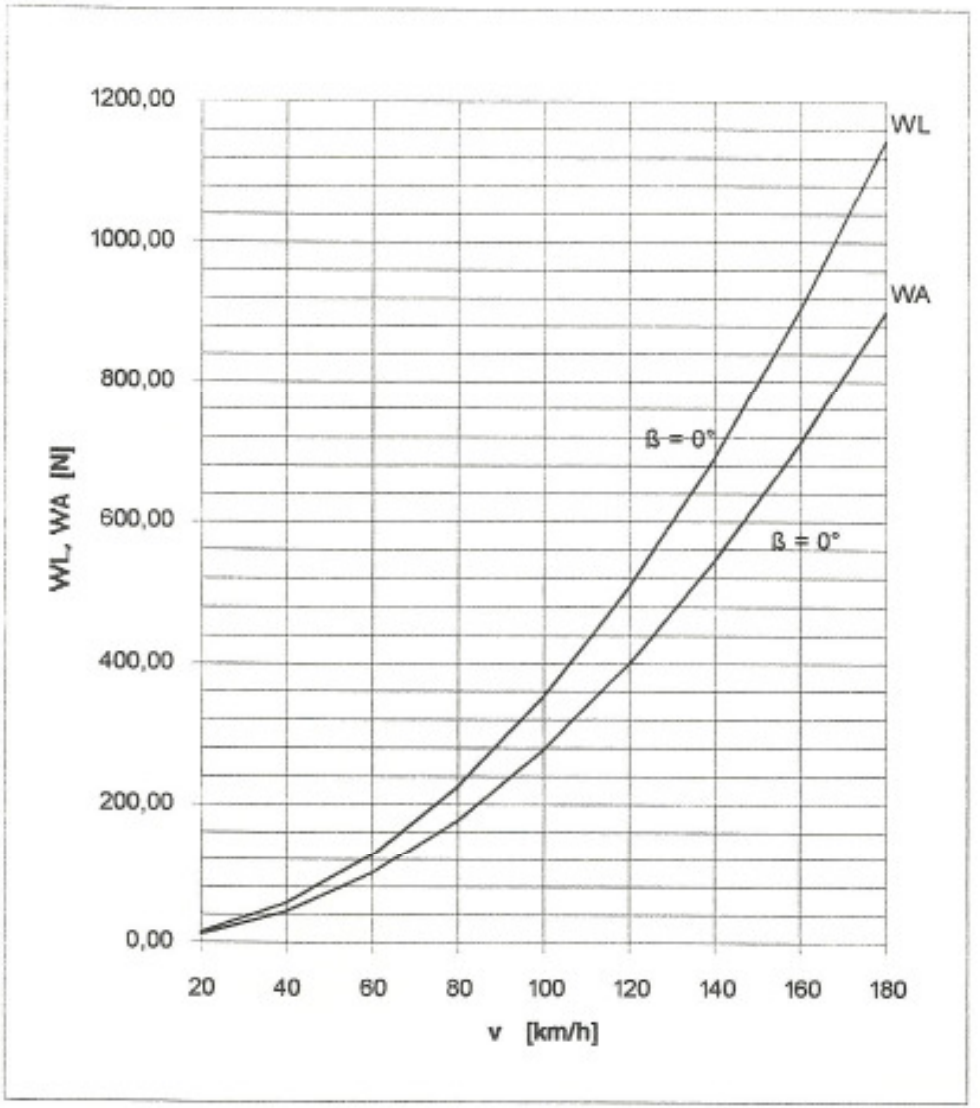
