



Fahrzeug- und Windradaerodynamik

Vehicle and windturbine aerodynamics

Dr.-Ing. A. Henze, Prof. Dr. sc. D. Krug

Institute of Aerodynamics

RWTH Aachen University

Inhalt

- Literatur und Termine
- Anliegende und abgelöste Strömungen
- Definition stumpfer Körper

Literatur und Termine

Literatur

- Hucho: Aerodynamik der stumpfen Körper
- Hucho: Aerodynamik des Automobils
- Hau: Windkraftanlagen

Klausur: 2 Stunden, 30.7.2024

Termine

- Sprechstunde: Freitags, 9:00 – 11:00 Uhr
- Mail: a.henze@aia.rwth-aachen.de

Schlanke und stumpfe Körper

Anliegende und abgelöste Strömungen

Anliegende und abgelöste Strömungen

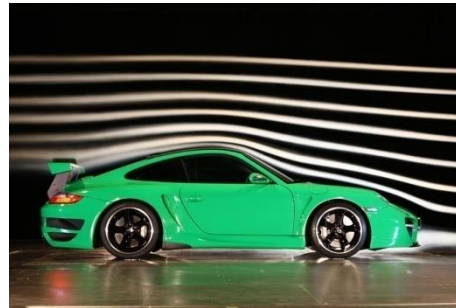
Schlanke Körper

- Vermeidung von Ablösung
- Maximierung von Auftrieb
- Minimierung von Widerstand
- Beispiele
 - Tragflügel
 - Turbinenschaufel

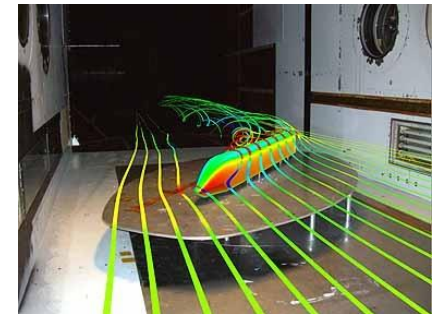
Stumpfe Körper

- Eisenbahnen
- Schiffe
- Bauwerke
- Automobile
- Landschaftsformationen

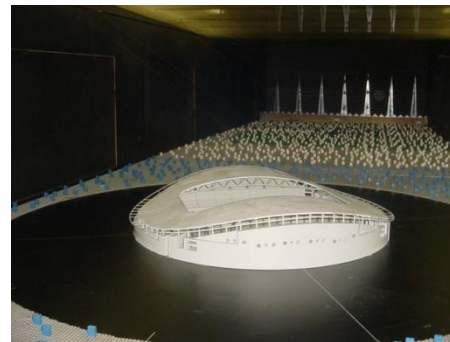
Typische stumpfe Körper in Natur und Technik



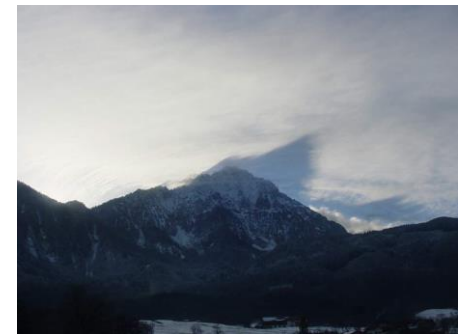
www.sportauto-online.de



DLR



IFH, UNI Karlsruhe

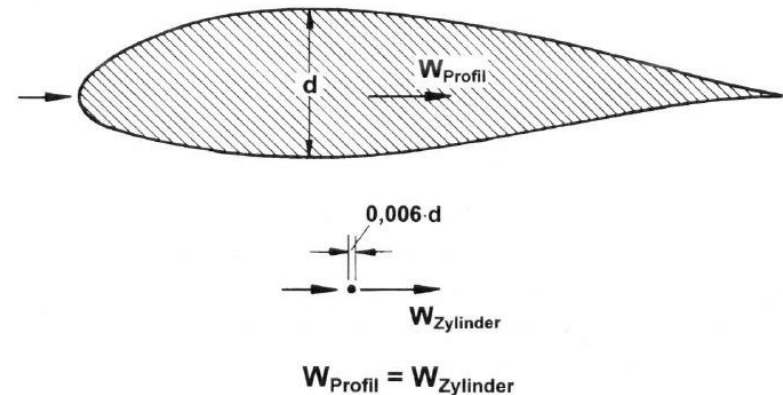


www.alpenstreckenflug.de

Anliegende und abgelöste Strömungen

Zwei grundlegend verschiedene Ziele

- Formen entwickeln, die bestimmte gewünschte Eigenschaften besitzen (z.B. Auto)
- Vorgegebene Formen, bei denen unerwünschte aerodynamische Eigenschaften vermieden werden (z.B. Bauwerke)



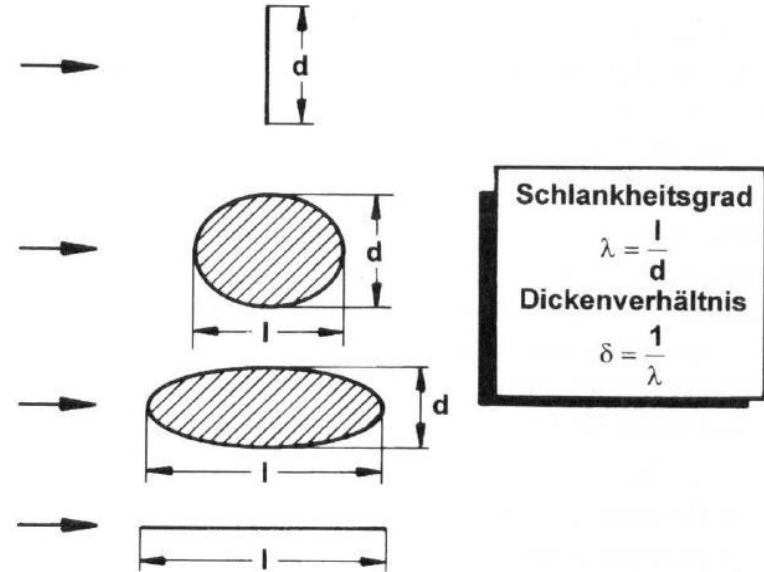
Zwei Körper gleichen Widerstands

- Bei stumpfen Körpern ist die Strömung fast immer abgelöst. Daher sind die auftretenden Kräfte i.a. deutlich größer.
- Die Strömungsmechanik ist nicht das dominierende Gestaltungselement

Definition stumpfer Körper

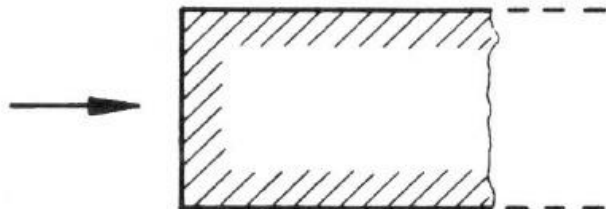
Definition stumpfer Körper

- Geometrie des Körpers
- Strömungsbild um den Körper
- Wirksame Kräfte
- Wirkung auf das Umfeld



Hucho, Aerodynamik der stumpfen Körper

Stumpfer „Kopf“ und stumpfes Ende

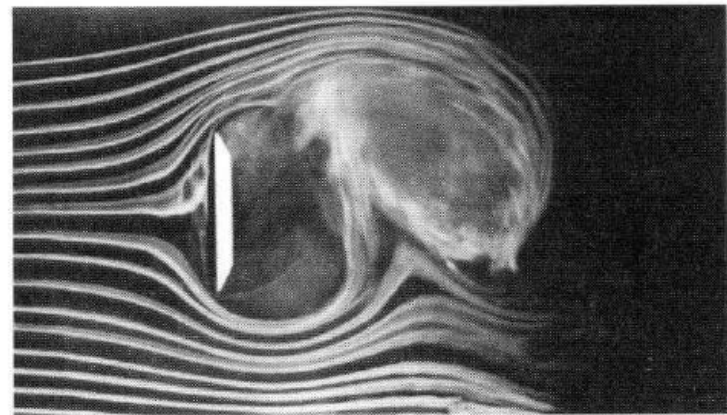
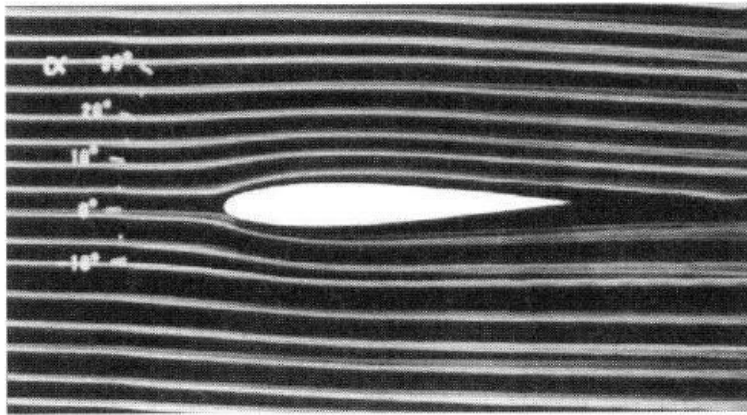


Hucho, Aerodynamik der stumpfen Körper

Definition stumpfer Körper

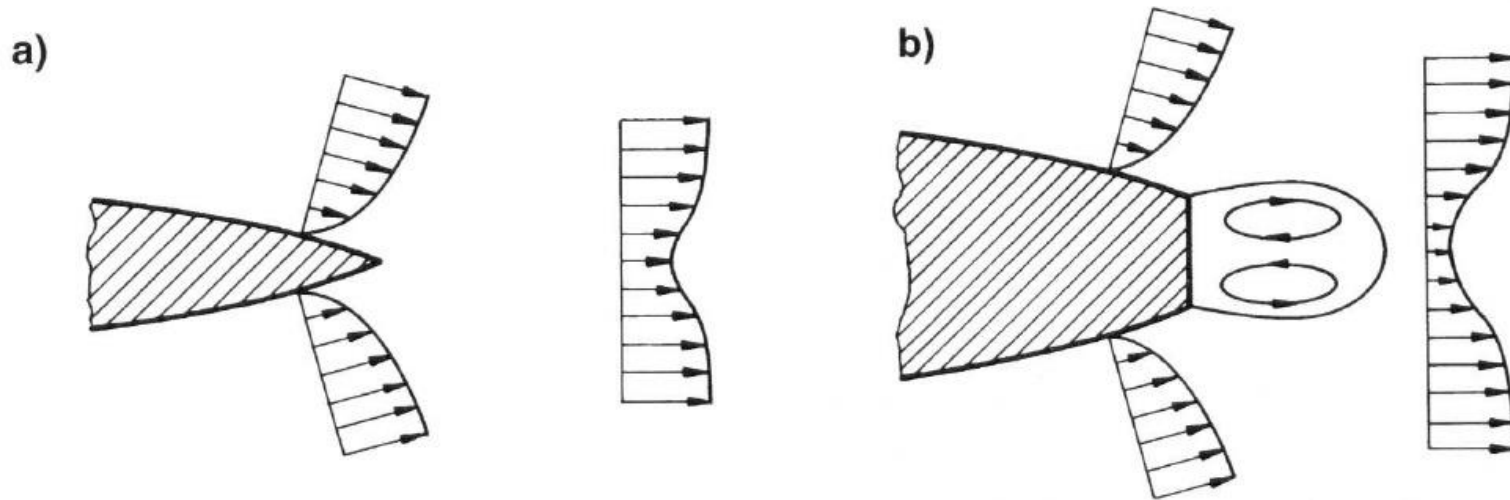
- Von Ablösungen geprägt
- Zähigkeitseffekte überwiegen
- Scherschichten
- Totwasser
- Instationär
- Instabil

Stromlinienbild eines schlanken und eines stumpfen Körpers, $Re = 10^4$



Hucho, Aerodynamik stumpfer Körper

Definition stumpfer Körper

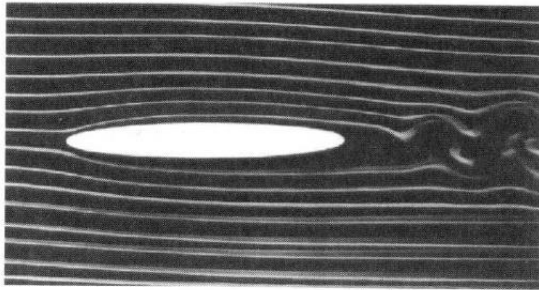


Hucho, Aerodynamik stumpfer Körper

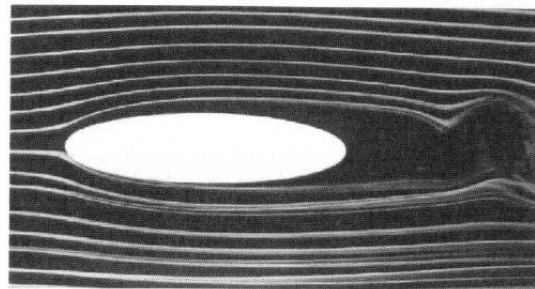
- Schematische Darstellung der Abströmung eines schlanken (a) und eines stumpfen Körpers (b)
- Beim schlanken Körper bildet sich ein Nachlauf. Die Grenzschichten der Ober- und der Unterseite fließen an der Hinterkante zusammen.
- Beim stumpfen Körper bildet sich ein Totwasser.

Definition stumpfer Körper

Umströmung elliptischer Zylinder bei verschiedenen Dickenverhältnissen, $Re = 10^4$

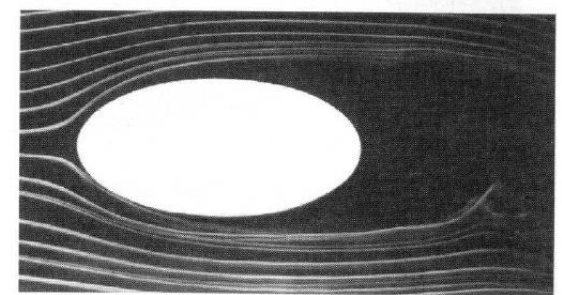


$d/l = 0.13$



Hucho, Aerodynamik stumpfer Körper

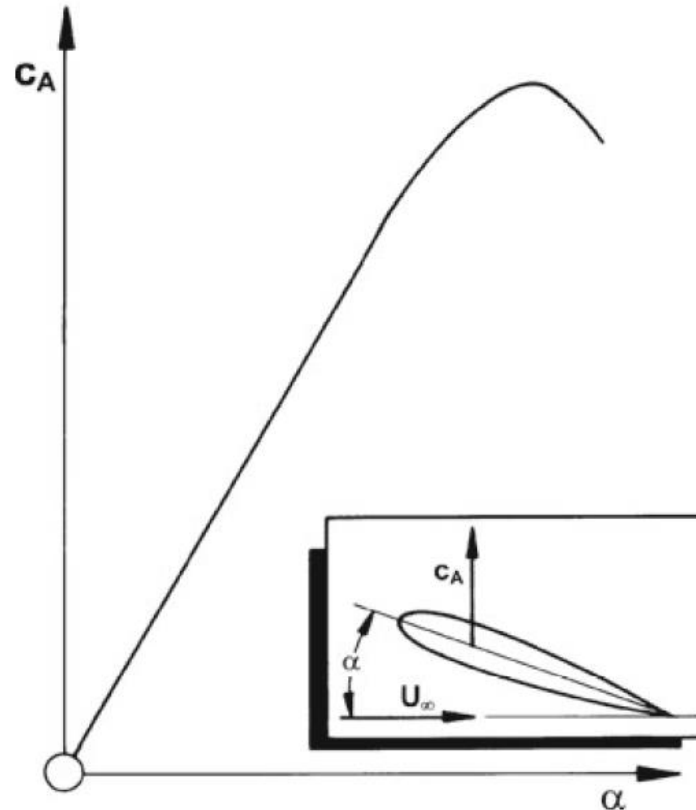
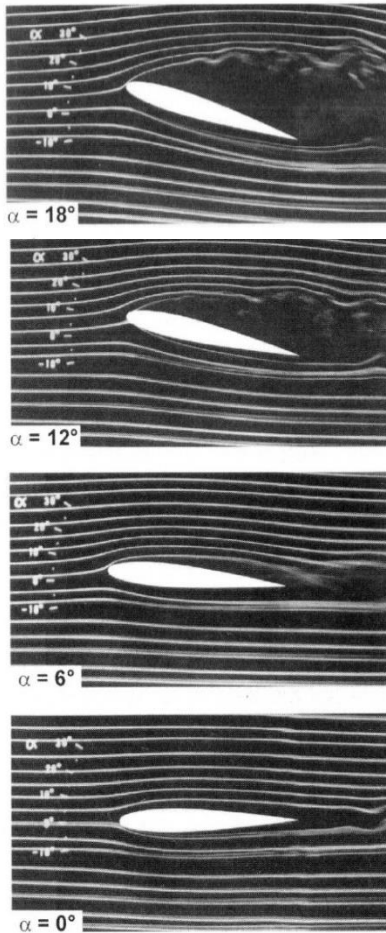
$d/l = 0.26$



$d/l = 0.5$

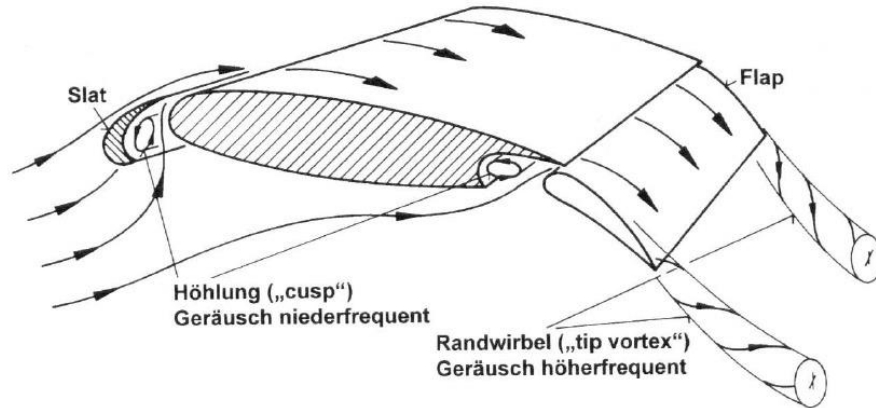
Definition stumpfer Körper

Schlank Körper verhalten sich wie stumpfe bei großen Anstellwinkeln



Hucho, Aerodynamik stumpfer Körper

Definition stumpfer Körper



Hucho, Aerodynamik stumpfer Körper

- Verhältnis von Druck- und Reibungs-widerständen an stumpfen und schlanken Körpern

- Typische Phänomene stumpfer Körper treten auch am Tragflügelprofil auf

Körper	Widerstand	
	Druck	Reibung
	100%	0%
	90%	10%
	60%	40%
	10%	90%
	0%	100%

Hucho, Aerodynamik stumpfer Körper

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Dr.-Ing. A. Henze, Prof. Dr. sc. D. Krug
Institute of Aerodynamics, RWTH Aachen University



Fahrzeug- und Windradaerodynamik

Vehicle and windturbine aerodynamics

Dr.-Ing. A. Henze, Prof. Dr. sc. A. Krug

Institute of Aerodynamics, RWTH Aachen University

Strömungsphänomene

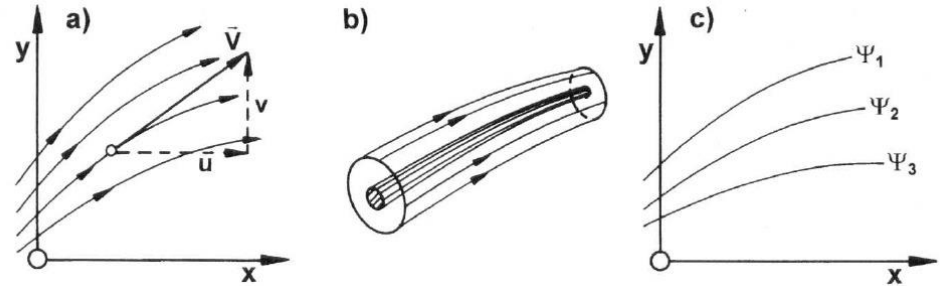
Inhalt

- Umströmung von Körpern
 - Kräfte und Momente
 - Grenzschicht
- Abgelöste Strömungen
- Beeinflussung des Totwassers
 - Einzüge
 - Eingriff in die Struktur des Totwassers
 - 3-dimensionale Heckformen und Effekte
- Wirkung auf das Umfeld
 - Bodennähe
 - Schwingungen

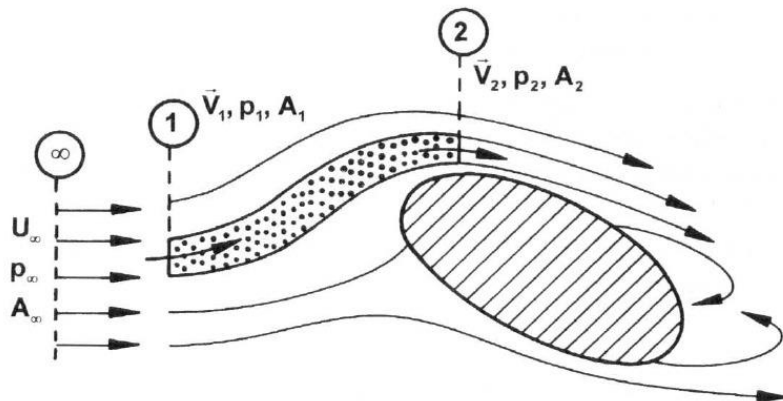
Umströmung von Körpern

Umströmung von Körpern

$$\frac{dy}{dx} = \frac{v(x, y)}{u(x, y)}$$



Definition: a) Stromlinie, b) Stromröhre, c) Stromfunktion



Definition der Stromlinie

Kontinuitätsgleichung $V_1 A_1 = V_2 A_2$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$V(x, y) = U_\infty \frac{A_\infty}{A(x, y)}$$

Umströmung von Körpern

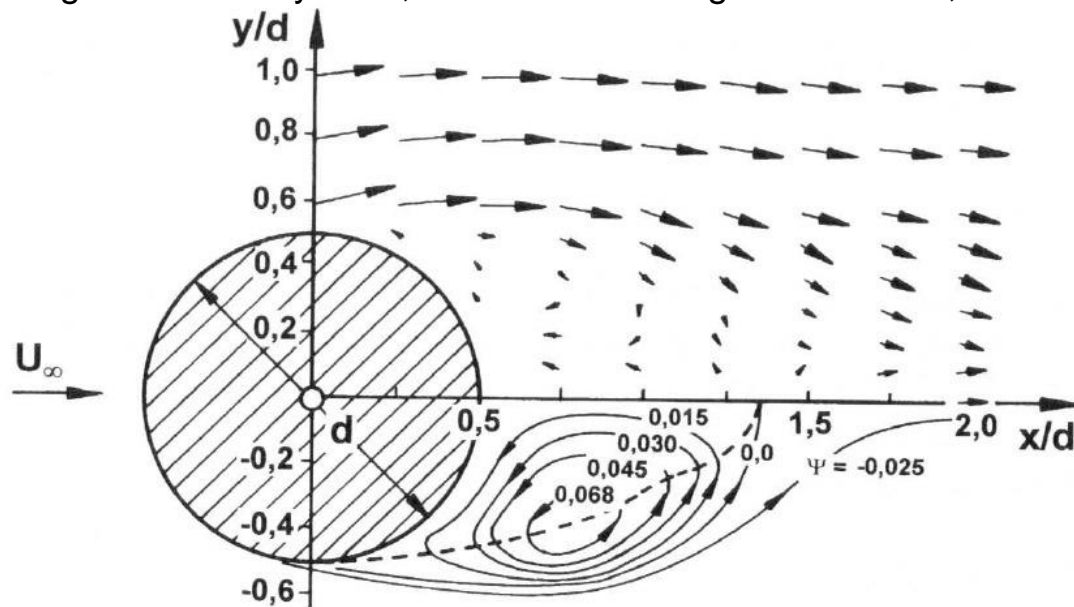
Stromfunktion $u = \frac{\partial \Psi}{\partial y} \quad v = -\frac{\partial \Psi}{\partial x}$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} = 0$$

$$\Psi = \int_{\Psi_1}^{\Psi_2} u(y) dy$$

$$\dot{Q} = \Psi_2 - \Psi_1$$

Umströmung eines Kreiszyinders, oben Geschwindigkeitsvektoren, unten Stromlinien



Leder, A. , Abgelöste Strömungen – Physikalische Grundlagen, Braunschweig, Vieweg, 1992

Umströmung von Körpern

Bernoulli-Gleichung

$$\frac{1}{2}\rho V_1^2 + p_1 = \frac{1}{2}\rho V_2^2 + p_2$$

$$\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 + p_\infty = \frac{1}{2}\rho V_2^2 + p_2$$

Eulerzahl

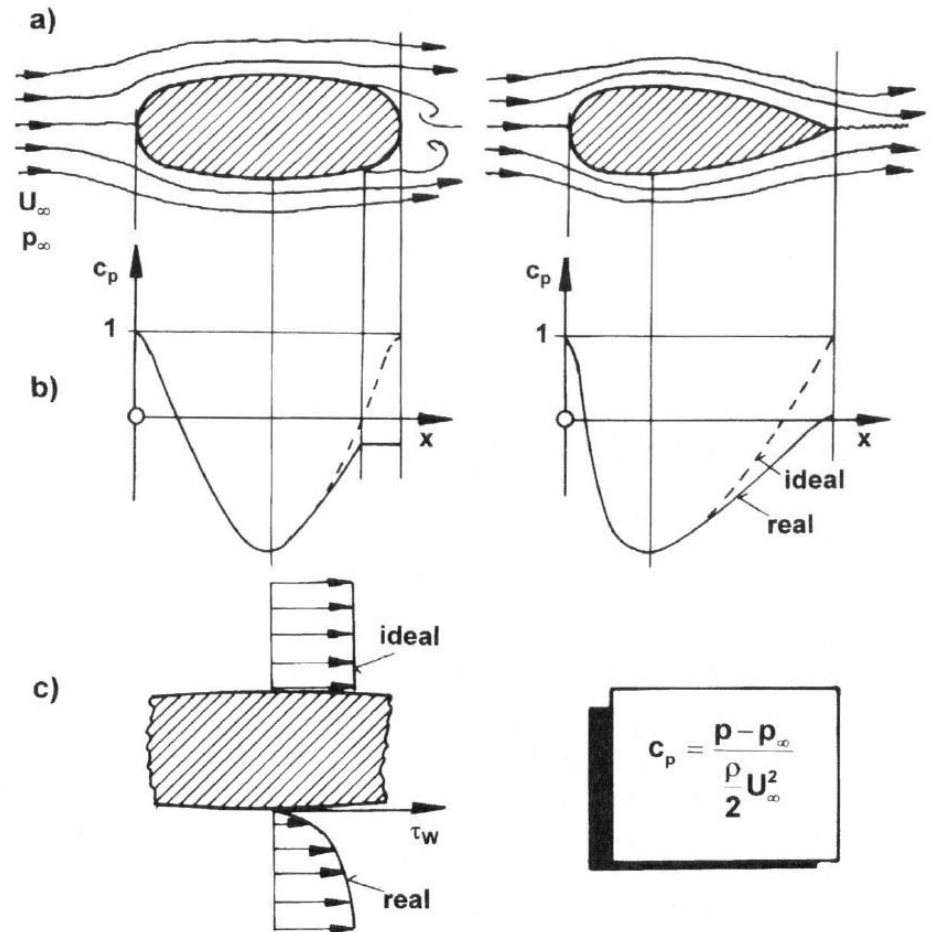
$$Eu = \frac{p}{\rho U_\infty^2}$$

Kraftbeiwert

$$Eu = \frac{p}{\rho U_\infty^2} \Rightarrow c_p = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \Rightarrow c_F = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A}$$

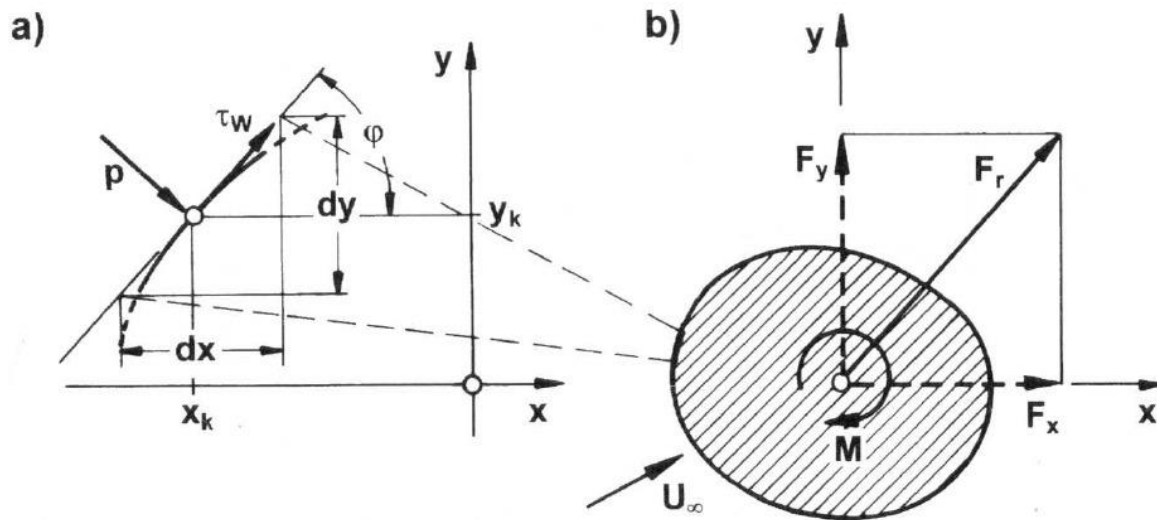
Momentenbeiwert

$$c_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 Al}$$



Vergleich der Umströmung eines stumpfen und eines schlanken Profils, a) Stromlinien, b) Druckverteilung, c) Haftbedingung

Kräfte und Momente



Kräfte und Momente an einem umströmten Körper

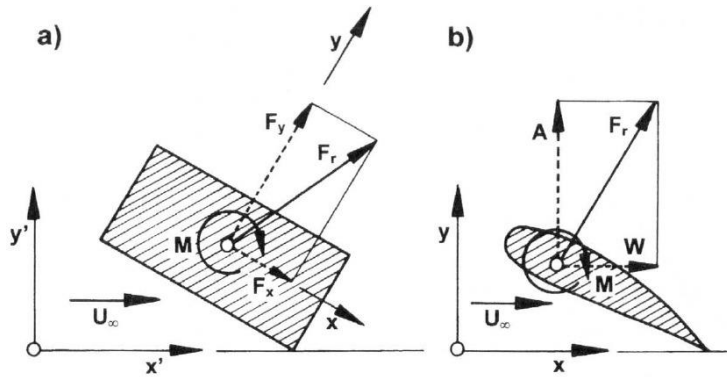
- a) Druck p und Wandschubspannung τ_w
- b) die resultierende Kraft und das Moment

$$F_x = b \oint p \frac{dy_k}{dx} dx + b \oint \tau_w dx$$

$$F_y = b \oint p dx + b \oint \tau_w \frac{dy_k}{dx} dx$$

$$M = b \oint p y_k \frac{dy_k}{dx} dx + b \oint \tau_w y_k dx + b \oint p x_k dx + b \oint \tau_w x_k \frac{dy_k}{dx} dx$$

Kräfte und Momente

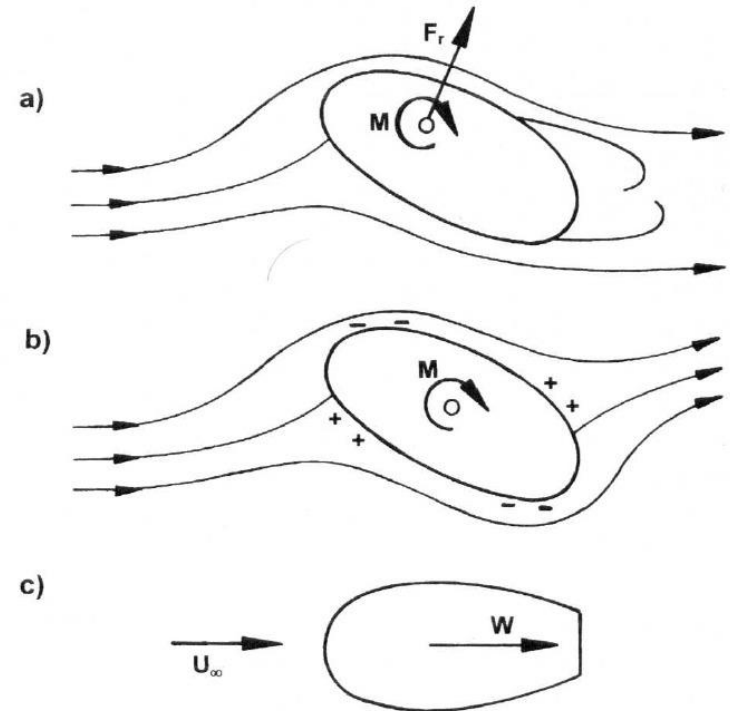


- Zerlegung der resultierenden Luftkraft F_r in
- a) die körperfesten Komponenten F_x und F_y
 - b) in die windfesten Auftrieb A und Widerstand W

$$W_f = \oint \tau_w \cos \phi \, ds$$

$$W_p = \oint p \sin \phi \, ds$$

$$W = W_f + W_p$$



- Die Invarianten eines Kräftesystems
- a) i.a. eine Einzelkraft und ein Moment
 - b) in reibungsfreier Strömung ein Moment
 - c) bei symmetrischer Strömung der Widerstand

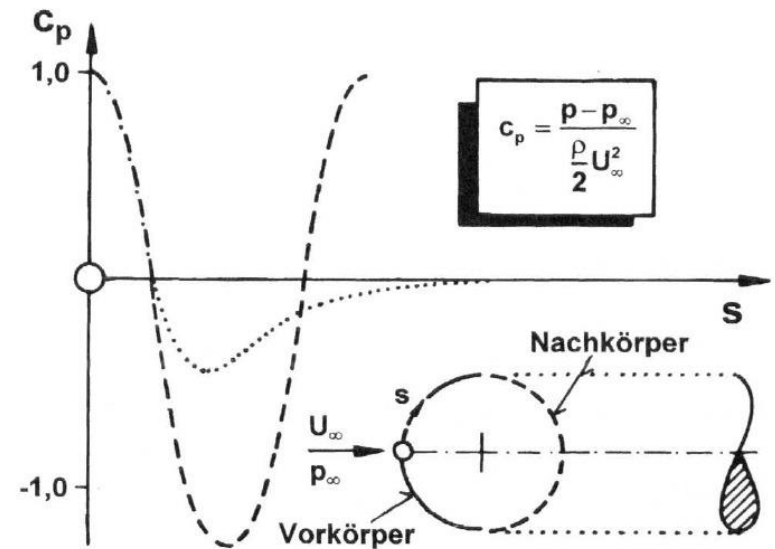
Kräfte und Momente

Kugel

- Symmetrische Druckverteilung
- Exakte Lösung aus Potentialtheorie
- Überlagerung von Parallelströmung und Dipol
- Kein Widerstand

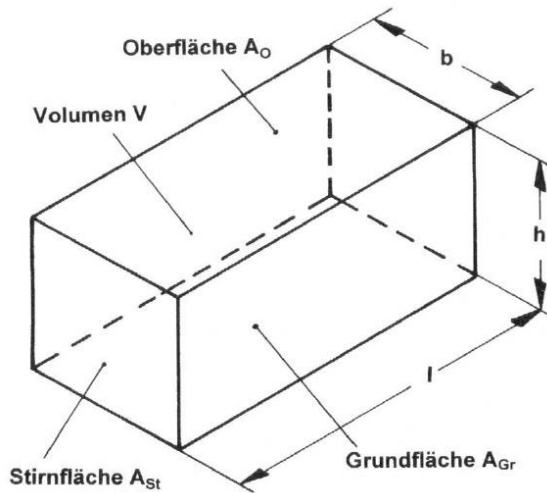
Kreiszyylinder

- Unterdruckspitze am Äquator ist schwächer
- Asymptotisch $c_p = 0$
- Bei Unendlich langem Nachkörper geht der Widerstand gegen Null



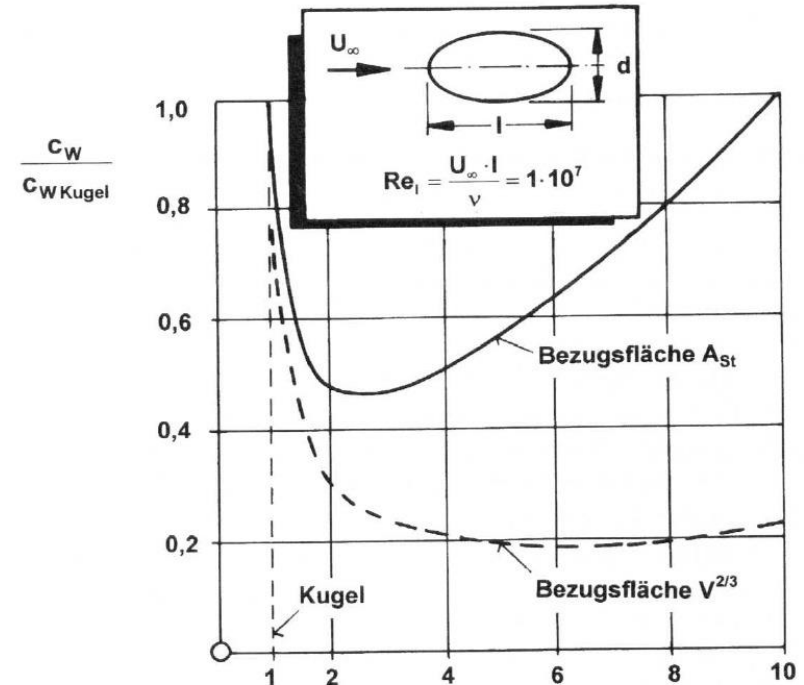
Vorkörper		Nachkörper		c_{wv}
—	Kugel	- - - -	Kugel	- 0,125
—	Kugel	Kreiszyylinder	0

Umströmung von Körpern



Flächen	
Stirnfläche	A_{St}
Grundfläche	A_{Gr}
Oberfläche	A_O
Volumen	$V^{2/3}$
Längen	
Länge	l
Breite	b
Höhe	h
Quermaß	$(A_{St})^{1/2}$

Bezugsflächen und Bezugslängen
bei der Bildung von dimensionslosen
Beiwerten



[Hoerner, S., Fluid Dynamic Drag, Midland Park, New Jersey] l/d

Widerstandsbeiwert c_W eines Rotationsellipsoids
bezogen auf den c_W – Wert der Kugel in Abhängigkeit
vom Schlankheitsgrad
Oben: Bezugsgröße ist A_{St}
Unten: Bezugsgröße ist $V^{2/3}$

Grenzschicht

Die Grenzschichtdicke nimmt mit der Lauflänge zu

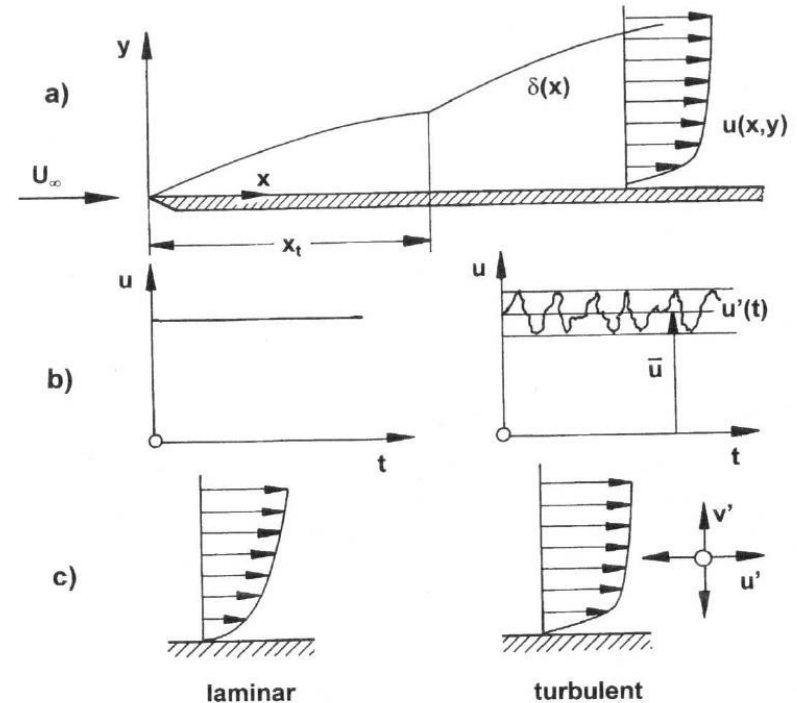
Zwei wesentliche Einflüsse

- Verhältnis der Trägheit zur Reibung
- Verlauf des statischen Druckes

$$Re = \frac{\rho U_{\infty} l}{\mu} = \frac{U_{\infty} l}{\nu}$$

$$Re_t = \frac{U_{\infty} x_t}{\nu} = 5 \cdot 10^5$$

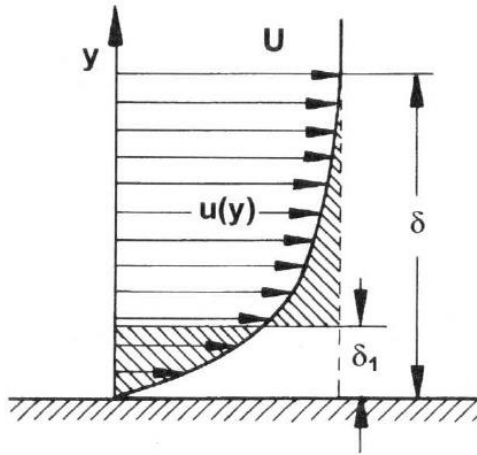
$$x_t = 5 \cdot 10^5 \frac{\nu}{U_{\infty}}$$



Die Grenzschicht an der längsangeströmten ebenen Platte

- Verlauf der Grenzschichtdicke $\delta(x)$
- Zeitlicher Verlauf der Geschwindigkeit $u(t)$ für die laminare und die turbulente GS
- Geschwindigkeitsprofile

Grenzschicht



Definition der Verdrängungsdicke δ_1

$$\delta_1 = \int_{y=0}^{\infty} \left(1 - \frac{u}{U_{\infty}}\right) dy$$

Definition der Impulsverlustdicke δ_2

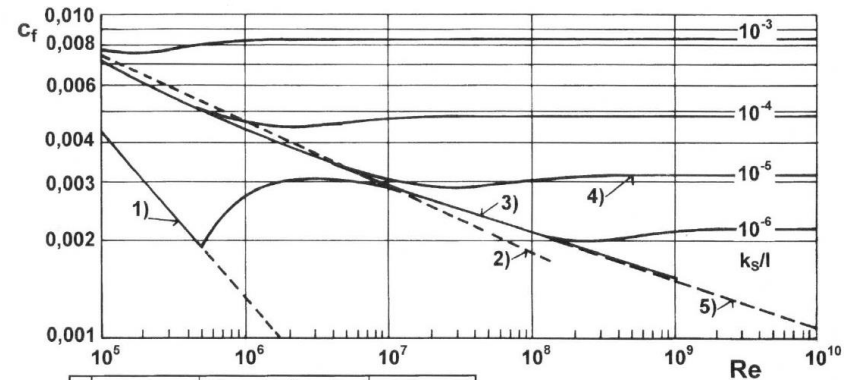
$$\delta_2 = \int_{y=0}^{\infty} \frac{u}{U_{\infty}} \left(1 - \frac{u}{U_{\infty}}\right) dy$$

Grenzschicht		
Kenngröße	laminar	turbulent**
$\delta(x) *$	$5,0 \text{Re}_x^{-1/2}$	$0,37 \cdot x \cdot \text{Re}_x^{-1/5}$
$\delta_1(x)$	$1,72 \text{Re}_x^{-1/2}$	$(1/8) \delta$
$\delta_2(x)$	$0,664 \text{Re}_x^{-1/2}$	$(7/72) \delta$
c_f^{***}	$1,328 \text{Re}_l^{-1/2}$	$0,074 \text{Re}_l^{-1/5}$

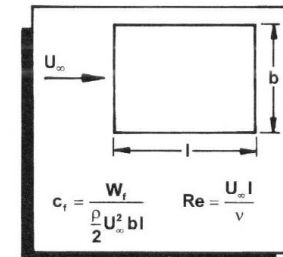
* Die Dicke der Grenzschicht wird dort gemessen, wo $u/U_{\infty} = 0,99$ ist.

** Es wird das 1/7-Potenzgesetz zugrundegelegt: $u/U_{\infty} = (y/\delta)^{1/7}$

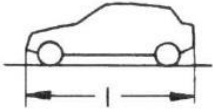

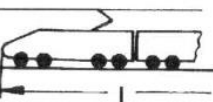
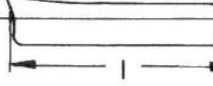
*** Im turbulenten Fall wird davon ausgegangen, dass die Platte von vorn an turbulent ist.