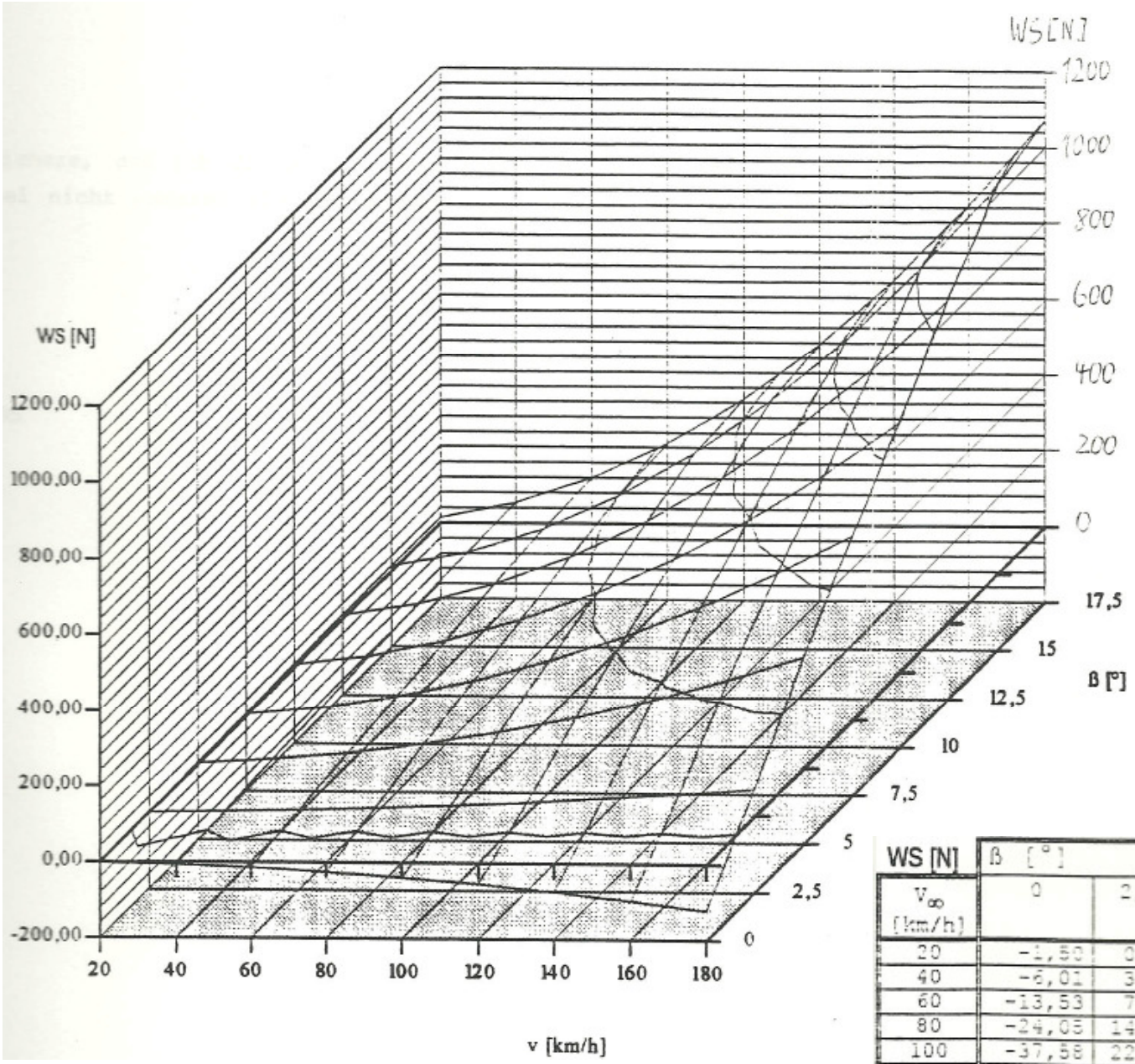


Bild A 8

v [km/h]	20	40	60	80	100	120	140	160	180
WL [N]	14,11	56,44	127,00	225,78	352,78	508,00	691,44	903,11	1143,00
WA [N]	11,11	44,44	100,00	177,78	277,78	400,00	544,44	711,11	900,00



WS [N]	ß [°]							
V_∞ [km/h]	0	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5
20	-1,50	0,88	3,61	6,00	8,11	10,49	12,61	13,22
40	-6,01	3,53	14,46	23,99	32,44	41,98	50,43	52,89
60	-13,53	7,94	32,53	53,97	73,00	94,44	113,47	119,00
80	-24,05	14,12	57,83	95,95	129,78	167,90	201,73	211,56
100	-37,58	22,07	90,35	149,92	202,78	262,35	315,20	330,56
120	-54,11	31,78	130,11	215,89	292,00	377,78	453,89	476,00
140	-73,65	43,25	177,10	293,85	397,44	514,20	617,80	647,89
160	-96,20	56,49	231,31	383,80	519,11	671,60	806,91	846,22
180	-121,75	71,50	292,75	485,75	657,00	850,00	1021,25	1071,00

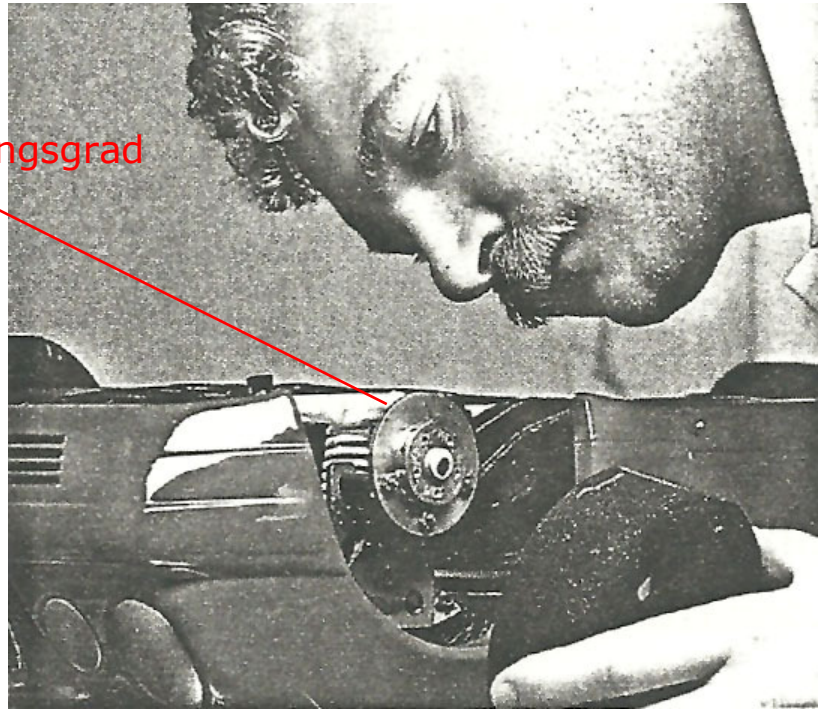
STYLINGMODELL

Bildquelle: Autor

WINDKANALMODELL

++ Durchströmung

++ hoher Detaillierungsgrad



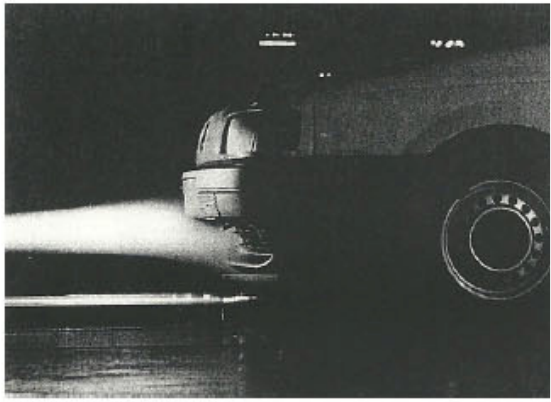
Daimler-Benz AG
Bildquelle: /6/

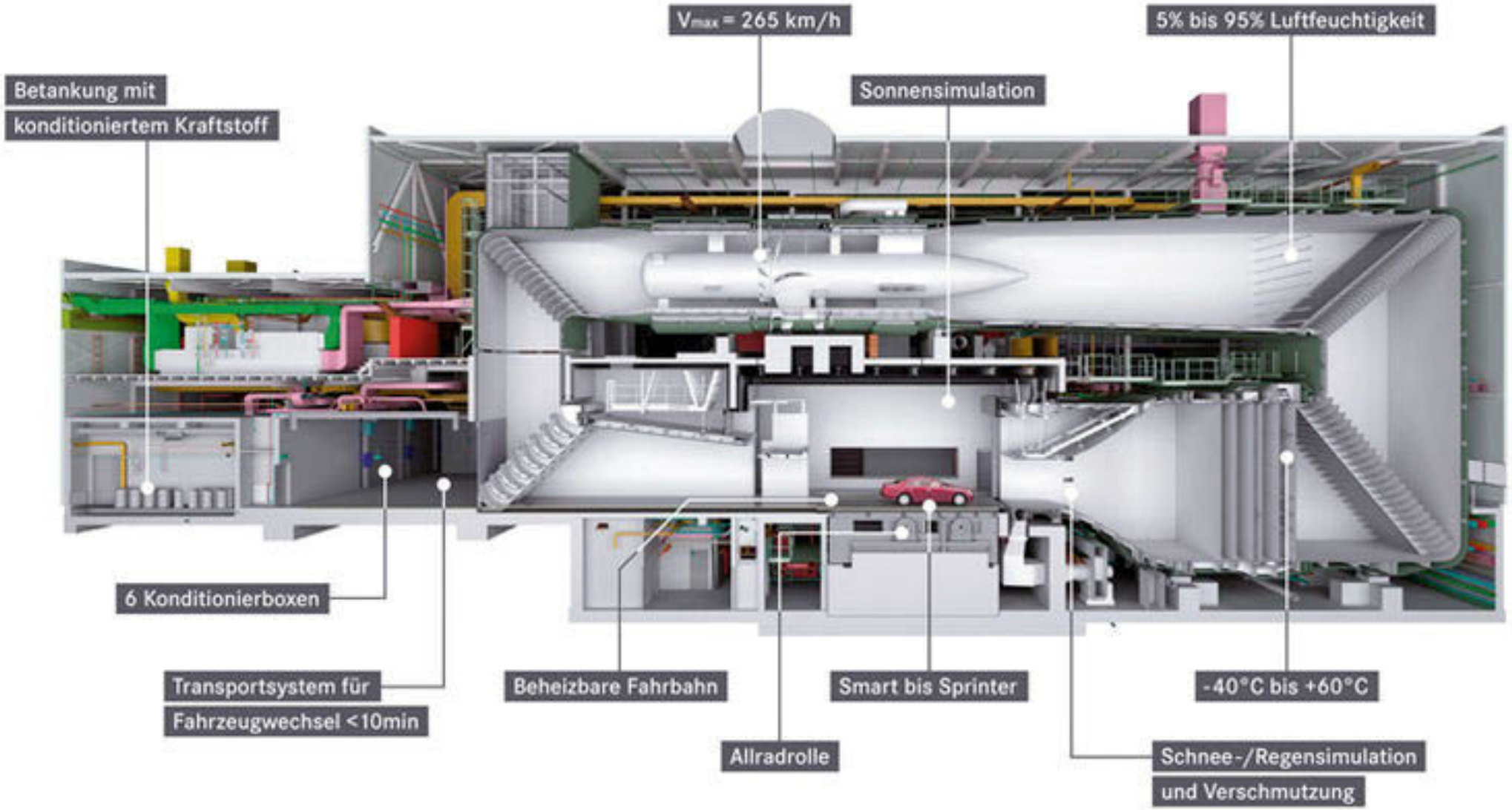
Aerodynamische Untersuchungen

heute weiter gefächert

Prioritäten unterschiedlich

Höchstgeschwindigkeit	Hohe Geschwindigkeiten bei sicherem Fahrverhalten
Wirtschaftlichkeit	Niedriger Spritverbrauch
Richtungsstabilität	Geradeauslauf Eigenlenkverhalten Seitenwindempfindlichkeit
Durchströmung der Karosserie	Funktion der Aggregate Motorkühlung Bremsen Kühlung
Fahrsicherheit Komfort Innenraum	Verschmutzung Heck / Beleuchtungsanlage angenehmes Innenklima niedrige Windgeräusche