1	Blasius	$c_f = 1,328 \text{Re}_l^{-1/2}$	laminar
2	Prandtl	$c_f = 0,074 \text{Re}_l^{-1/5}$	turbulent glatt
3	Prandtl- Schlichting	$c_f = 0,455 (\log \text{Re})^{-2,58}$	
4		$c_f = (1,89 + 1,62 \log(k_s/l))^{-2,5}$	turbulent sandrauh
5	Schoenherr	extrapoliert	turbulent glatt



Grenzschicht

	l [m]	U_∞ [m/s]	$Re_l = \frac{U_\infty \cdot l}{\nu}$	δ [m]
	4,5	40	$1,2 \cdot 10^7$	0,06
	6	264	$1 \cdot 10^8$	0,06
	300	70	$1,4 \cdot 10^9$	1,64
	250	10	$2,5 \cdot 10^9$	1,22

Fluid	Dichte ρ [kg/m ³]	dynamische Zähigkeit μ [kg/ms]	kinematische Zähigkeit ν [m/s ²]	Schall- geschwindigkeit a [m/s]
Luft	1,2	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$15 \cdot 10^{-6}$	340
Wasser	10^3	10^{-3}	10^{-6}	1460

Stoffwerte und Schallgeschwindigkeit für Luft und Wasser

Luftdruck: 10^5 Pa = 1 bar

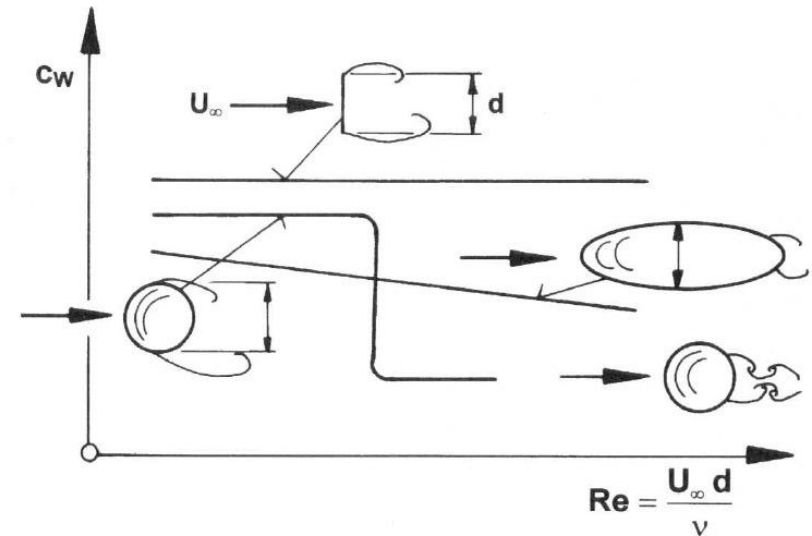
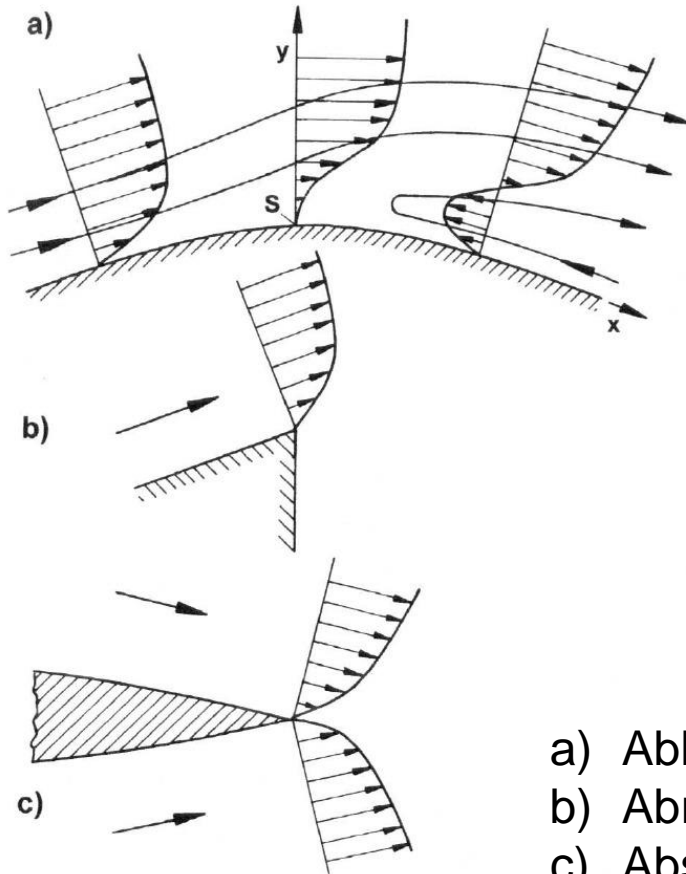
Temperatur: 20° C

Typische Re-Zahlen und Grenzschichtdicken am Ende des Körpers

Abgelöste Strömungen

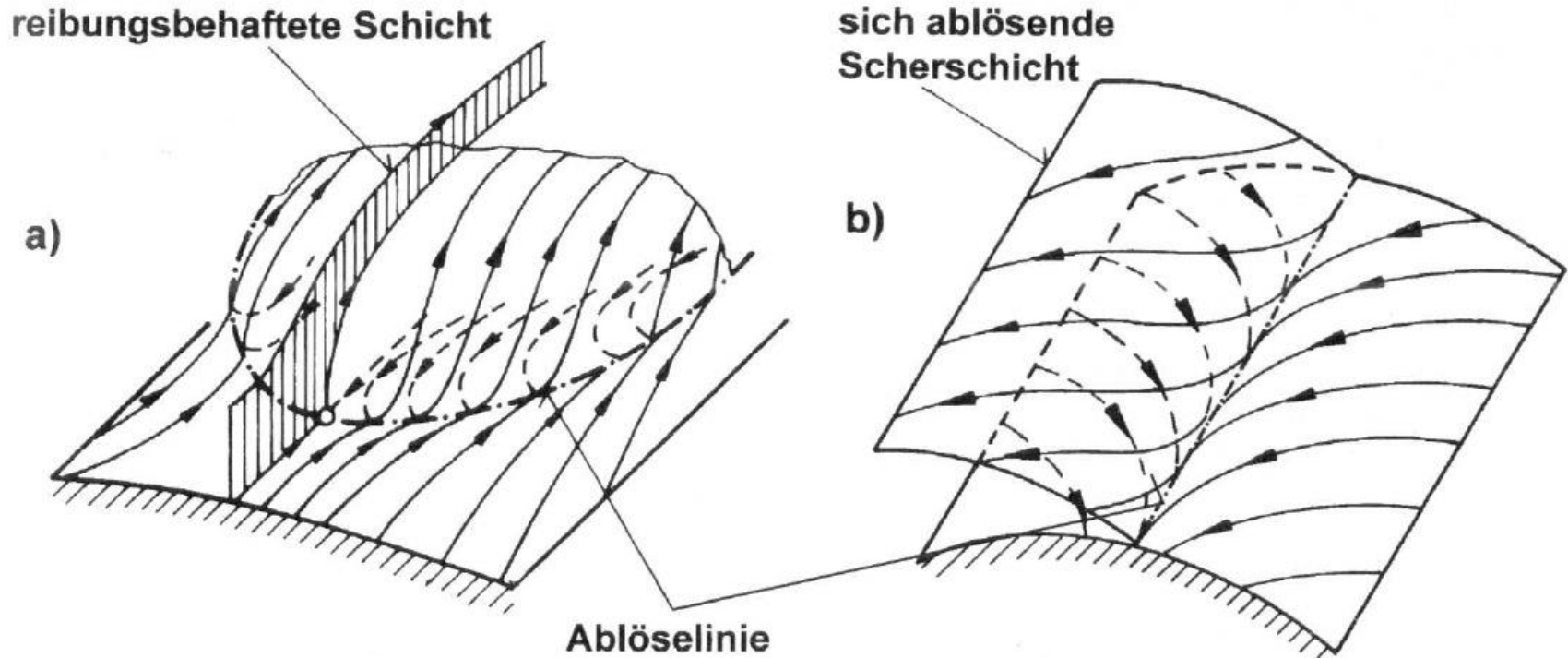
Abgelöste Strömungen

Einfluss der Reynoldszahl, schematisch



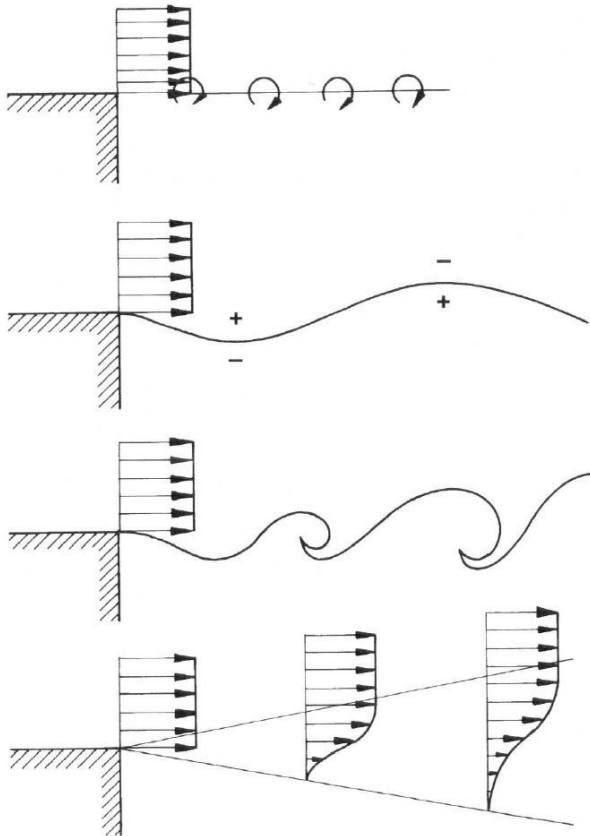
- a) Ablösung $(du/dy)_W = 0$
- b) Abriss
- c) Abströmen

Abgelöste Strömungen

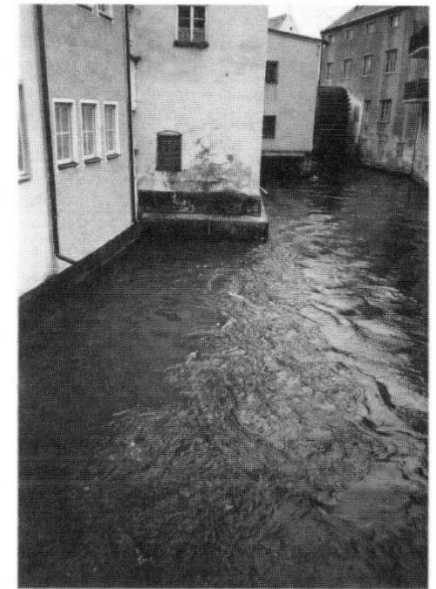
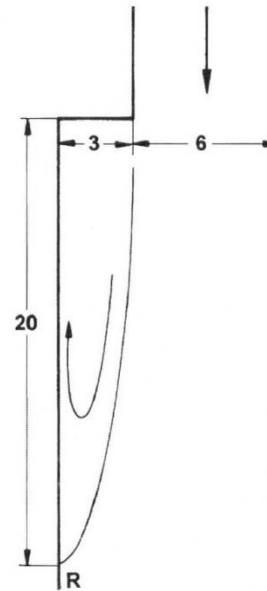


[Küchemann, D., The Aerodynamic Design of Aircraft, Oxford, Pergamon Press, 1978]

Abgelöste Strömungen, Scherschchicht



- zweidimensionale Wirbelschicht
- instabil, Auslenkung wird vergrößert
- diskrete Einzelwirbel
- breite Vermischungszone



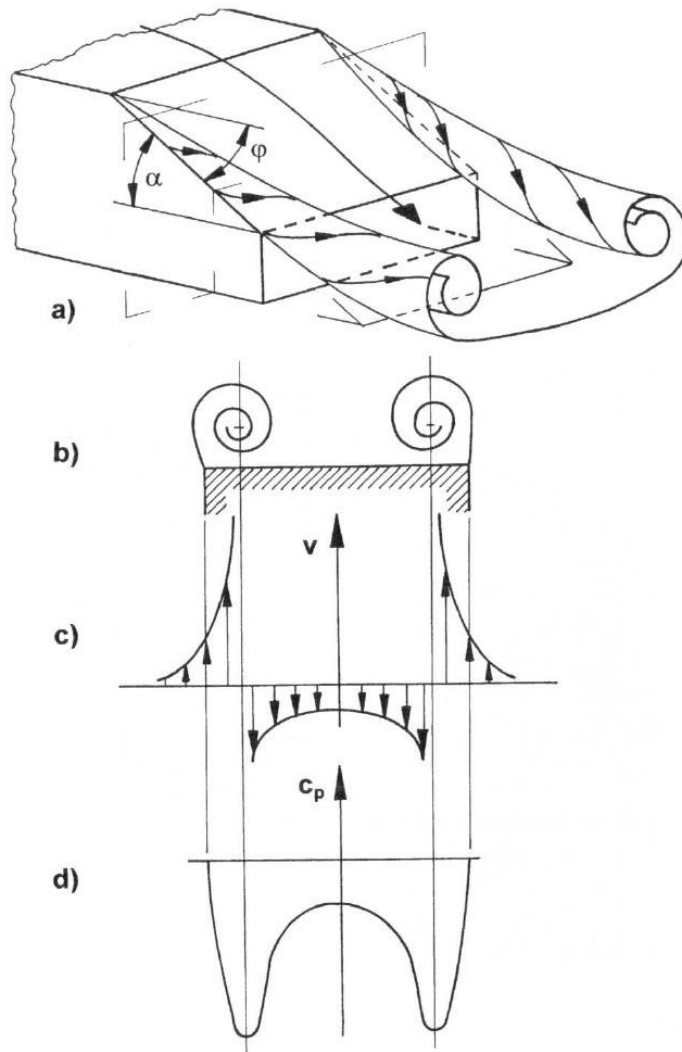
Zirkulation

$$\Gamma = \Delta U \cdot x = U \cdot x$$

Hucho, Aerodynamik stumpfer Körper

Ausbildung einer Scherschicht hinter einer rückspringenden Stufe

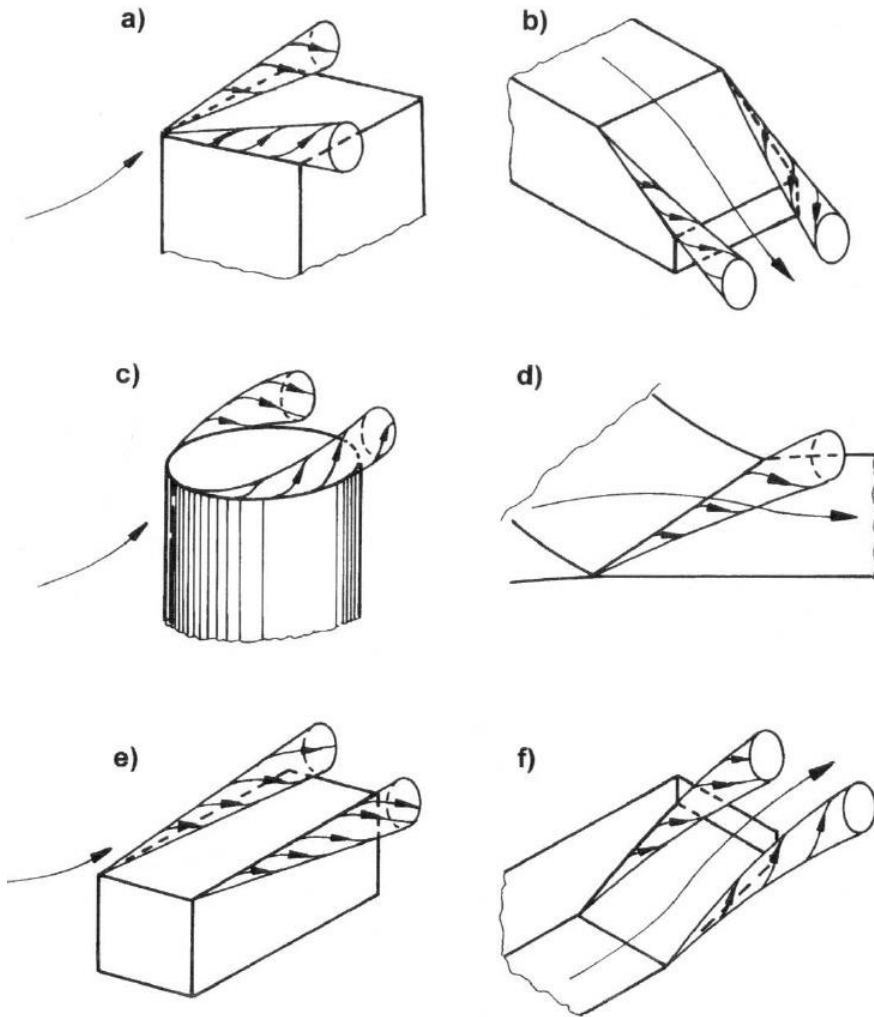
Abgelöste Strömungen



Aufrollen der Scherschicht zu einem Tütenwirbel

- a) Schema
- b) Wirbel im Querschnitt
- c) Geschwindigkeitsverteilung
- d) Druckverteilung

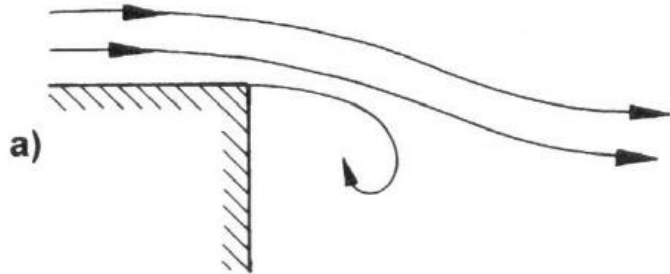
Abgelöste Strömungen



Beispiele für Tütenwirbel

- | | |
|--------------|----------------|
| a) Hausdach | d) A-Säule |
| b) Fließheck | e) Container |
| c) Tank | f) Schiffsheck |

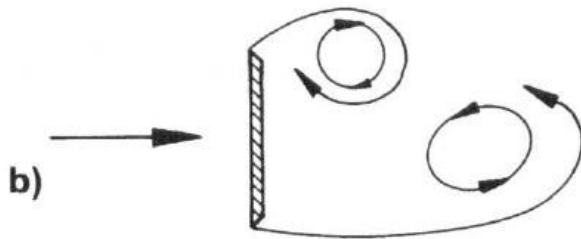
Abgelöste Strömungen



Scherschicht an einer senkrecht zur Hauptströmung verlaufenden Hinterkante

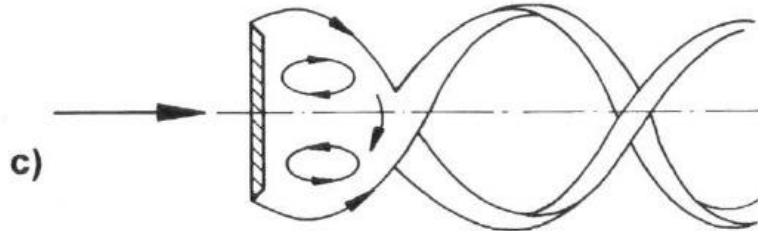
3 Fälle:

- einseitig
- zweiseitig
- Rotationssymmetrisch



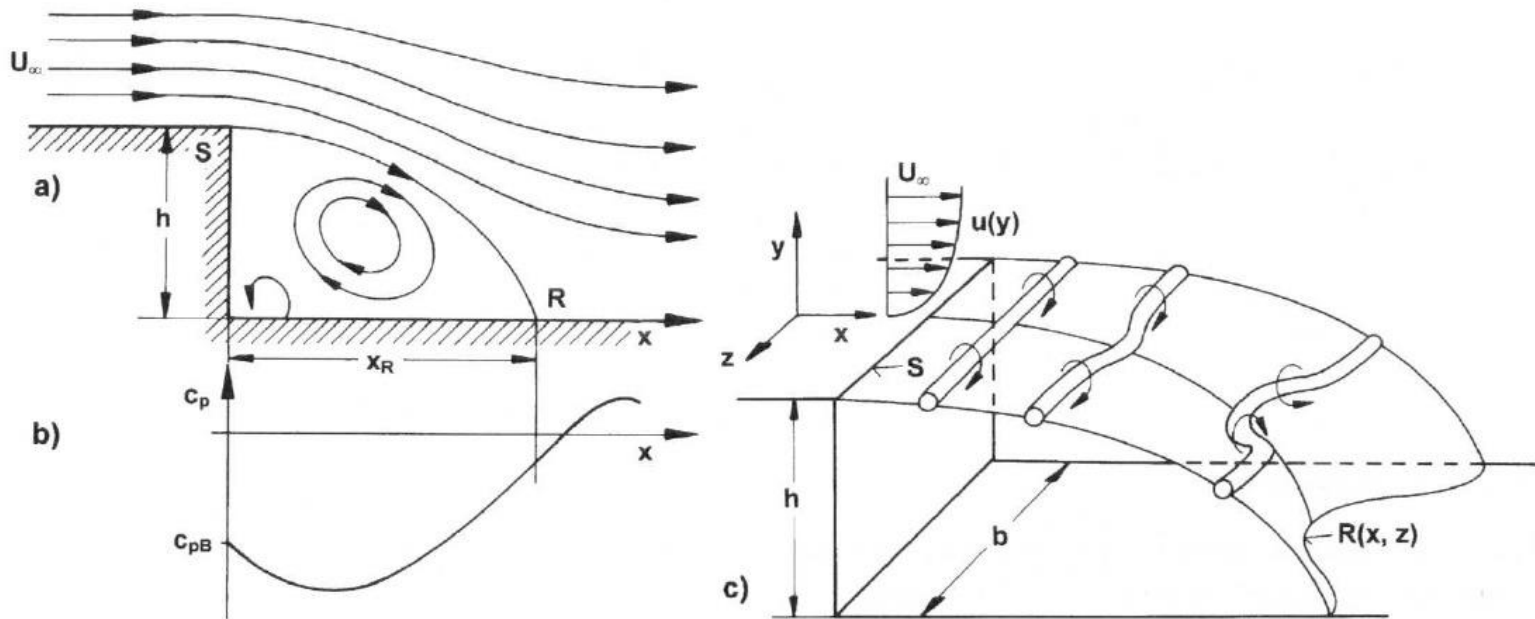
Beispiele:

- Stufenheck
- Leeseite von Bauwerken
- Unstetige Erweiterung



Leder, A., Abgelöste Strömungen – Physikalische Grundlagen
Braunschweig, Vieweg, 1992

Abgelöste Strömungen

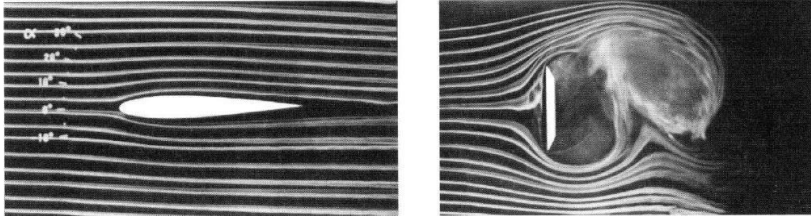


Shih, C., Ho, C.-M., Three-Dimensional Recirculation Flow in a Backward Facing Step, Journal of Fluids Engineering, 116, 228&232, 1994

- a) Stromlinien
- b) Druckverlauf
- c) Dreidimensionale Struktur

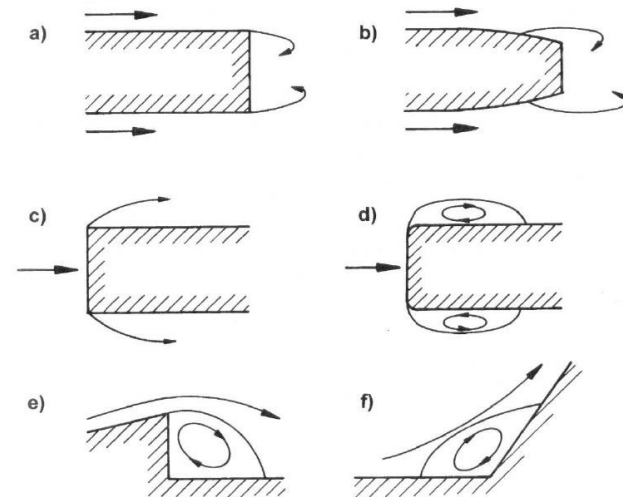
- Ablösung in S \rightarrow Wiederanlegen in R
- x_R ist ein zeitlicher Mittelwert
- Druckanstieg für das rückströmende Fluid
- Dreidimensionale Strukturen
- Einbeulen der Wirbellinien
- Querströmung

Abgelöste Strömungen

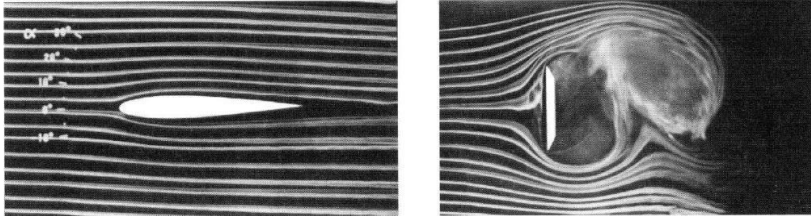


- 2-seitige Ablösung
- Gegenseitige Wechselwirkung
- Große Amplituden
- Starke Mischbewegung
- Hoher Basisunterdruck
- Großer Widerstand

Beispiele für 2-dimensionale Ablösungen

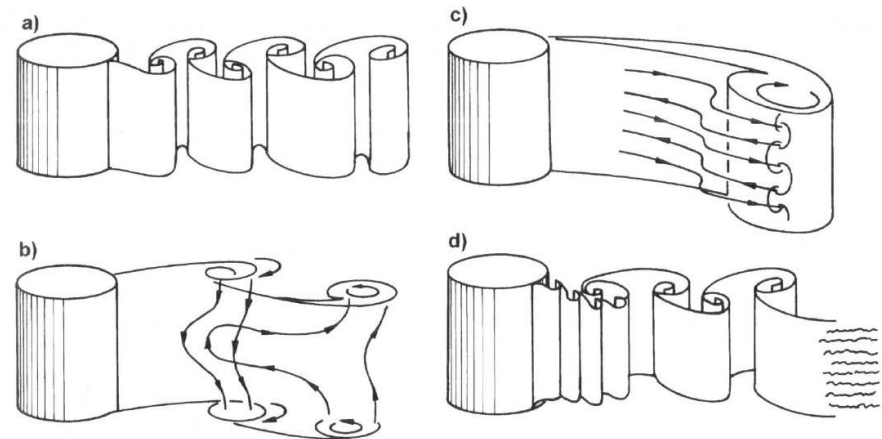


Abgelöste Strömungen



- 2-seitige Ablösung
- Gegenseitige Wechselwirkung
- Große Amplituden
- Starke Mischbewegung
- Hoher Basisunterdruck
- Großer Widerstand

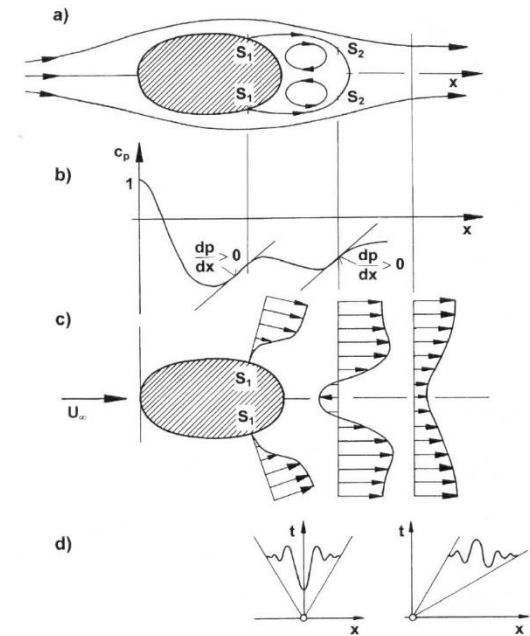
3-dimensionale Strukturen an einem 2-dimensionalen Kreiszyylinder



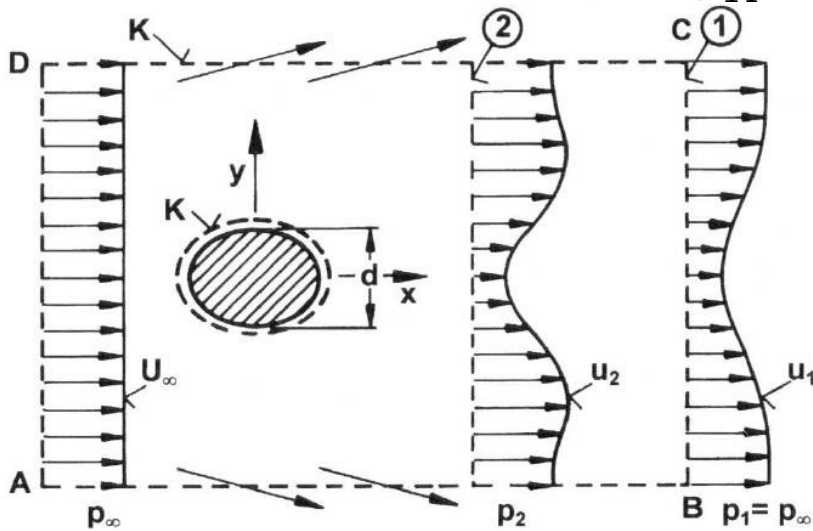
Williamson, C.H.K., Three-dimensional Wake Transition, JFM, 328, 345-407, 1996

Schema, Umströmung eines stumpfen Körpers

- Stromlinien
- Druckverlauf
- Geschwindigkeitsverlauf, Nachlaufdüse
- Absolut und konvektiv sensitive Bereiche



Widerstand des Körpers
$$W = \rho b \int_K u_1 (U_\infty - u_1) du$$



Fläche	Volumenstrom	x-Impuls
AD	$-b \int U_\infty dy$	$-\rho b \int U_\infty^2 dy$
BC	$+b \int u_1 dy$	$+\rho b \int u_1^2 dy$
AB + DC	$+b \int (U_\infty - u_1) dy$	$+\rho b \int U_\infty (U_\infty - u_1) dy$
Summe	$Q_{\text{Summe}} = 0, \text{ Kontinuität}$	$+\rho b \int u_1 dQ$ (K)

Beeinflussung des Totwassers

Text durch Klicken hinzufügen

Ziele:

- Abbau des Luftwiderstandes
- Vermeidung von Verschmutzung der Basis
- Vermeidung von Schwingungen

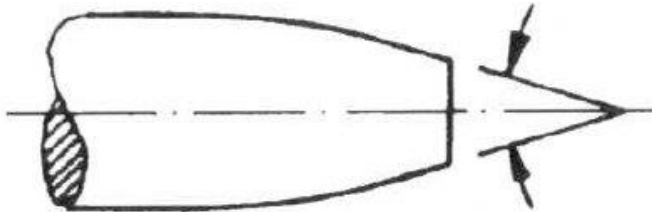
Ansätze zur Anhebung des statischen Druckes an der Basis:

- durch Veränderung der Heckgeometrie
 - Verringerung des Unterdruckes
 - Verkleinerung der Basisfläche
- Veränderung der Struktur des Totwassers
- aktive und passive Maßnahmen

Beeinflussung des Totwassers

Beispiele

Einziehen



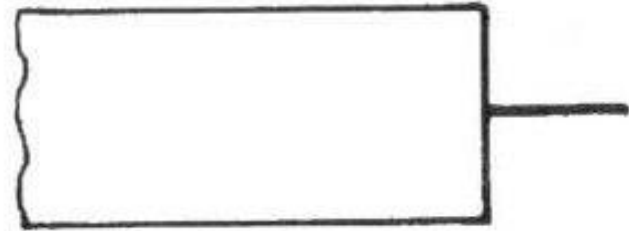
K. Wieghardt, Betrachtungen zum Zähigkeitswiderstand von Schiffen, Jahrbuch der STG, 52, 184—202, 1958

W. A. Mair, Reduction of Base Drag by Boat-tailed Afterbodies in Low-Speed Flow, Aeronautical Quarterly, 20, 307—320, 1969

D.J. Maull, Mechanisms of Two and Three-dimensional Base Drag, In Sovran, G., Morel, T., Mason, W. T. (Eds.), Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles, New York, Plenum Press, 1978

G. Buresti, R Fedeli, A. Ferraresi, Influence of Afterbody Rounding on the Pressure Drag of an Axisymmetric Bluff Body, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 69-71, 179-188, 1997

Teiler



A. Roshko, On the wake and drag of bluff bodies, J. of the Aeronautical Sciences, 22, 124-132, 1955

J.F. Nash, A discussion of two-dimensional turbulent base flow, ARC, R&M 3468, 1967

Nachstromkörper

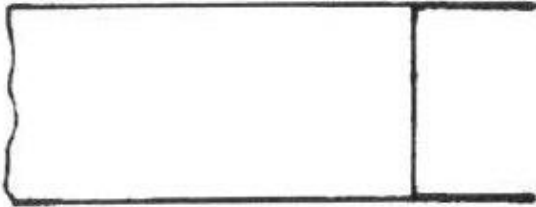


W. A. Mair, The effect of a Rear-mounted Disc on the Drag of Blunt Based Body of Revolution, Aeronautical Quarterly, 16, 350-360, 1965

Beeinflussung des Totwassers

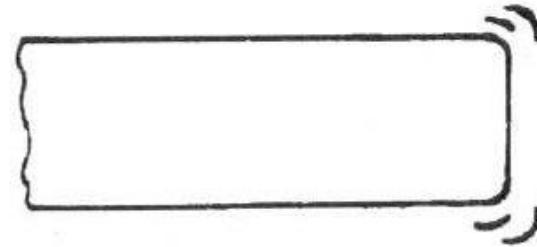
Beispiele

Leitflächen



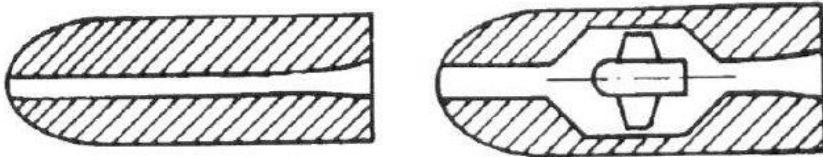
W.H. Hucho, H.J. Emmelmann, Aerodynamische Form-optimierung, ein Weg zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit von Nutzfahrzeugen, Fortschrittsberichte VDI-Zeitschriften, 12, Nr. 31, 1977

Umlenkflügel



K. Frey, Verminderung des Strömungswiderstandes von Körpern durch Leitflächen, Forschung Ingenieur Wesen, 67-73, 1933

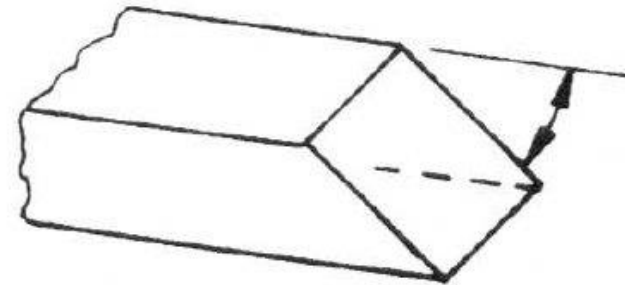
Belüftung, aktiv/passiv



G.K. Suryanarayana, H. Pauer, G.E.A. Meyer, Bluff-body drag reduction by passive ventilation, Exp. In Fluids, 16, 73-81, 1993

D.M. Sykes, The Effect of Low Flow Rate Gas Ejection and Ground Proximity on Afterbody Pressure Distribution, Paper 2 in Scibor-lyski, Road Vehicle Aerodynamics, 1968

Abschrägen

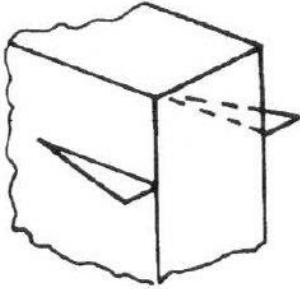


L.J. Janssen, W.-H. Hucho, Aerodynamische Entwicklung von VW Golf und Scirocco, ATY, 77, 1975

Beeinflussung des Totwassers

Beispiele

Spoiler



R.A. Young, Bluff Bodies in a Shear Flow, Ph.D.-Thesis, Univ. of Cambridge, 1972

Ausblasen, Coanda-Effekt



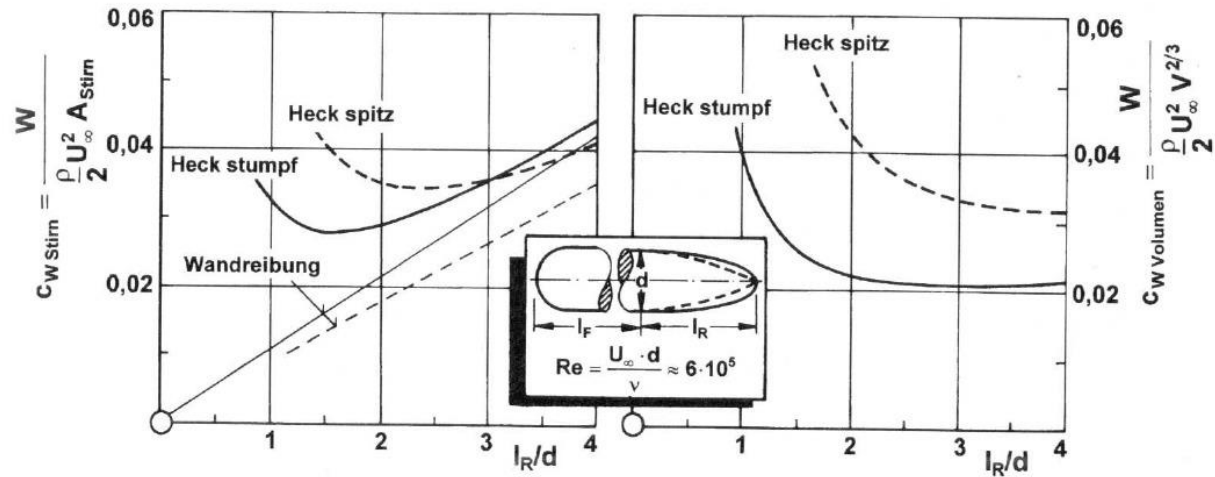
D. Geropp, Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Wechselwirkung und aktiven Strömungsbeeinflussung eines Kfz-Nachlaufs, Tagung Aerodynamik des Kraftfahrzeuges, Haus der Technik, Essen, 1995

Einzüge

- Druckanstieg an der Basis
- Die Strömung löst weit hinten ab
- Verkleinerung der Basisfläche
- „Boat tailing“
- Rotationsellipsoid
- Spindel
- verschiedene Bezugsflächen
- elliptisches Heck hat größeres Volumen

Beeinflussung des Totwassers

Einzüge



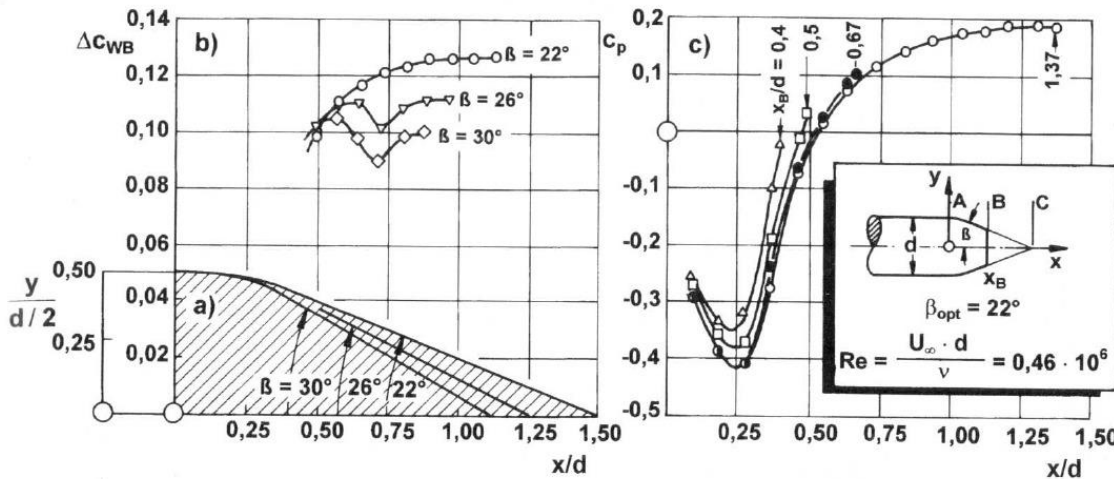
K. Wieghardt, Betrachtungen zum Zähigkeitswiderstand von Schiffen, Jahrbuch der STG, 52, 184—202, 1958

	l_R/d	c_W	l_R/d	c_W
Mair (1969) $Re_d = 4,6 \cdot 10^5$	2,67	0,118	1,67	0,119
Petersohn (1957) $Re_d = 2 \cdot 10^6$	2,0	0,190	2,0	0,080
	4,0	0,035	-	-

W. A. Mair, Reduction of Base Drag by Boat-tailed Afterbodies in Low-Speed Flow, Aeronautical Quarterly, 20, 307—320, 1969

Beeinflussung des Totwassers

Einzüge

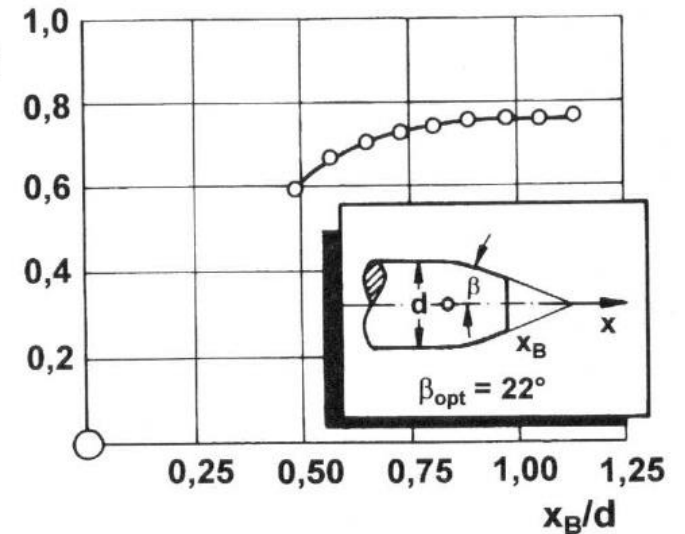


- Boat tailing und bob tailing
- a. Untersuchte Heckformen
- b. Absenkung des Widerstandes
- c. Druckverteilung auf der Kontur

$$\Delta c_{WB,ideal} = c_{WA} = |c_{pA}| = 0.165$$

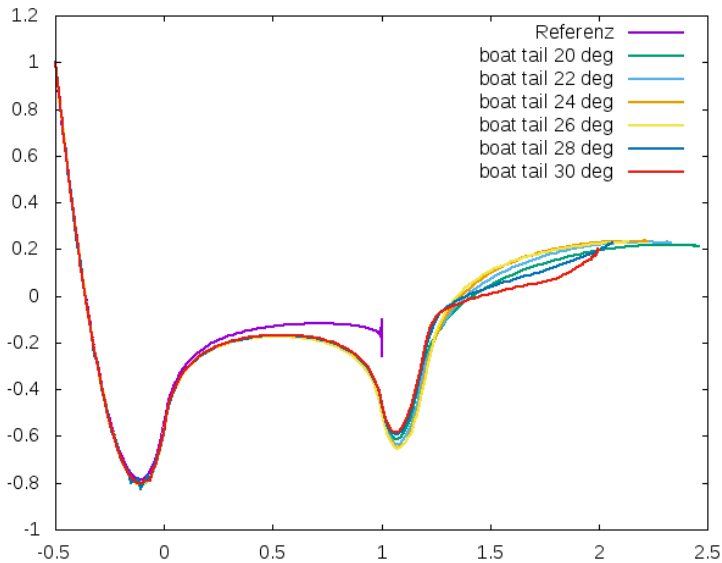
Druckrückgewinnfaktor f nach Mair

$$f = \frac{\Delta c_{WB}}{|c_{pA}|} = \frac{\Delta c_{WB}}{0.165}$$



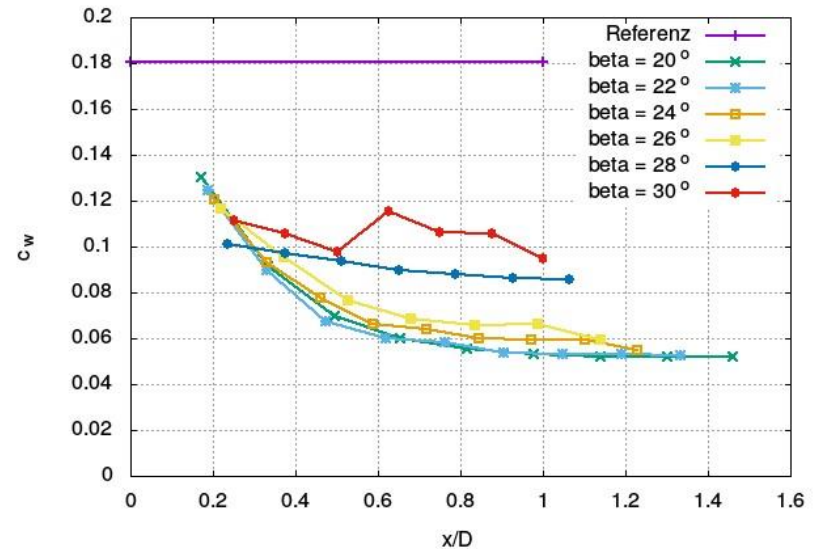
Beeinflussung des Totwassers

Boat-, Bob Tailing



Druckverteilung am Heck

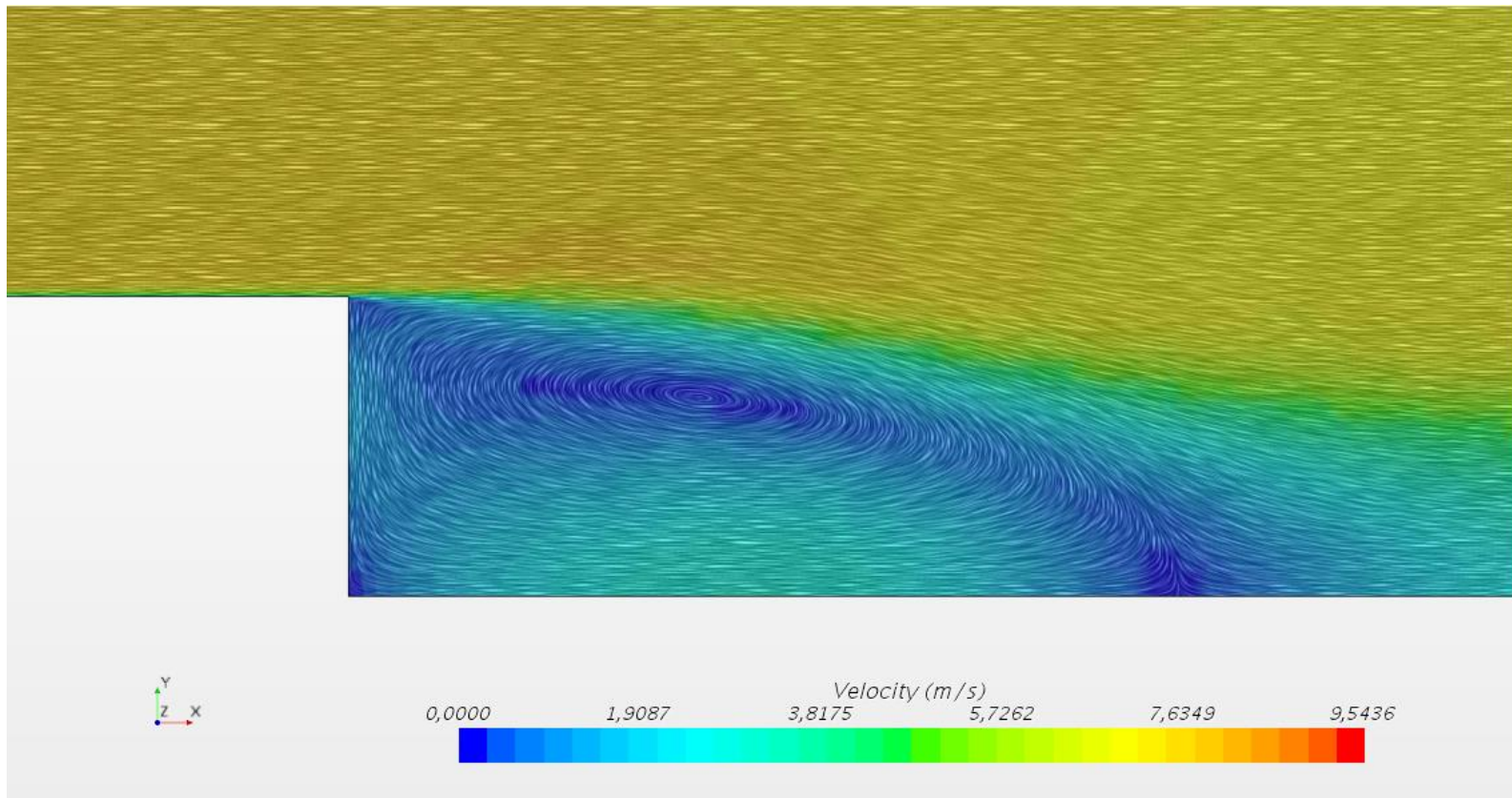
Boat und Bob Tailing



Widerstandsreduktion

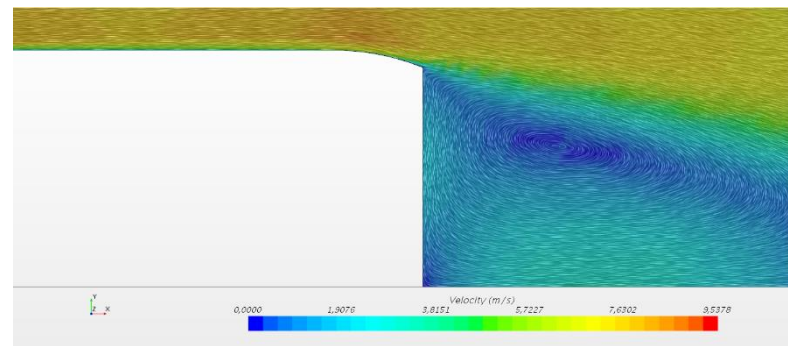
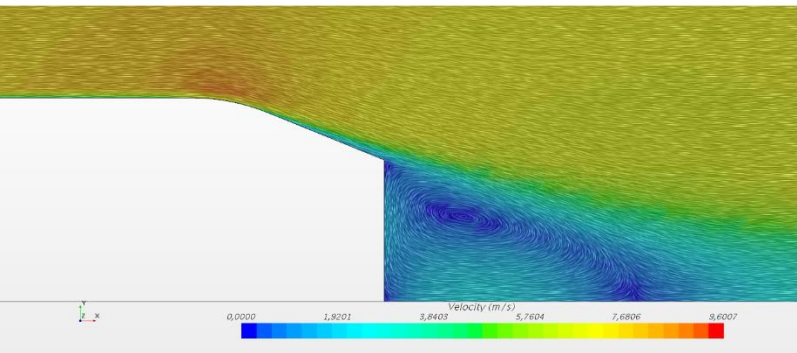
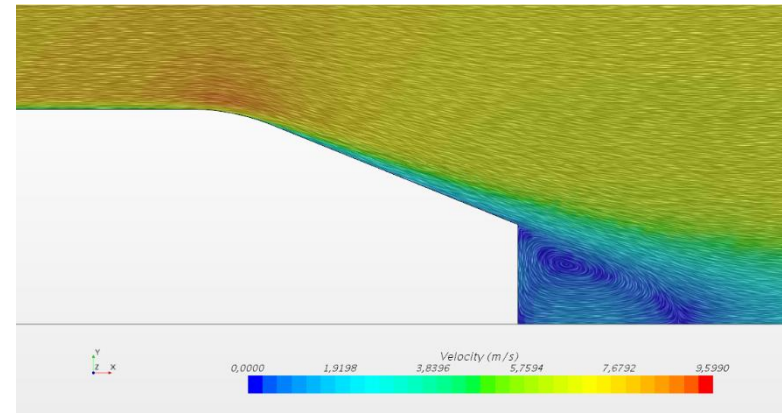
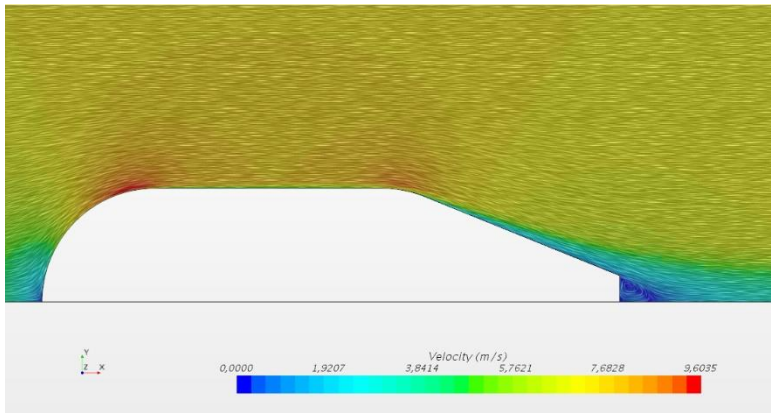
Beeinflussung des Totwassers

Boat-, Bob Tailing



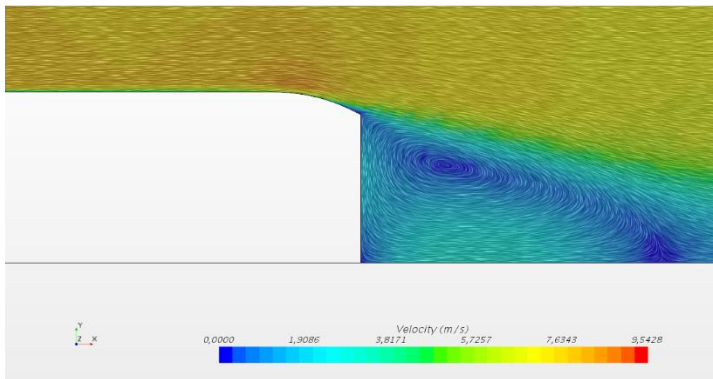
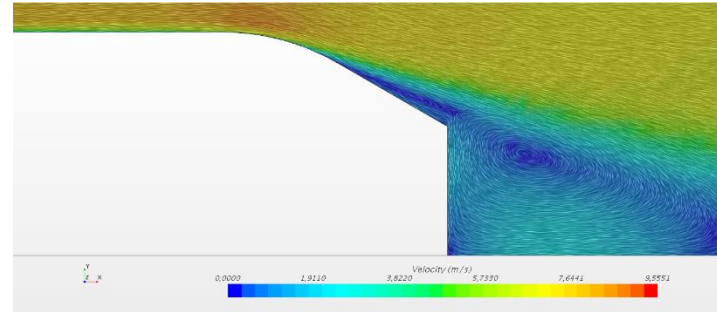
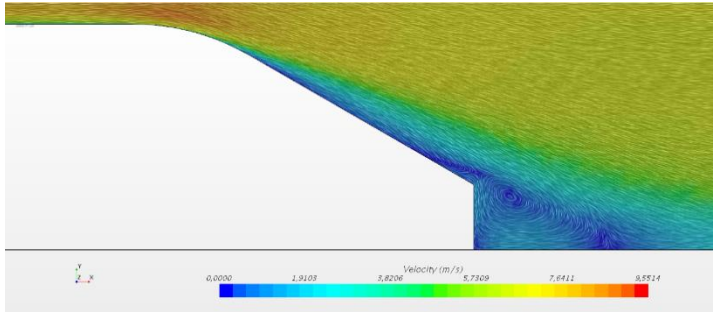
Beeinflussung des Totwassers

Boat-, Bob Tailing



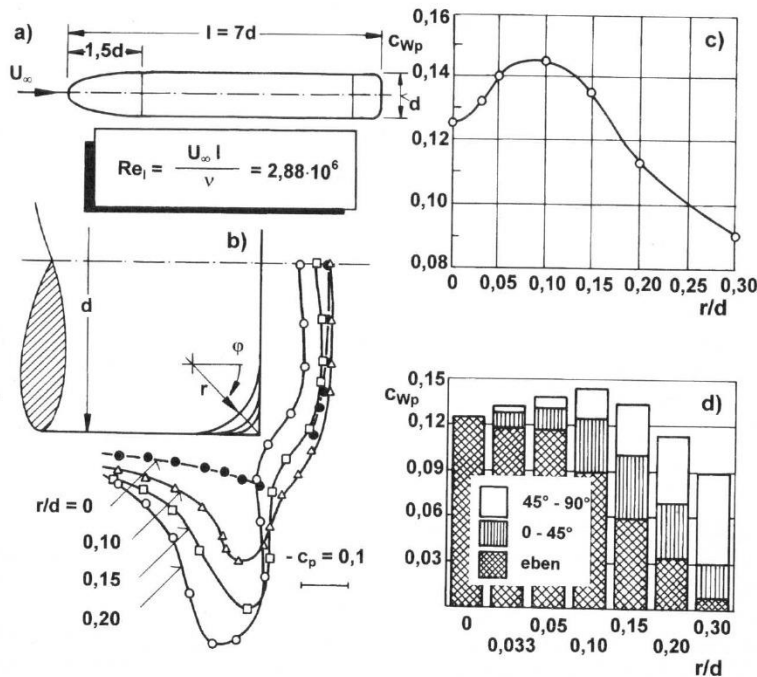
Beeinflussung des Totwassers

Boat-, Bob Tailing



Beeinflussung des Totwassers

Einzüge

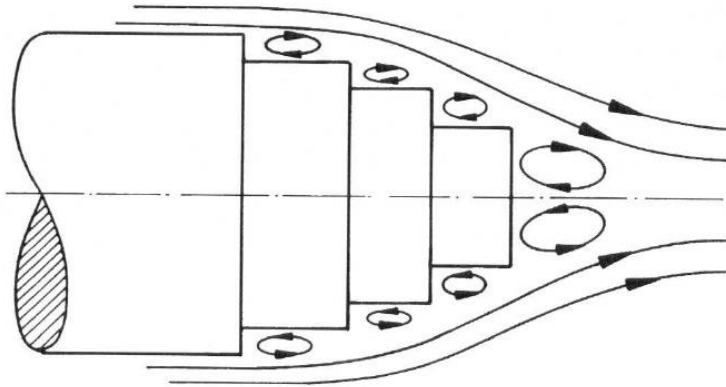


- a. Untersuchter Körper
- b. Radien am Heck und Druckverteilung
- c. c_{Wp} -Wert über dem Heckradius
- d. Aufteilung des Widerstandes auf die 3 Sektoren am Heck

Einfluss des Heckradius auf den Widerstand nach Buresti et al.

Beeinflussung des Totwassers

Einzüge



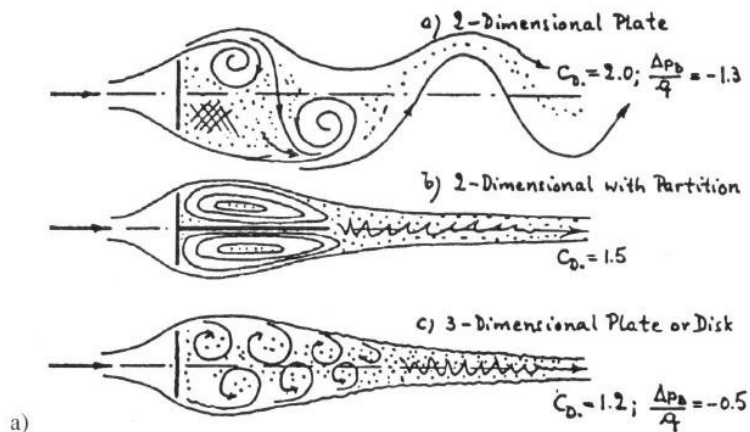
- Boat tailing mit ringförmigen Stufen
- mehrere Ringwirbel schwächer als ein großer
- schlechter als eine stetige Kontur

P. R. Viswanath, Flow Management techniques for base and afterbody drag reduction, Progress in Aerospace Sciences, 32, 79-129, 1996

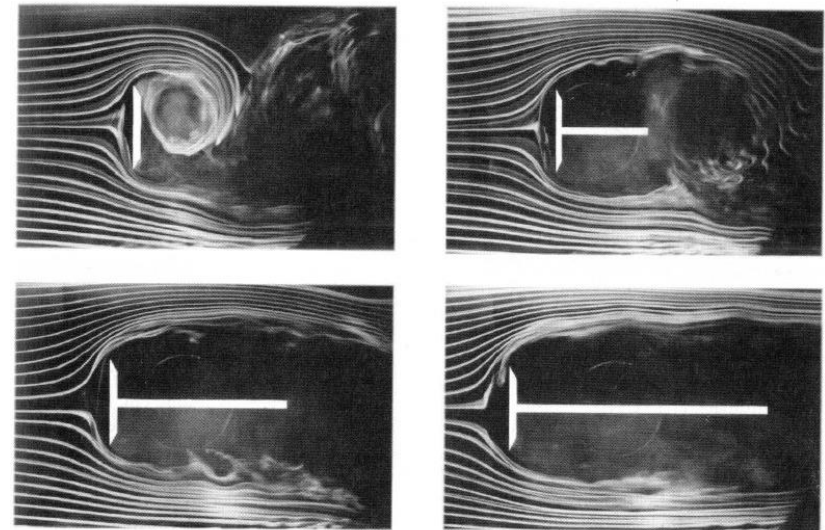
Eingriff in die Struktur des Totwassers

Trennflächen

- bei 2-d Strömung wird die Wechselwirkung zwischen den Scherschichten unterbunden
- Aus einer zweiseitigen Ablösung werden zwei einseitige
- weniger Energiedissipation
 - geringerer Widerstand
 - Wirbel bilden sich möglichst weit stromab
 - kleinerer Unterdruck auf der Basis



Zeichnung aus Hoerner, Base Drag and Thick Trailing Edges, J. Aeronaut. Sc., 1950

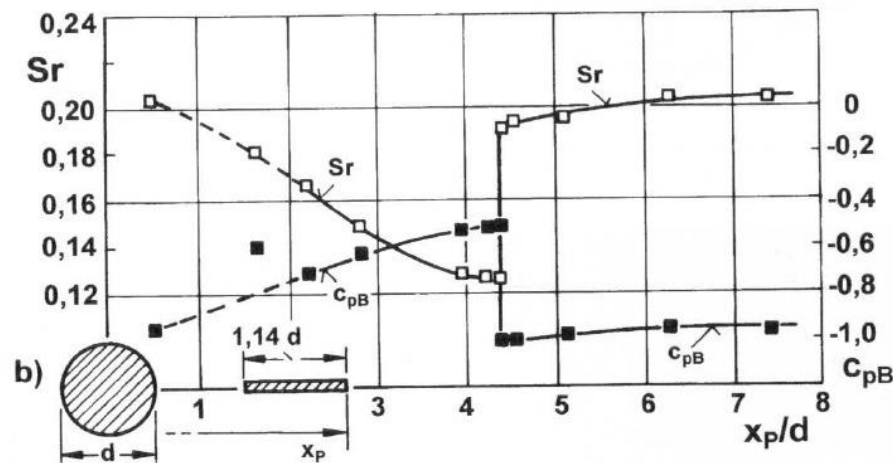
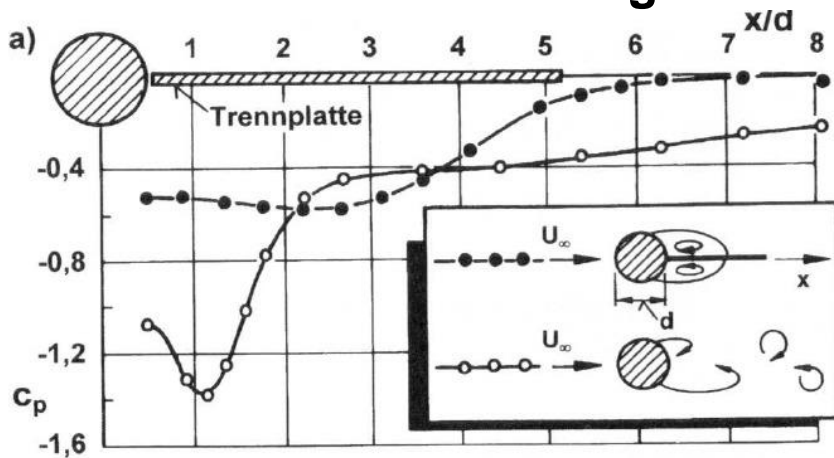


b)

Hucho: Aerodynamik stumpfer Körper

Eingriff in die Struktur des Totwassers

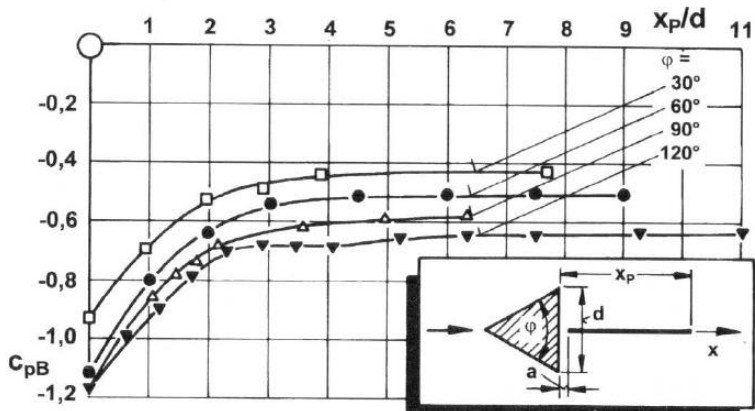
Text durch Klicken hinzufügen



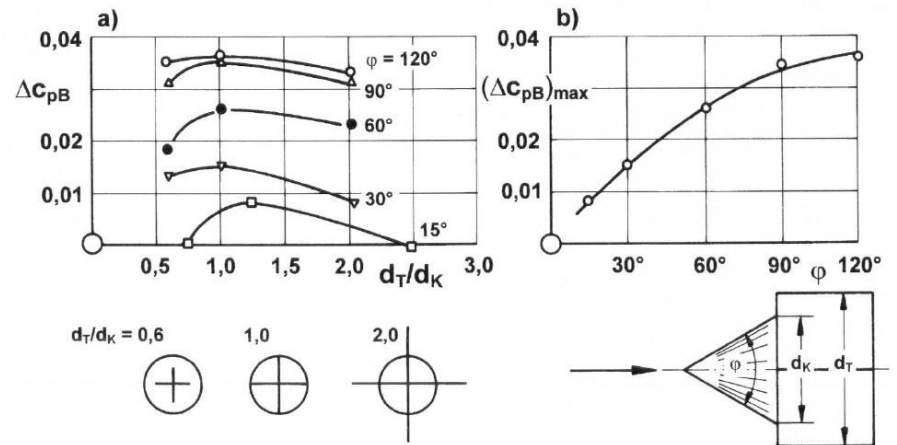
- a) Anheben des Basisdruckes c_{pB} durch Unterbindung der Wechselwirkung zwischen dem oberen und dem unteren Wirbel mit einer langen Trennplatte
- b) Einfluss einer kurzen Platte auf die Strouhalzahl Sr und den Basisdruck c_{pB}

A. Roshko, On the wake and drag of bluff bodies, J. Aeron. Sciences, 22, 124.-132, 1955

Eingriff in die Struktur des Totwassers



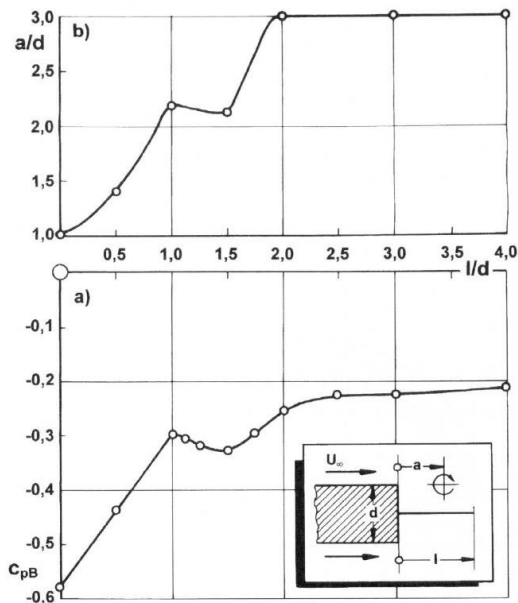
Anheben des Basisdruckes hinter einem Keil



Anheben des Basisdruckes eines Kegels

a) Breite ; b) $(\Delta C_{pB})_{\max} = f(\text{Kegelwinkel})$

Eingriff in die Struktur des Totwassers

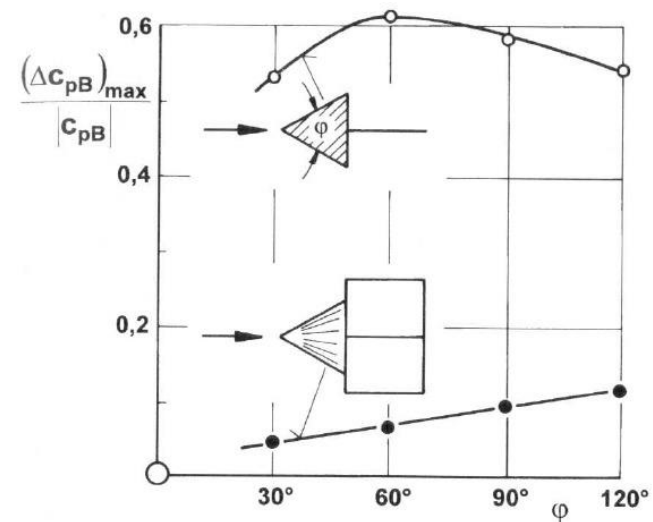


- Einfluss einer Trennplatte an der Basis eines stumpfen Körpers
- a) Basisdruck
- b) Wirbelkern

Tanner, Ein Verfahren zur Berechnung des Totwasserdruckes und Widerstandes von stumpfen Körpern bei inkompressibler nichtperiodischer Totwasserströmung, Diss. Göttingen, 1967

P.W. Bearman, Investigation of the flow behind a two-dimensional model with a blunt trailing edge and fitted with Splitter plates, JFM, 21, 241-255, 1965

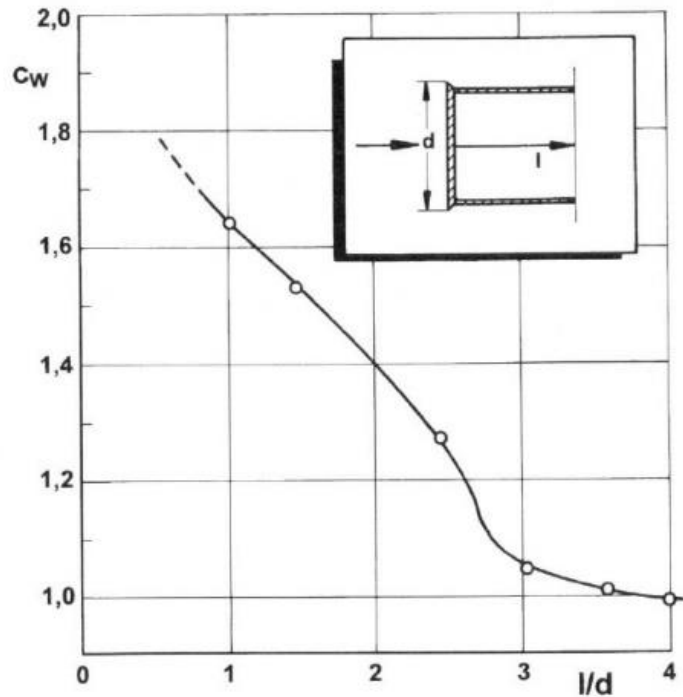
Vergleich zwischen Keil und Kegel



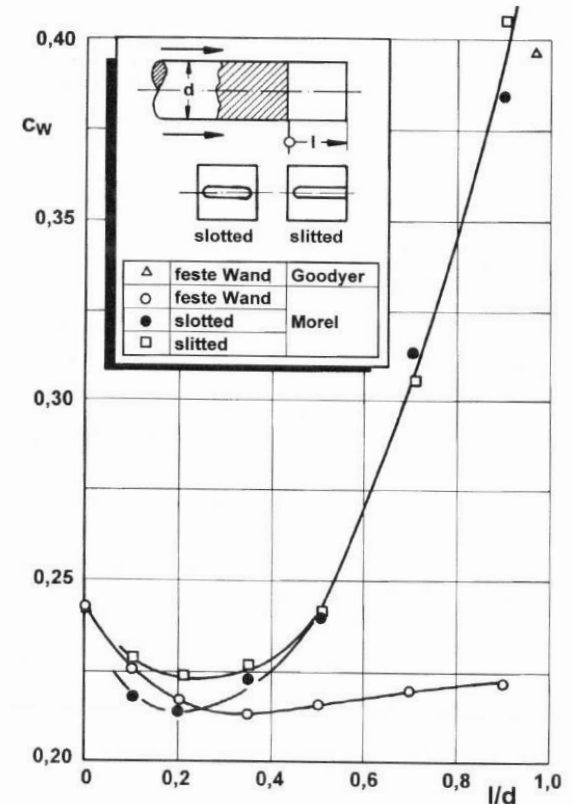
Eingriff in die Struktur des Totwassers

Ringförmige Verlängerung des Zylindermantels

Seitlich angebrachte Leitbleche

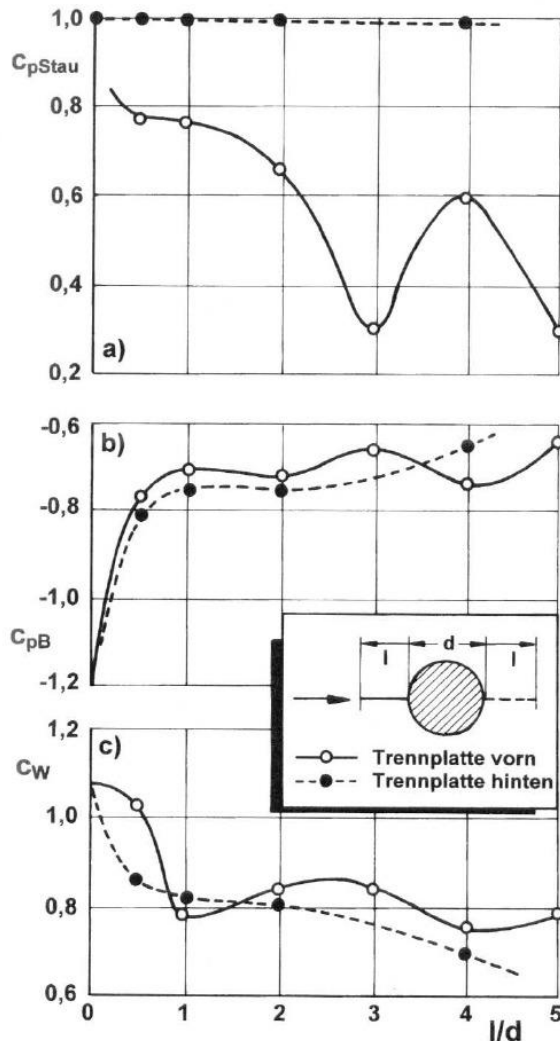


A. Leder, Abgelöste Strömungen – Physikalische Grundlagen, Braunschweig, Vieweg, 1992



T. Morel, Effect of base cavities on the Aerodynamic Drag of an axisymmetric cylinder, Aeronautical Quarterly, 30, 400-412, 1979

Eingriff in die Struktur des Totwassers



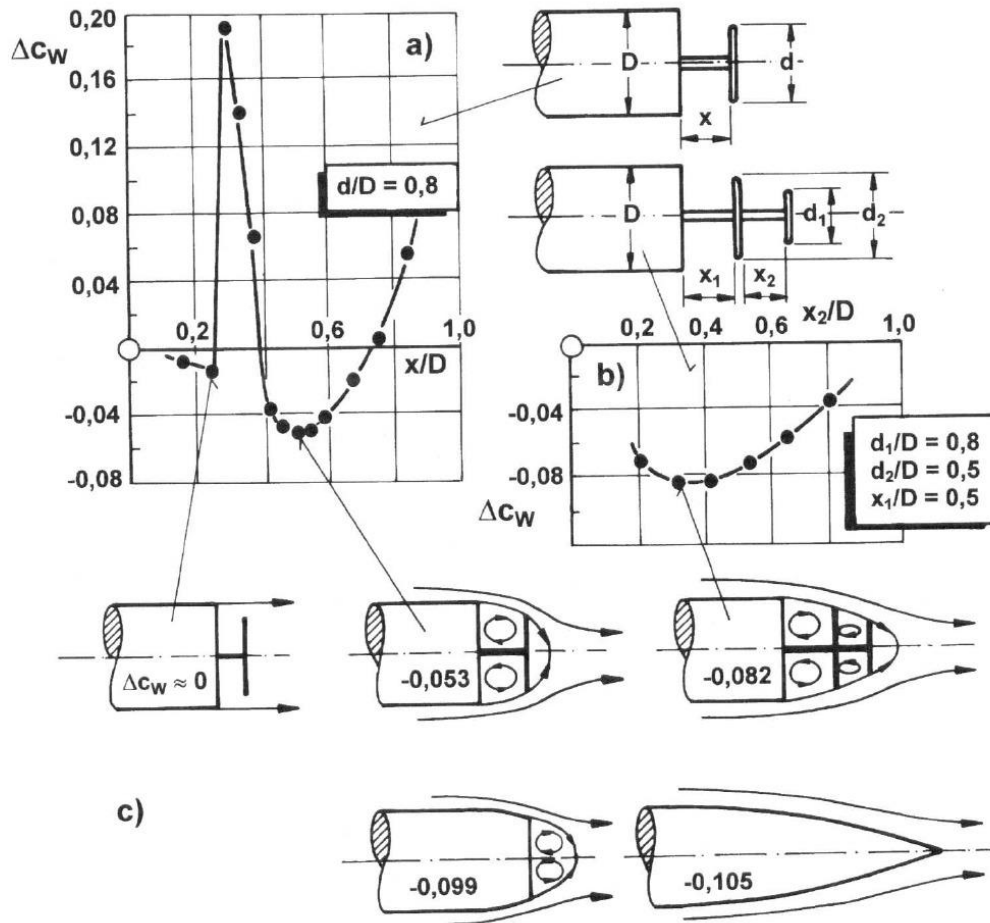
Vorne angebrachte Trennplatte am Kreiszyylinder

- Staudruck
- Basisdruck
- Widerstand

- Durch die Grenzschicht wird der Druck im Staupunkt reduziert
- Die Ablösung wird nach hinten verlagert
 - ohne Trennplatte $\varphi = 87^\circ$
 - mit Trennplatte $\varphi = 107^\circ$
 - Totwasser wird schmaler, Basisdruck nimmt zu
- Die Frequenz der Wirbel nimmt zu, Intensität nimmt wegen
- der dickeren Grenzschicht im Ablösepunkt ab

P.R. Visvanath, A. Prabhu, T. Srinivas, Drag reduction of a circular cylinder with a forward splitter plate, Int. Conf. On Exp. Fluid Mech., China, 1991

Eingriff in die Struktur des Totwassers



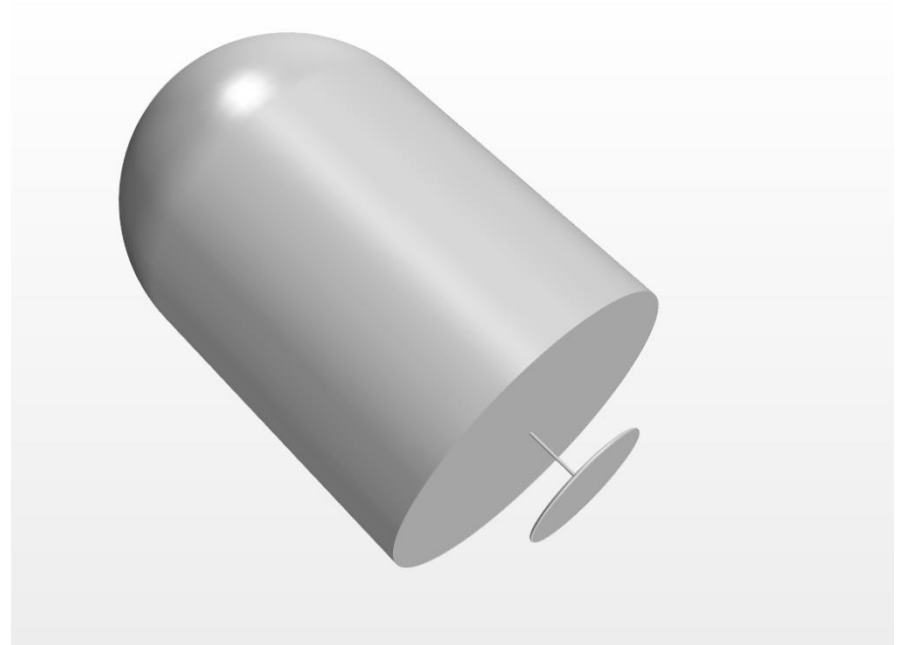
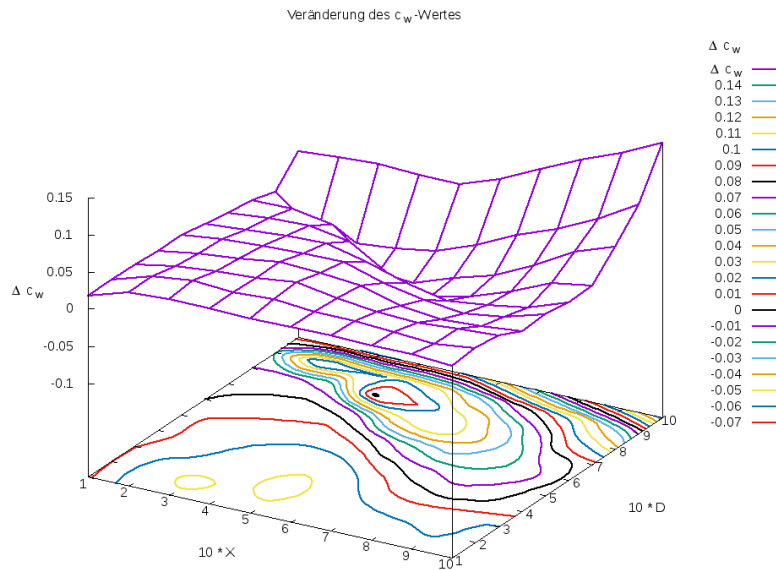
Einfluss von hinter der Basis angebrachten Kreisscheiben

- sehr kleiner Abstand: Strömung wird von Totwasser dominiert, Wirbel im Antiuhreigersinn
- $0,3 \leq x/D \leq 0,4$: oszillierende Pumpschwingung
- $x/D \geq 0,4$: stabiler Ringwirbel
- Boattailing und Bobtailing sind besser

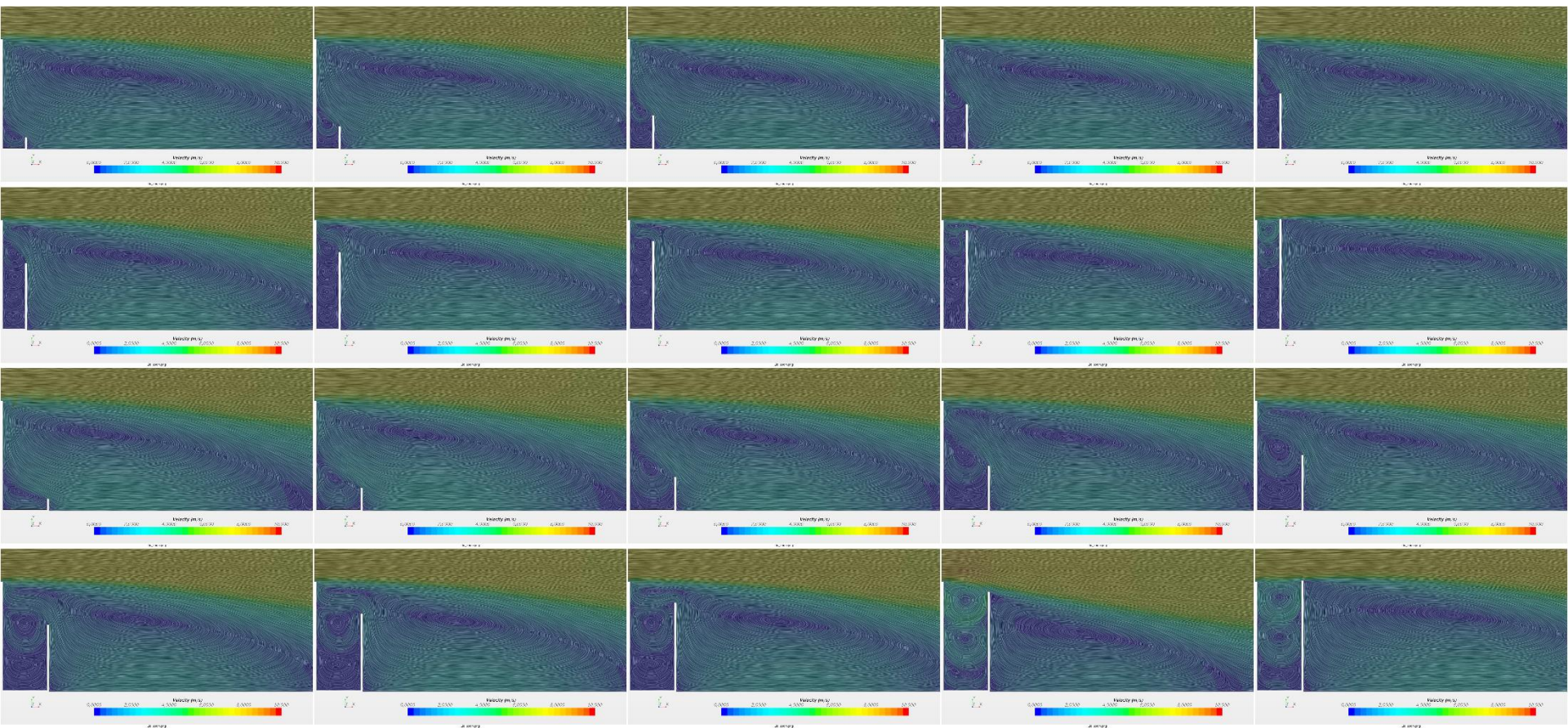
W. A. Mair, The effect of a rear-mounted disc on the drag of a blunt based body of revolution, Aeronautical Quarterly, 16, 350-360, 1965