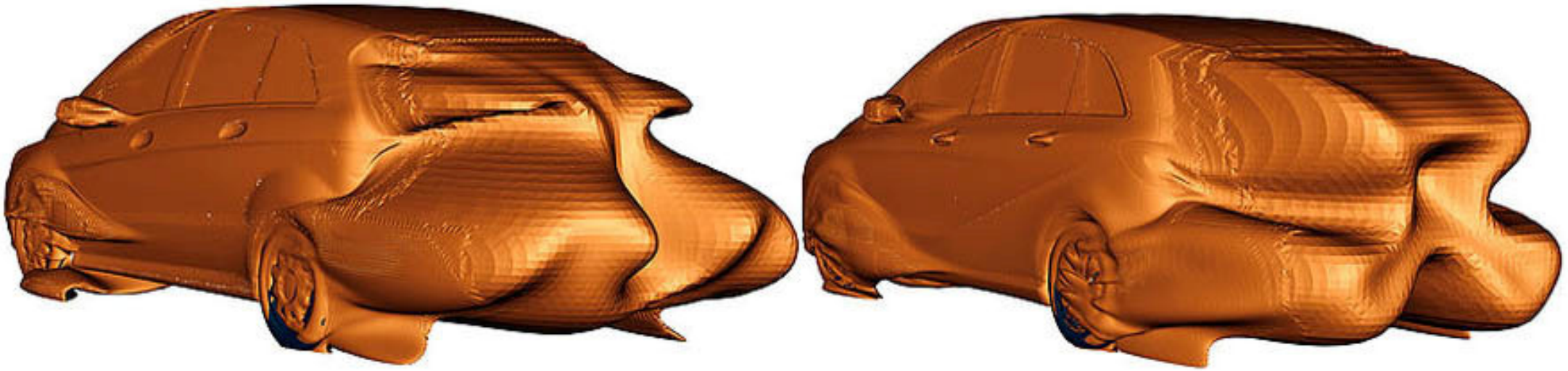


Mercedes Windkanal, mit umlaufendem Luftstrom (Göttinger Bauart).

Die fixierten Fahrzeuge fahren auf Rollen, um z.B. auch die Umströmung der Räder analysieren zu können.

Die Rollen sind gleichzeitig Mess-Waage.