Eingriff in die Struktur des Totwassers

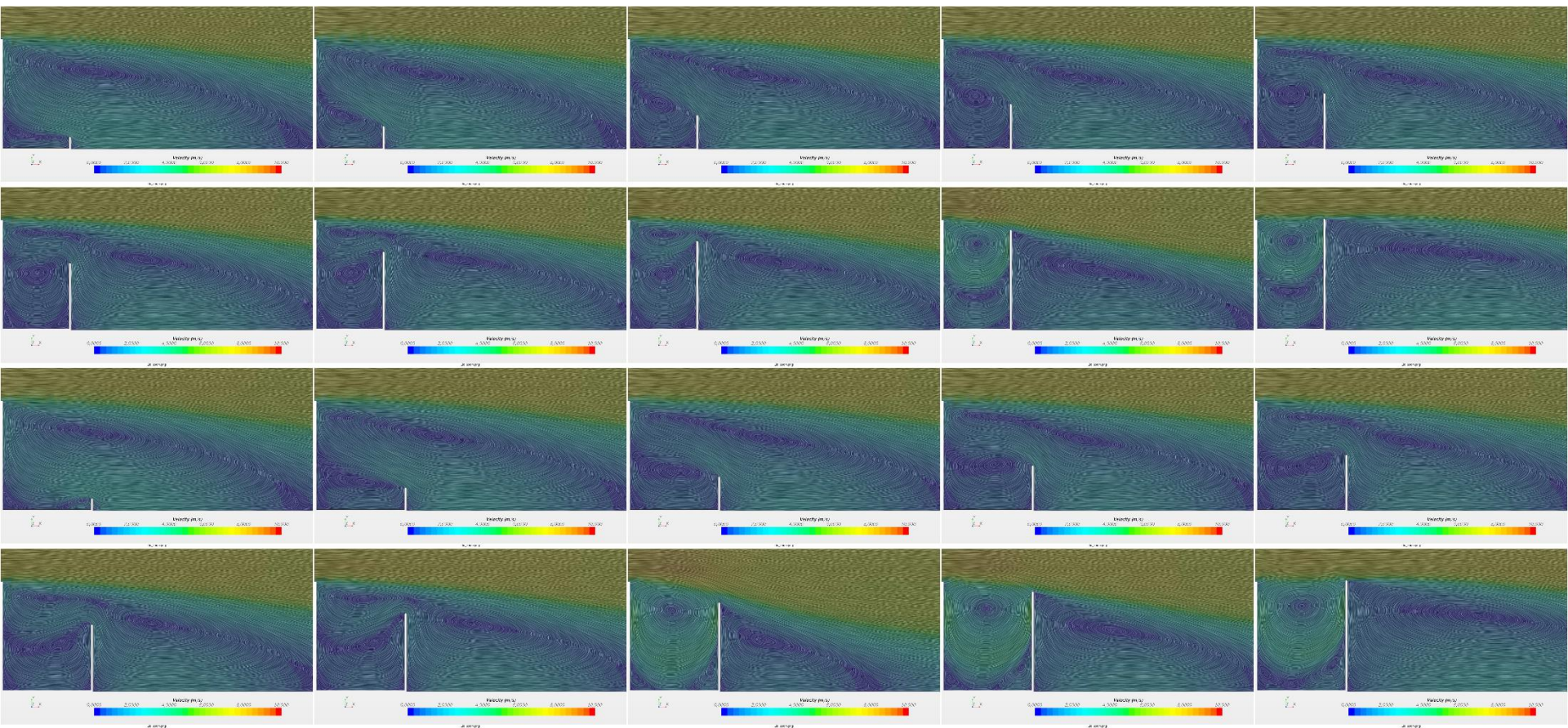
Kreisscheibe



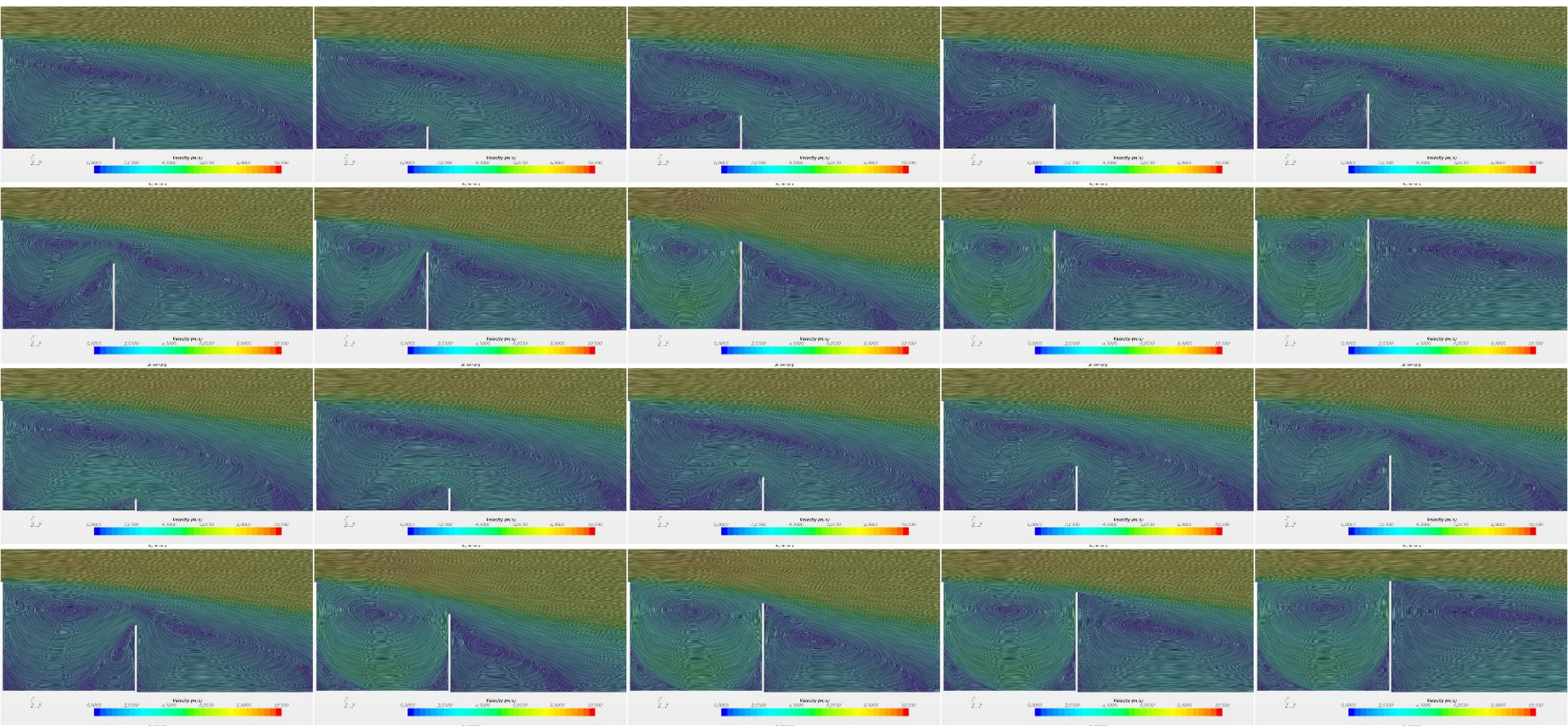
Eingriff in die Struktur des Totwassers



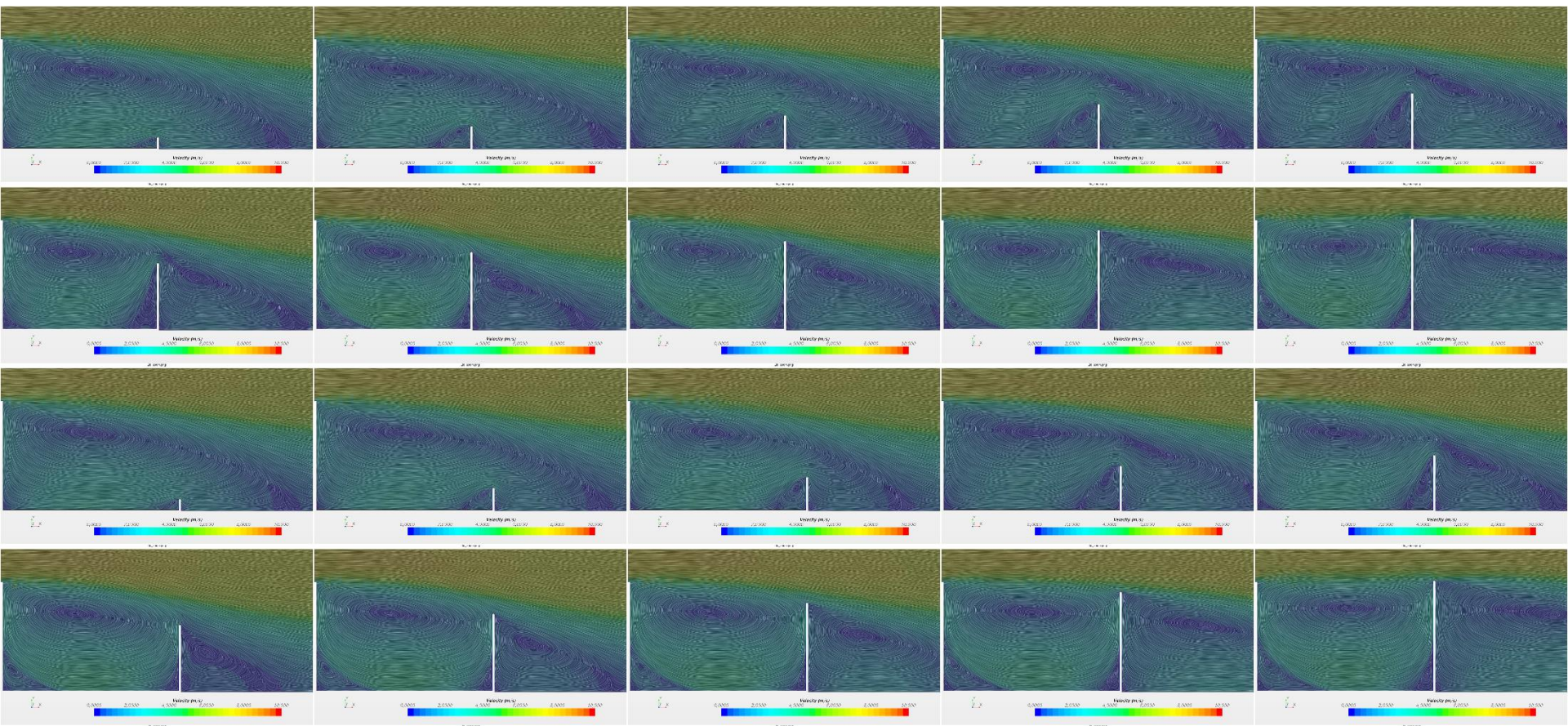
Eingriff in die Struktur des Totwassers



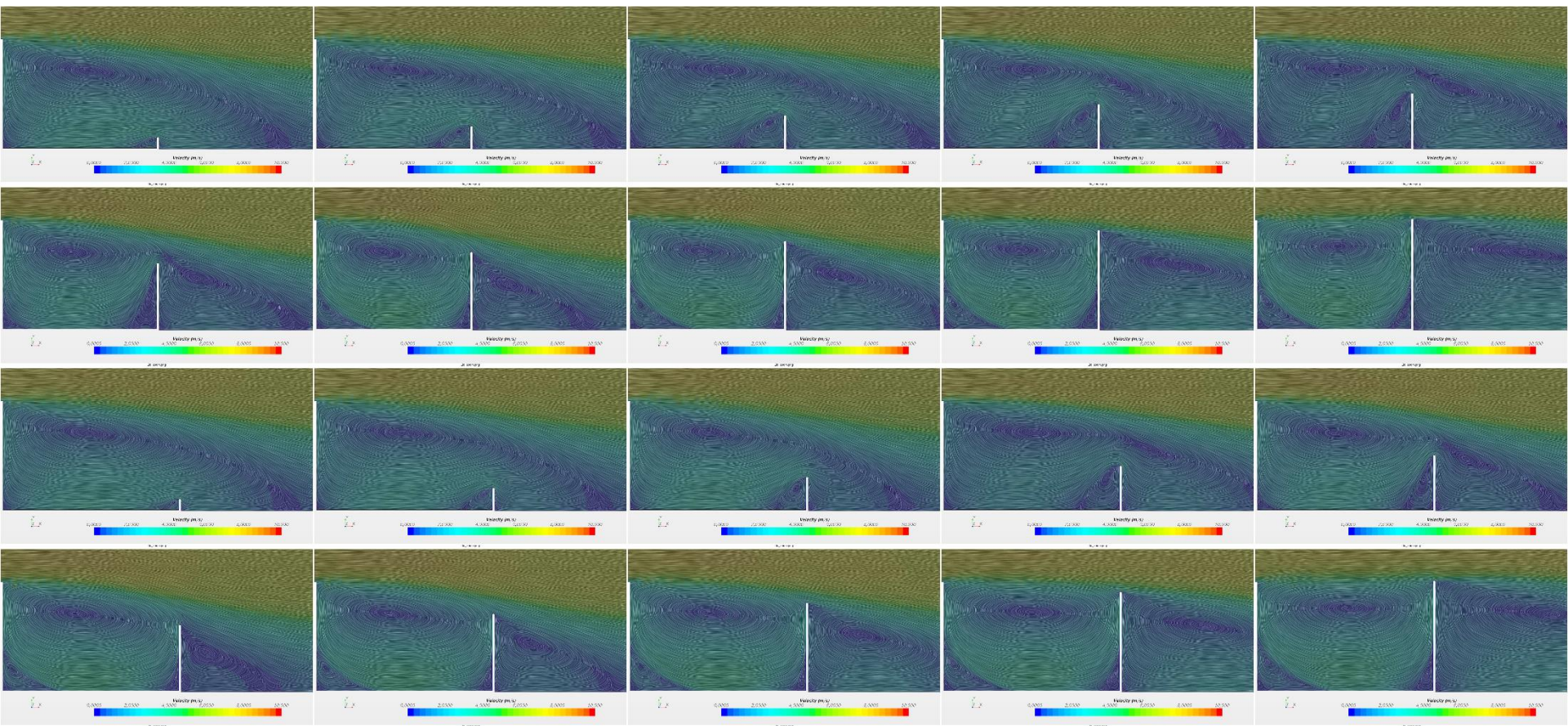
Eingriff in die Struktur des Totwassers



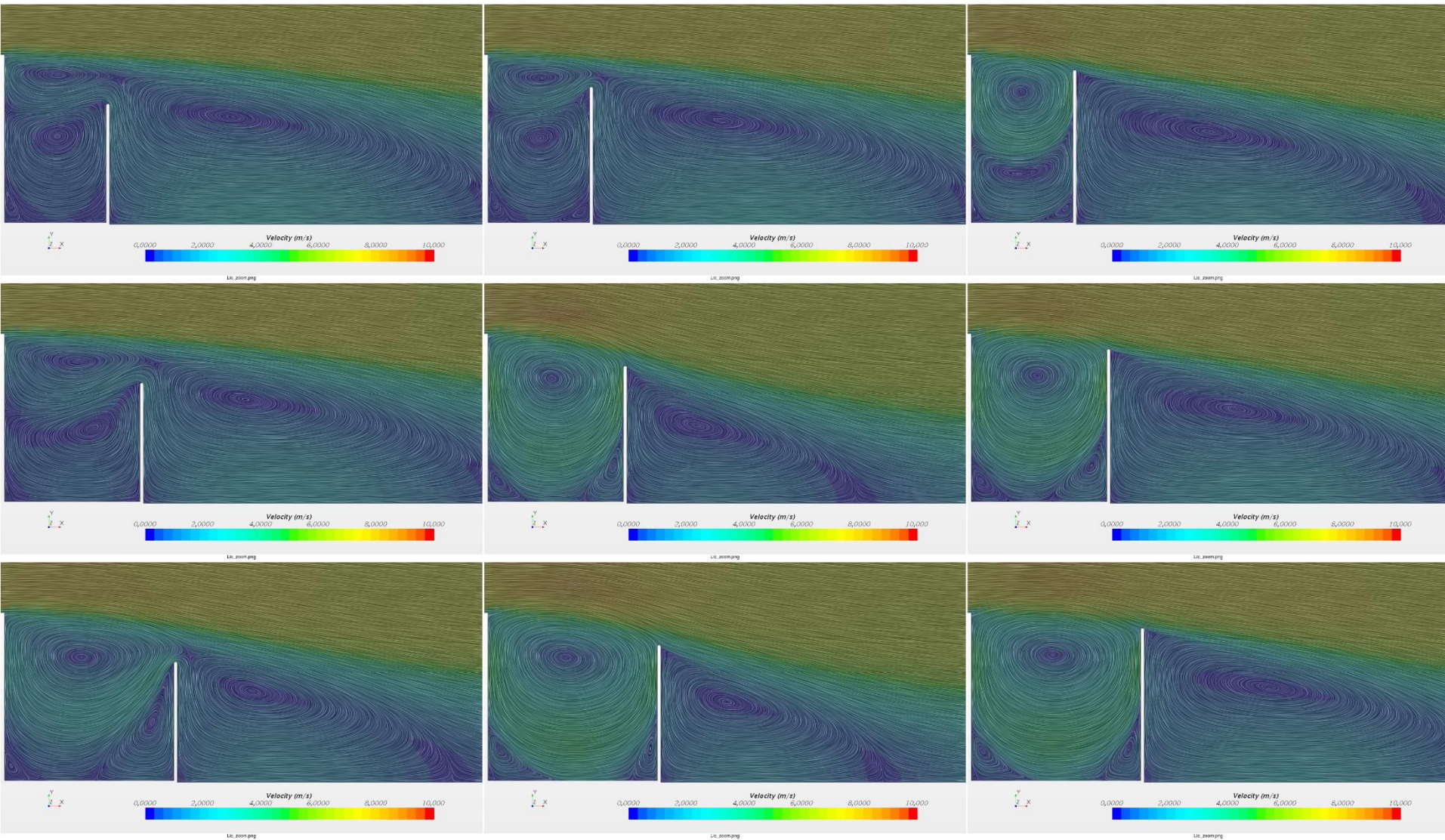
Eingriff in die Struktur des Totwassers



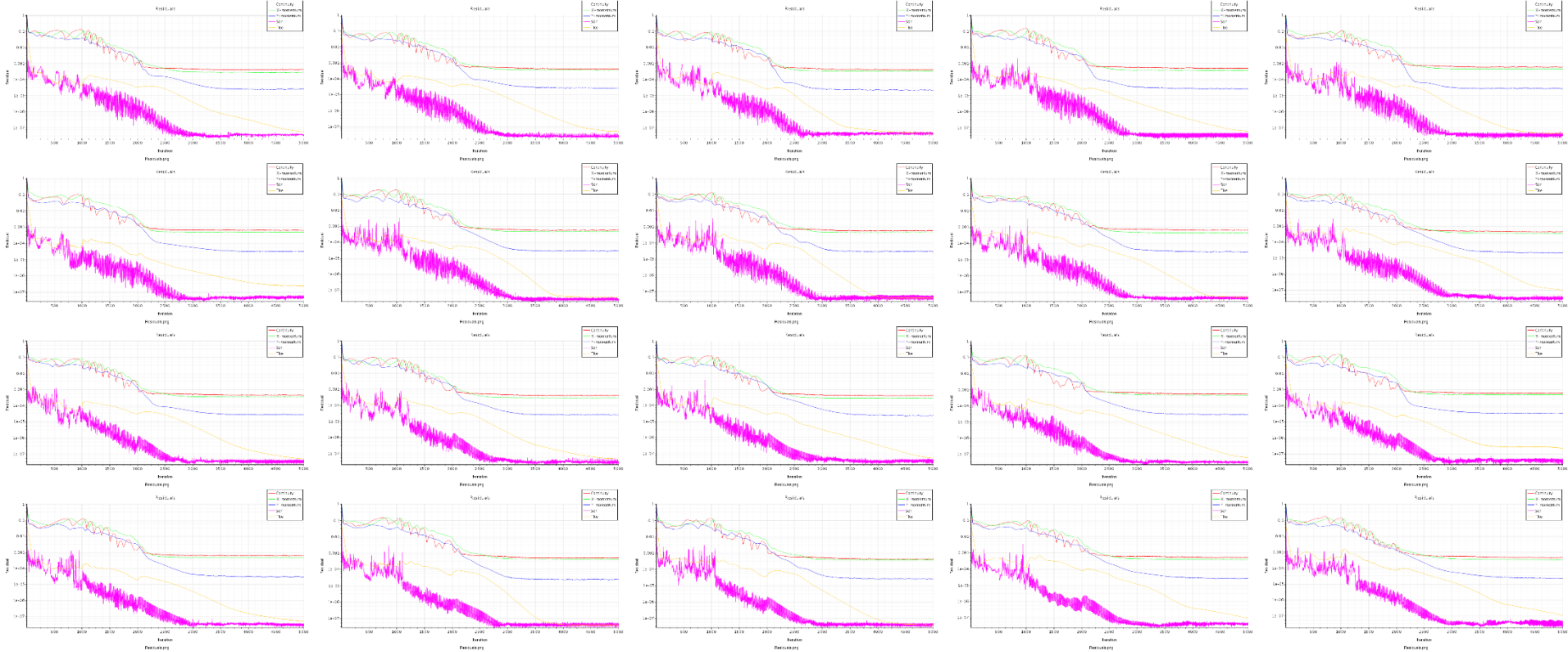
Eingriff in die Struktur des Totwassers



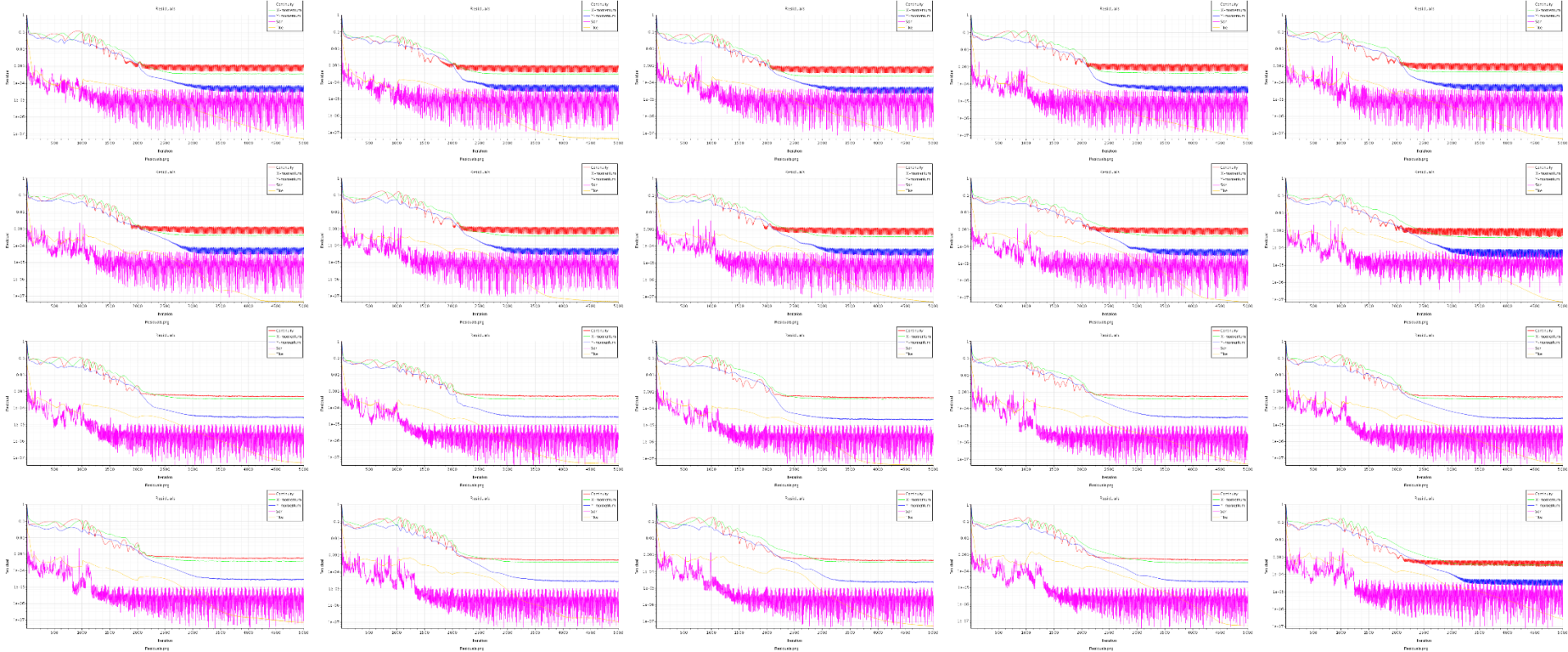
Eingriff in die Struktur des Totwassers



Eingriff in die Struktur des Totwassers

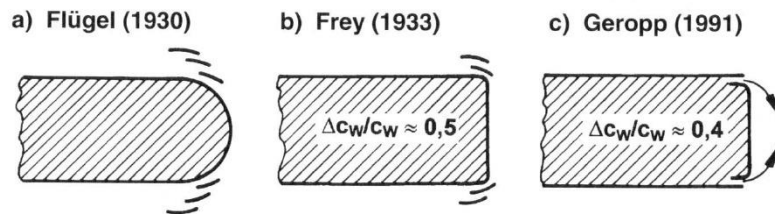


Eingriff in die Struktur des Totwassers



Eingriff in die Struktur des Totwassers

Anhebung des Basisdruckes durch Umlenkung mit Hilfe von Flügeln oder Luftstrahlen

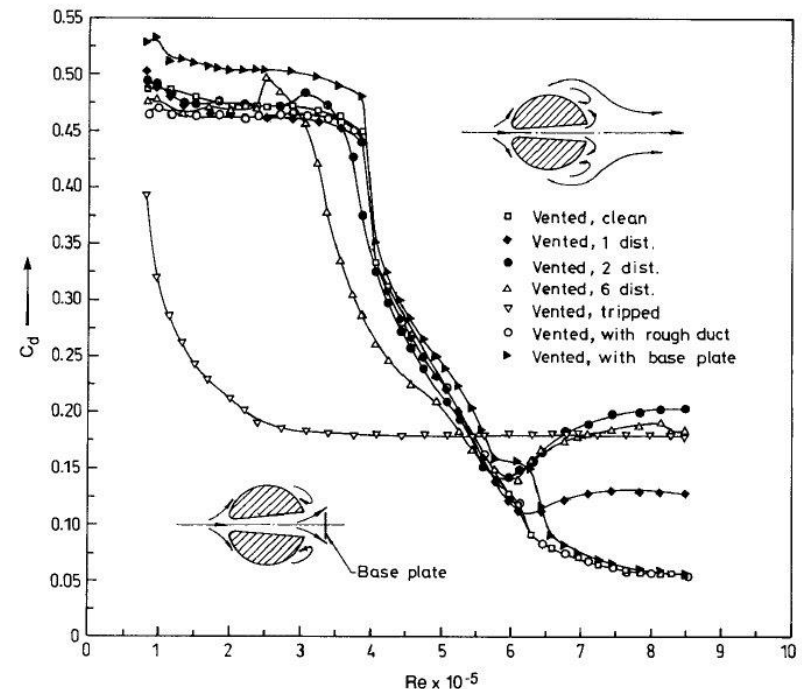


G. Flügel, Ergebnisse aus dem Strömungsinstitut der Technischen Hochschule Danzig, Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, 87, 88-113, 1930

K. Frey, Verminderung des Strömungswiderstandes von Körpern durch Leitflächen, Forschung Ingenieur Wesen, März/April, 67-74, 1933

D. Geropp, Reduktion des Strömungswiderstandes von Fahrzeugen durch aktive Strömungsbeeinflussung, Patentschrift DE 3837729

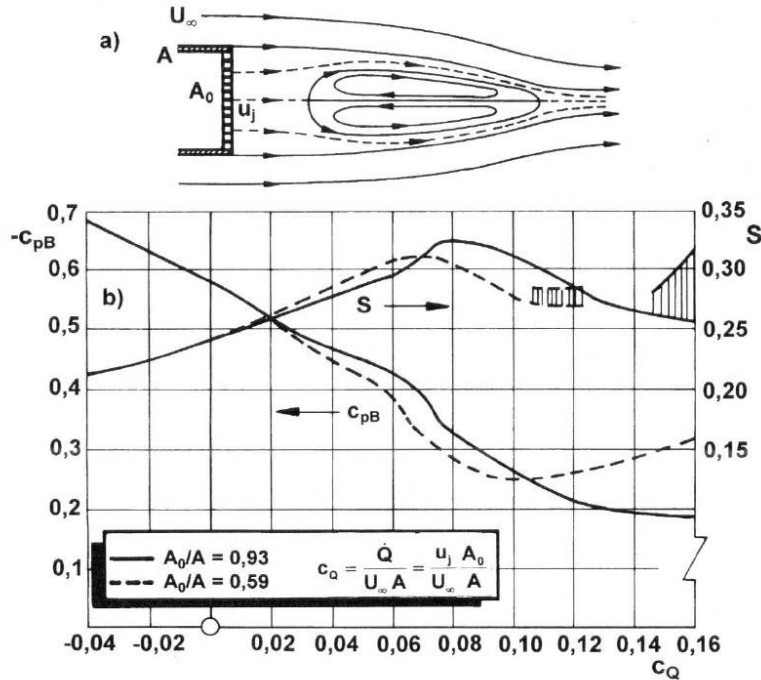
Passive Belüftung des Totwassers an einer Kugel, Effekt nur bei überkritischer Re-Zahl



G.K. Suryanarayana, H. Pauer, G.E.A. Meyer, Bluff-body drag reduction by passive ventilation, Exp. In Fluids, 16, 73-81, 1993

Eingriff in die Struktur des Totwassers

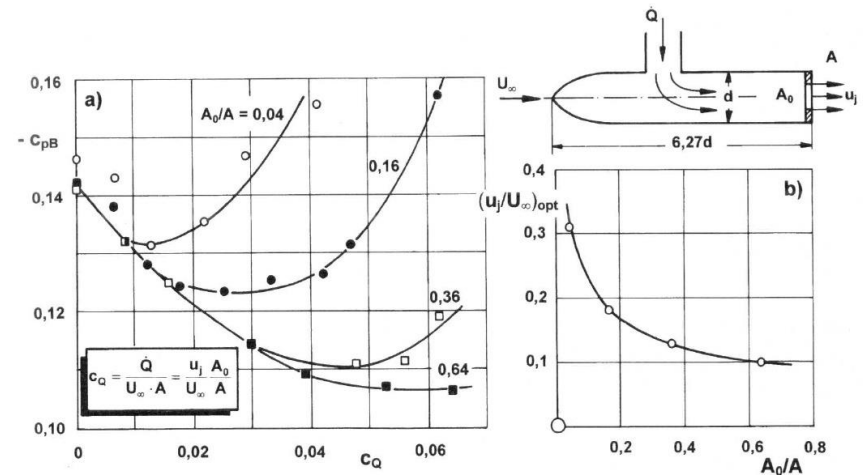
Anheben des Basisdruckes durch flächenhaftes Ausblasen von Luft



P.W. Bearman, The effect of base bleed on the flow behind a two-dimensional model with a blunt trailing edge, Aeron. Quart, 18, 207-224, 1967

Anheben des Basisdruckes durch Ausblasen von Luft

- Zusätzliche Leistung für das Ausblasen entspricht einem zusätzlichen Widerstand



D.M. Sykes, The effect of low flow rate ejection and ground proximity on afterbody pressure distribution, Paper 2 in Scybor-Rylski, A.J. (Ed): Road Vehicle Aerodynamics, London, The City University, 1968

$$P_{\dot{Q}} = \dot{Q} \Delta p$$

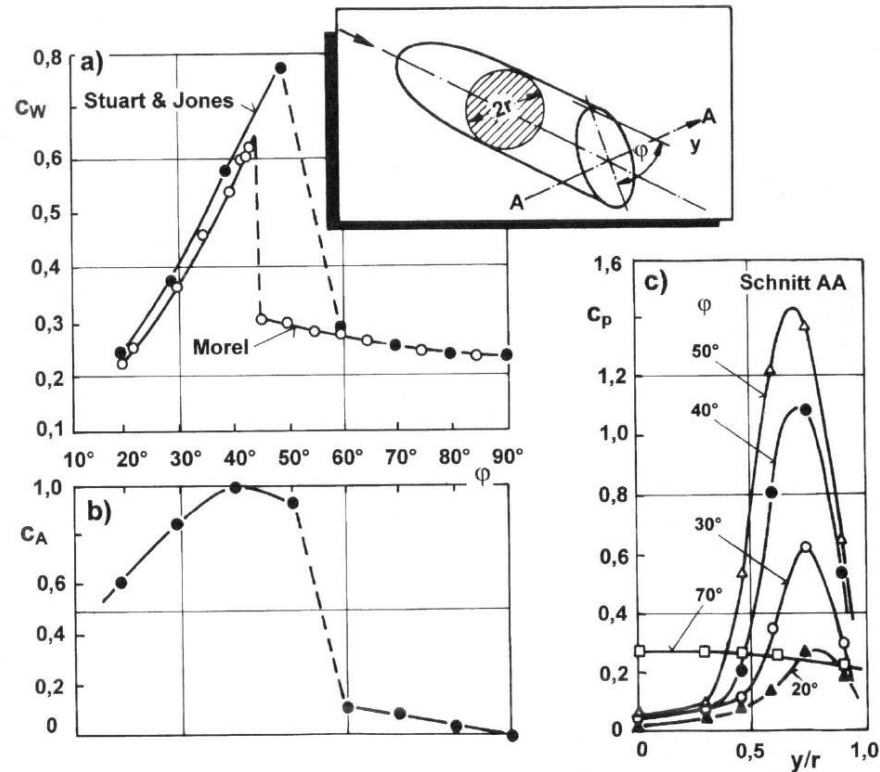
$$\Delta W = \frac{P_{\dot{Q}}}{U_\infty} = \frac{\dot{Q} \Delta p}{U_\infty}$$

$$\Delta c_W = \frac{\dot{Q}}{U_\infty A} \frac{\Delta p}{\frac{\rho}{2} U_\infty^2} = c_{\dot{Q}} \cdot \Delta c_p$$

3-dimensionale Heckformen

Beeinflussung der Heckströmung durch den Neigungswinkel φ der Basis

- a) Widerstand
- b) Auftrieb
- c) Basisdruck

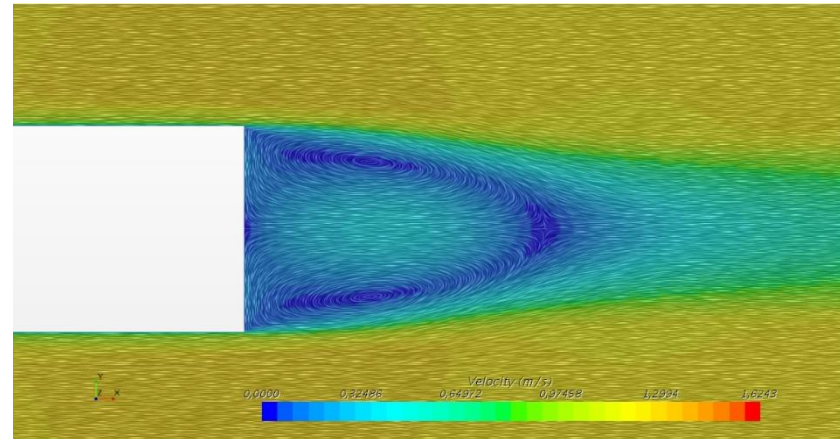
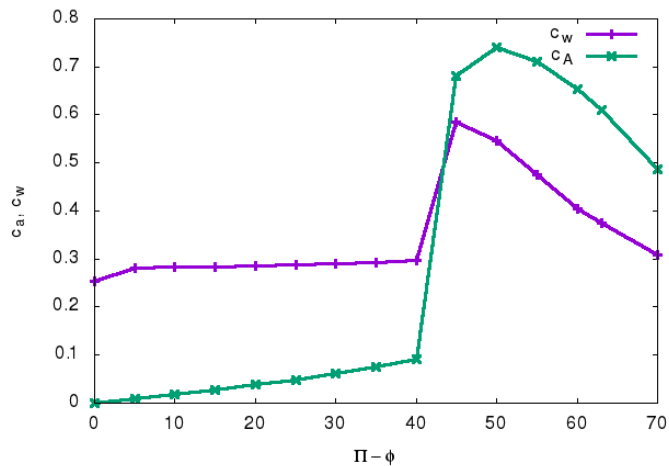


T. Morel, The effect of base slant on the flow pattern and drag of 3-dimensional bodies with blunt ends, In Sovran, Morel, Mason, Aerodynamic mechanisms of bluff bodies and road vehicles, New York, Plenum Press, 191-226, 1978

3-dimensionale Heckformen

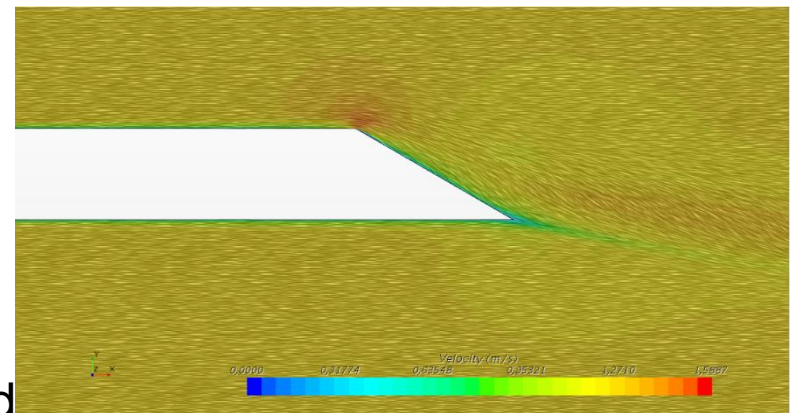
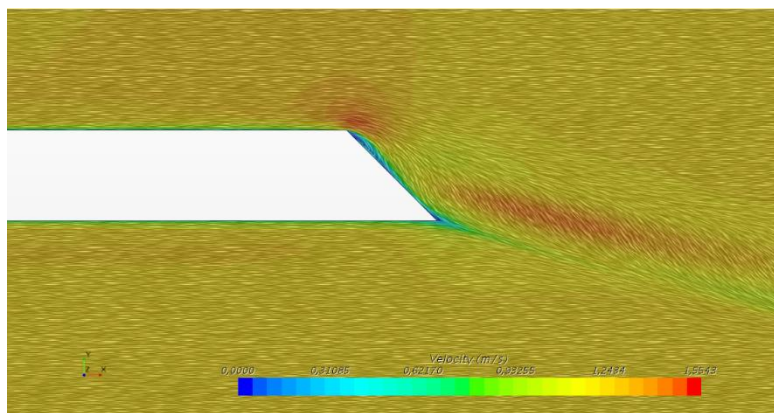
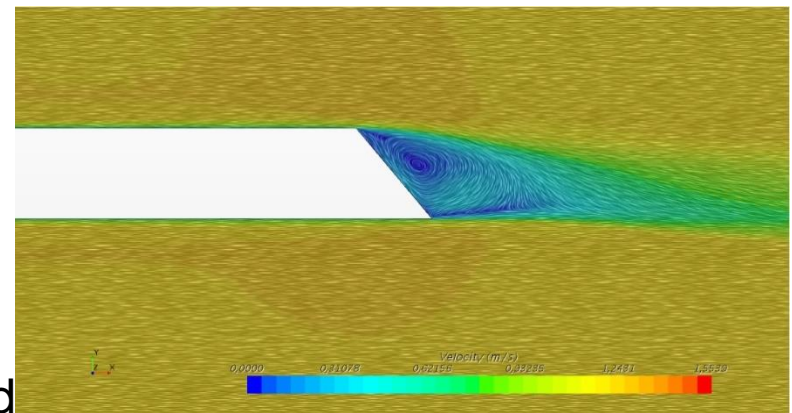
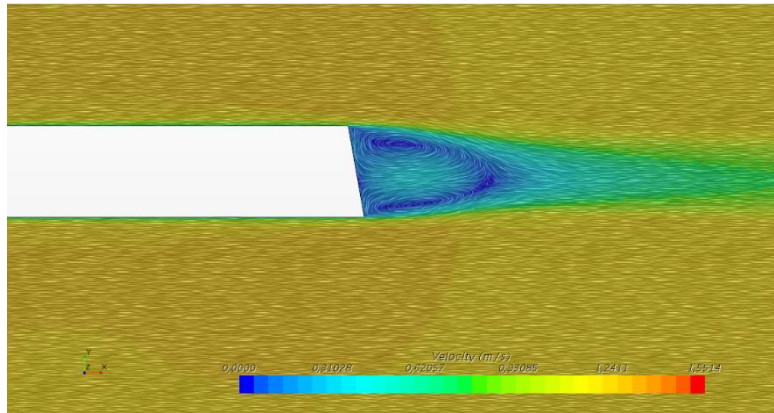
Beeinflussung der Heckströmung durch den Neigungswinkel φ der Basis

Auftrieb und Widerstand bei schraeg abgeschrittenem Heck



3-dimensionale Heckformen

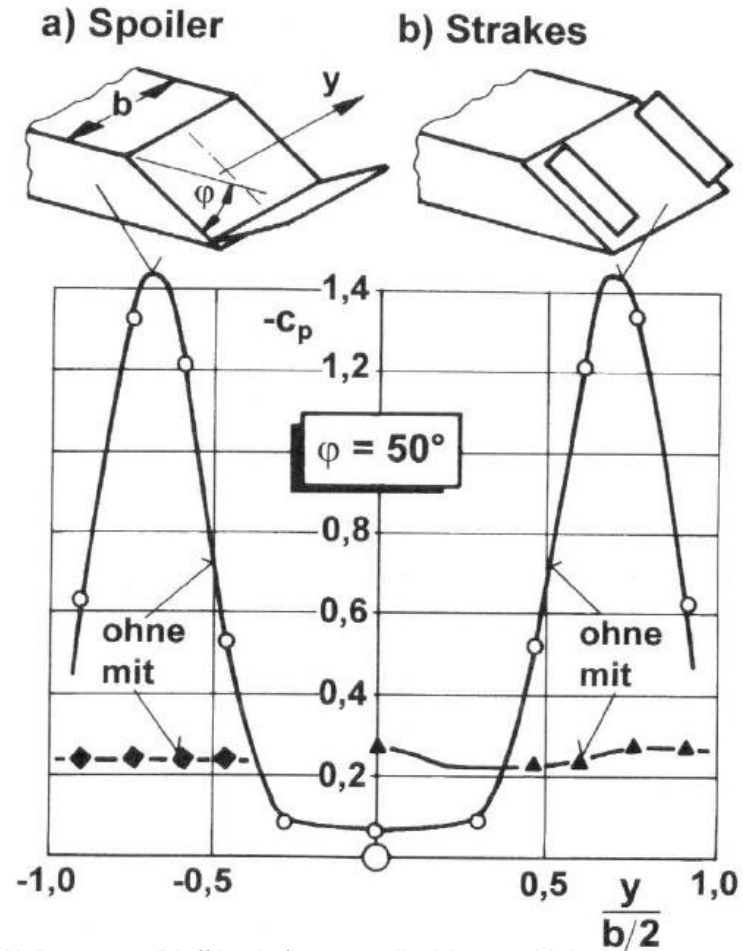
Beeinflussung der Heckströmung durch den Neigungswinkel φ der Basis



3-dimensionale Heckformen

Anhebung des Basisdruckes an einem hinten abgeschrägten prismatischen Körper

- a) mit einer Klappe (Spoiler)
- b) Mit seitlichen Flächen (Strakes)



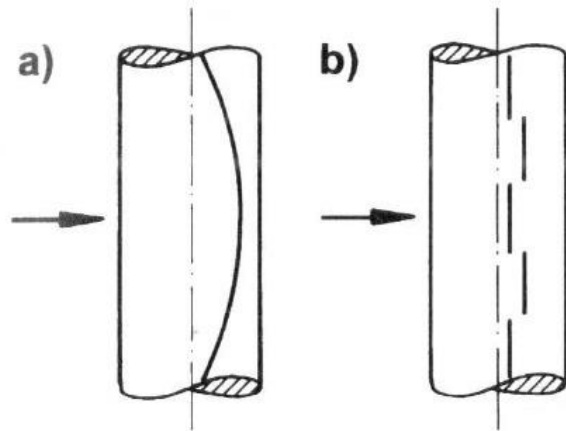
P.W. Bearman, Bluff body flows applicable to vehicle aerodynamics, in Morel, Dalton, Aerodynamics of Transportation, New York, ASME, 1-11, 1979

3-dimensionale Effekte

Dreidimensionale Ablösung an einem nominal zweidimensionalen Kreiszyylinder

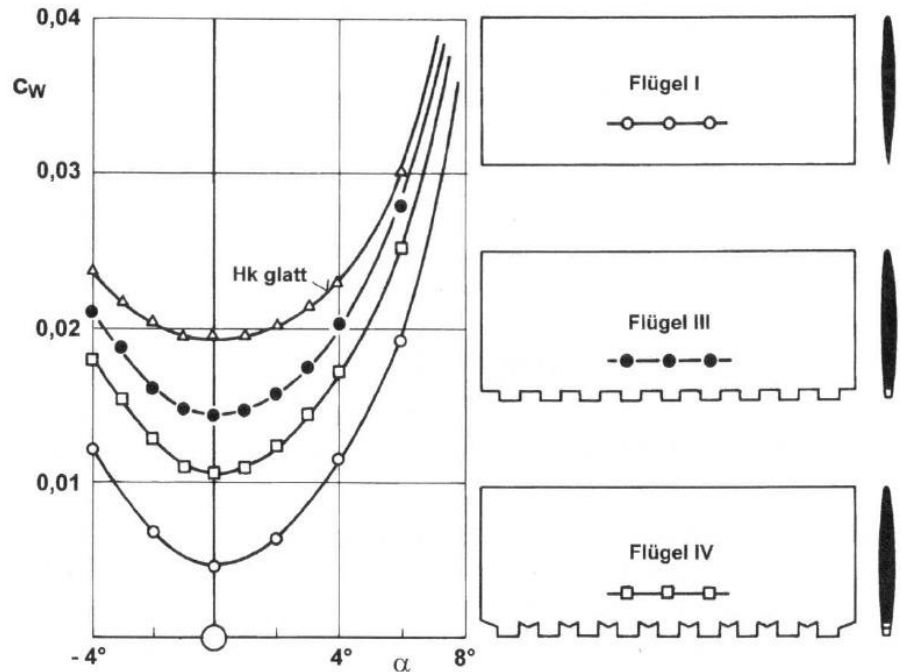
- a) gekrümmte Ablöselinie
- b) Mit Hilfe von Drahtstücken versetzte Ablösung

Keine alternierenden Wirbel



A. Naumann, M. Morsbach, C. Kramer, The conditions of separation and vortex formation past cylinders, 4. AGARD Conference Proceedings No 4. Separated flows, 539-574, 1966

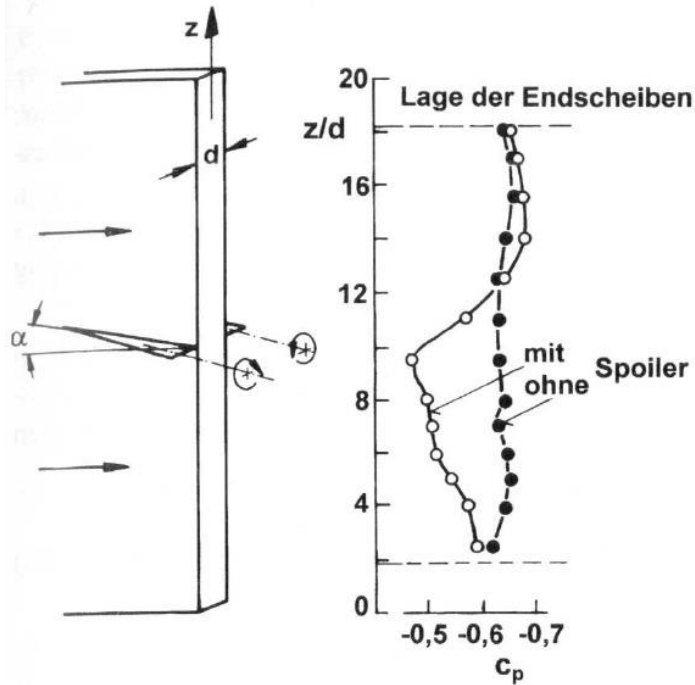
Reduzierung des Widerstandes eines stumpf endenden Profils durch Zackung der Hinterkante



M. Tanner, Reduction of base grad, Prog. In Aero. Sc., 16, 369-384, 1975

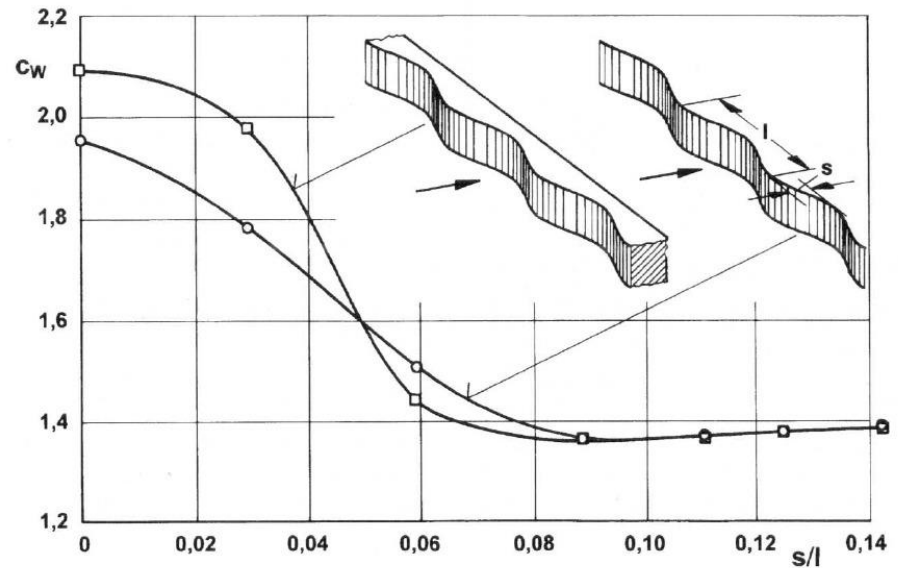
3-dimensionale Effekte

Anhebung des Basisdruckes mit dreieckigen Spoilern unter einem Winkel α



R.A. Young, Bluff bodies in a shear flow, Ph.D. Thesis, Univ. Cambridge, 1972

Reduzierung des Widerstandes eines stumpfen Körpers durch sinusförmige Ausbildung der Vorder-/Hinterkante



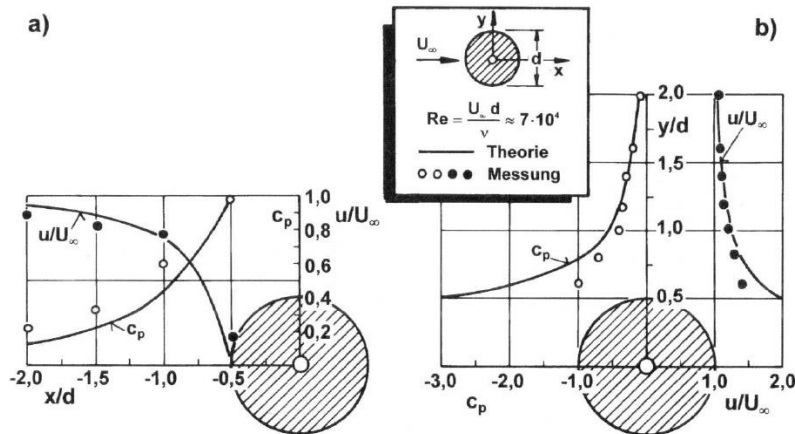
P.W. Bearman, J.C. Owen, Reduction of bluff body drag and suppression of vortex shedding by the introduction of wavy separation lines, J.Fluids and Structures, 12, 123-130, 1998

Wirkung auf das Umfeld

Wirkung auf das Umfeld

„Ausstrahlung“ eines stumpfen Körpers auf seine Umgebung: Druck und Geschwindigkeit

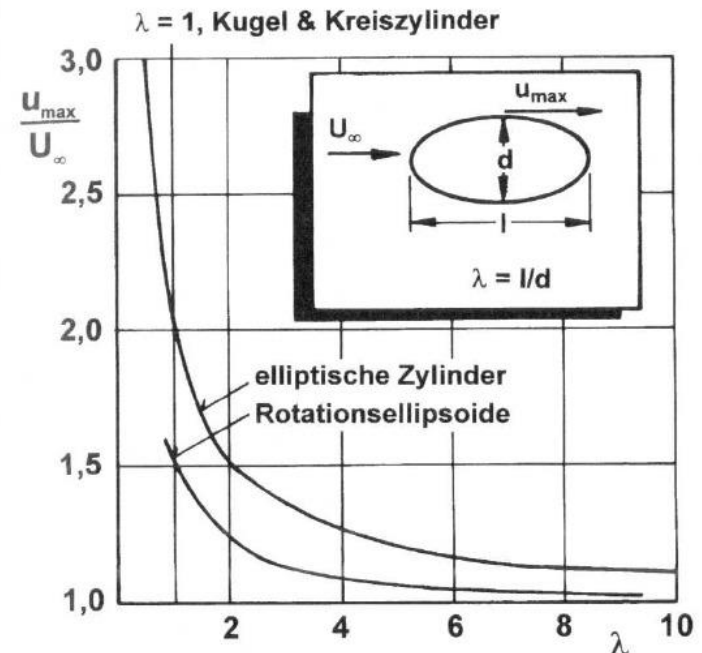
- Vor
- Neben einem Kreiszyylinder



Messung aus: Strömungspraktikum II des Instituts für Strömungsmechanik, TU Braunschweig

Übergeschwindigkeit auf der „Schulter“ von elliptischen Zylinder und Rotationsellipsoiden

$$u_{\max, \text{Kreiszyylinder}} / u_{\max, \text{Kugel}} = 2 : 1.5$$

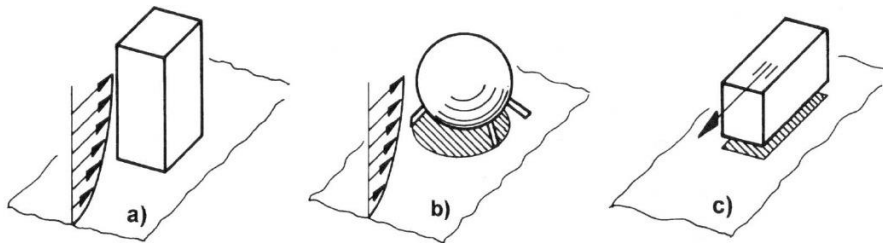


Hucho, Aerodynamik stumpfer Körper

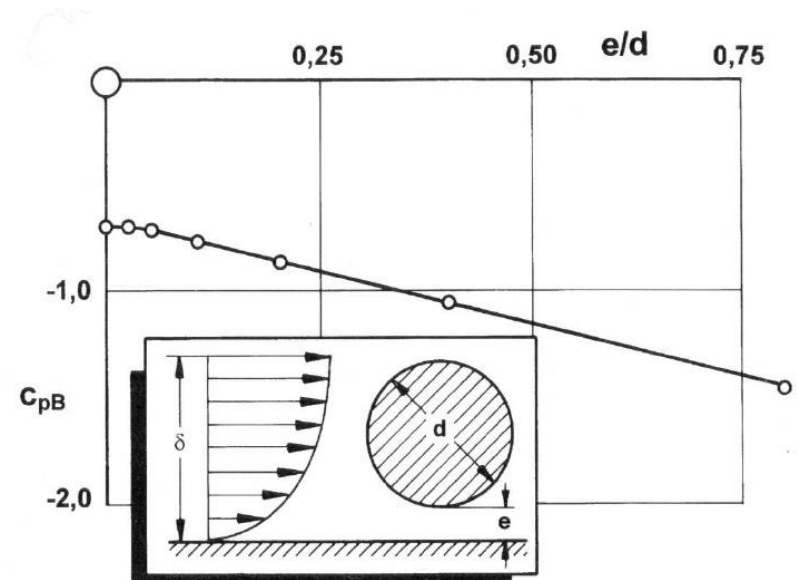
Bodennähe

Stumpfe Körper in Bodennähe

a) Gebäude, b) Kugeltank, c) Fahrzeug



Anheben des Basisdruckes eines Kreiszyinders bei Annäherung an den Boden

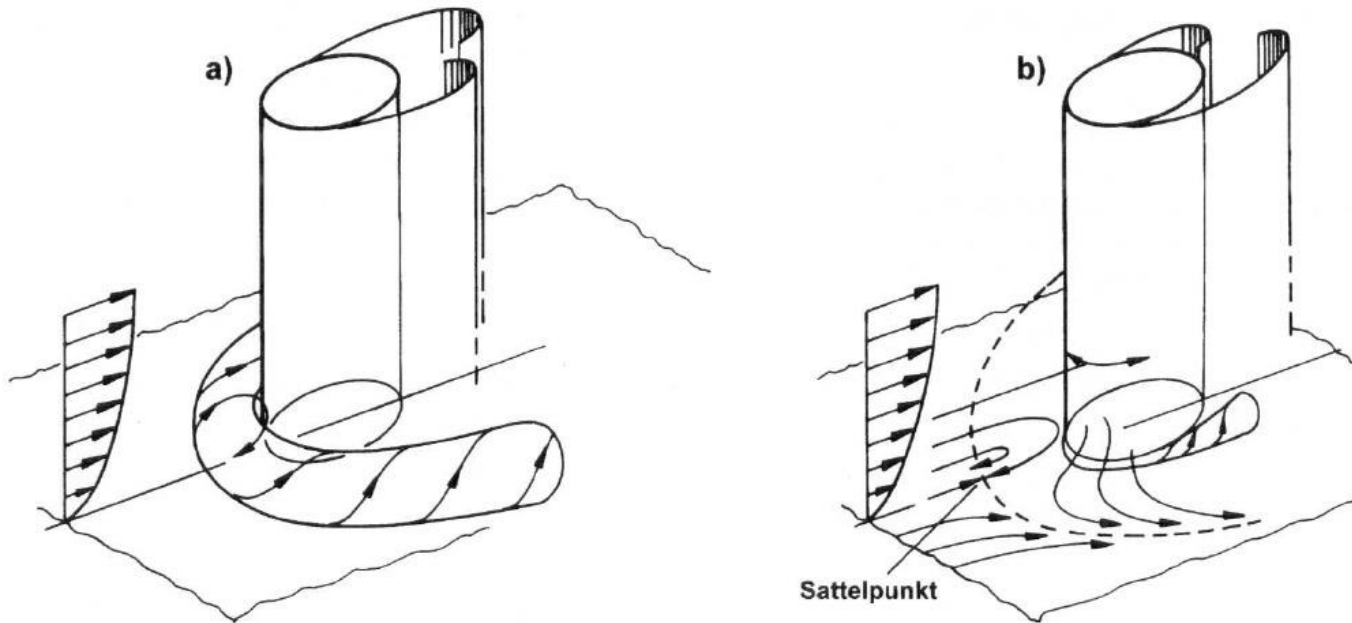


D.J. Maull, Mechanisms of two and three dimensional base drag, In Sovran, Morel, Mason, Aerodynamic drag Mechanisms of bluff bodies and road vehicles, New York, Plenum Press, 1978

Bodennähe

Umströmung eines auf dem Boden stehenden Kreiszylinders

a) Hufeisenwirbel, b) Sekundärwirbel

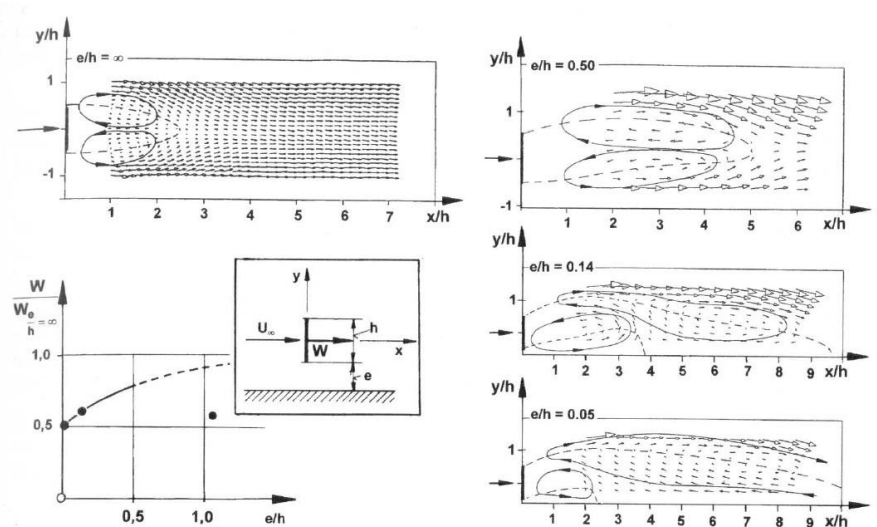
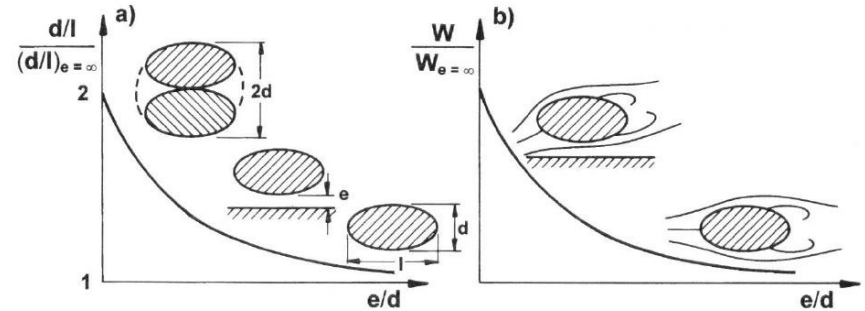


D.J. Maull, Mechanisms of two and three dimensional base drag, In Sovran, Morel, Mason, Aerodynamic drag Mechanisms of bluff bodies and road vehicles, New York, Plenum Press, 1978

Wirkung auf das Umfeld

Bodennähe

- asymmetrische Umströmung, nach oben gewölbter Körper, Ablösung auf der Oberseite, ansteigender Widerstand
- effektive Dicke des Körpers nimmt zu, Ablösung wandert nach vorne
- Venturi-Düse, Druck nimmt ab, Wiederanstieg wird stärker, Ablösung auch auf der Unterseite
- ebene Platte, keine Verschiebung der Ablösung, kurze Rezirkulation – großer Widerstand, lange Rezirkulation – niedriger Widerstand
- Auswirkung auch auf den Auftrieb
 - Dicke des Körpers
 - Venturi-Düse

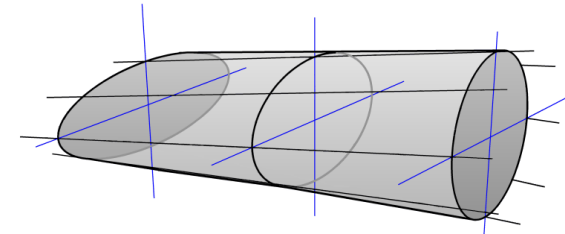


A. Leder, D. Geropp, Analysis of unsteady flow past bluff bodies, J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 49, 329-338, 1993

Schwingungen

Mechanismen

- stationäre Anströmung, alternierende Wirbel
- wirbelinduzierte Schwingungen bei elastischen Körpern, an dünnwandigen Schalen: „Ovalling“
- stationäre Zuströmung, zufällige elastische Auslenkung, anfachende Kräfte,
- bewegungsinduziert, „Galloping“



Socrates.Berkeley.edu



Darren Drake, WEMC engineer

Schwingungen

Mechanismen

- stationäre Zuströmung, selbst-erregte Schwingungen in zwei Freiheitsgraden: „Flutter“, Tacoma Bridge
- instationäre Zuströmung, z.B. pulsierend „Buffeting“



Standard-YouTube-Lizenz



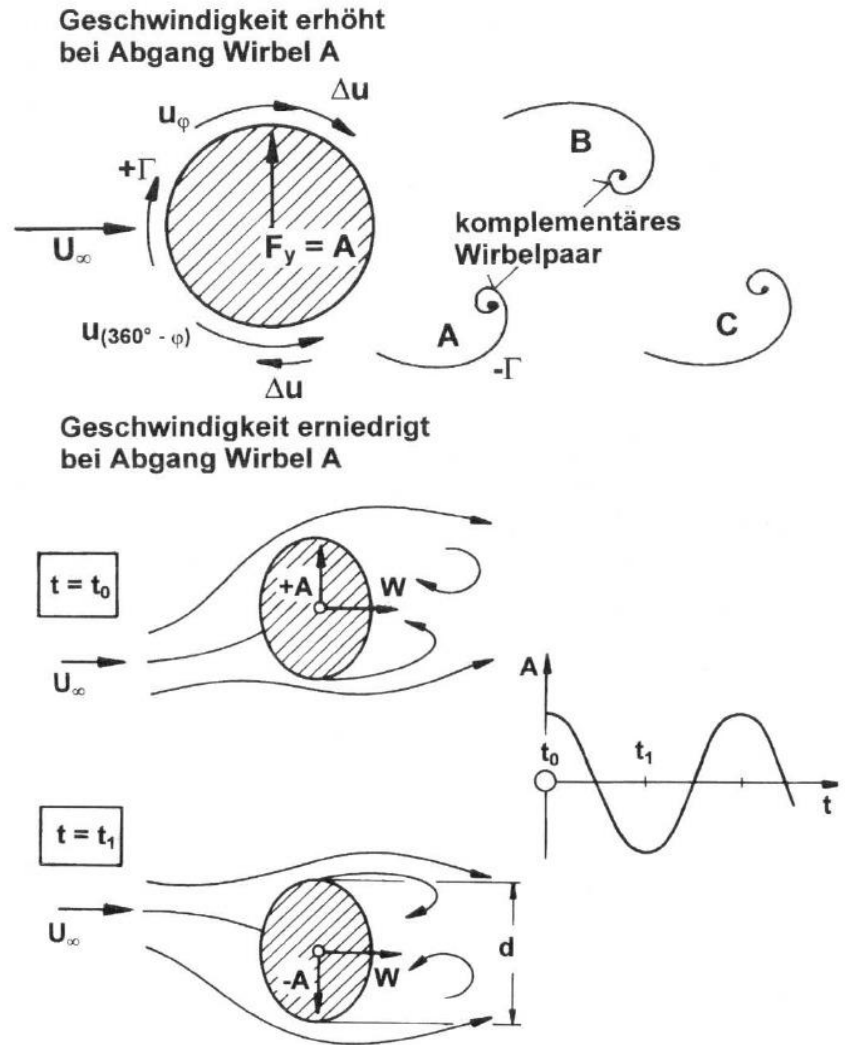
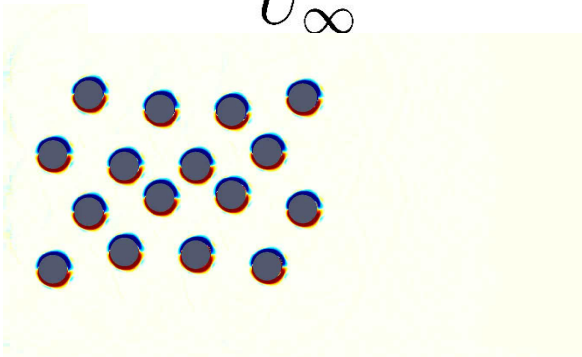
Dylan Toh