cw = 0,26

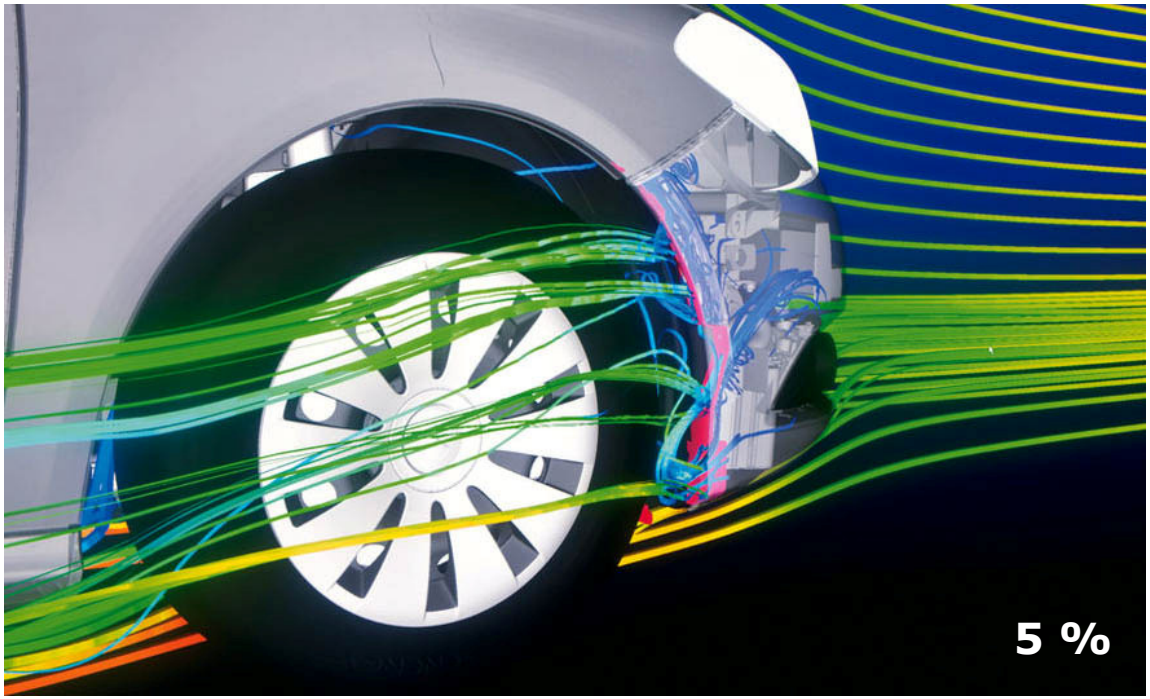


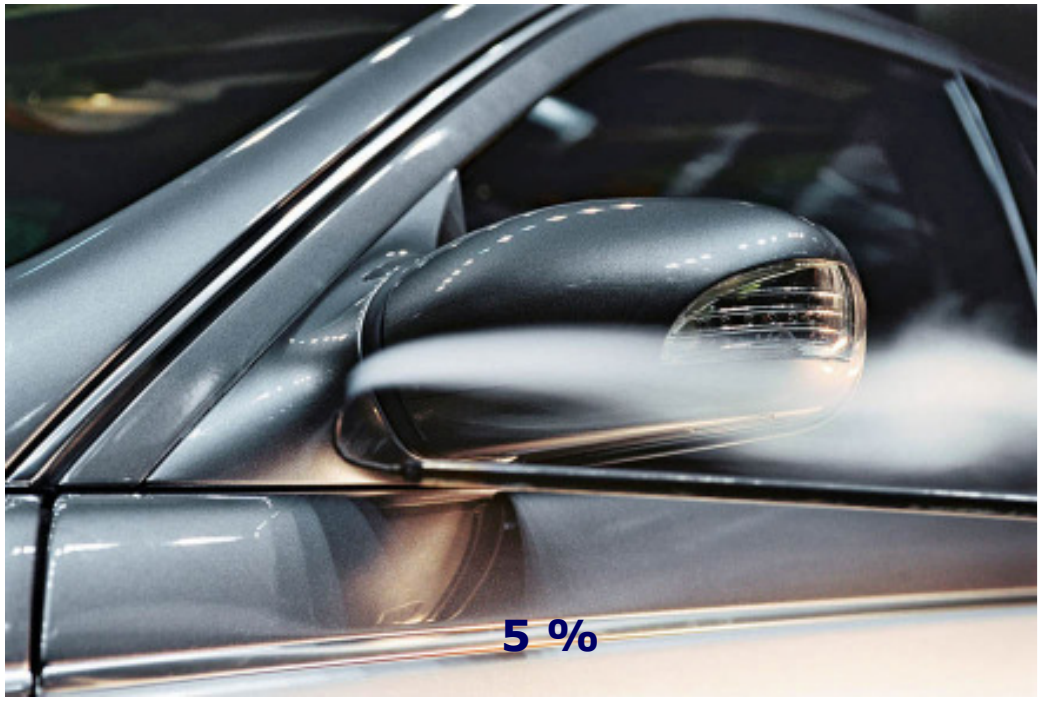
Optimierung Heckbereich:

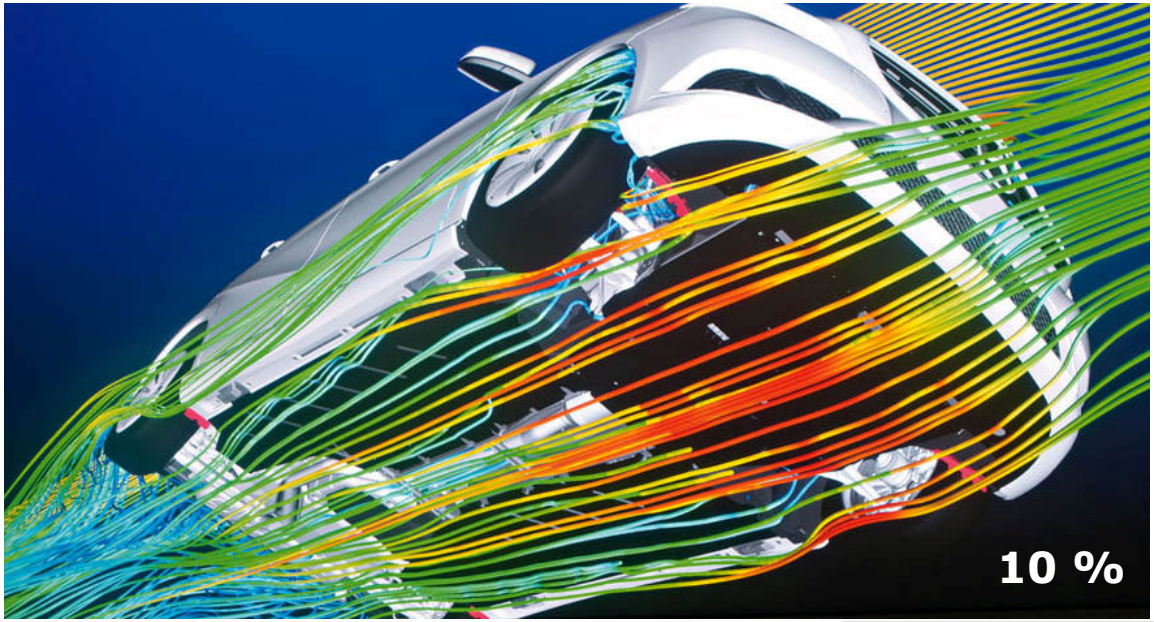
rechts: die neue B-Klasse zeigt ein wesentlich besseres Fließverhalten der Luft,

damit weniger Luftwirbel (Quelle: Mercedes-Benz);

siehe auch Radhäuser vorne;







links oben: Eine Optimierung der Radhäuser bringt bis zu 5% Verbesserung cw.

Gleiches gilt für die Außenspiegel (bis ca. 5%).

Bei der Unterbodenverkleidung lassen sich bis zu 10% erreichen.

Bildquelle: Mercedes-Benz AG

Analyse und Visualisierung der Strömung im Todwasserbereich.

-> Minderung der Verschmutzung von Heckscheibe und Scheinwerfern.

VW XL1

Bj. 2011

cw = 0,19

Honda Insight,

Bj. 1999

cw = 0,26

Air-Cap (Mercedes Cabrio) mit aktiver Luftführung, reduziert Wirbel und Luftwiderstand. (Quelle: Mercedes-Benz)

Kühlerjalousien: aktive Luftklappen reagieren auf den Luftbedarf,

Steigerung des cw Wertes um ca. 5% (Quelle: BMW AG)

Quellen:

u.a.:

/1/ Schuckert: Der Windkanal des Instituts für Schiffbau, Informationsblatt des Instituts, 1-1993

/2/ Hucho, Wolf-Heinrich (Hrsg.): Aerodynamik des Automobils, 3. Aufl., Düsseldorf: VDI, 1994

/3/ Hucho, Wolf-Heinrich (Hrsg.): Aerodynamik des Automobils, 1. Aufl., Würzburg: Vogel, 1981

/4/ Prandtl, Ludwig / K. Oswatitsch / K. Wieghardt: Führer durch die Strömungslehre, Braunschweig: Vieweg 1994

/5/ Schlichting, Hermann: Grenzschicht-Theorie, 5. Aufl., Karlsruhe: G. Braun, 1965

/6/ Daimler-Benz AG, Abt. Öffentlichkeitsarbeit und Wirtschaftspolitik (Hrsg.):
Daimler-Benz HighTech Report, Berichte aus Forschung, Technik, Umwelt, Heft 3/1995, Verlag des Hrsg.