Wirkung auf das Umfeld

Schwingungen

- Eigenfrequenz
- große Amplitude
- Zerstörung
- Zeitfestigkeit
- Widerstandsamplitude nur 20 % des Auftriebs
- „Locking in“

$$Sr = \frac{f \cdot d}{U_\infty} = 0.2 \dots 0.3$$

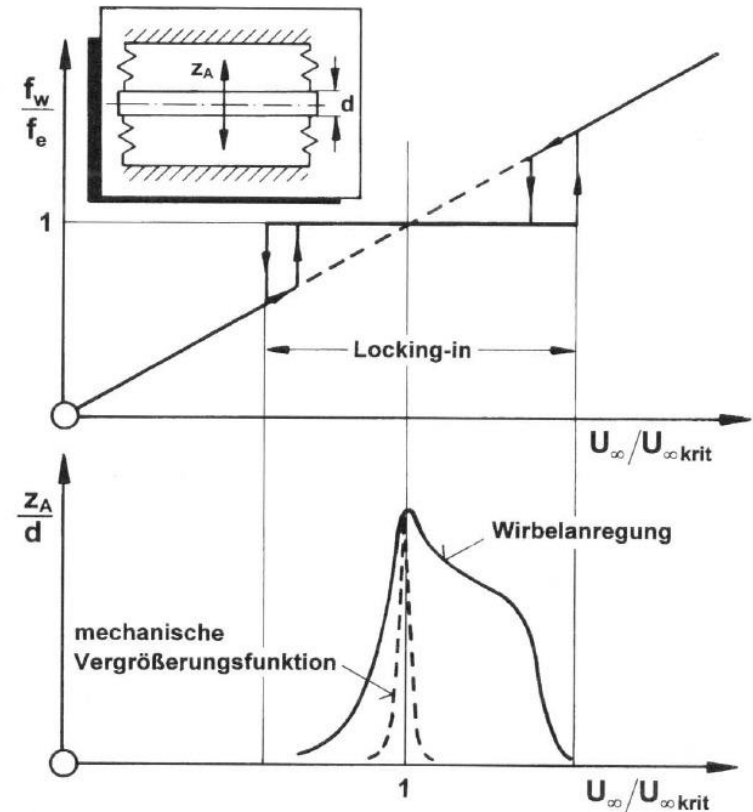


Wirkung auf das Umfeld

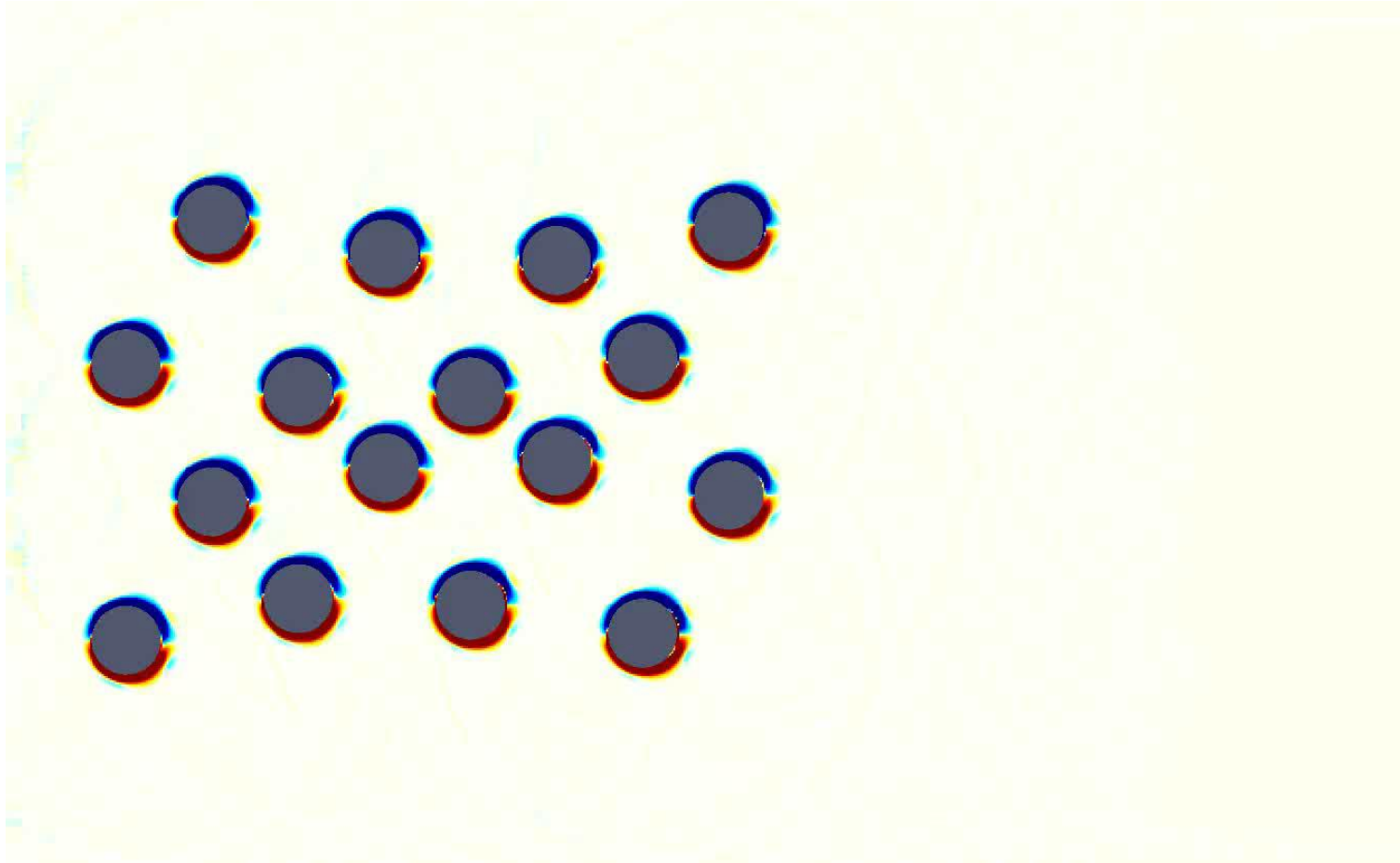
Schwingungen

Locking In“: sprungartige Synchronisation der Frequenz f_w , der abgehenden Wirbel mit der Eigenfrequenz f_e des Zylinders

$$f_w = \frac{Sr}{d} U_\infty$$
$$U_{\infty, \text{krit}} = \frac{f_e d}{Sr}$$



Schwingungen

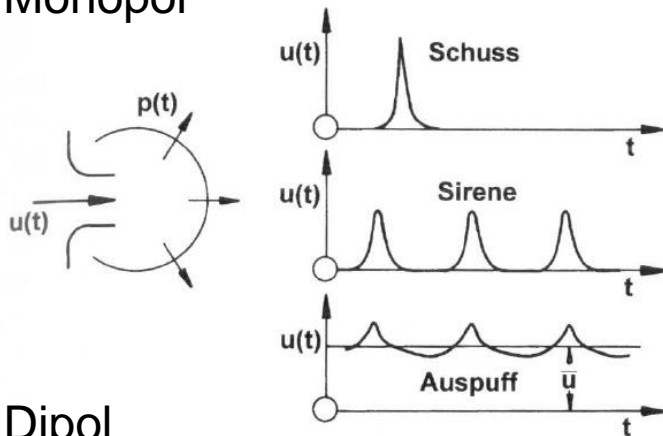


H.W. Försching, Grundlagen der Aeroelastik, Berlin, Heidelberg, Springer, 1974

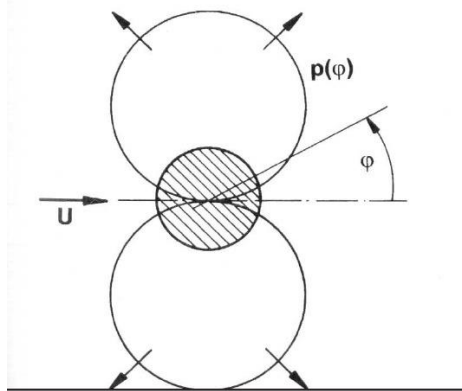
Wirkung auf das Umfeld

Strömungsgeräusche

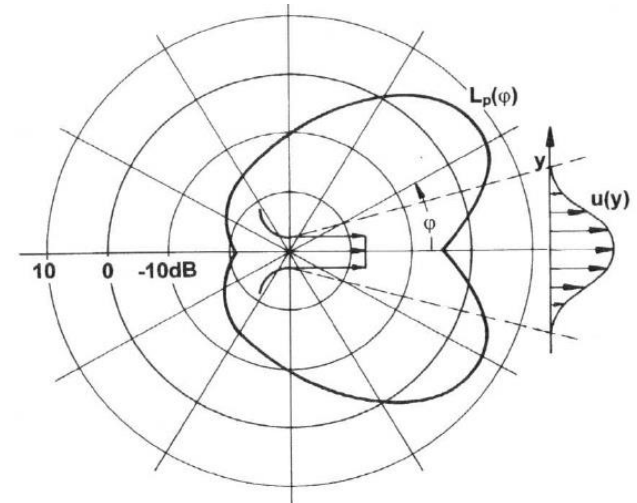
Monopol



Dipol



Quadrupol



Bezeichnung	Schema	Intensität	Art der Strömung	Beispiel
Monopol		$P_M \sim \frac{\rho}{a} U^4$	Pulsierender Volumenstrom	Leck in Dichtung, Mündung des Auspuffs
Dipol		$P_D \sim \frac{\rho}{a^3} U^6$	Fluktuierende Druckbeaufschlagung	Auftreffen einer Strömung auf eine Oberfläche
Quadrupol		$P_Q \sim \frac{\rho}{a^5} U^8$	Kollision von Fluidelementen	Freistrah, turbulente Grenzschicht

P Schallleistung; U Strömungsgeschwindigkeit; a Schallgeschwindigkeit; ρ Dichte

L. Cremer, M. Hubert, Vorlesung über Technische Akustik, Berlin, Heidelberg, Springer, 1990

**Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit**



Fahrzeug- und Windkraftaerodynamik

Vehicle and windturbine aerodynamics

Dr.-Ing. A. Henze, Prof. Dr. sc. D. Krug

Institute of Aerodynamics, RWTH Aachen University

Geometrisch einfache Körper

Geometrisch einfache Körper

Inhalt

- Kreiszyylinder

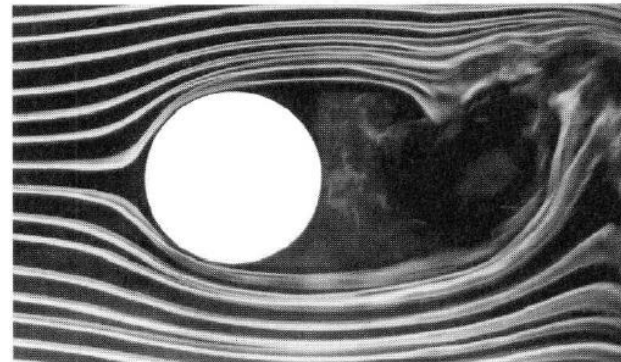
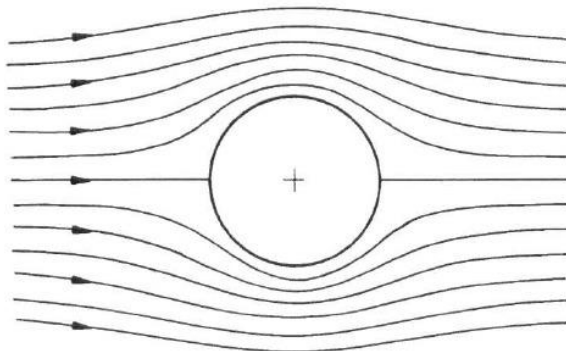
Kreiszyylinder

Kreiszyylinder

Versuchsbedingungen

- für große Re-Zahlen braucht man große Modelle (Konflikt mit der Mach-Zahl)
- große Modelle → große Versperrung
- empfindlich gegenüber Störungen, wie Turbulenz der Anströmung, Wandrauigkeit
- Ablösung und Turbulenz sind i.A. dreidimensional → Einfluss der Spannweite

Reibungsfreie Lösung $c_p = 1 - \left(\frac{w_k}{U_\infty} \right)^2 = 1 - 4 \sin^2 \phi$



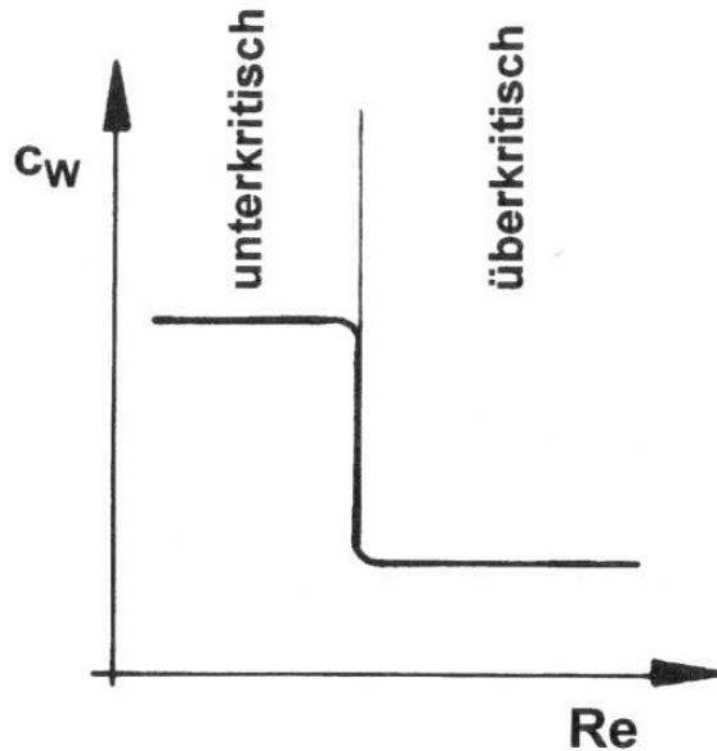
- Übereinstimmung auf der Vorderseite
- Abweichung auf der Rückseite
- Asymmetrie

- alternierende Wirbel
- oszillierende Querkraft

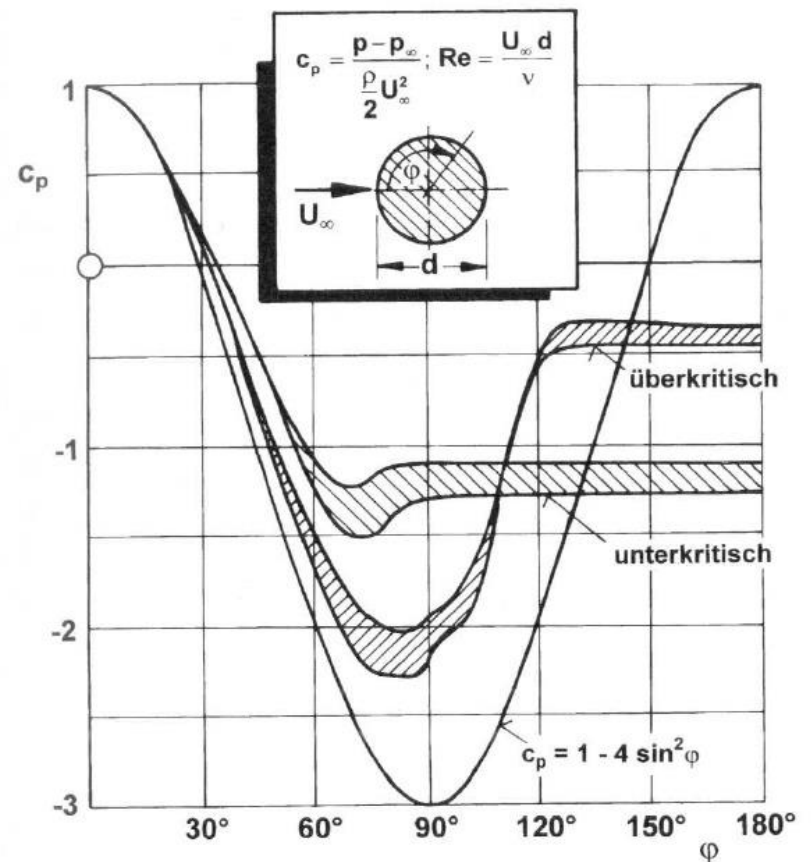
Kreiszyylinder

- Druckverteilung auf dem Umfang des Kreiszyinders
- Vergleich der idealen mit der realen Strömung
- bei kleineren Re-Zahlen: Ablösung vor der dicksten Stelle
 - breites Totwassergebiet, hoher Unterdruck
 - großer Widerstand
- bei größeren Re-Zahlen: Ablösung hinter dickster Stelle
 - turbulente Grenzschicht → größerer Druckgradient
 - schmales Totwassergebiet → geringer Widerstand

Kreiszyylinder

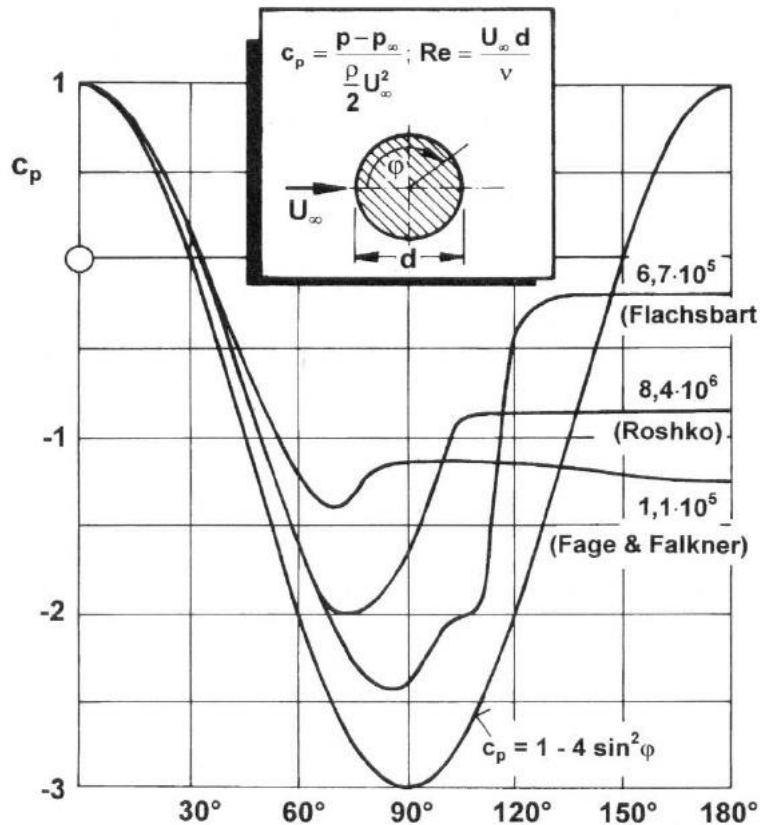


stark vereinfachte Darstellung,
„Textbook plot“

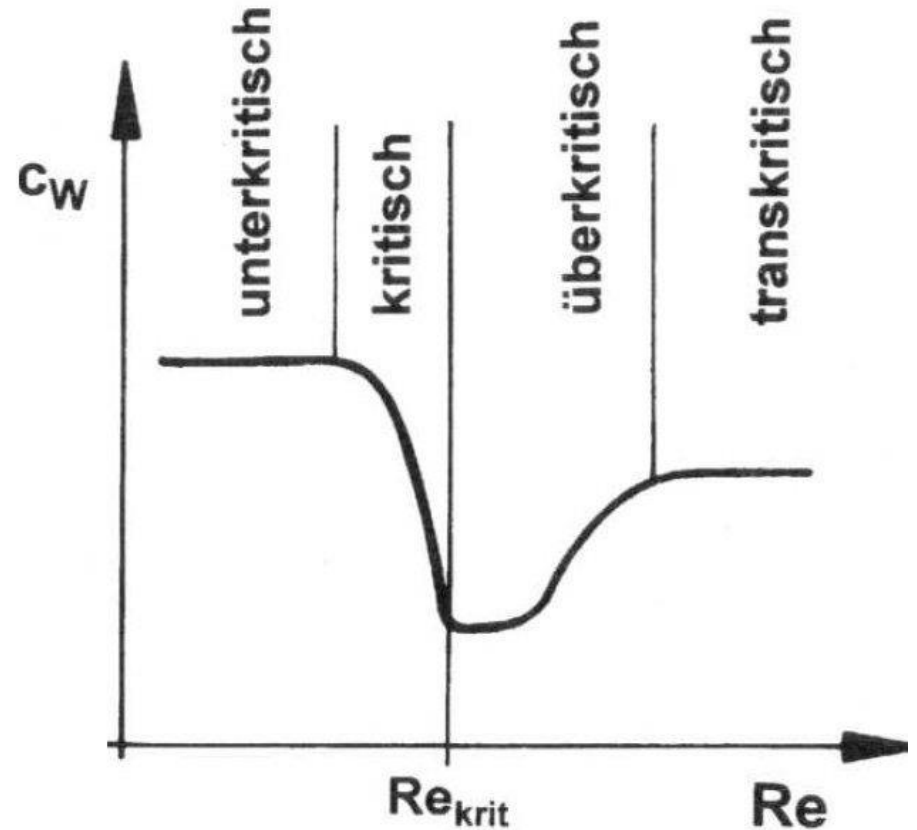


S. Hoerner, Fluid dynamic drag, Midland Park, New Jersey
Selbstverlag des Autors, 1965

Kreiszyylinder



Druckverteilung am Kreiszyylinder
Vergleich verschiedener Autoren



Tatsächlicher Verlauf des
Widerstandsbeiwertes

Kreiszyylinder

$Re \rightarrow 0$

- Schleichende symmetrische Strömung, extrem hoher Widerstand, z.B.: dünne Drähte

Bis A: $3-4 < Re < 30-40$

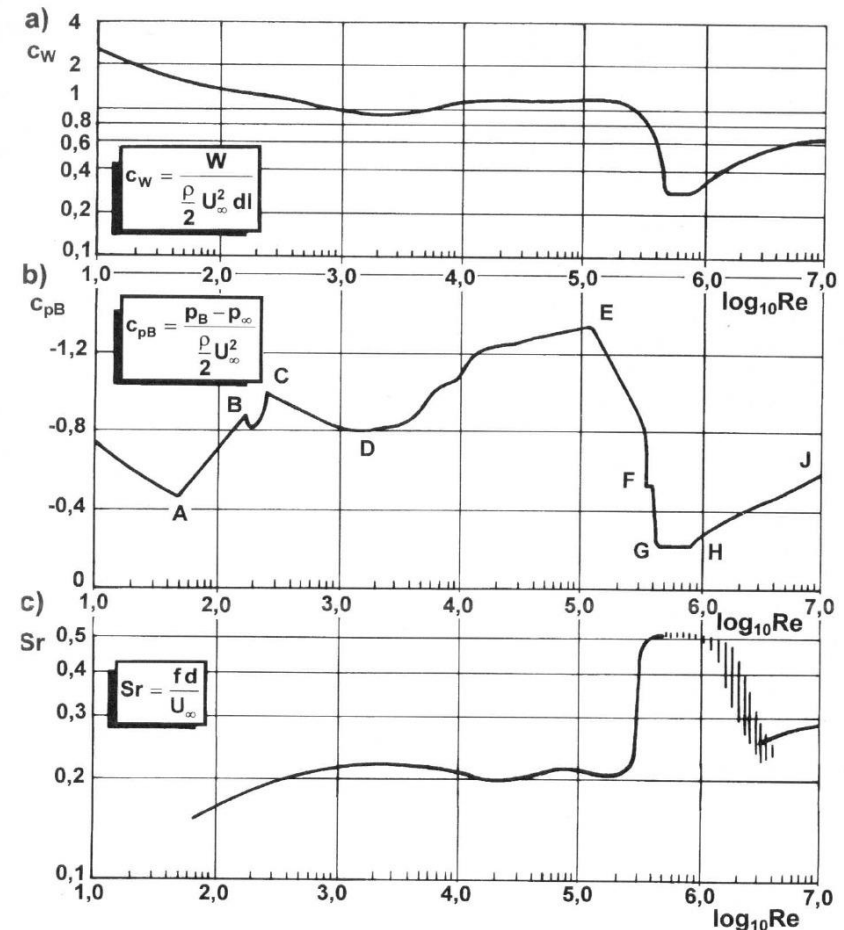
- Laminare Grenzschicht löst bei $Re=40$ ab, symmetrisch, stationär x_R nimmt mit wachsender Re zu, c_{pB} nimmt zu, Widerstand nimmt ab

A-B: $40 < Re < 140-200$

- Bei $Re = 50$ instationär, asymmetrisch, alternierende Wirbel, Kármán'sche Wirbelstraße, Wirbel bis $80 D$ stabil, Basisdruck nimmt zwar ab, aber die Breite des Totwassergebietes nimmt ab
→ Widerstand nimmt leicht ab

B-C: $190 < Re < 260$

- erste kleine Längswirbel, dreidimensional



Abhängigkeit der Eigenschaften des Kreiszyinders von der Reynoldszahl, a) Widerstand, b) Basisdruck c) Strouhalzahl

Kreiszyylinder

C-D: $260 < Re < 10^3$

- Längswirbel werden pulsierend, turbulent Reynoldsspannungen nehmen ab, Totwasser wird kürzer, trotzdem steigt der Basisdruck, Widerstand nimmt ab

D-E: $1000 < Re < 2 \cdot 10^5$

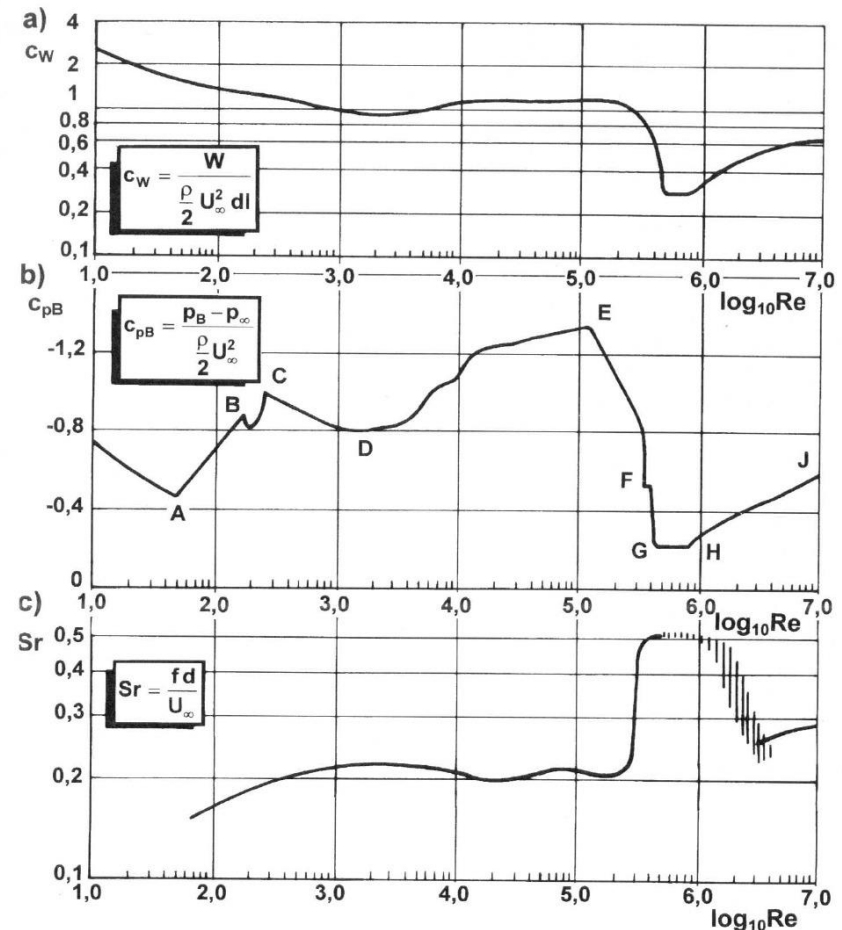
- Grenzschicht laminar, Ablöswinkel bei 80° , gleichmäßige Bildung der Wirbel, konstante Strouhalzahl, ‚äolische Harfe‘ bei $Re \sim 1000$ 2-d Wirbel lösen sich schnell auf, Totwasser wird kürzer, Wirbel näher an die Basis, Basisdruck nimmt ab, hoher Widerstand

E-F-G: $2 \cdot 10^5 < Re < 4 \cdot 10^5$

- „kritisch“, laminare Grenzschicht löst ab, Blase, Turbulentes Wiederanlegen, turbulente Ablösen Bei 140° , schmales Totwasser, Widerstand nimmt sprunghaft ab, Frequenz nimmt zu

F: zunächst einseitige Blase \rightarrow asymmetrisch

- Auftrieb, bei leicht höherer Re-Zahl: beidseitige Blase



Abhängigkeit der Eigenschaften des Kreiszyinders von der Reynoldszahl, a) Widerstand, b) Basisdruck c) Strouhalzahl

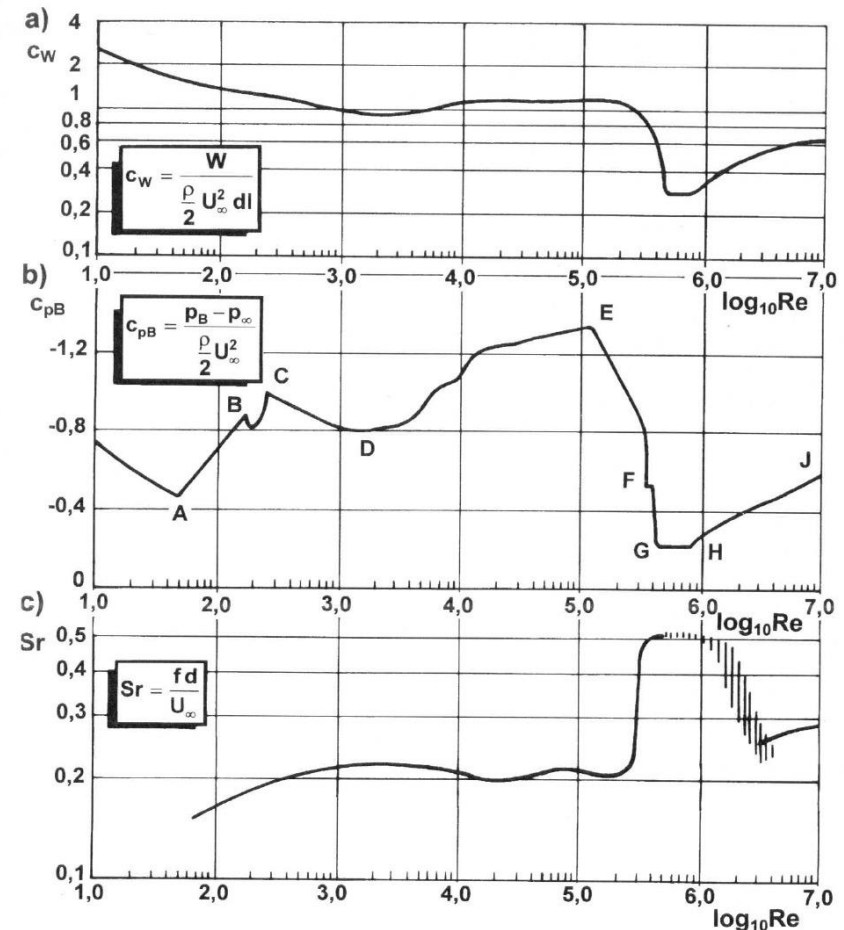
Kreiszyylinder

G-H: $4 \cdot 10^5 < Re < 7 \cdot 10^5$

- „überkritisch“, symmetrisch, laminare Ablösung, Umschlag, Wiederanlegen, hohe Querbewegungen, Grenzschicht kann steileren Druckanstieg bewältigen, hoher Basisdruck, niedriger Widerstand

H-J: $Re > 7 \cdot 10^5$

- „transkritisch“, turbulenter Umschlag weiter vorne, keine Blase, Ablösung nach vorne, breites Totwasser, konstanter Widerstand $c_w = 0.7$, schmalbandiges Frequenzspektrum, $Sr = 0.28$, regelmäßige Strukturen



Abhängigkeit der Eigenschaften des Kreiszyinders von der Reynoldszahl, a) Widerstand, b) Basisdruck c) Strouhalzahl

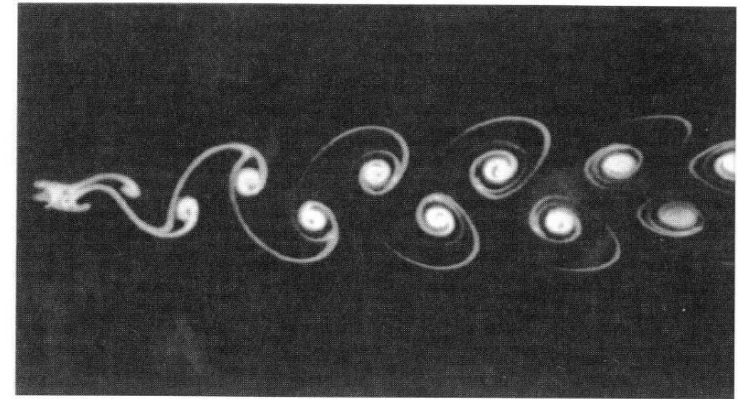
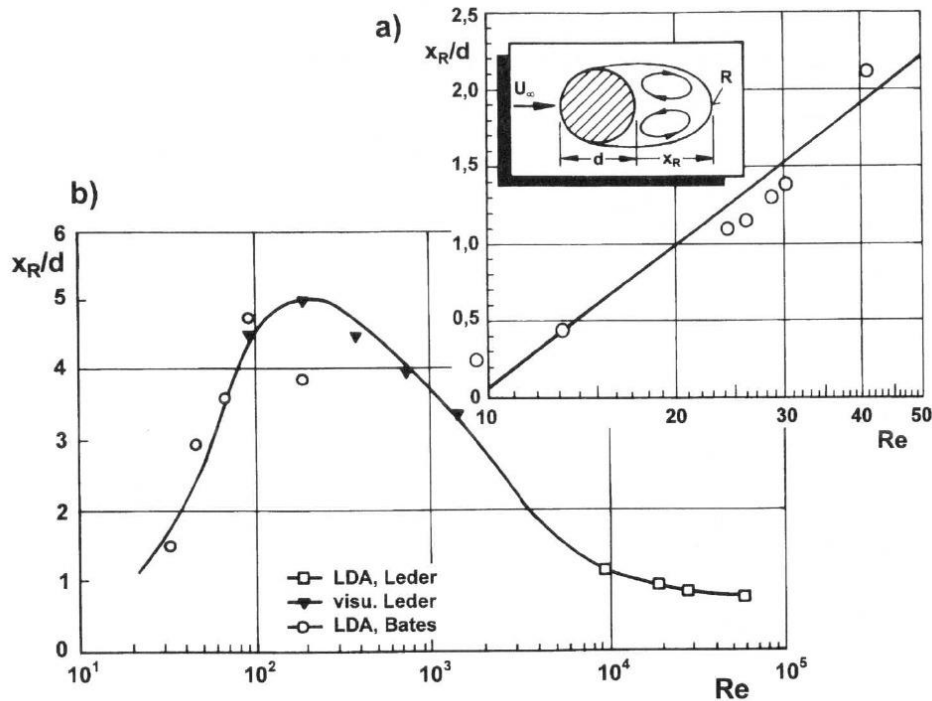
Kreiszyylinder

- Länge des Totwassers

a) Extrem kleine Re-Zahl

b) Kleine und große Reynolds-zahl

- Kármánsche Wirbelstraße, $Re=105$

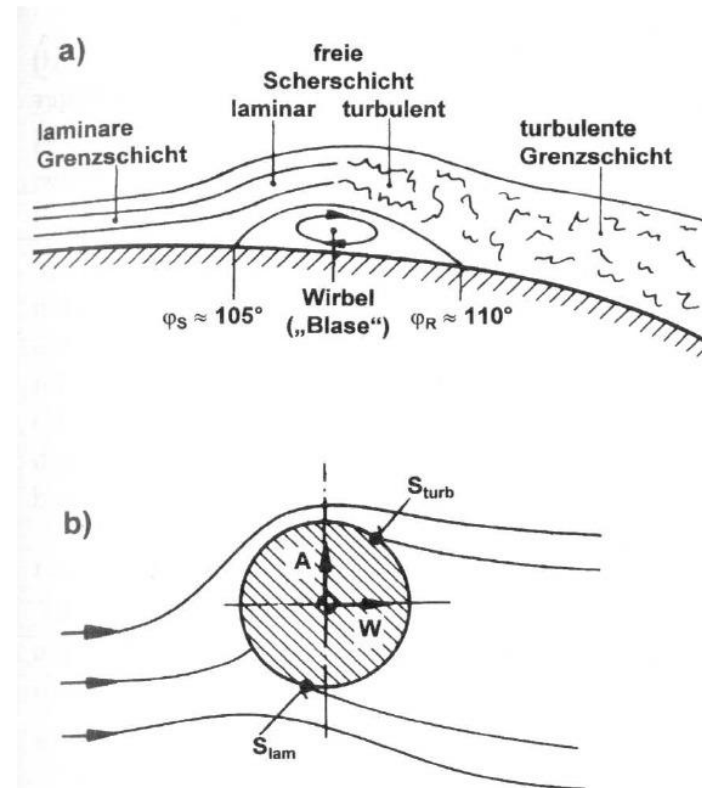
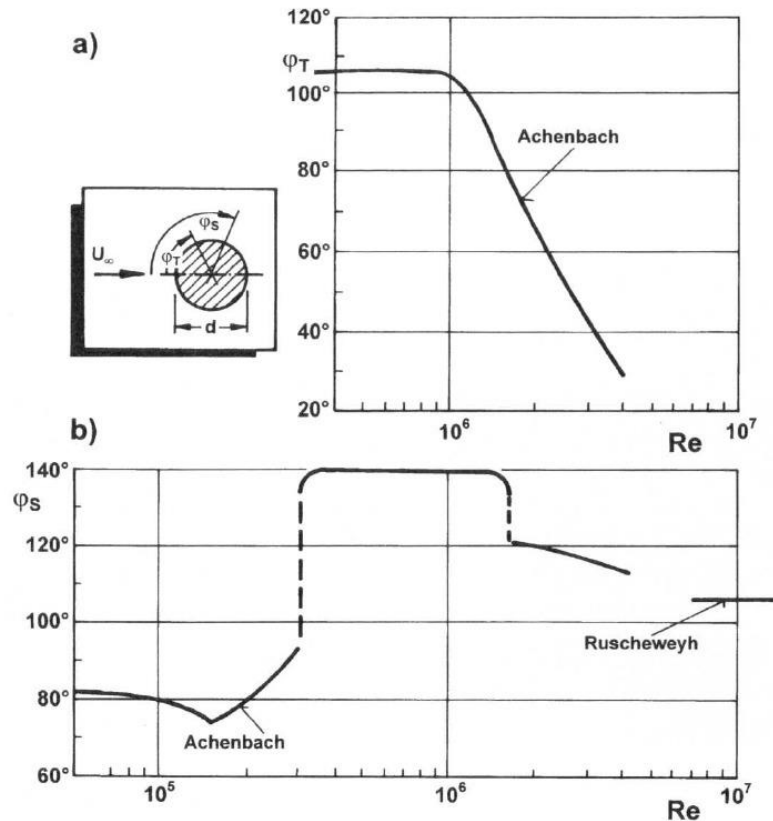


Van Dyke, An album of fluid motion, 1997

Kreiszyylinder

- Verhalten der Grenzschicht am Kreiszyylinder
- a) Umschlag laminar/turbulent
- b) Ablösung

- a) Umschlag laminar/turbulent über einer
 - Ablöseblase
- b) Unterschiedliche Lage der Ablösung
 - Querkraft



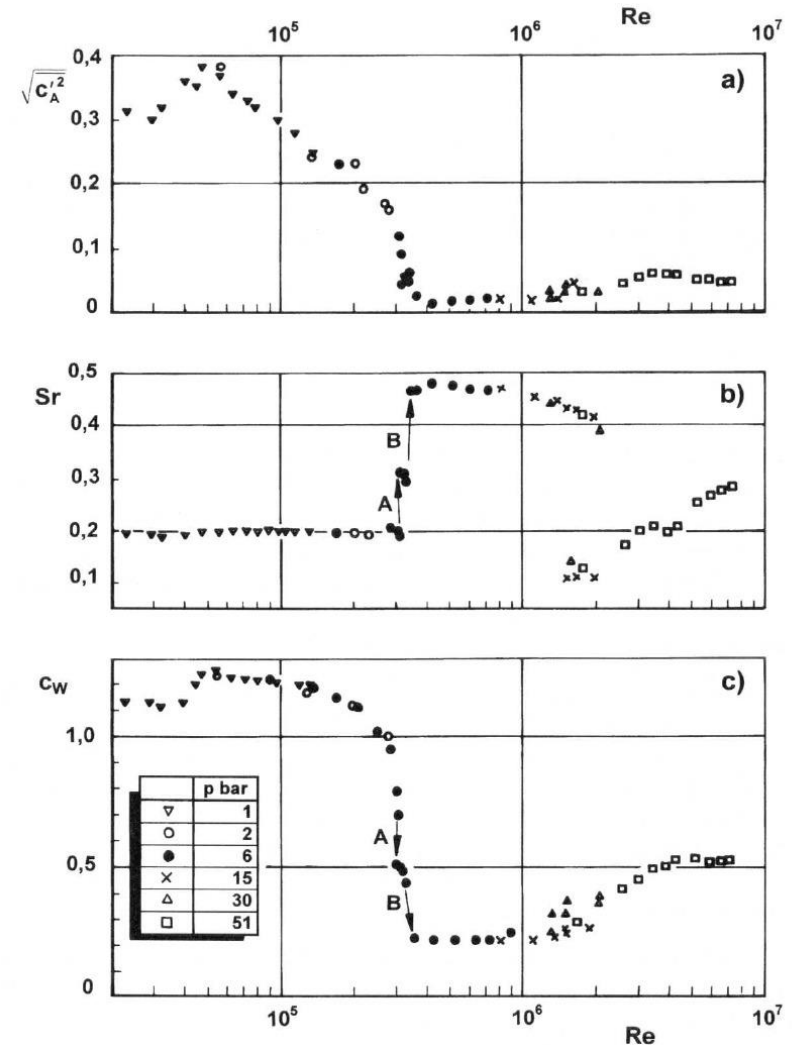
Kreiszyylinder

Messungen im Göttinger Hochdruckkanal (HDG, DLR, 1985)

- Sprung A: einseitiger Umschlag
- Sprung B: zweiseitiger Umschlag

Die Querkraft verhält sich ähnlich wie der Widerstand, nur ein Drittel so groß

Widerstand ist ebenfalls dynamisch, RMS-Wert ist um den Faktor 5 kleiner als bei der Querkraft

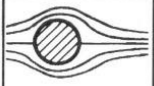









RMS = Root Mean Square

Kreiszyylinder

Die einzelnen Strömungsformen

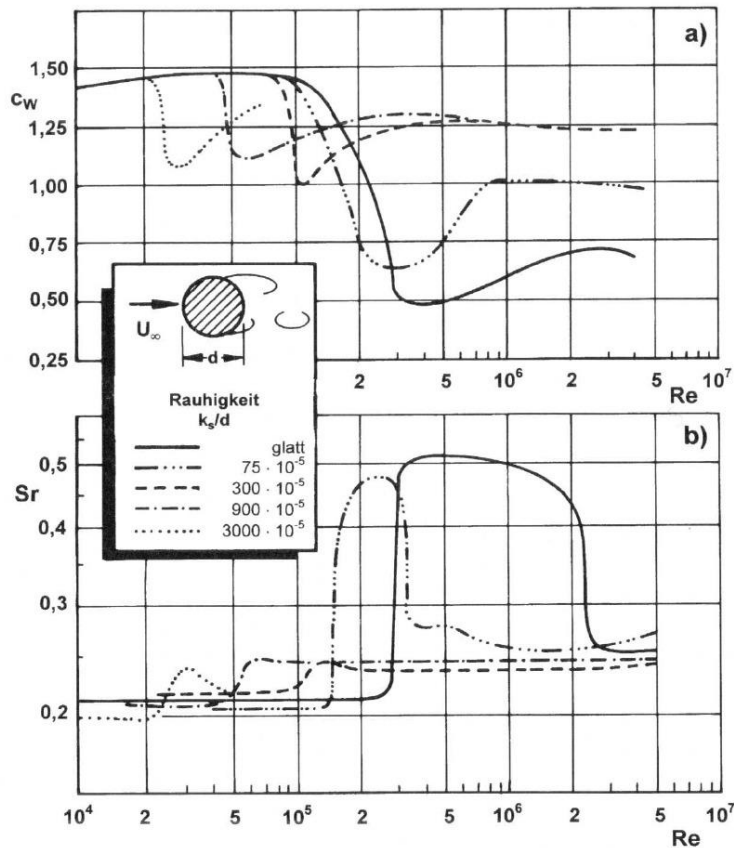
- Instabilitäten beginnen im Nachlauf und wandern stromauf
- Instabilitäten erreichen das Totwasser
- Scherschichten werden instabil
- Grenzschicht schlägt um

Bereich	Reynoldszahl	Bezeichnung	Strömung	c_w	Sr	φ_s
	$Re \rightarrow 0$	schleichende Bewegung		60 bei $Re = 1$	-	-
bis A	$Re < 50$	Wirbelpaar stationär		> 4	-	$115^\circ < \varphi_s < 130^\circ$
A - B	$50 < Re < 200$	laminar Kármánsche Wirbelstraße		≈ 1	$0,18 < Sr < 0,20$	$115^\circ < \varphi_s < 130^\circ$
B - C	$200 < Re < 260$	Umschlag lam/turb im Nachlauf		≈ 1	$\approx 0,2$	110°
C - D	$260 < Re < 1 \cdot 10^3$	Umschlag lam/turb im Totwasser		$\approx 1,2$	$\approx 0,2$	
D - E	$1 \cdot 10^3 < Re < 2 \cdot 10^5$	unterkritisch Umschlag lam/turb in Scherschicht		1,2	0,2	$80^\circ < \varphi_s < 90^\circ$
E - G	$2 \cdot 10^5 < Re_{krit} < 4 \cdot 10^5$	kritisch Umschlag über Blase	siehe Bild 3.9	$0,2 < c_w < 1,2$	$0,2 < Sr < 0,5$	$80^\circ < \varphi_s < 140^\circ$
G - H	$4 \cdot 10^5 < Re < 1 \cdot 10^6$	überkritisch Umschlag lam/turb direkt			0,5	140°
H - J	$Re > 10^6$	transkritisch			0,28	115°
F	$Re = 3 \cdot 10^5$	Blase einseitig				springt

M.V. Morkovin, Flow around circular cylinder- A kaleidoscope of challenging Fluid phenomena, A.G. Haswen, Symposium on fully separated flows, Amer. Soc. Of Mech. Eng., 1964

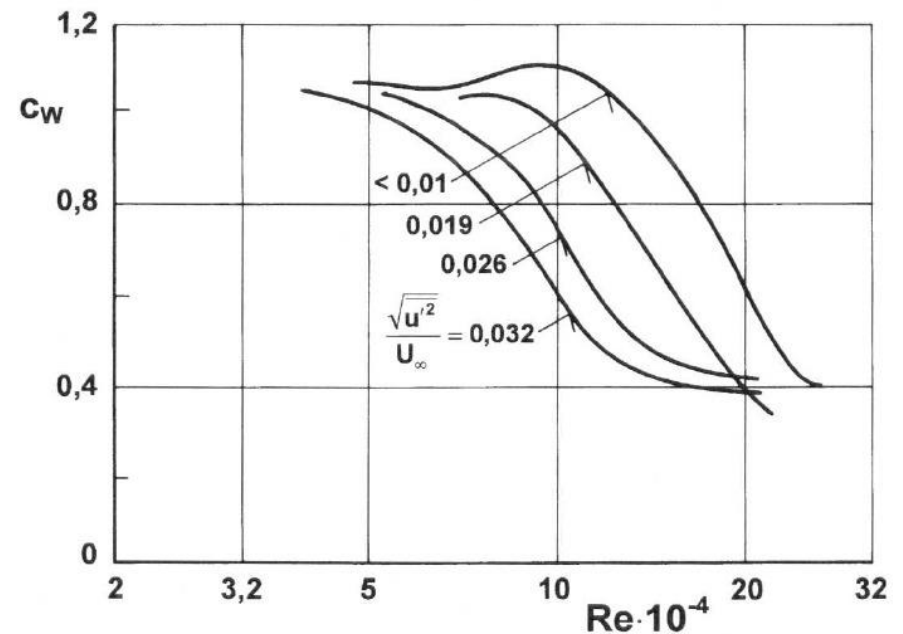
Kreiszyylinder

Einfluss der Rauigkeit auf den Widerstand und die Strouhalzahl



Widerstand in Abhängigkeit vom Turbulenzgrad

- kritische Reynoldszahl wird kleiner
- kritischer Bereich wird breiter
- früherer Grenzschichtumschlag
- spätere Ablösung



**Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit**



Fahrzeug- und Windkraftaerodynamik

Vehicle and windturbine aerodynamics

Dr.-Ing. A. Henze, Prof. Dr.-sc. D. Krug

Institute of Aerodynamics, RWTH Aachen University

Automobile

Inhalt

- Bauformen von Automobilen/Zielvariablen
- Fahrleistung, Verbrauch und Höchstgeschwindigkeit
- Widerstand und Mechanismen
- Anströmung und Stabilität
- Linearisiertes Fahrzeugmodell
- Seitenwindempfindlichkeit, Schräganströmung und Akustik
- Mehrphasenströmungen

Bauformen von Automobilen/Zielvariablen

Automobile

- stumpfe Körper
- komplexe Geometrie
 - geringer Bodenabstand
 - offene Hohlräume
 - rotierende Räder
 - durchströmte Kanäle
- vollständig dreidimensional
 - Umströmung des Fahrzeugs
 - Durchströmung der Karosserie
 - Strömung innerhalb eines Aggregates
 - gekoppelte externe und interne Strömung
 - Durchströmung des Motors und Rückwirkung auf die Umströmung
- turbulente Grenzschichten

Zielvariablen

		Fahrzeugart										
		Limousine	Cabriolet	Kleinbus	Lieferwagen	Stadtlinienbus	Überlandlinienbus	Reisebus	mitlerer Lkw	schwerer Lkw	Rennwagen (Formel I)	Motorrad
Zielgröße	Widerstand	xx		x	x		x	xx	x	xx	xx	x
	Auftrieb und Nickmoment	x									xxx	
	Giermoment und Seitenkraft	x		xx	xx						x	
	Heizung, Lüftung, Klima	xx	x	x		x	x	xx	x	xx	x	
	Aggregattekühlung	xx								xx	x	
	Windgeräusche	xx	xx	x			x	x				xx
	Verschmutzung	x	x		x	x	x	xx				

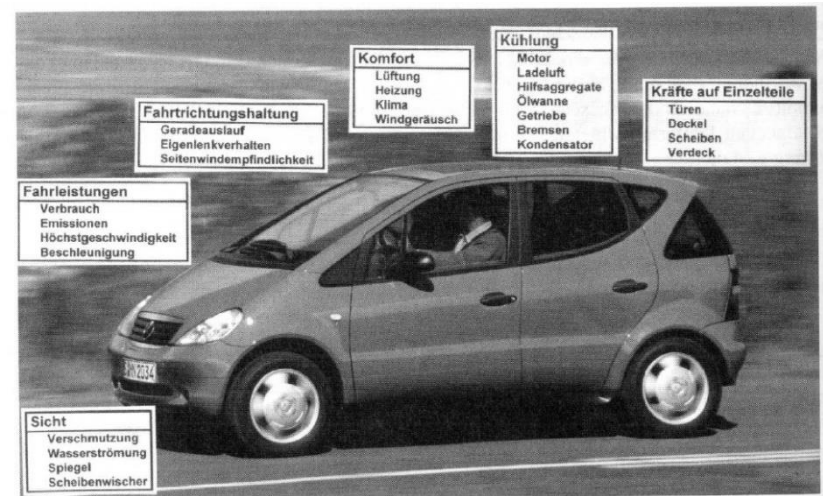
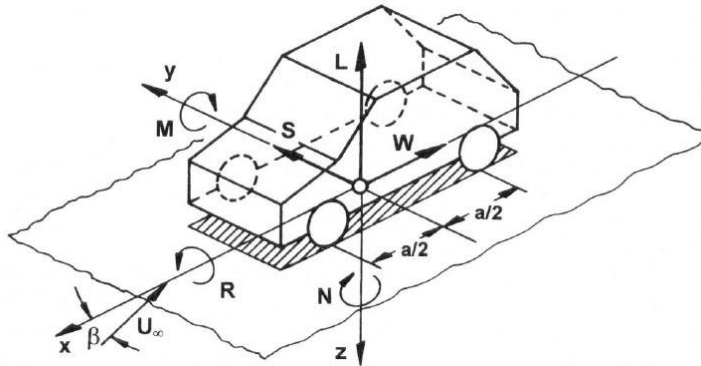


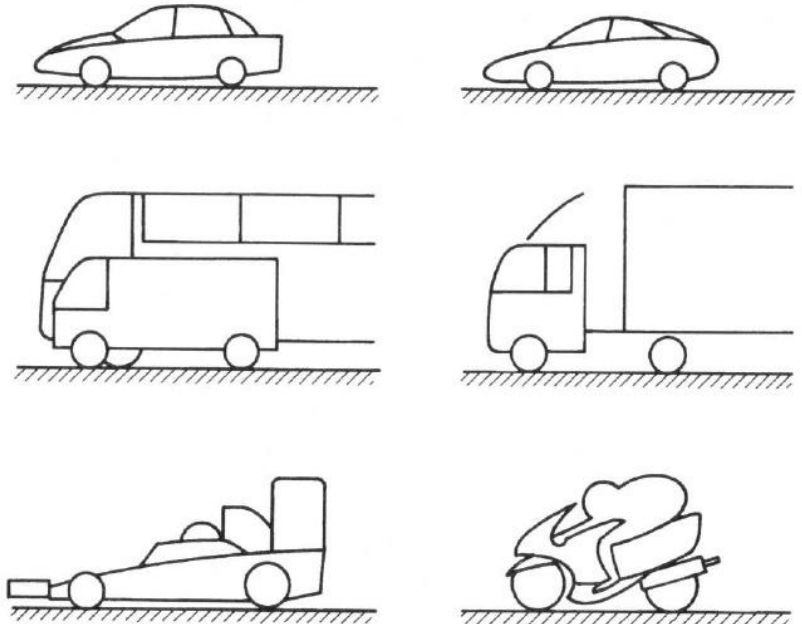
Photo: Daimler-Chrysler AG

Automobile



Koordinatensysteme und Definition der Luftkräfte und -momente

- Üblicherweise → Widerstandsreduktion
 - Kraftstoffverbrauch
 - Höchstgeschwindigkeit
 - Schadstoffemission
- Seitenkraft, Gier-, Nick-, Rollmoment, Auftrieb
 - Querstabilität, Geradeauslauf
 - Kurvenverhalten
 - Empfindlichkeit gegen Seitenwind



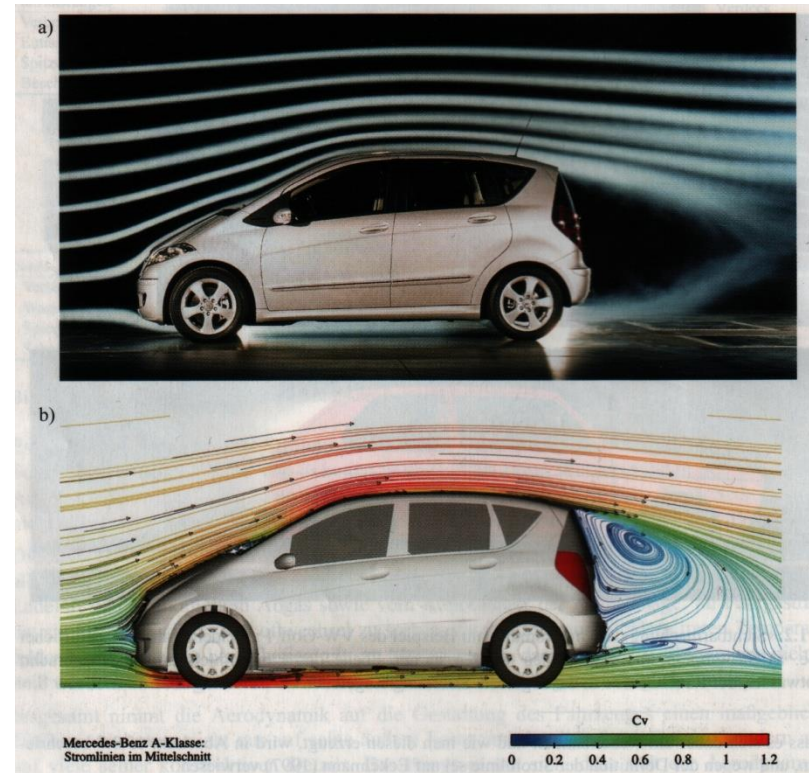
Vielzahl von Formen in der Fahrzeugaerodynamik

Automobile



Sichtbarmachung des Strömungsfeldes am VW-Golf 1

- Stromlinien (Rauchfäden)
- Rauch im Totwasser

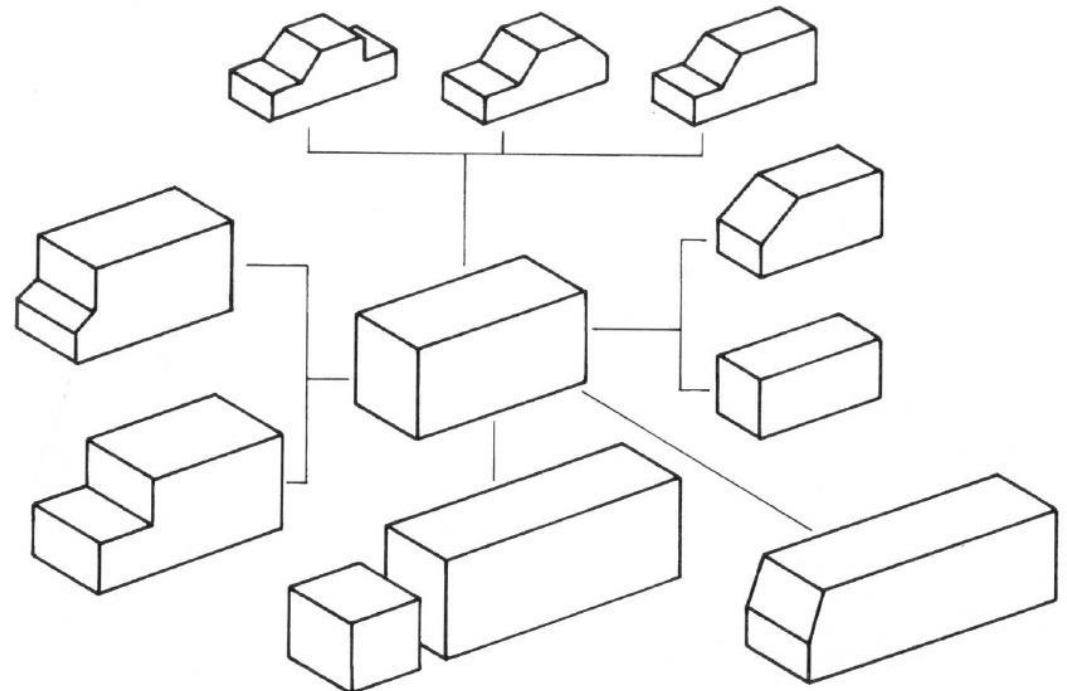


Strömung um Mercedes-Benz A-Modell

- Sichtbarmachung durch Rauch
- Numerische Simulation

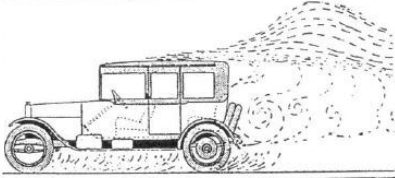

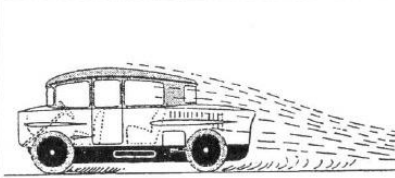
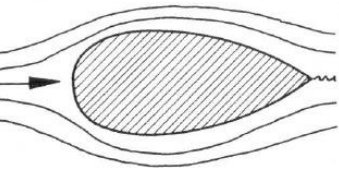
Umströmung einzelner Teile

- Geräusche an scharfen Kanten
 - Offene Fenster
- leichteres Dach, Türen, ...
→ flattern
- Kühlluft → Lage der Öffnungen
- Belüftung des Innenraumes
 - Lärm im Innenraum
 - Lärm in der Umgebung
 - Regentropfen, Schmutz
- Rennfahrzeuge
 - kleiner Widerstand
 - Abtrieb
 - Optimum für jede Strecke

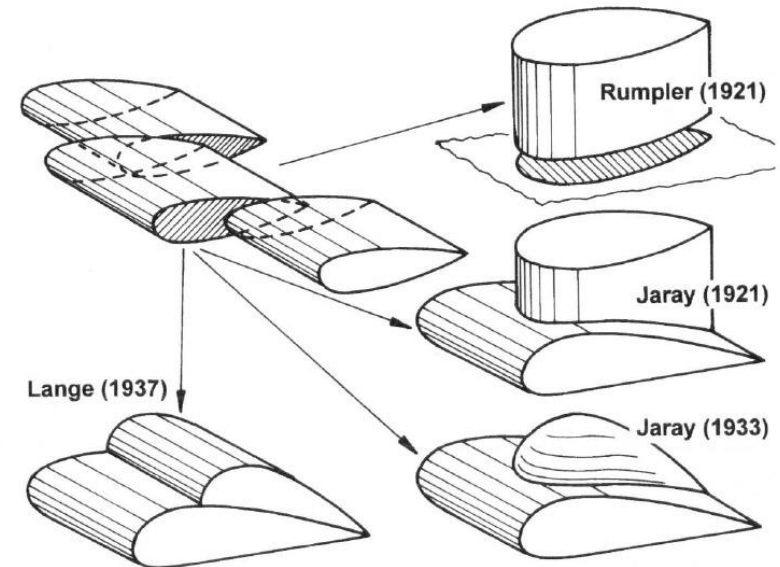


Einfache Geometrien bestehen aus Quadern

Aerodynamische Fahrzeugauslegung

	ausgeführtes Fahrzeug	aerodynamisches Pendant
Design		
Aerodynamik		

Zielkonflikt:
Design gg. Aerodynamik

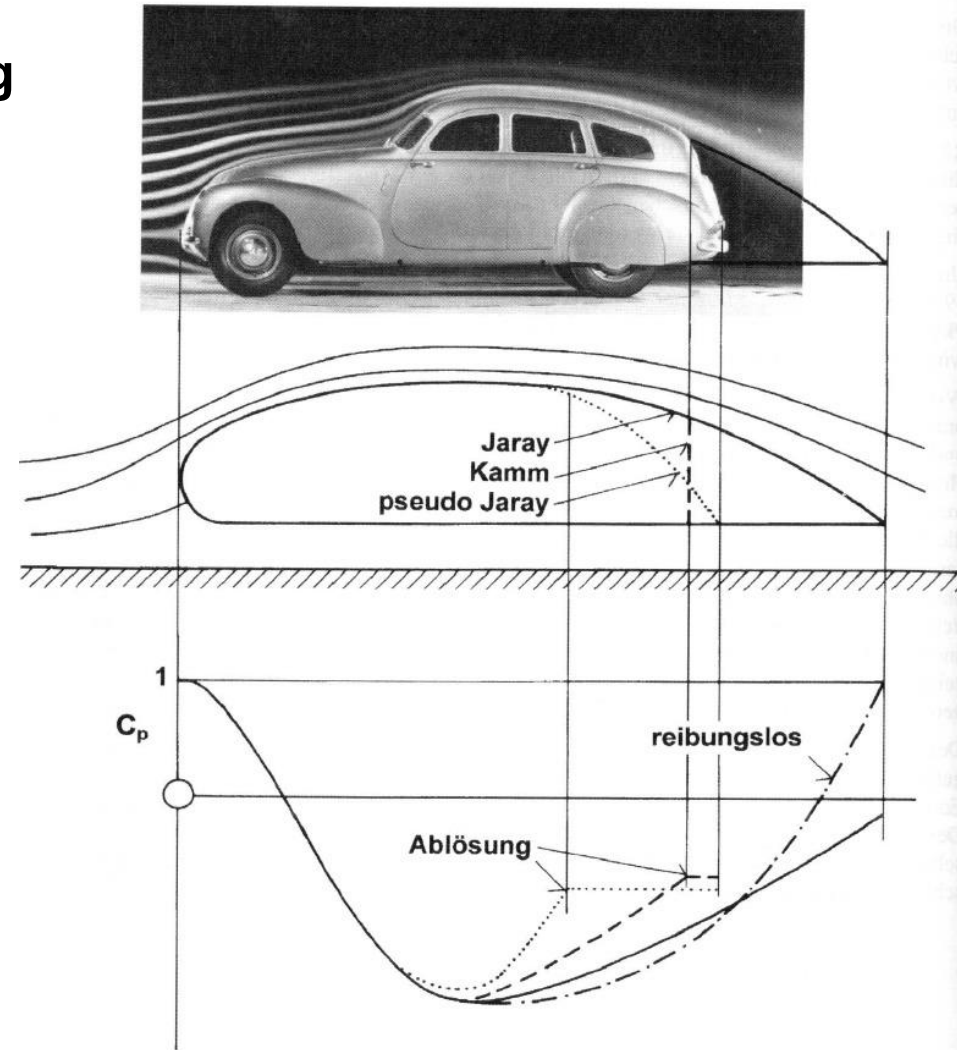


- Tropfenwagen, Rumpler 1921
- 2 Profile, Jaray 1921
- Profil + Rotationskörper, Jaray 1933
- 2 horizontale Profile, Lange 1937

Aerodynamische Fahrzeugauslegung

Kammheck, 1938-1939

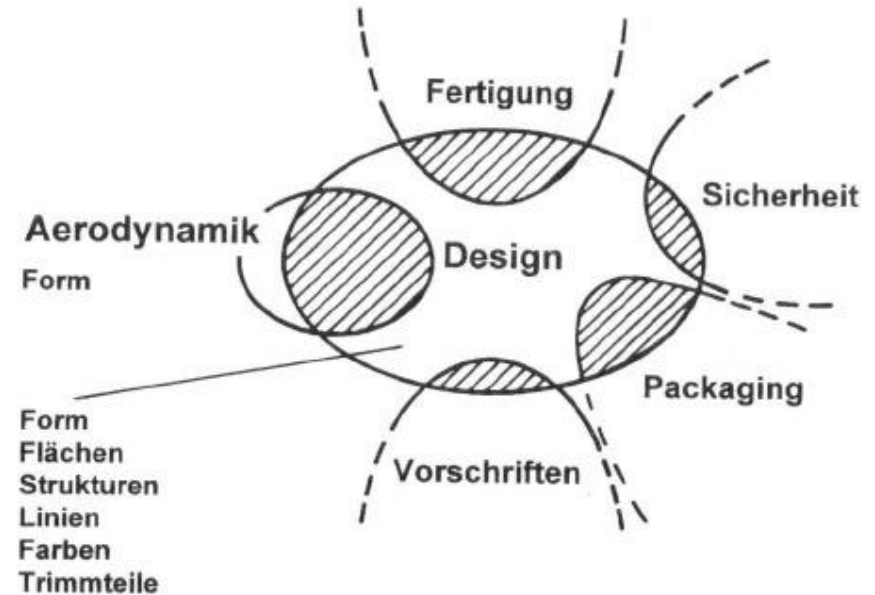
- leichtes Einziehen
- Abschneiden der Kontur an der Ablösung
- Druckrückgewinn
- günstiger Luftwiderstand



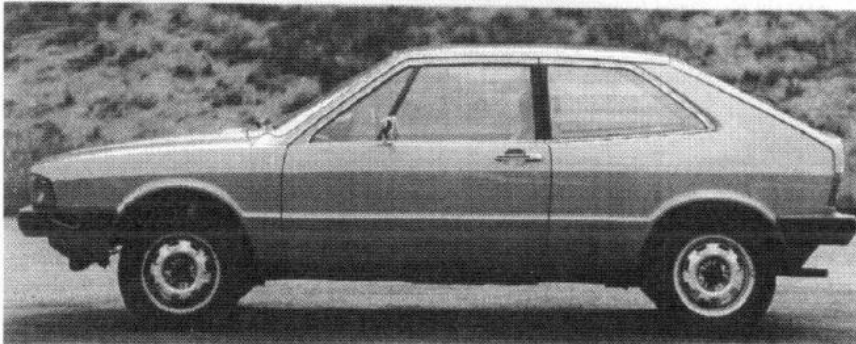
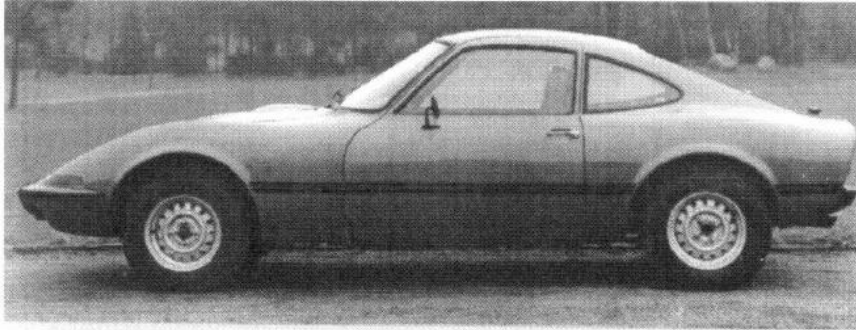
Aerodynamische Fahrzeugauslegung

2 Möglichkeiten

1. Vorgegebener Design-Entwurf, aerodynamische Verbesserung → Formen werden runder, fließender, Widerstand wird kleiner
2. Grundkörper mit niedrigem Widerstand, Veränderungen des Designers → Konturen werden stärker, Widerstand nimmt zu



Aerodynamische Fahrzeugauslegung



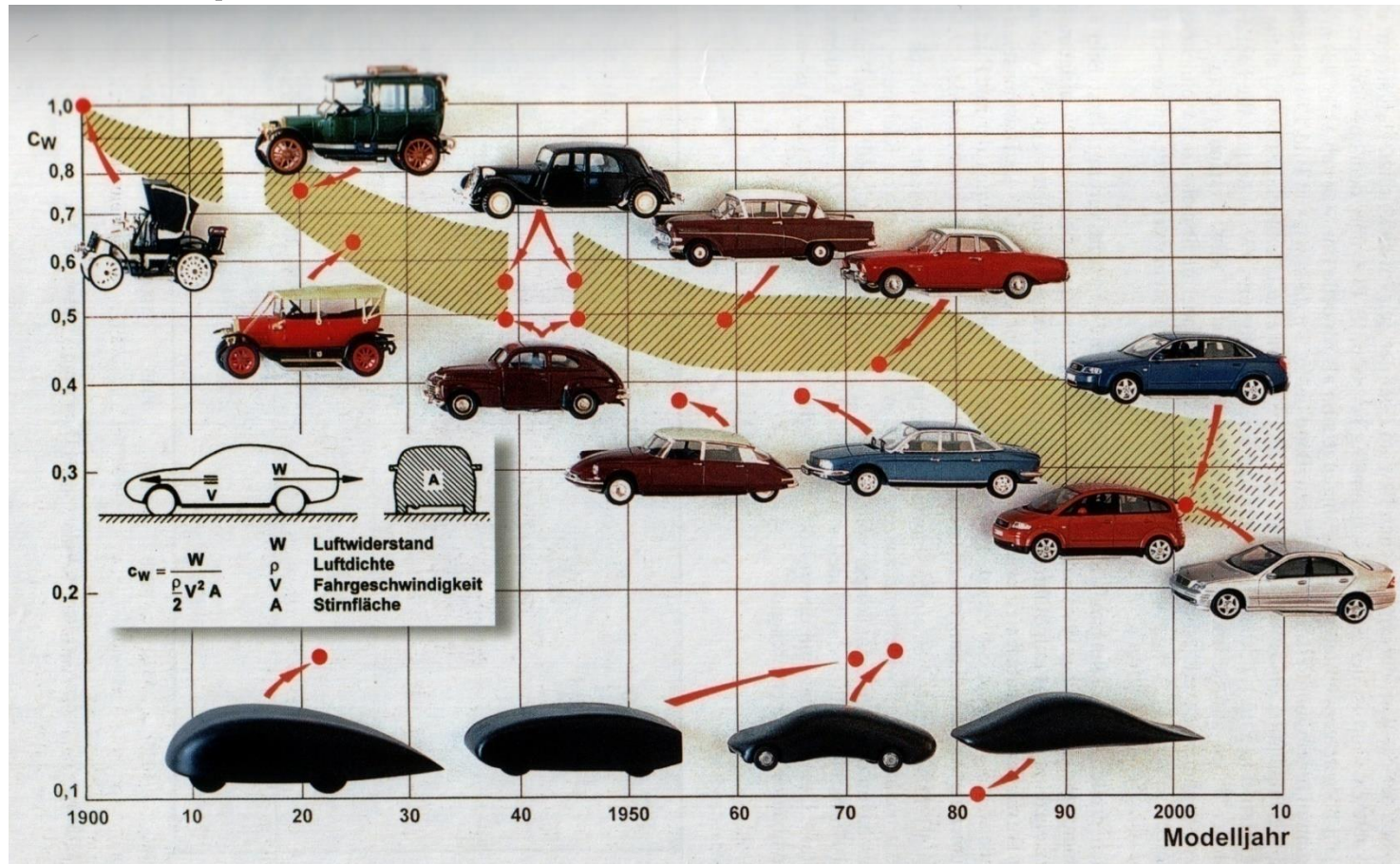
2 Möglichkeiten

1. Vorgegebener Design-Entwurf, aerodynamische Verbesserung → Formen werden runder, fließender, Widerstand wird kleiner
2. Grundkörper mit niedrigem Widerstand, Veränderungen des Designers → Konturen werden stärker, Widerstand nimmt zu

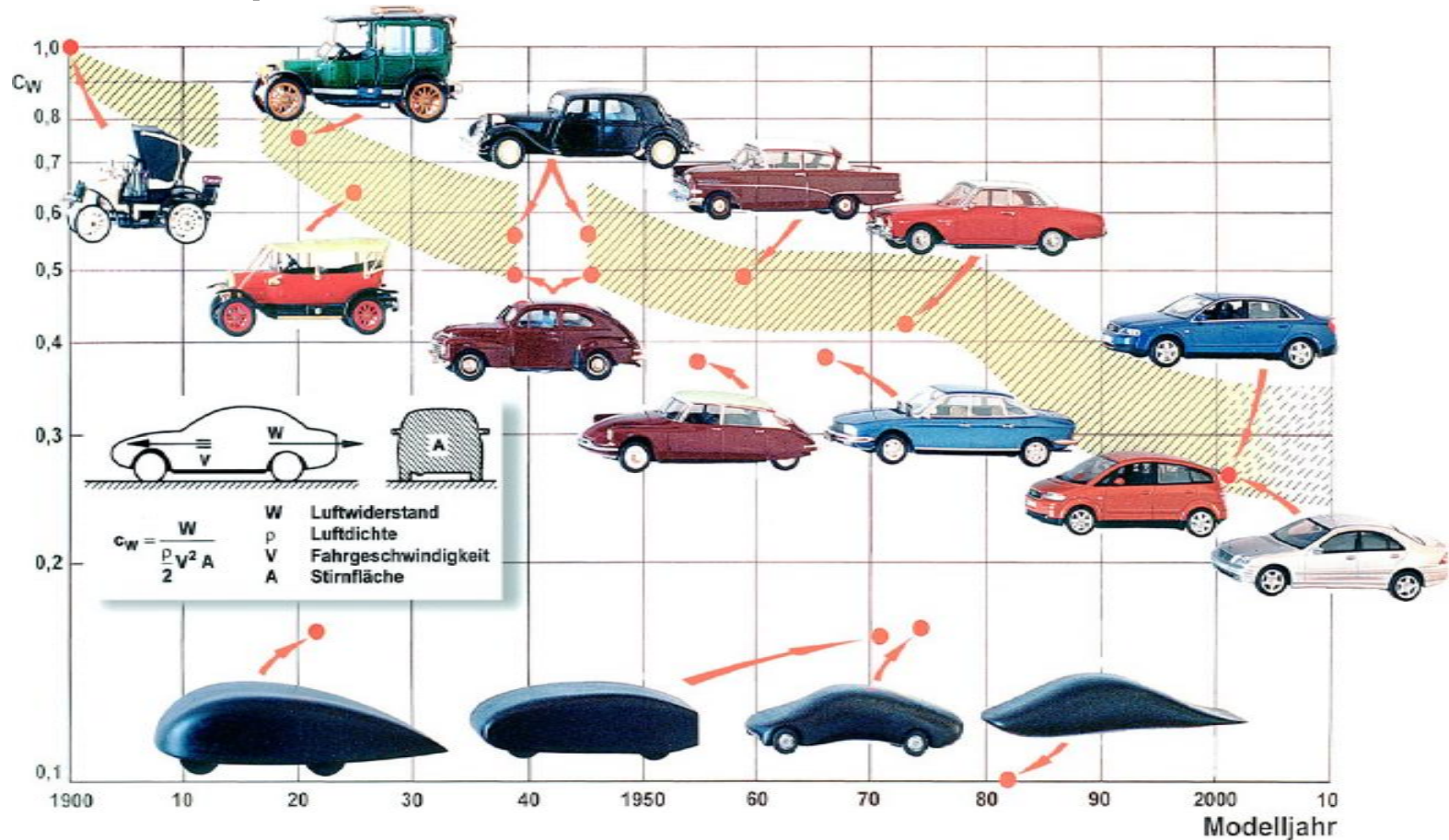
Stromlinienförmig Opel GT, 1969, $c_w = 0.41$, $A = 1.51 \text{ m}^2$

Detail optimierter VW Scirocco, 1974, $c_w = 0.41$, $A = 1.73 \text{ m}^2$

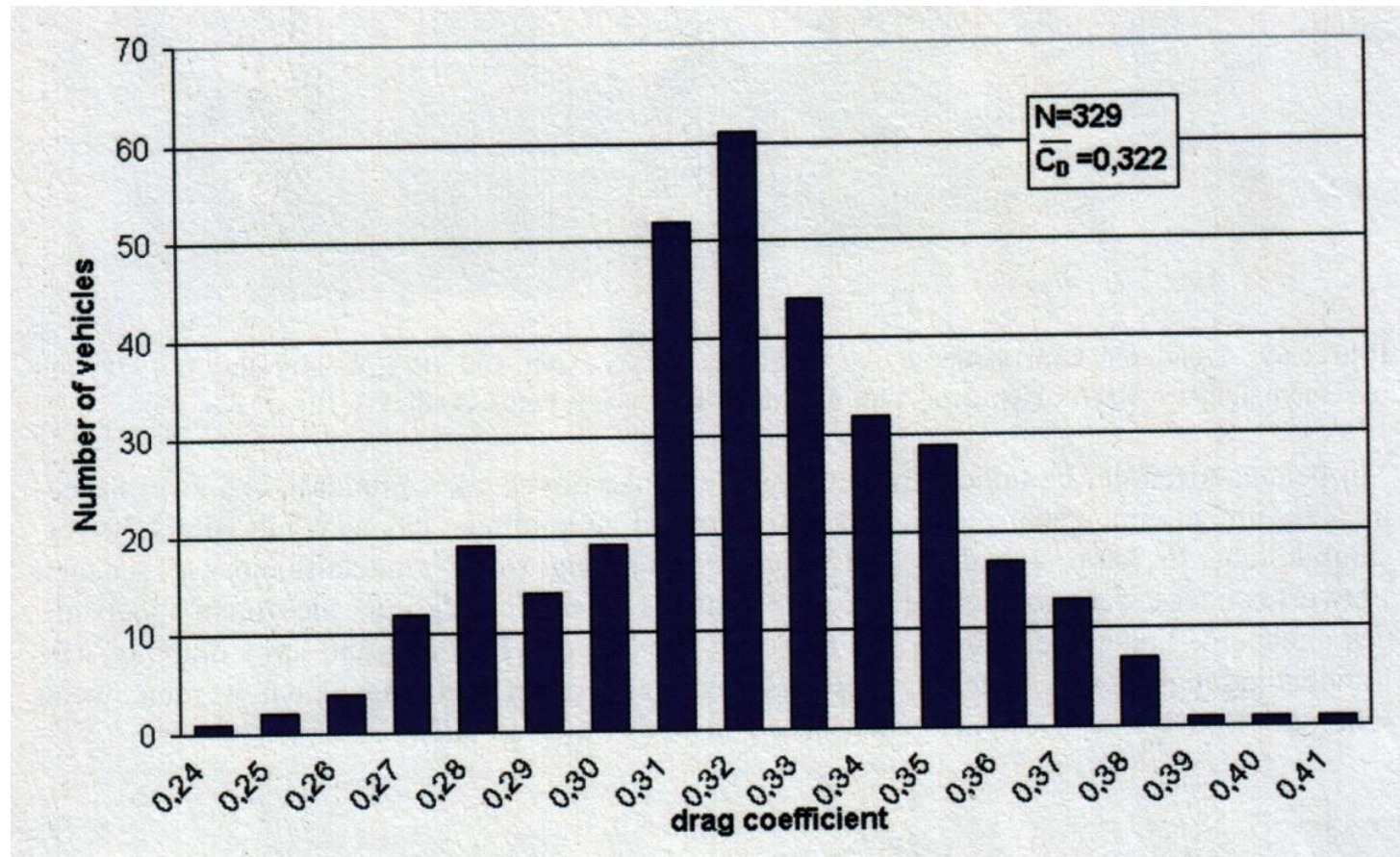
Entwicklung des c_w – Wertes von PKW im Vergleich zu extrem optimierten Körpern



Entwicklung des c_w – Wertes von PKW im Vergleich zu extrem optimierten Körpern



C_w – Histogramm der europäischen PKW, 2003, EADE, European Aero Data Exchange



Fahrleistung, Kraftstoffverbrauch und Höchstgeschwindigkeit

Kräfte, Leistungen und Widerstände

Traktionskraft zwischen angetriebenen Rädern und Straße

$$F_T = W + R + m \frac{dV}{dt} + mg \sin \alpha$$

Leistung

$$P_T = F_T \cdot V$$

Ebene Fahrbahn ohne Beschleunigung

$$P_T = (W + R)V$$

- W: Luftwiderstand
- R: Rollwiderstand
- m: Fahrzeugmasse
- V: Geschwindigkeit
- t: Zeit
- g: Erdbeschleunigung
- α : Steigung
- c_W : Widerstandsbeiwert
- ρ : Dichte
- b: Breite
- h: Höhe

Luftwiderstand

$$W = c_W A \frac{1}{2} \rho V^2$$

Stirnfläche

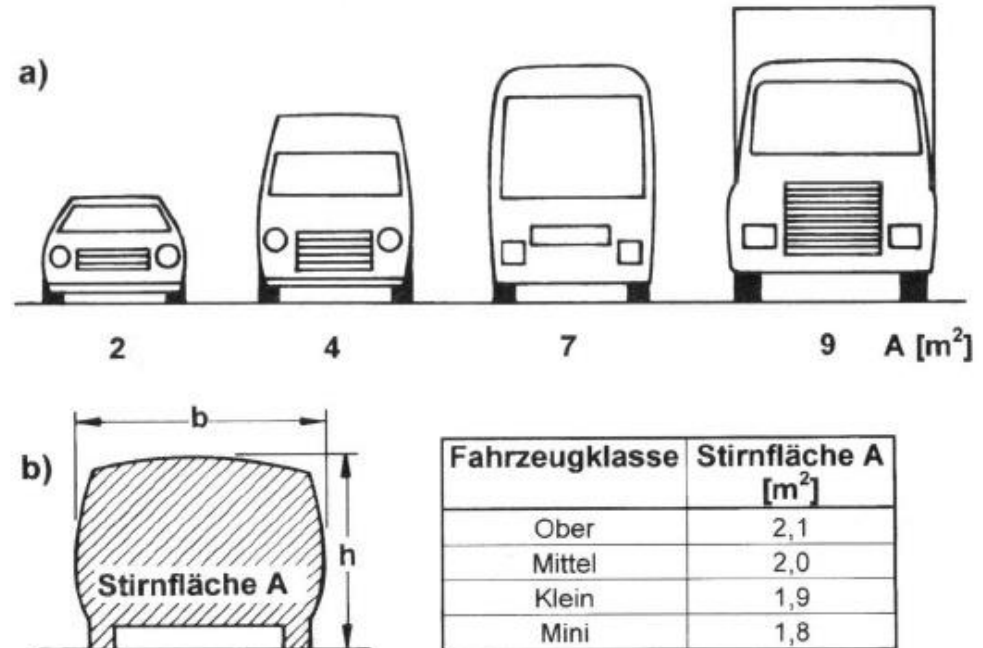
$$A = 0.81b \cdot h$$

Widerstandsbeiwerte und Stirnflächen für verschiedene Fahrzeugarten

Stirnfläche A

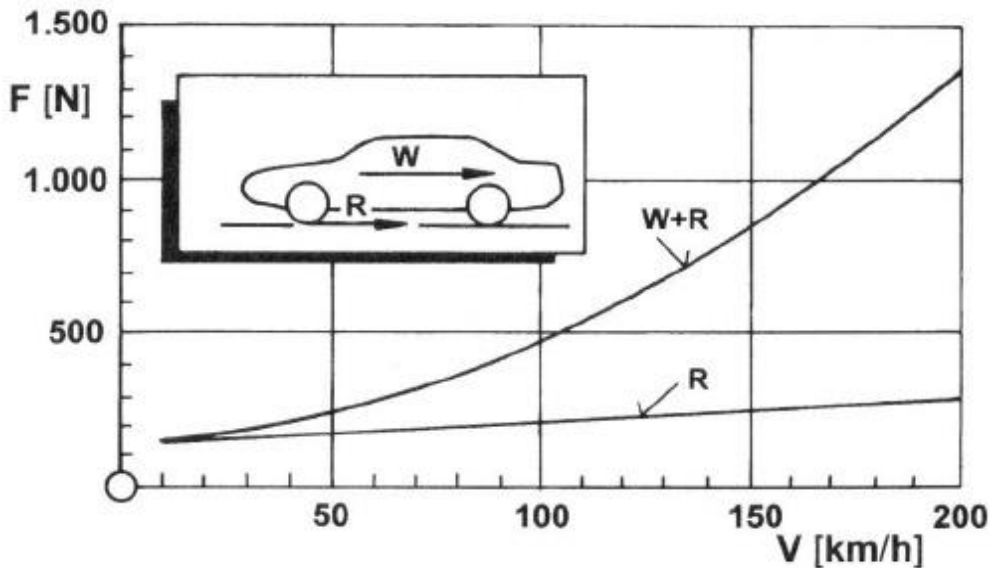
- a) bei verschiedenen Fahrzeugarten
- b) typische Werte für PKW

Fahrzeugtyp	c_w -Wert-Bereich	Stirnfläche [m ²]
Lkw mit Anhänger	0,87 - 0,55	9
Sattelzug	0,75 - 0,48	9
Reisebus	0,65 - 0,42	7 - 10
Schnelltransporter	0,50 - 0,33	4 - 5
Limousine	0,27 - 0,45	2,0 - 2,2
3-Liter Pkw	0,25 - 0,27	2,0 - 2,2

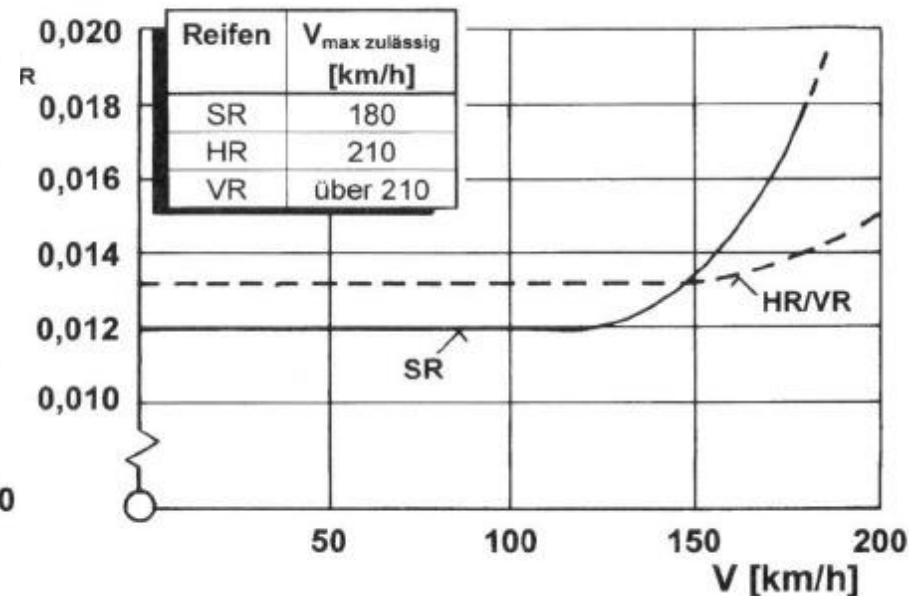


Rollwiderstand und Luftwiderstand

$$R = f_R G = f_R m g$$



Luft- und Rollwiderstand beim BMW 520 i
 $C_w = 0.27$, $A = 2.18 \text{ m}^2$, $G = 1570 \text{ kg}$



Rollwiderstand von PKW-Reifen

- Der Luftwiderstand ist dominant: Bei 200 km/h: Luftwiderstand beträgt 80 % des Gesamtwiderstandes

Verringerung des Kraftstoffverbrauches

Wird der Widerstandsbeiwert von c_{w0} um Δc_w reduziert, ergeben sich 2 Möglichkeiten:

1. Steigerung der Höchstgeschwindigkeit V_{\max}
2. Verringerung des Kraftstoffverbrauches b

(2) Sollte die moderne Variante sein, aber häufig wird (1) gemacht.

Wirksamkeit der Widerstandsreduzierung bezüglich einer Verbrauchssenkung

$$\frac{\Delta b}{b_0} = \kappa \frac{\Delta c_w}{c_{w0}} \quad \kappa: \text{Wirksamkeitsfaktor}$$

Der Wirksamkeitsfaktor hängt ab von:

- Art des Fahrzeuges
- Verbrauchskennfeld
- Getriebeabstimmung
- Einstatzprofil

Verringerung des Kraftstoffverbrauches

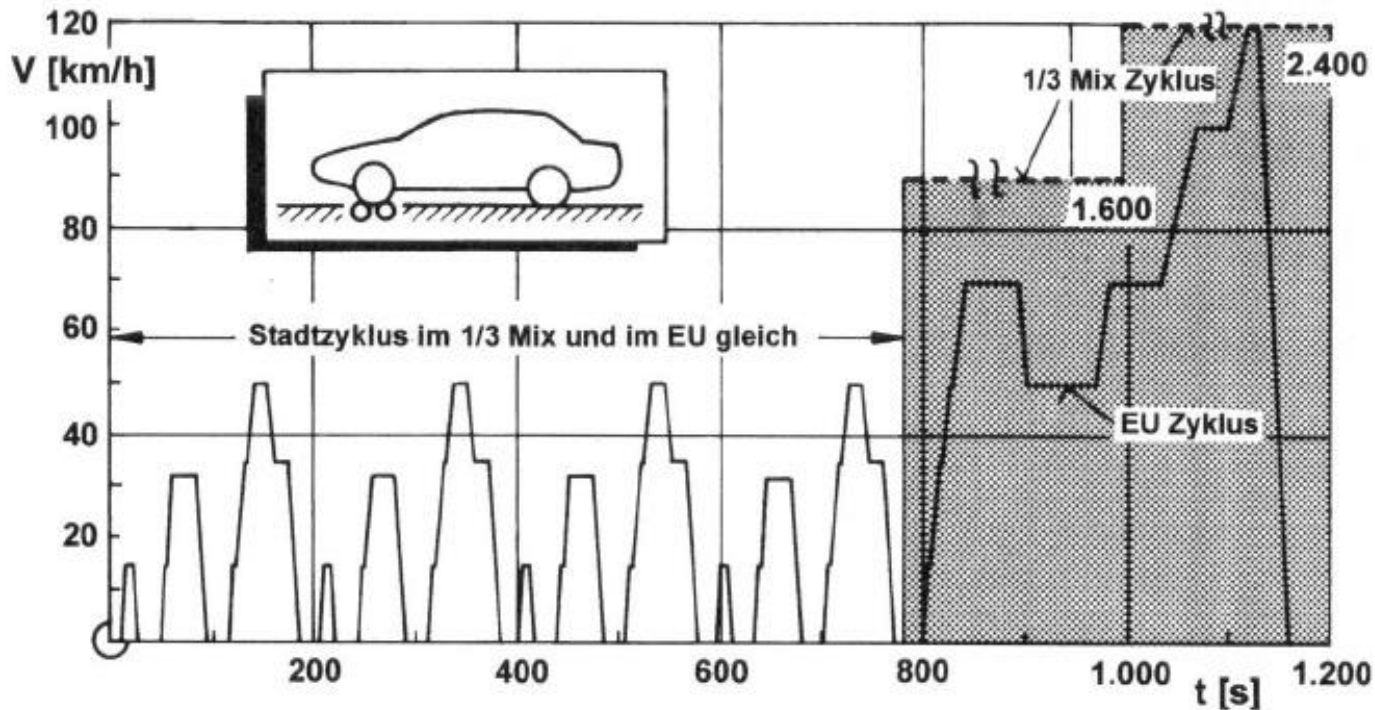
Vergleich zwischen dem alten 1/3 mix und dem neuen amtlichen EU-Zyklus (1996)

- im Stadtverkehr sind beide gleich
- Unterschiede bei höheren Geschwindigkeiten
 - 800 s konstant 90 km/h und 120 km/h
 - Kurvenzug mit Beschleunigung und Verzögerung
 - Hochgeschwindigkeitsanteil ist nur 50% des Stadtzyklus
- Mittlere Geschwindigkeit beim 1/3 mix ist 76.2 km/h
- Mittlere Geschwindigkeit beim EU-Zyklus ist 32.5 km/h

Fahrzyklus		1/3 Mix	EU
Durchschnittsgeschwindigkeit km/h		76,2	32,5
Widerstandsanteil	Luft	0,44	0,24
	Roll	0,44	0,45
	Beschleunigung	0,12	0,31

Verringerung des Kraftstoffverbrauches

- Ergebnis: Reduktion um 10 % c w
- 3 % Reduktion des Verbrauchs: $\kappa = 0.3$ beim 1/3 Mix
- 2 % Reduktion des Verbrauchs: $\kappa = 0.2$ beim neuen EU-Mix



Verringerung des Kraftstoffverbrauches

- Realistischere Ergebnisse bei Messungen im kundennahen Fahrbetrieb
- Der schnell gefahrene Anteil der Fahrt nimmt bei höheren Wagenklassen zu
→ Der Wirksamkeitsfaktor nimmt zu.

Art des Fahrzeuges	Faktor κ in Abhängigkeit vom Fahrzyklus				
	Drittelmix	EU-Zyklus	Ebene	Landstraße	Schwerer Kurs
Pkw	0,3 – 0,4	0,2			
Schnelltransporter			0,48	0,30	0,20
Reisebus			0,44	0,30	0,03
38 t-Lkw			0,34	0,07	0,03

- Richtwerte für κ bei verschiedenen Fahrzeugarten
- „schwerer Kurs“: bergige Strecke bei Personenwagen, Stadtverkehr für Busse
- Annahme: weniger Widerstand, gleiche Höchstgeschwindigkeit
→ weniger Motorleistung
- (wird nicht von allen Fahrern akzeptiert, wegen Beschleunigungsfähigkeit)

Steigerung der Höchstgeschwindigkeit

$$P_T = F_T \cdot V$$

$$V_{\max} = \frac{P_{T, V_{\max}}}{F_{T, v_{\max}}}$$

$$V_{\max} = \frac{\eta_T(P_{b,T}) V_{\max}}{F_{T, V_{\max}}}$$

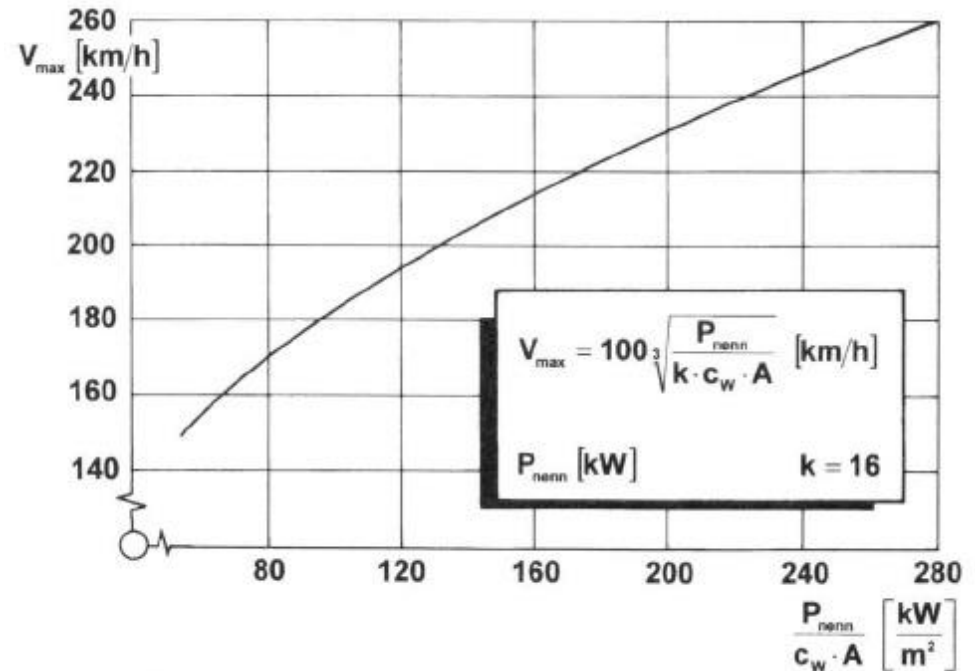
$$V_{\max} = 100 \sqrt[3]{\frac{P_{\text{nom}}}{k \cdot c_W \cdot A}}$$

Einfache Faustformel

Wirkungsgrad des Triebstranges zwischen Getriebeeingang und Radaufstandsfläche

$$\eta_T = \frac{P_T}{P_{b,T}}$$

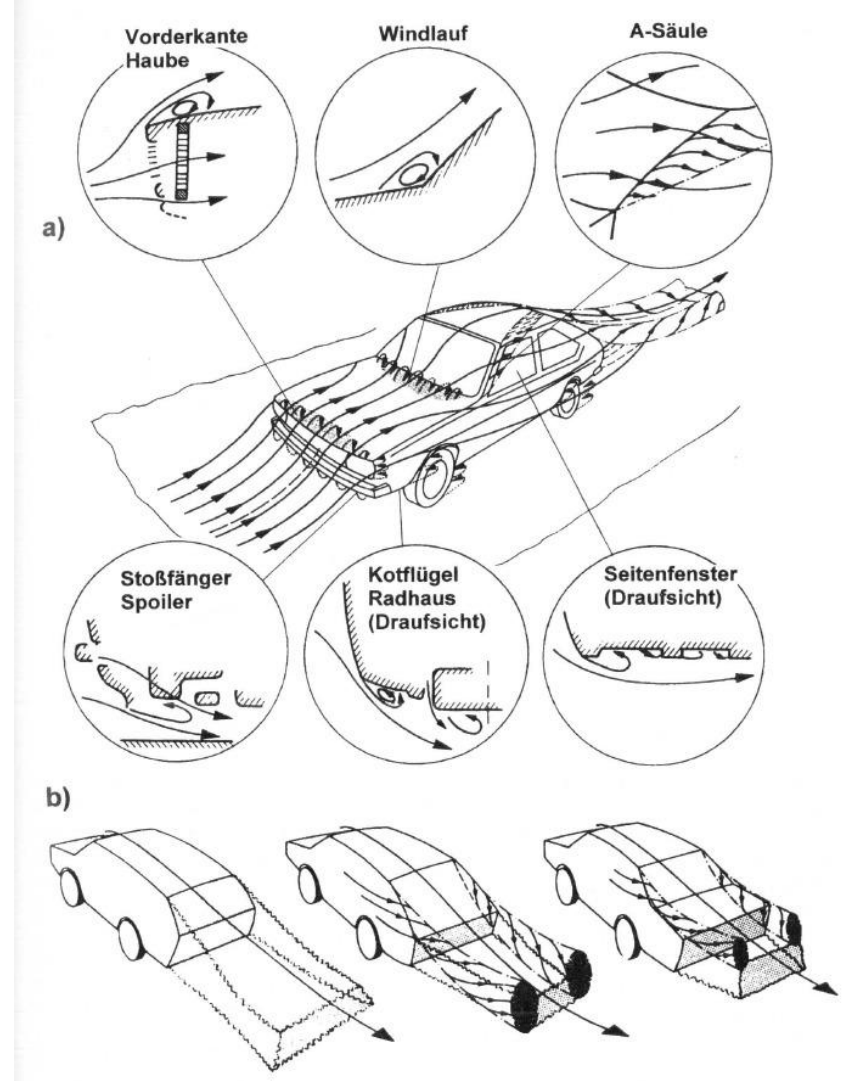
P_B enthält nicht die Leistung für Hilfsantriebe



Widerstand und Mechanismen

Umströmung

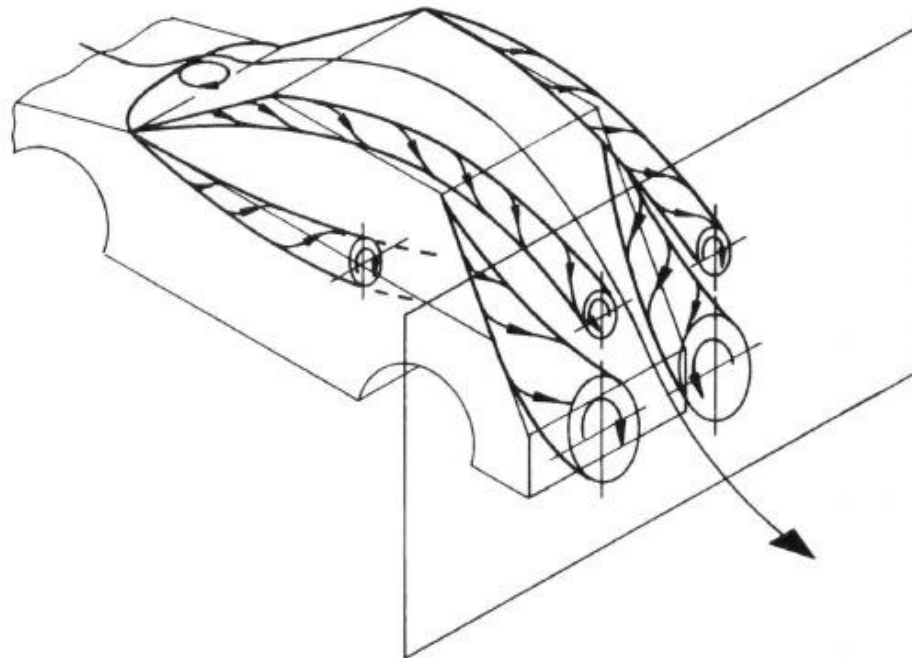
- a) Ablösung an Kanten, die senkrecht zur Anströmung bzw. geneigt sind
- b) Verschiedene Ablösungen am Heck
 - Vollheck: großes Totwasser, Kanten stehen senkrecht zur Strömungsrichtung
 - Fließheck: schräge Kanten der C-Säule
 - Stufenheck: Kombination von beiden



Umströmung

3 Längswirbelsystem am Fließheck

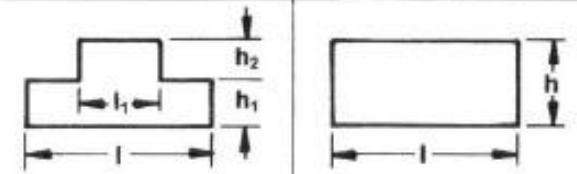
- starkes Wirbelpaar von der C-Säule, einwärtsrotierend
- entgegengesetzt rotierende Wirbel von der A-Säule
- drittes Wirbelpaar vom Windlauf, schwächer als die beiden anderen



Umströmung

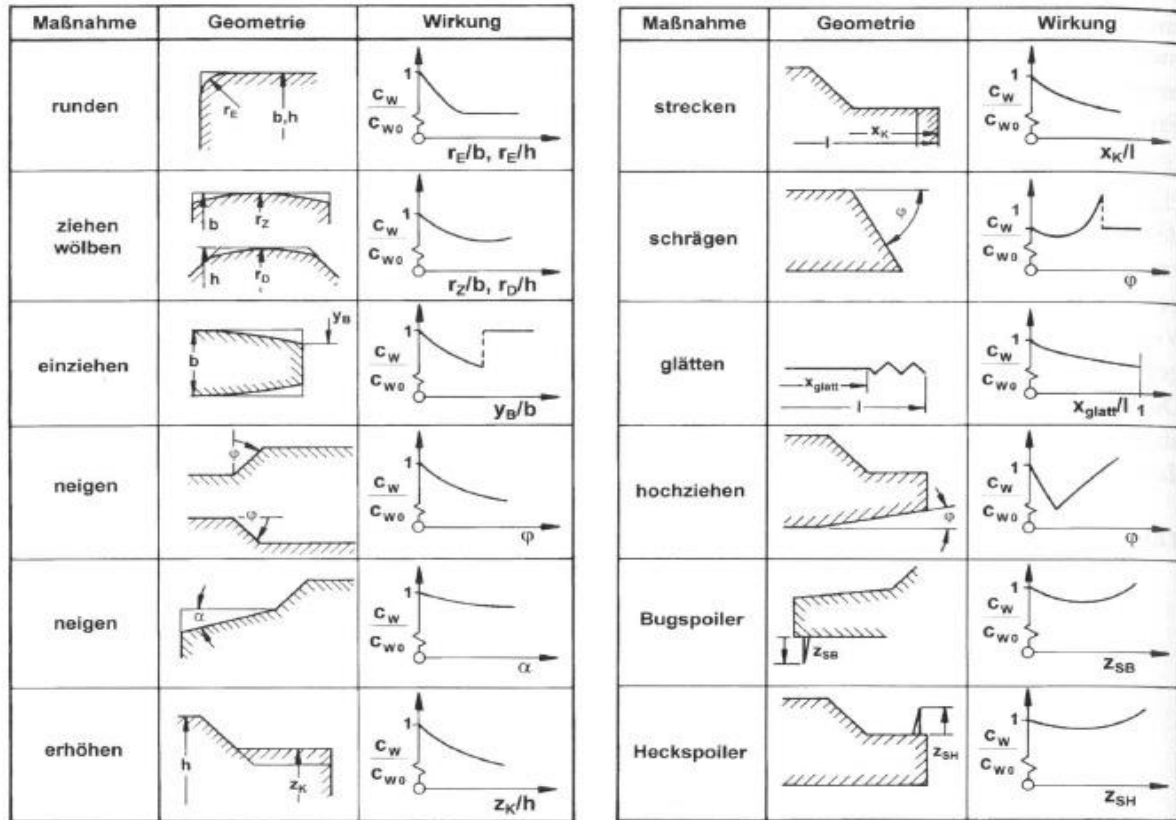
Annahme:

- A_{ober} = Fläche einer ebene Platte der Länge l
- Voll turbulente Grenzschicht
- U_{∞} um 10 % höher beim PKW (lokale Übergeschwindigkeiten)
- C_f aus Moody-Diagramm
- C_w umgerechnet auf die Stirnfläche
- Überlandbus: $c_w = 0.5$: Reibungsanteil ist 8%
- Personenwagen: $c_w = 0.3$: Reibungsanteil 13%

	Fahrzeug	
	Pkw	Bus
$C_{w_f} = \frac{W_f}{\frac{\rho}{2} V^2 A_{\text{ober}}}$ 		
Maße [mm]	$l = 4.700$ $l_1 = 2.300$ $h_1 = 725$ $h_2 = 525$ $b = 1.780$	$l = 12.000$ $h = 4.000$ $b = 2.500$
Oberfläche A_{ober}	26,0 m ²	156 m ²
Stirnfläche A	2,1 m ²	10 m ²
V	100 km/h	100 km/h
U_{∞}	1,1 $V = 30,6$ m/s	$V = 27,8$ m/s
Re_l	$1,2 \cdot 10^7$	$2,2 \cdot 10^7$
C_f	0,003	0,0028
C_{w_f}	0,035	0,04

Abschätzung des Reibungsbeiwertes an einem PKW und einem Reisebus

Umströmung

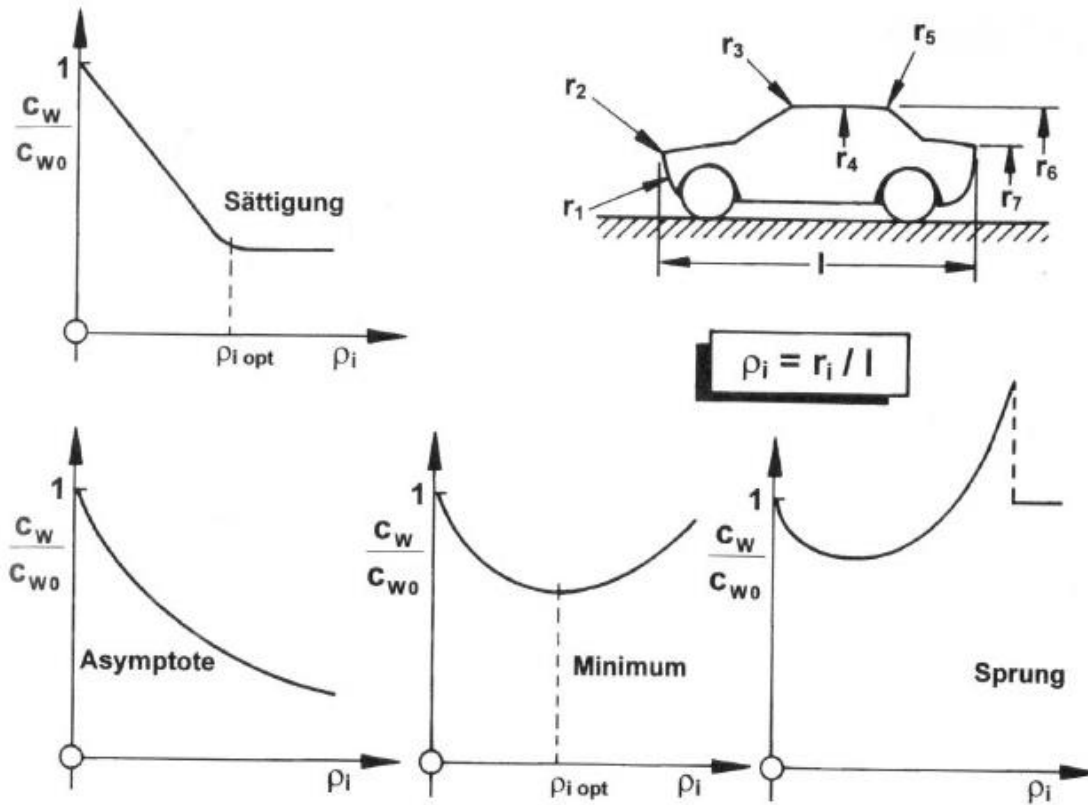


Wesentliche Zusammenhänge zwischen den Änderungen an einzelne Formdetails und dem Luftwiderstand

Umströmung

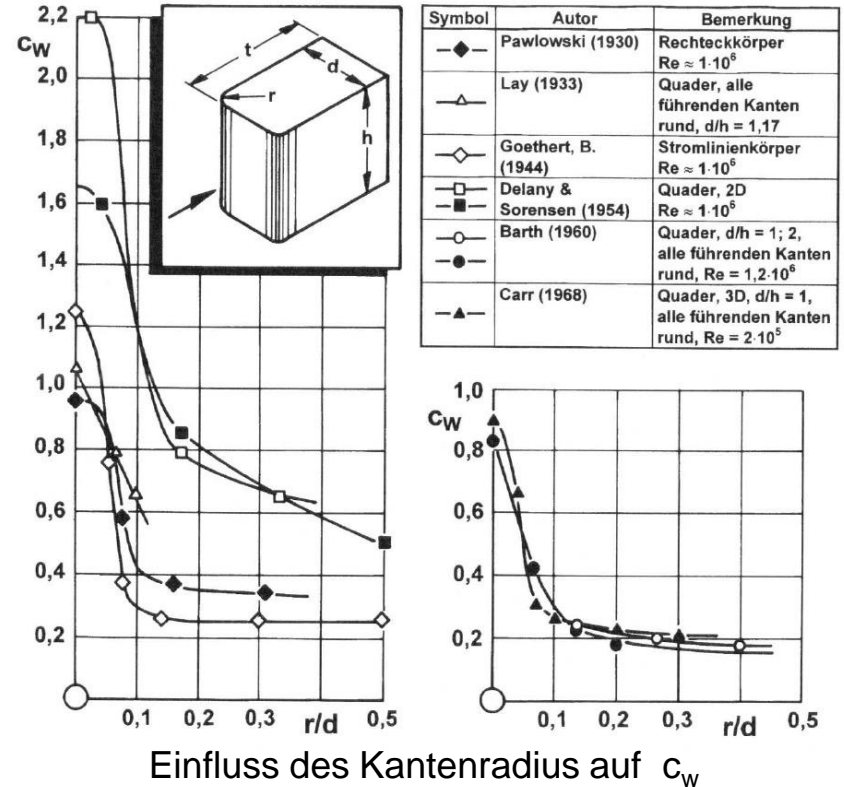
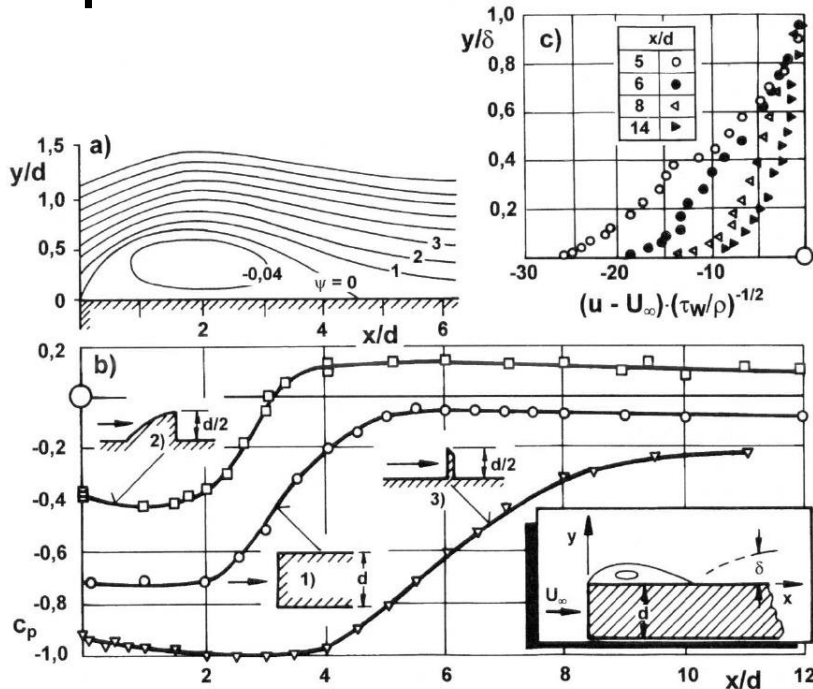
- leichtes Einziehen
- Abschneiden der Kontur an der

Umströmung



Typische Funktionen: Sättigung, Asymptote, Minimum, Sprung

Stumpfe Vorderkante

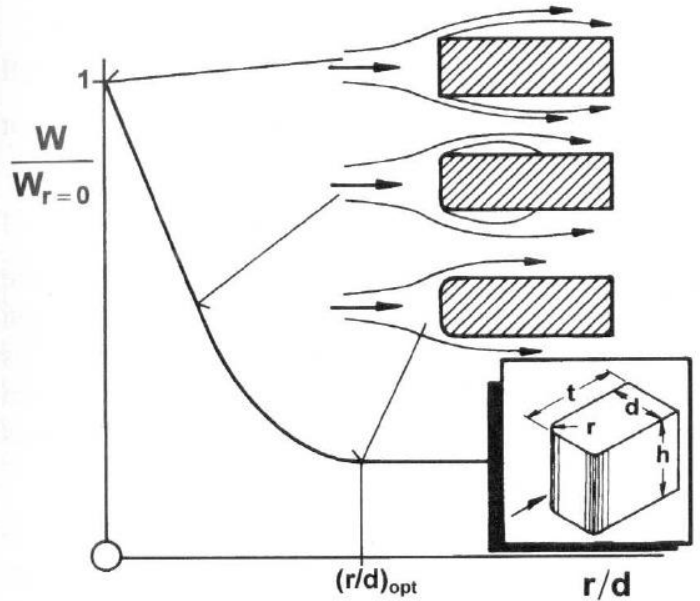


Strömung um die scharfe Vorderkante einer ebenen Platte

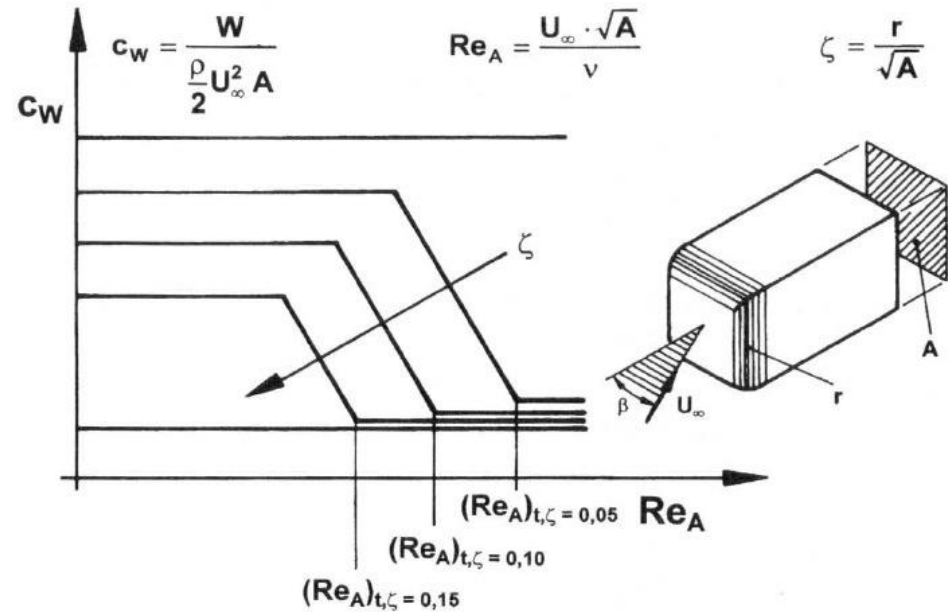
- a) Stromlinien
- b) Druckverteilung
- c) Geschwindigkeitsprofile nach Wiederanlegen

$$\frac{\sqrt{(u'^2)_{\max}}}{U_\infty} \approx 0,3, \quad \frac{\sqrt{(v'^2)_{\max}}}{U_\infty} \approx 0,2 - 0,25$$

Stumpfe Vorderkante

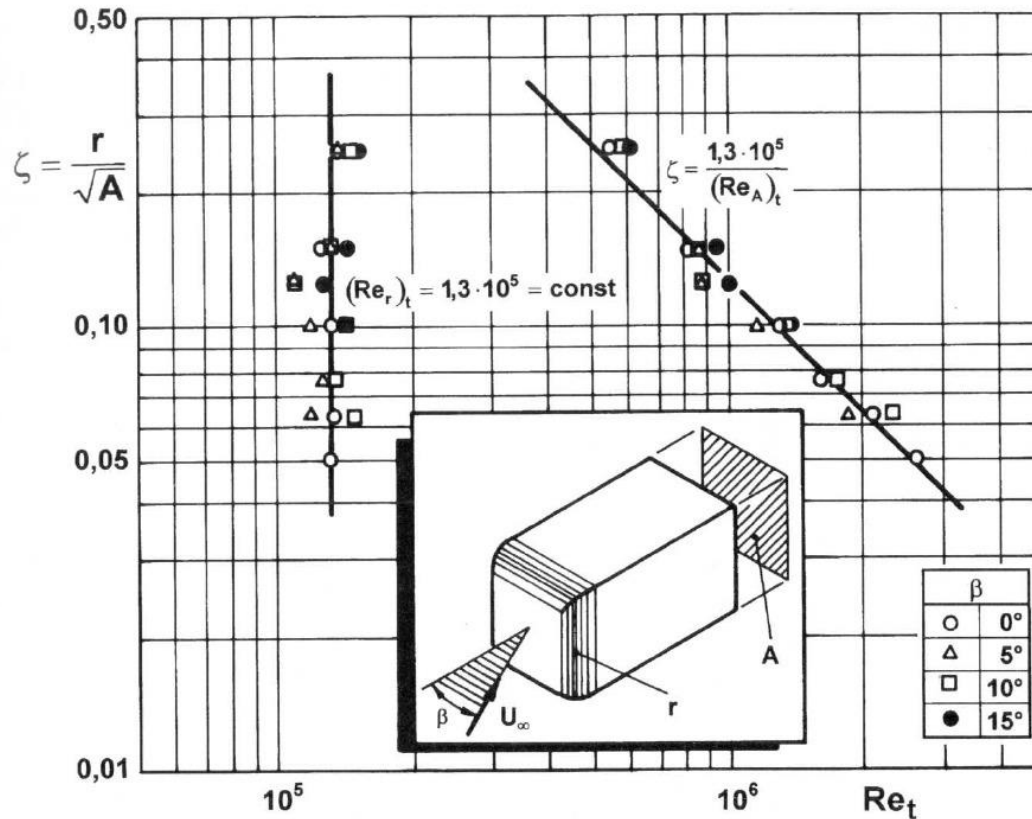


Einfluss des Kantenradius auf die Strömungsform und den Widerstand eines Quaders



Einfluss des Kantenradius auf die kritische Reynolds-Zahl (ähnlich wie beim Kreiszyylinder)

Stumpfe Vorderkante

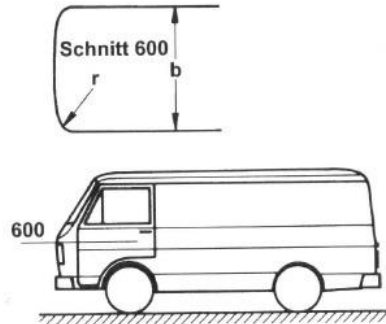
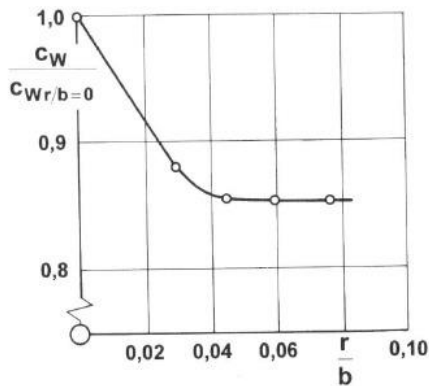
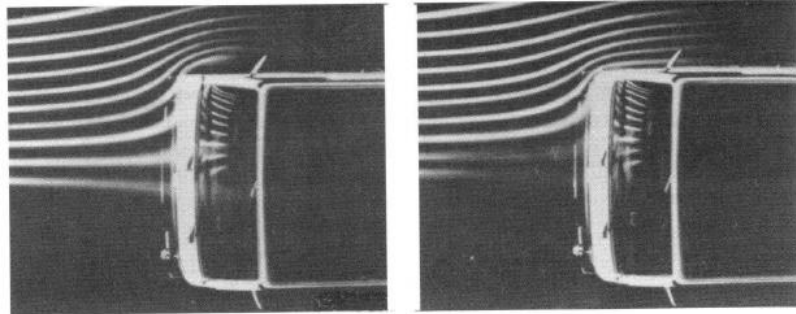


$$\zeta_{\text{opt}} = \left(\frac{r}{\sqrt{A}} \right)_{\text{opt}} = \frac{1.3 \cdot 10^5}{(\text{Re}_A)_t}$$

$$\text{Re}_{t,\text{opt}} = \left(\frac{U_\infty \cdot r}{\nu} \right)_t = 1.3 \cdot 10^5 = \text{const}$$

Einfluss des Vorderkantenradius auf die kritische Reynoldszahl
Ähnlich wie beim Kreiszyylinder

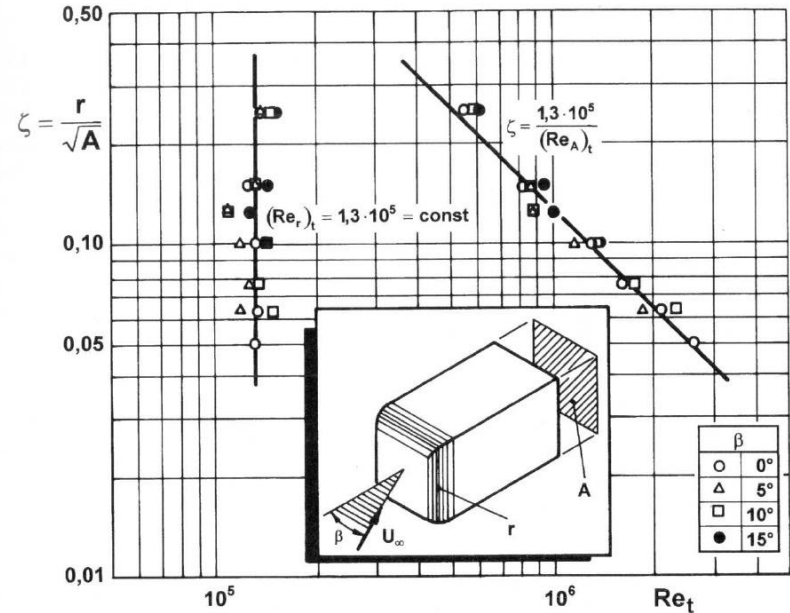
Sättigung



Sättigung am Kastenwagen VW LT 1

Optimaler Radius ist erreicht, wenn die Kurve gesättigt ist.

Bei größerem Radius ergibt sich keine Verbesserung am Vorderwagen, aber vielleicht am Hinterwagen

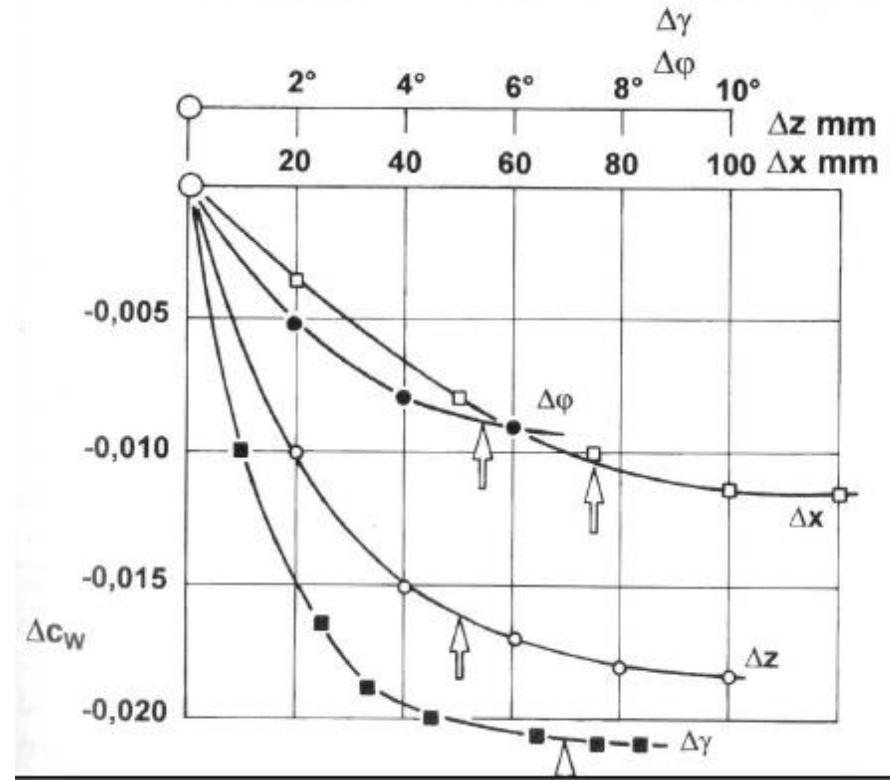
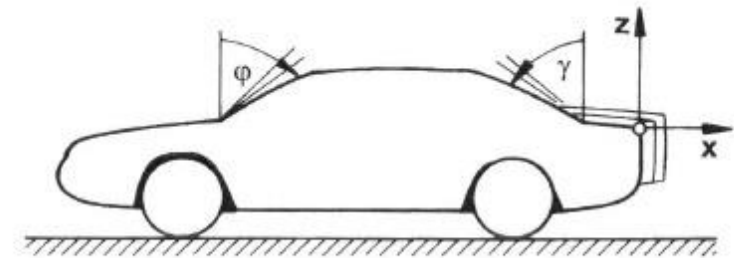


Stadtbus: $U = 50 \text{ km/h}$: $r = 140 \text{ mm}$
 Reisebus: $U = 80 \text{ km/h}$: $r = 89 \text{ mm}$

$$r_{\text{opt}} = 1.3 \cdot 10^5 \cdot \frac{\nu}{U_{\infty}}$$

Asymptote

- Neigung der Windschutz- und der Heckscheibe
 - Höhe des Kofferraumes
 - Länge des Kofferraumes
 - Kein klares Optimum
- Konflikt zwischen Design und Aerodynamik



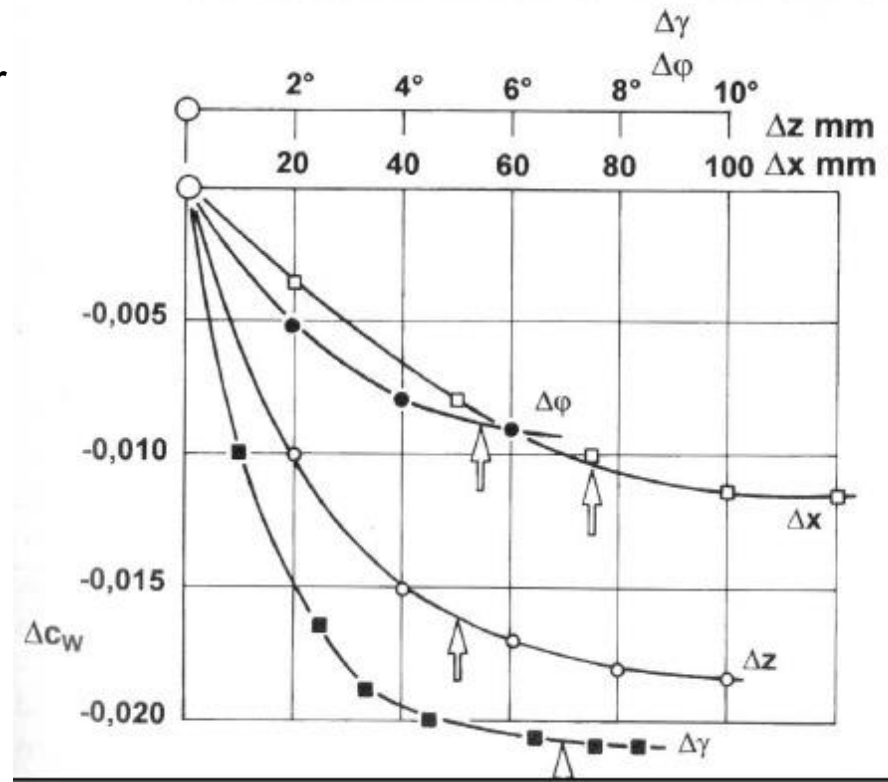
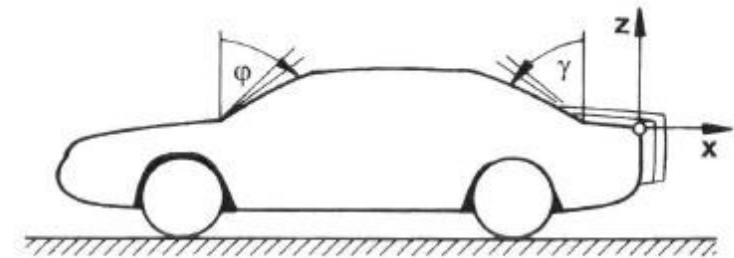
Examples for „Asymptote“ for AUDI 100 III 1983

Asymptote

Mechanismen:

- bei zunehmender Neigung strömt mehr über das Dach und weniger über die A-Säulen → geringerer Widerstand
- Anstellung der Heckscheibe ähnlich wie beim Tragflügel = Abnahme des Anstellwinkels → niedrigerer Widerstand, niedrigerer Auftrieb
- Die Höhe und die Längen des Kofferraumes wirken ähnlich wie bei der zurückspringenden Stufe

Examples for „Asymptote“ for AUDI 100 III 1983

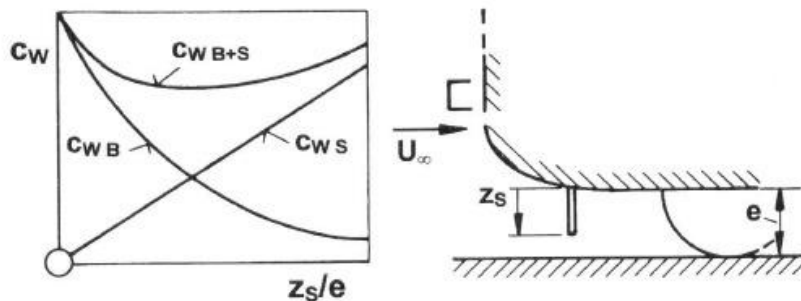


Minimum

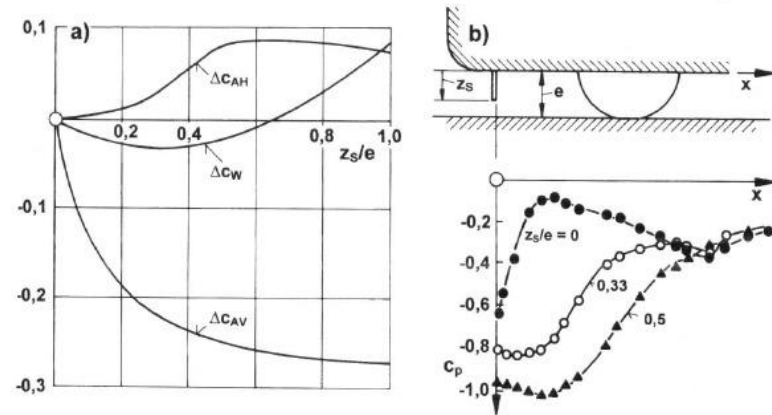
2 gegenläufige Effekte:

- Beispiel: Bugspoiler und Fahrzeugunterboden

$$W_{B+S} = W_B + W_S$$



Typ „Minimum“, schematisch



a) Auftrieb und Widerstand

b) Druckverteilung

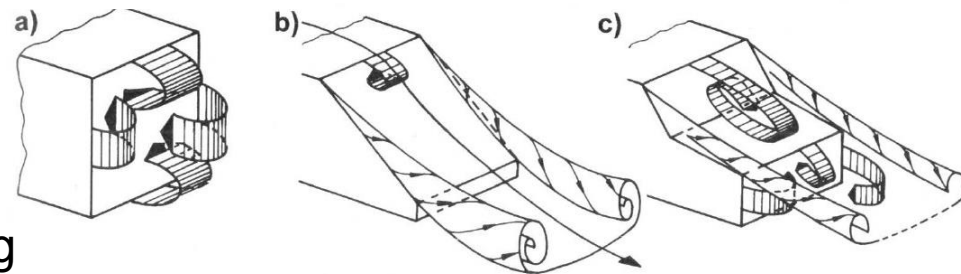
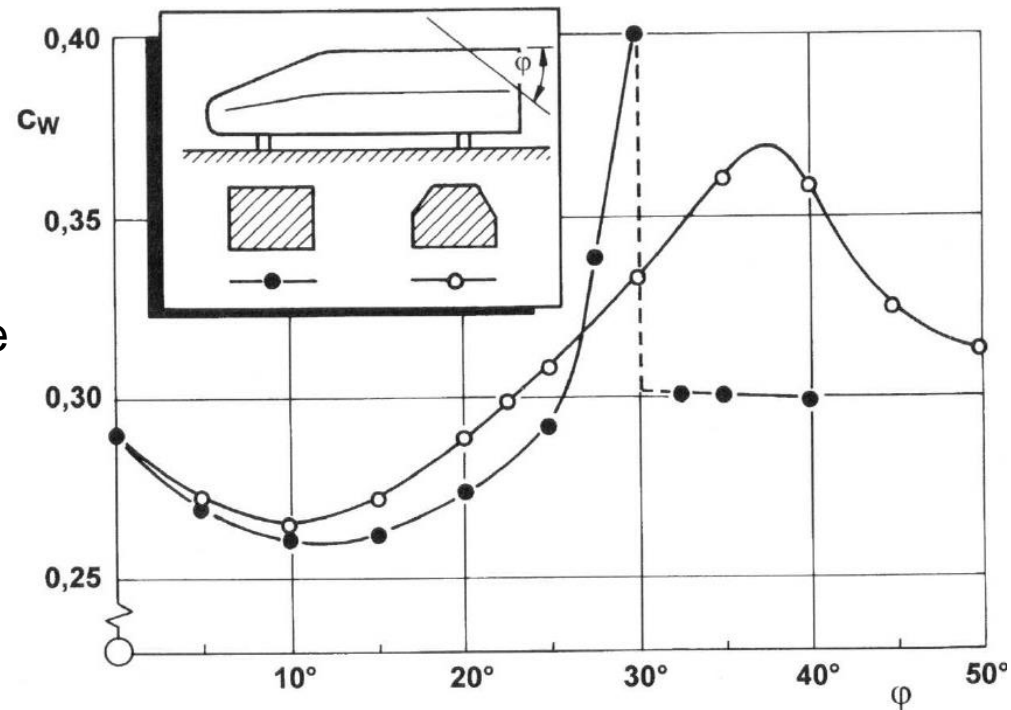
- Spoiler: quer gehaltene ebene Platte
- Unterboden: raue ebene Platte
- Der Spoiler schirmt die raue Platte ab
- Abnahme des Druckes
→ Verringerung des Auftriebes an der Vorderachse (asymptotisch)
- Gleichzeitig stärkeres Druckgefälle
→ Erhöhung des Kühlluftstromes

Sprung

Vollheck: $\varphi = 0^\circ$: Ablösung an allen 4 Seiten, Großes Totwassergebiet

Bei kleinem Winkel:

- Das Wirbelpaar induziert Abwind. Die Strömung über dem Dach wird nach unten gezogen und liegt an. Bei gerundeter Kante verschwindet die Ablösung, nur noch Totwasser am senkrechten Heckteil
- Mit wachsendem Winkel φ nimmt die Intensität der Randwirbel zu: Der Unterdruck wächst \rightarrow größerer Widerstand
- Bei 30° platzen die Wirbel auf. Der Abwind bricht zusammen, die Ablösung wandert wieder zur Dachhinterkante

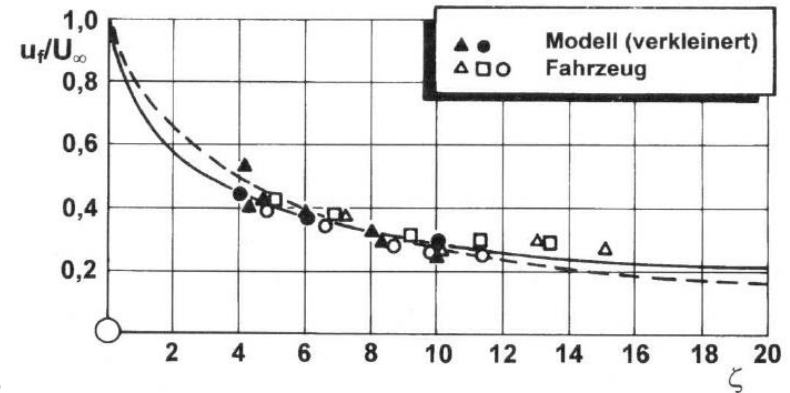
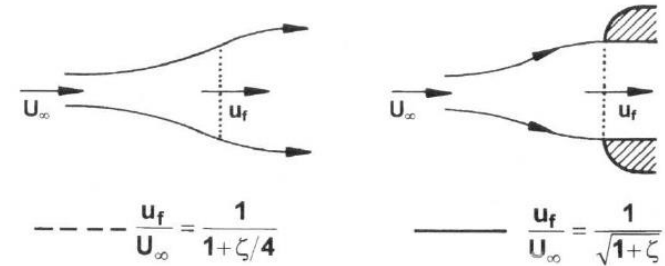


Typisches Beispiel: Schrägheck

Anströmung und Stabilität

Durchströmung

- Kühler (Kondensator, Wasser, Öl, Ladeluft)
- Klimaanlage im Fahrgastraum
- Kühlung für Vorderradbremsten
- zusätzlicher Auftrieb/Abtrieb
- zusätzlicher Widerstand
- Messung bei offenem und geschlossenem Einlass
- „Kühlluftwiderstand“
- Interferenzwiderstand
 - Änderung der Umströmung des Vorderwagens (vielleicht negativ)
 - verstärkte Schräganströmung der Vorderräder
 - höhere Geschwindigkeit an der Unterseite



„Face velocity“ u_f am freifahrenden und ummantelten Kühler als Funktion des Verlustbeiwertes ζ

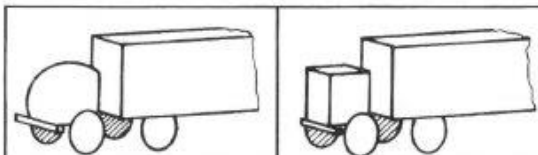
$$c_{WK} = \frac{W_K}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A_K} \approx 2 \frac{u_f}{U_\infty}$$

$$\Delta c_{WK} = c_{WK} \frac{A_K}{A}$$

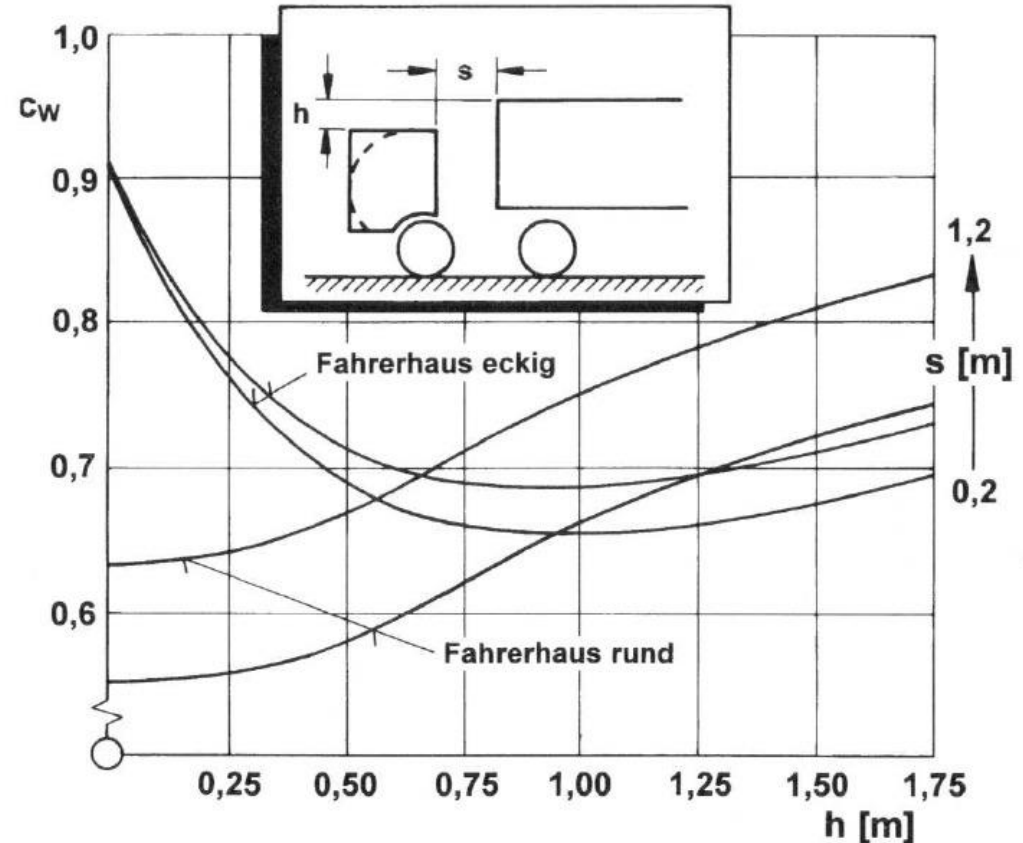
$$\zeta = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho u_f^2}$$

Interferenz

- mehrere Körper
- Fahrerhaus + Auflieger
- PKW + Wohnwagen
- geometrische Zuordnung
 - Spaltweite s
 - ❖ stark begrenzt
 - ❖ Gesamtlänge < 18 m
 - ❖ muss manövrierbar sein
 - Höhendifferenz h



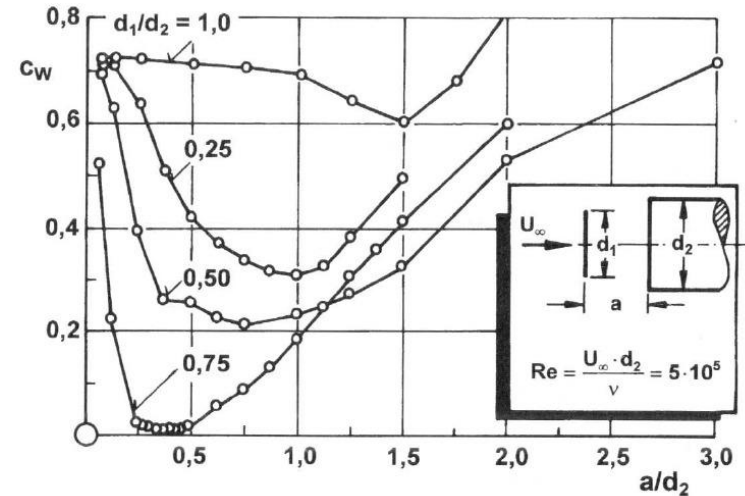
	Zug mit rundem Fahrerhaus			Zug mit eckigem Fahrerhaus		
Widerstand	Zug	Fahrerhaus	Auflieger	Zug	Fahrerhaus	Auflieger
c_w	0,52	0,11	0,52	0,48	0,51	-0,03



Einfluss der Zuordnung von Fahrerhaus und Container auf den Widerstand

Umströmung

- kleine Abstände: $c_w = 0.72$ (koaxialer Zylinder)
- c_w nimmt mit wachsendem Abstand ab (Abschirmung)
- Minimum für alle Durchmesserverhältnisse
- Minimum hängt vom Verhältnis ab
- absolutes Minimum für $d_1 / d_2 = 0.75$
- axial angeströmter Zylinder mit gut gerundeter Nase
- bei größeren Abständen: Summe aus 2 Einzelwerten: Zylinder $c_w = 0.75$, Kreisscheibe $c_w = 1.2$



Kopfwiderstand eines längsangeströmten Kreiszyinders mit davor angeordneter Kreisscheibe für verschiedene Durchmesserverhältnisse und Abstände (Kopfwiderstand: Scheibe + Verbindungsstange + $0.625 d_2$)

$$c_w = c_{w2} + \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 c_{w1} = 0.75 + 1.2 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2$$

Interferenz

Minimaler Widerstand c_w^*

I) Extrem kleiner Wert $c_w^* < 0.1$

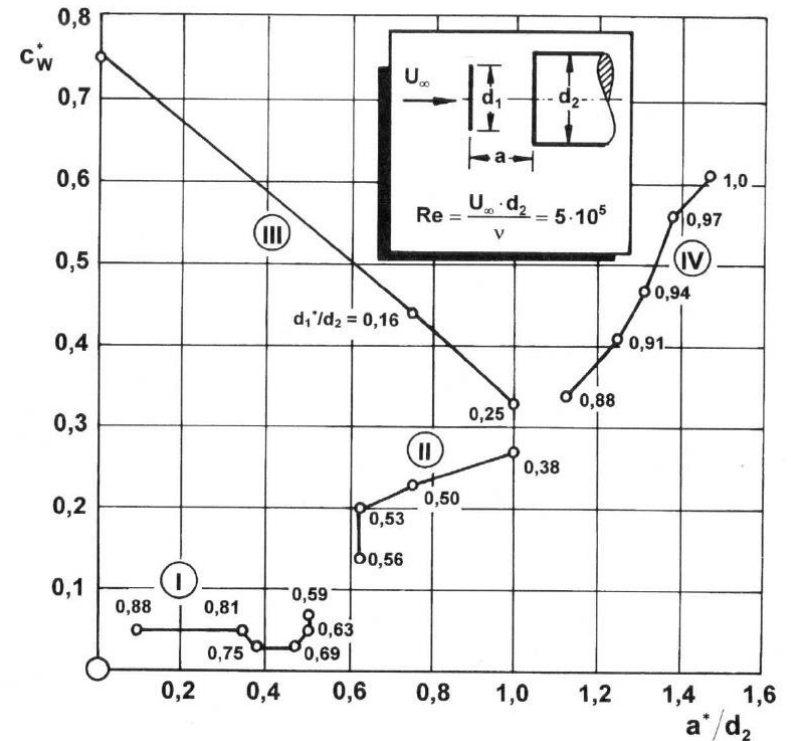
Abstand ist optimal

„idealer“ Körper mit runder Nase

II) Abstand ist zu groß, starke Schwankungen

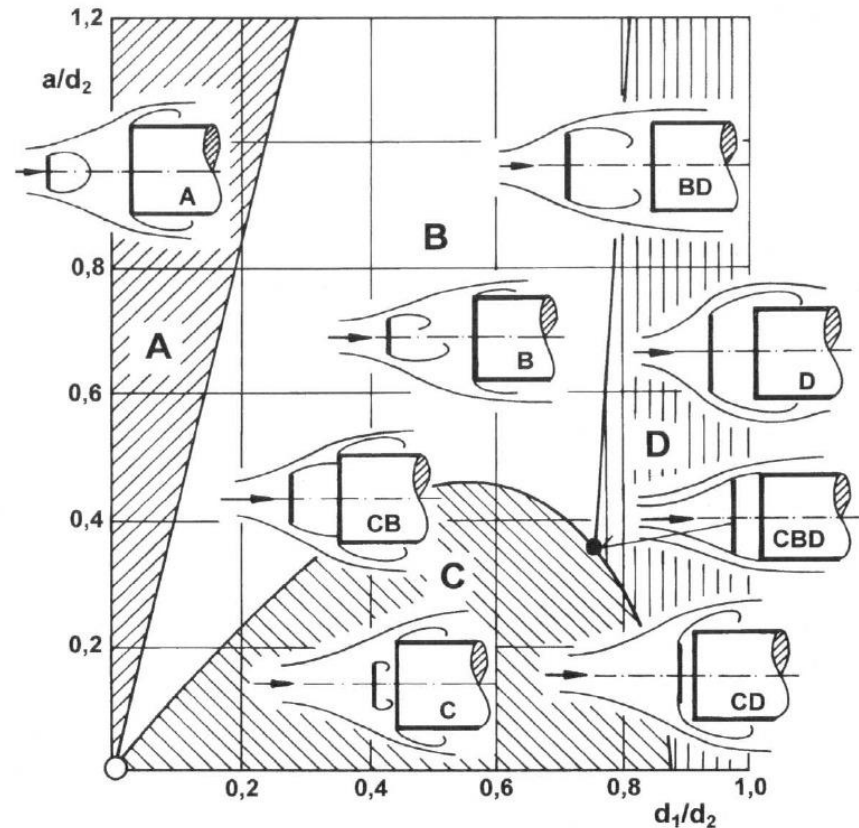
III) Platte ist zu klein

IV) Abstand ist zu groß



Interferenz

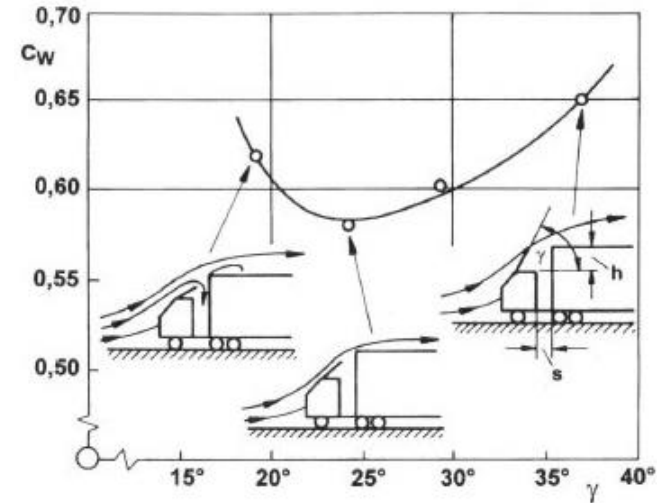
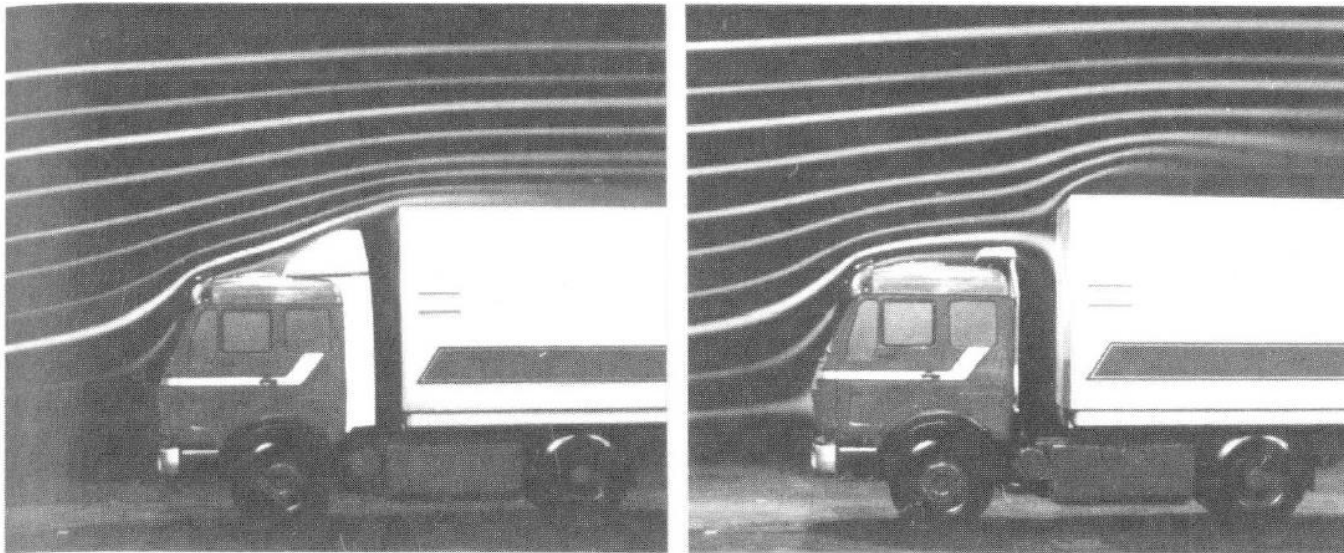
- A) Scheibe zu klein und Abstand zu groß
 - B) Scheibe immer noch zu klein, Abstand zu groß
 - C) Scheibe und Abstand zu klein
 - D) Scheibe zu groß
- Im Triple-Punkt CBD ist das Optimum



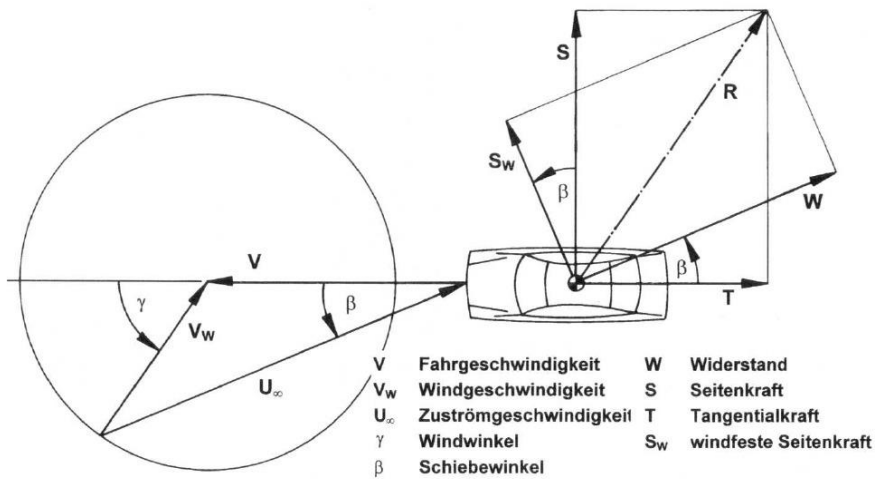
Interferenz

Wirkung eines Leitbleches auf dem Fahrerhaus eines Sattelzuges

Vergleich der Strömung um einen Sattelzug mit und ohne Leitvorrichtung am Fahrerhaus

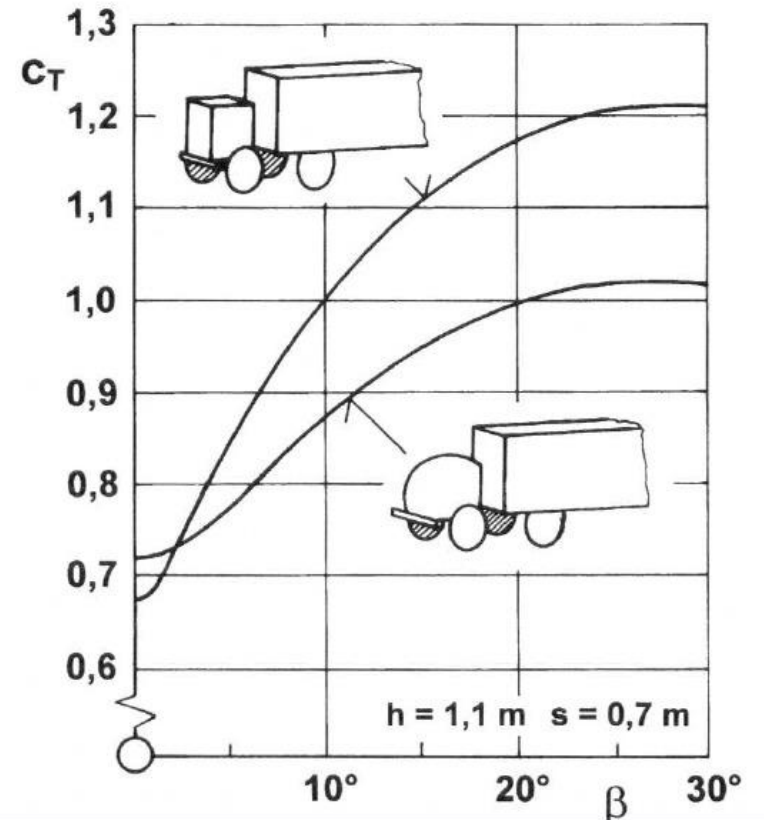


Schräganströmung



- Windgeschwindigkeit
- Schiebewinkel
- anders als beim Flugzeug
- Tangentialkraft ist wichtig, Koeffizient c_T

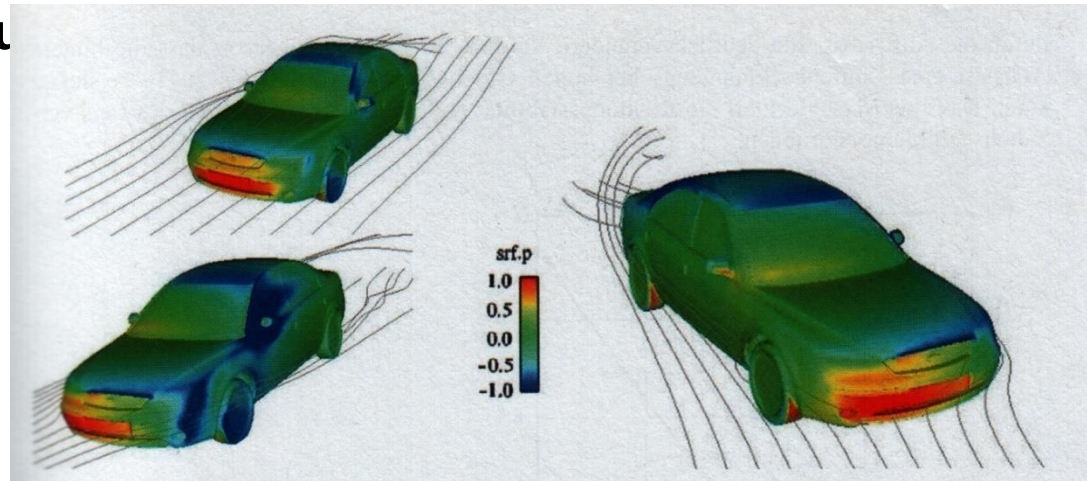
Einfluss des Schiebewinkels β auf den Tangentialkraftbeiwert eines Sattelzuges mit rundem und eckigem Fahrerhaus



Schräganströmung

- Das Fahrwerk wird schräg durchströmt
- Der Spalt zwischen Fahrerhaus und Auflieger wird schräg durchströmt
- senkrechte Platte in der Mitte der Front des Aufliegers,
- nur bei Zügen, die mit dem gleichen Auflieger betrieben werden
- seitliche Verkleidungen
- Die Tangentialkraft t ist von geringerer Bedeutung, weil
- hohe Schiebewinkel bei hoher Geschwindigkeit sind selten
- bei niedriger Geschwindigkeit sind die Kräfte klein und unbedeutend für den Treibstoffverbrauch
- typische Werte:
 - $\beta \sim 5^\circ$ PKW auf der Autobahn
 - $\beta \sim 8^\circ$ LKW (langsamer)

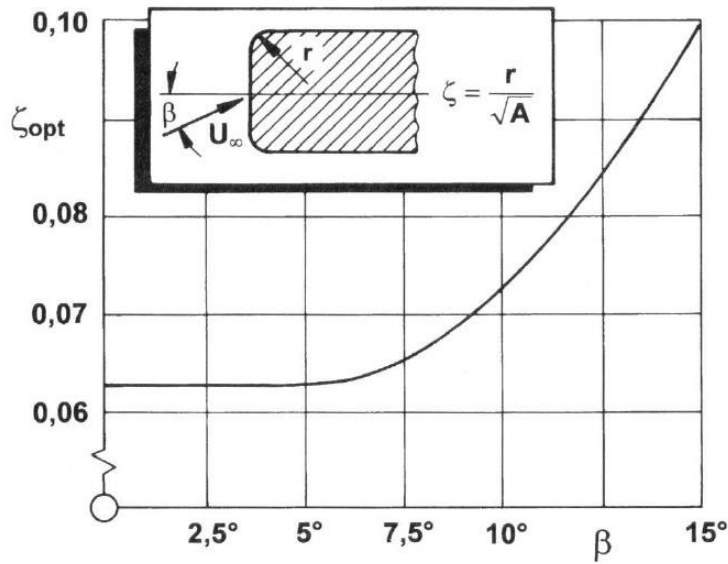
Schräganströmung



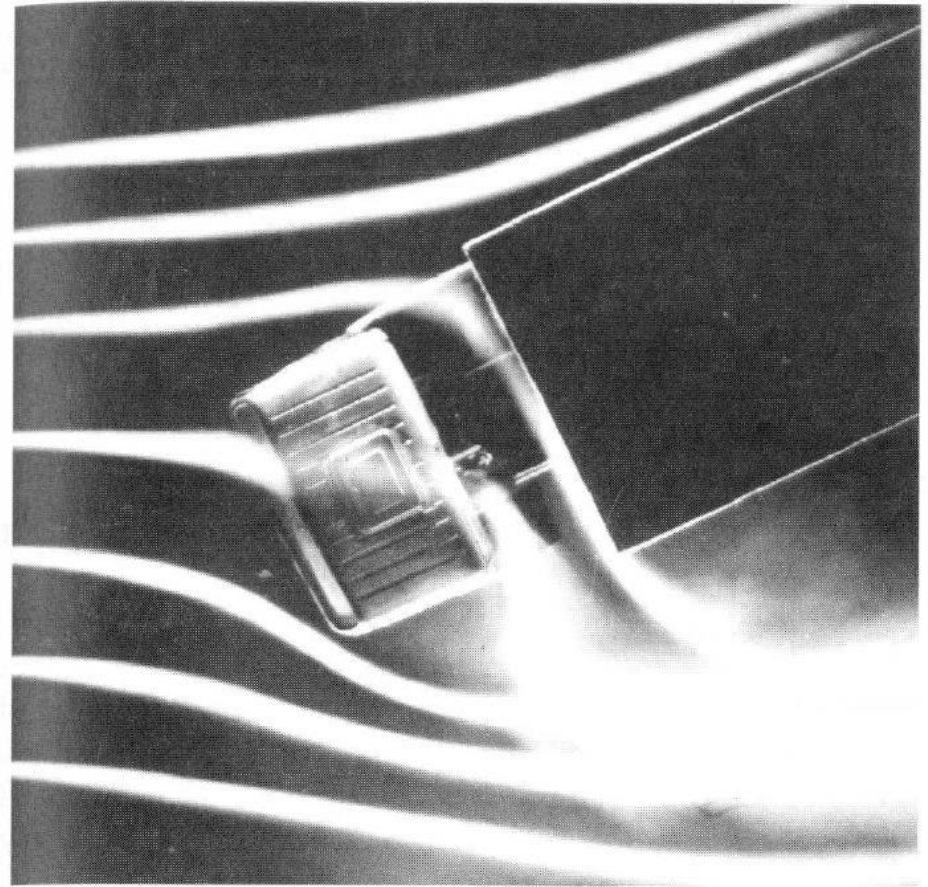
Ford Werke GmbH (2003)

Druckverteilung auf der Karosserie bei symmetrischer Anströmung und bei Schräganströmung unter 20° , Ford Werke GmbH, 2003

Schräganströmung



Zunahme des „optimalen“ Bugradius bei Schräganströmung

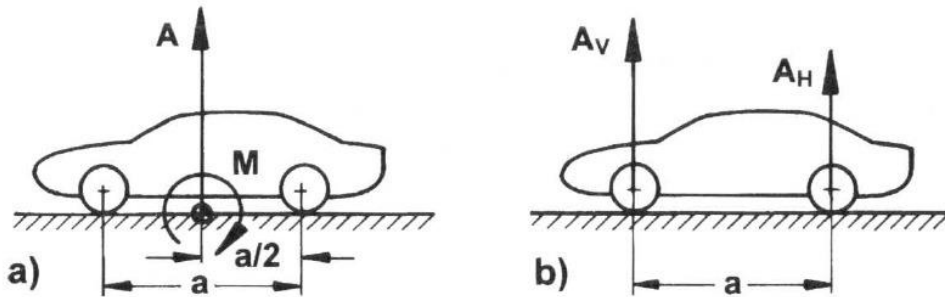


Durchströmung des „Spaltes“ zwischen Fahrerhaus und Auflieger

Auftrieb und Nickmoment

Umströmter stumpfer Körper in Bodennähe:

- Auftrieb und Moment um die Querachse: Nickmoment
- zusätzlicher Effekt: positive Krümmung → positiver Auftrieb (aus der Profiltheorie)
- sind nur für PKW interessant, unbedeutend für Busse und LKW
- Aufteilung des Auftriebes auf beide Achsen: positiver Auftrieb ist unerwünscht
→ geringere Seitenkräfte sind möglich
- bei ungleichmäßiger Verteilung
→ Eigenlenkverhalten ändert sich mit Geschwindigkeit
- Vermeide Auftrieb an der Hinterachse
→ Bremssystem → Die Hinterachse darf nicht zuerst blockieren



Auftrieb und Nickmoment an einem PKW, schematisch

Fahrtrichtungshaltung, Stabilität

- bei angestellter Strömung
→ asymmetrisches Strömungsfeld → zusätzliche Kräfte und Momente
- das Fahrzeug ändert den Kurs, wenn der Fahrer nicht korrigiert

2 Aspekte bei der Reaktion auf Seitenwind

- Komfort
- Sicherheit

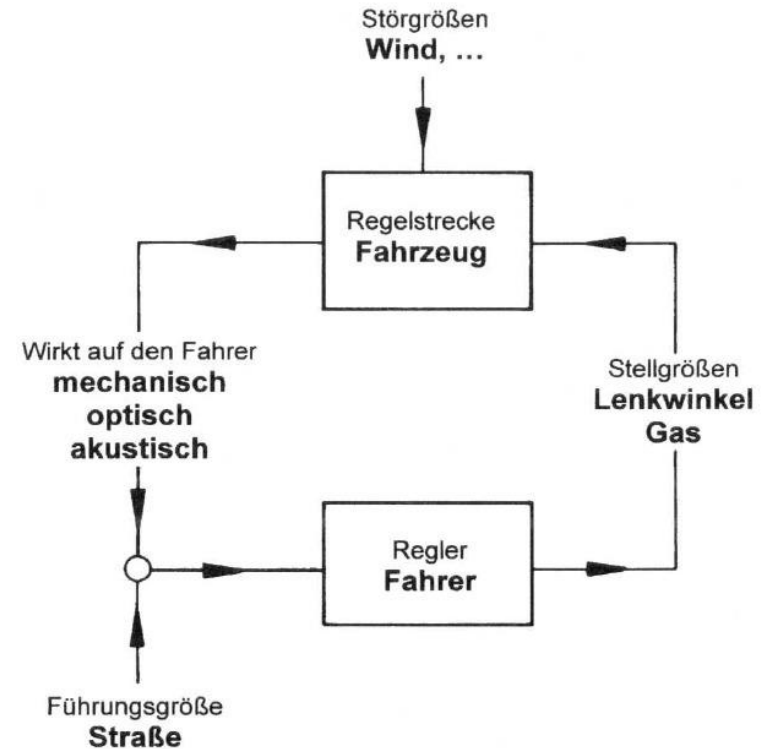
- lästig und ermüdend, wenn permanent reagiert werden muss
- bei größeren Kursabweichungen wird es gefährlich, insbesondere bei Böen oder beim Überholen

- Heckmotor → Frontmotor: niedrigere Seitenwindempfindlichkeit wg. Verlagerung des Schwerpunktes nach vorne
- wird wieder wichtiger, wenn das Gewicht der Fahrzeuge vermindert wird

Auftrieb und Nickmoment

- Fahrer + Fahrzeug: geschlossener Regelkreis
- Führungsgröße ist die Straße
- Der Regelkreis soll unter allen vorkommenden Bedingungen stabil bleiben
- das Regelverhalten kann kaum beeinflusst werden (durch Training)
- Stabilität muss vom Fahrzeug kommen

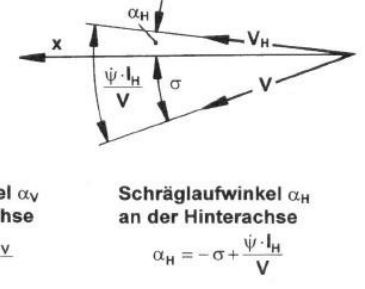
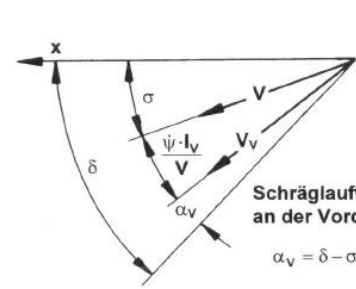
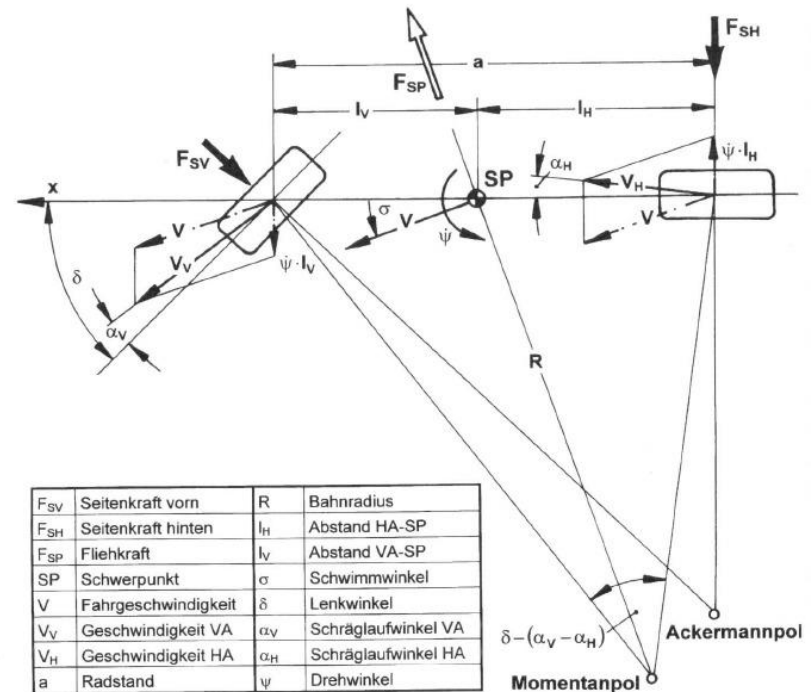
- mathematisches Modell für das Fahrzeug
- mathematisches Modell für den Fahrer
- Kräfte und Momente für alle denkbaren Kombinationen von Windstärke und Schiebewinkel



Linearisiertes Fahrzeugmodell

Linearisiertes Fahrzeugmodell

- kleine Querbewegung $a_y / g < 0.5$
→ linearisiertes Modell
- Alle Winkel sind kleiner, ausser dem Schiebewinkel β
- $\cos = 1$
- $\sin, \tan = \text{Winkel}$
- Einspurmodell
- keine Längskräfte (weder beschleunigen noch bremsen)
- die Änderung der Vertikalkräfte wird vernachlässigt(zunächst)
- Modell mit 2 Freiheitsgraden (Schwimmen und Gieren)
- Zunächst werden Seitenwinde weggelassen



Linearisiertes Fahrzeugmodell

Bewegung des Fahrzeuges in Querrichtung

$$mb = F_V + F_H$$

Rotation um die Hochachse

$$\Theta \ddot{\Psi} = F_V l_V - F_H l_H$$

Seitenführungskräfte an Vorder- und Hinterachse

$$F_V = c_V \alpha_v$$
$$F_H = c_H \alpha_H$$

c_V und c_H beinhalten:
Seitenführungs-Steifigkeit der
Reifen, elastokinematische
Eigenschaften der Achsen und der
Lenkung

Bewegungsgleichung

$$mv\dot{\sigma} + \frac{1}{v}(mv^2 + c_v l_v - c_H l_H)\dot{\Psi} + (c_V + c_H)\sigma - c_V \delta = 0$$
$$\Theta \ddot{\Psi} + \frac{1}{v}(c_V l_V^2 + c_H l_H^2)\dot{\Psi} - (c_H l_H - c_V l_V)\sigma - c_V l_V \delta = 0$$

Schräglaufwinkel an Vorder- und Hinterachse

$$\alpha_V = \delta_V - \sigma - \frac{l_V}{v}\dot{\Psi}$$
$$\alpha_H = -\sigma + \frac{l_H}{v}\dot{\Psi}$$

Winkel

$$\Psi = \varphi - \sigma$$

Beschleunigung

$$b = \frac{v^2}{r_{Sp}} = \dot{\varphi}v = (\dot{\Psi} + \dot{\sigma})v$$

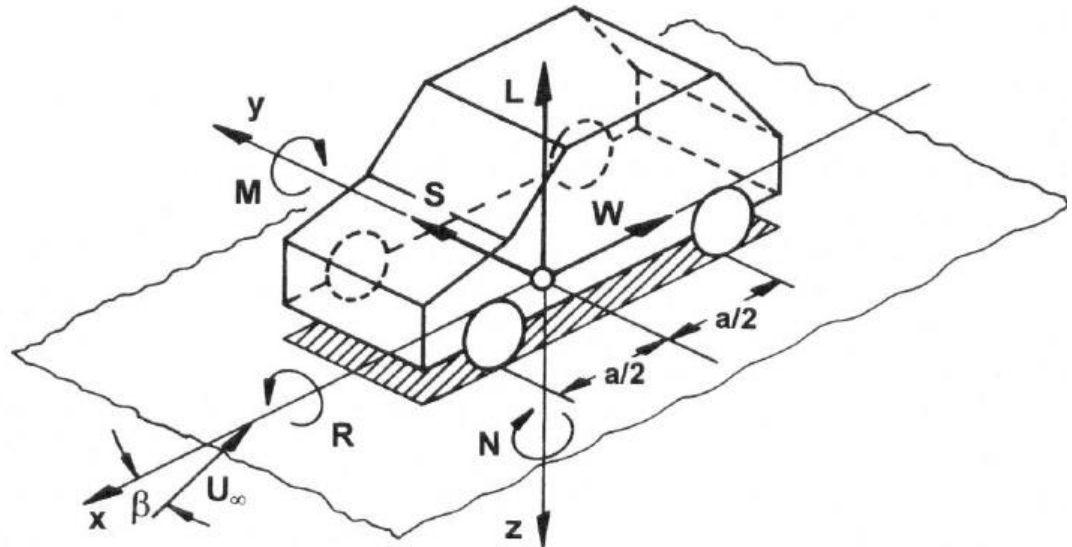
Linearisiertes Fahrzeugmodell

Fahrt bei Seitenwind

- asymmetrische Umströmung
- Veränderung von Tangentialkraft T , Auftrieb A und Nickmoment M
- neu: Seitenkraft S , Giermoment N , Rollmoment R

Die Geschwindigkeit U_∞ hat 2 Komponenten:

- Windgeschwindigkeit V_W
- Fahrgeschwindigkeit V



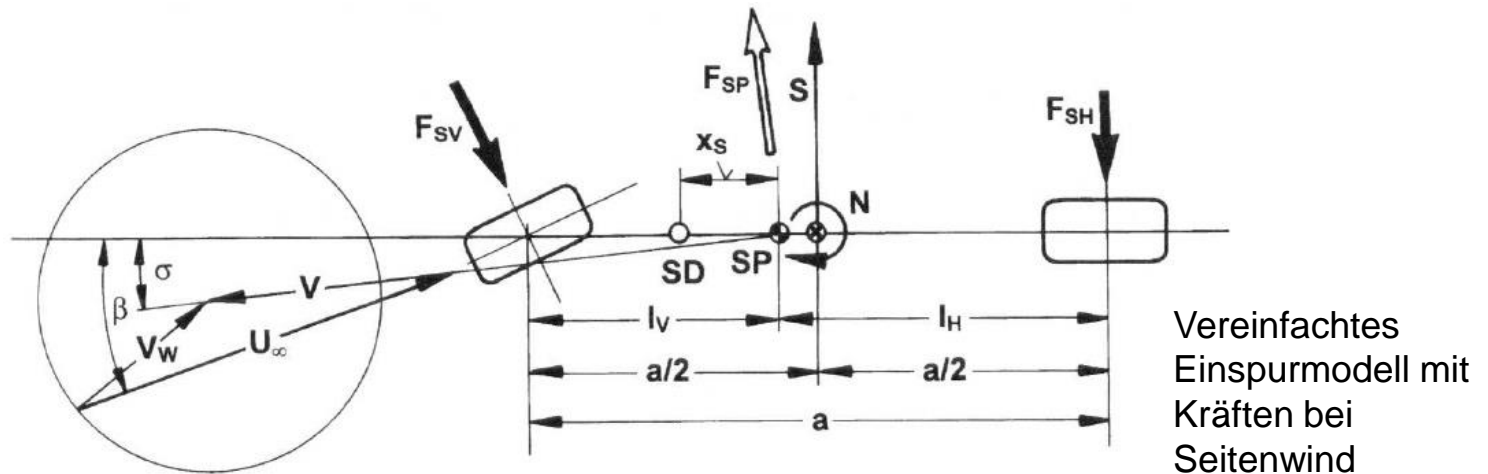
Linearisiertes Fahrzeugmodell

Fahrt bei Seitenwind

- asymmetrische Umströmung
- Veränderung von Tangentialkraft T , Auftrieb A und Nickmoment M
- neu: Seitenkraft S , Giermoment N , Rollmoment R

Die Geschwindigkeit U_∞ hat 2 Komponenten:

- Windgeschwindigkeit V_w
- Fahrgeschwindigkeit V



Neue Komponenten

$$S = c_S \frac{\rho}{2} U_\infty^2 A$$
$$N = c_N \frac{\rho}{2} U_\infty^2 A a$$

Giermoment = Seitenkraft x Hebelarm

$$N = S x_S \quad x_S = \frac{c_N a}{c_S}$$

Seitenkraft und Giermoment

$$S = k \beta U_\infty^2$$
$$N = k x_S \beta U_\infty^2$$

Kurshalten bei Seitenwind

$$\dot{\Psi} = 0, \quad \ddot{\Psi} = 0, \quad \dot{\sigma} = 0$$

Resultierende Bewegungsgleichung

$$(c_V + c_H)\sigma - c_V \delta + k \beta U_\infty^2 = 0$$
$$-(c_H l_H - c_V l_V)\sigma - c_V l_V \delta + k x_S \beta U_\infty^2 = 0$$

Elimination des Schwimmwinkels σ

$$\delta = \beta U_\infty^2 \frac{k c_H (l_H + x_S) - c_V (l_V - x_S)}{c_V + c_H}$$

Bewegungsgleichung

$$\left| \begin{array}{l} m v \dot{\sigma} + \frac{1}{v} (m v^2 + c_v l_v - c_H l_H) \dot{\Psi} + (c_V + c_H)\sigma - c_V \delta + k \beta U_\infty^2 = 0 \\ \Theta \ddot{\Psi} + \frac{1}{v} (c_V l_V^2 + c_H l_H^2) \dot{\Psi} - (c_H l_H - c_V l_V)\sigma - c_V l_V \delta + k x_S \beta U_\infty^2 = 0 \end{array} \right.$$

Linearisiertes Fahrzeugmodell

Der Lenkwinkel bleibt klein, wenn

- der aerodynamische Koeffizient k klein ist; kann durch Formgebung beeinflusst werden
- die Schräglaufsteifigkeit c_V der Frontachse groß ist

$$\delta = \beta U_\infty^2 \frac{k c_H (l_H + x_S) - c_V (l_V - x_S)}{c_V + c_H}$$

Interessanter Fall: Lenkwinkel ist 0

$$\begin{aligned} c_H (l_H + x_{S,\delta=0}) - c_V (l_V - x_{S,\delta=0}) &= 0 \\ x_{S,\delta=0} &= \frac{c_V l_V - c_H l_H}{c_V + c_H} \end{aligned}$$

Auftrieb und Nickmoment

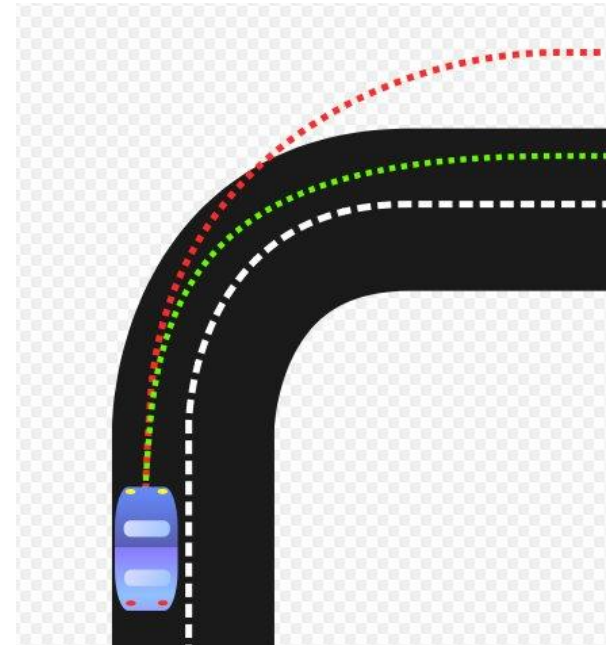
Umströmter stumpfer Körper in Bodennähe:

- Auftrieb und Moment um die Querachse: Nickmoment
- zusätzlicher Effekt: positive Krümmung → positiver Auftrieb (aus der Profiltheorie)
- sind nur für PKW interessant, unbedeutend für Busse und LKW
- Aufteilung des Auftriebes auf beide Achsen
- positiver Auftrieb ist unerwünscht → geringere Seitenkräfte sind möglich
- bei ungleichmäßiger Verteilung → Eigenlenkverhalten ändert sich mit Geschwindigkeit
- Vermeide Auftrieb an der Hinterachse → Bremssystem → Die Hinterachse darf nicht zuerst blockieren

Kurvenfahrt

- Üblicherweise: ÜKW untersteuern

$$c_H l_H > c_V l_V$$

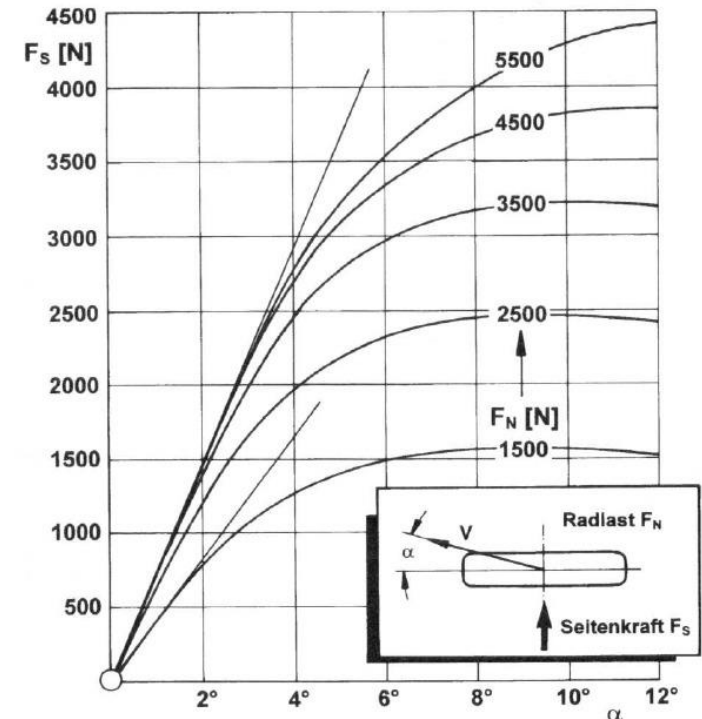


<http://en.wikipedia.org/wiki/Understeer>

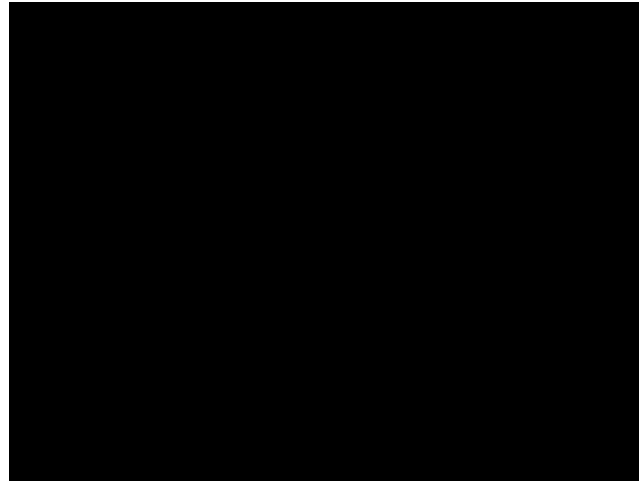
- Abstand zwischen Druckpunkt und Schwerpunkt: x_{s0} negativ
- Druckpunkt liegt hinter dem Schwerpunkt
- Nur mit großer Finne möglich
- Schwerpunktverschiebung ist auch nur begrenzt möglich
- Selbst Fahrzeuge mit Frontantrieb haben ein positives x_{s0}

Kurvenfahrt

- Seitenkraftdiagramm eines PKW-Reifens
- Nur für kleine Winkel linear
- Steifigkeit = Steigung der Kurve,
- nimmt zu, wenn die Radlast zunimmt
- Bei gegebener Seitenlast nimmt der Schräglaufwinkel zu, wenn die Radlast abnimmt
- Auftrieb entlastet
- Nickmoment verteilt auf Vorder- und Hinterachse
- Untersteuern wird zum Übersteuern → gefährlich



Über- und Untersteuern



Fahrermodell

2-Ebenen Modell: Führungs- und Stabilisierungsebene

- normale Fahrt ohne Einwirkung von Störungen
- Reaktion auf stochastische Störungen; versucht Abweichungen klein zu halten: adaptiver Regler

$$\delta_L(t) = \Delta \bar{\delta}_L(t) + T_1 \Delta \dot{\delta}_L(t)$$

T_1 : Reaktionszeit

Führungsanteil

Reaktion auf zeitlich konstanten
Mittelwert des Windes stabil

Kompensatorischer Teil

Kritisch, besonders drastischen Änderungen

- seitliche Abweichung $y(t)$ vom Sollkurs
- Gierwinkel $\Psi(t)$
- Gierwinkelgeschwindigkeit $d\Psi/dt$

- Gierwinkelbeschleunigung $d^2 \Psi / d t^2$
- Rollwinkel (bei hoher Fahrerposition)

$$\delta_L(t) = -A_y y(t - T_y) - A_\Psi \Psi(t - T_\Psi) + A_{\dot{\Psi}} \dot{\Psi}(t - T_{\dot{\Psi}}) + A_{\ddot{\Psi}} \ddot{\Psi}(t - T_{\ddot{\Psi}}) + \dots$$

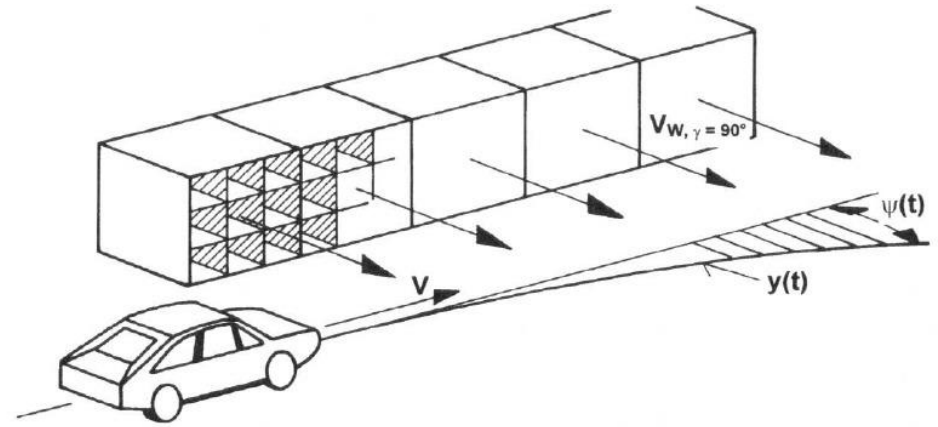
T_Ψ, T_y, \dots Reaktionszeiten

A_Ψ, A_y, \dots fahrerspezifische Komponenten,
Müssen aus Experimenten bestimmt werden

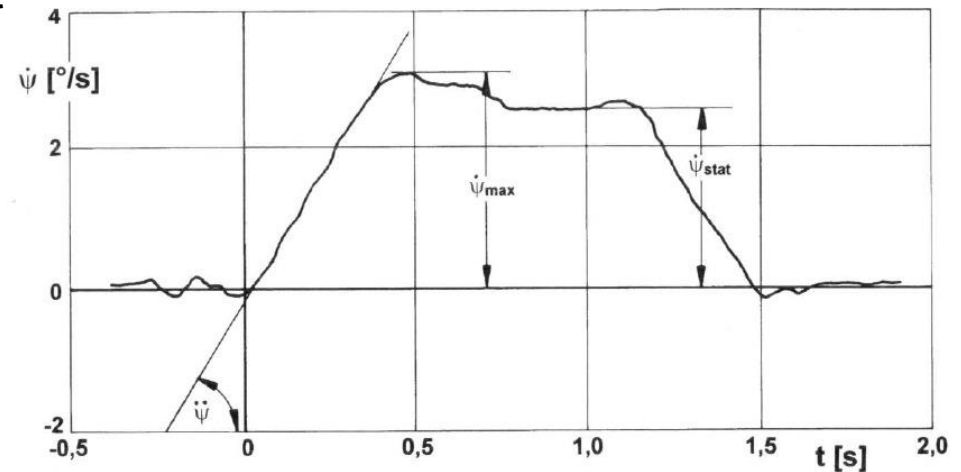
Seitenwindempfindlichkeit, Schräganströmung und Akustik

Seitenwindempfindlichkeit

- Lenkrad festhalten $\delta_L = 0$
 - Lenkrad loslassen
 - Gegenlenken \rightarrow gerader Kurs
-
- V : Fahrgeschwindigkeit
 - V_W : Windgeschwindigkeit
 - \rightarrow kleiner Schiebewinkel wird eingestellt
 - \rightarrow lineares Verhalten von c_S und c_N
-
- Messung der Gierwinkelgeschwindigkeit
 - Integration: $y(t)$
 - Differentiation: Gierwinkelbeschleunigung



Offener Regelkreis: Verhalten des Fahrzeuges



Seitenwindempfindlichkeit

Aus Experimenten mit Fahrern ist bekannt:

- Seitenwindempfindlichkeit wird hauptsächlich nach der Gierwinkelbeschleunigung bewertet

Aus Befragungen:

- Großer Giermomentenbeiwert c_N → wird als seitenwindempfindlich eingestuft
- Großer c_S seitliches versetzen ohne Gieren ist leichter beherrschbar

Für die Aerodynamik folgt bei einem Konflikt: Seitenkraft gg. Giermoment

→ lieber kleineres Giermoment, höhere Seitenkraft wird in Kauf genommen

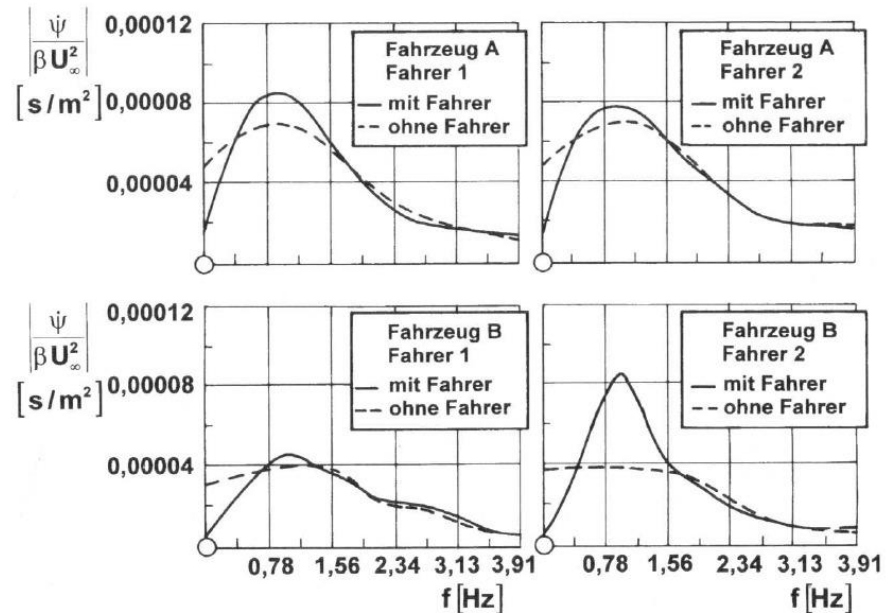
System Fahrer + Fahrzeug

Messung des Mittelwertes und RMS des Lenkwinkels $\delta_L(t)$

- leider gibt es keine einheitlichen Versuche
- stark unterschiedliche Längen von Teststrecken, Verhältnis ist 1:8
- Fahr- und Windgeschwindigkeiten sind unterschiedlich
- Die Ergebnisse sind nicht vergleichbar

Seitenwindempfindlichkeit

- Bewertung im Frequenzbereich
- Tests bei natürlichem Seitenwind, oder numerisch
- Verhältnis der Amplitude der Übertragungsfunktion der Gierwinkelgeschwindigkeit zur Störgröße Windgeschwindigkeit
- beide Fahrzeuge: Maximum bei 0.8 Hz, nahe der Giereigenfrequenz
- Fahrzeug ist sensibler, wg höherer Amplitude
- bis 0.4 Hz: beide Fahrer können Störungen kompensieren
- bei 0.8 Hz: mit Fahrer schlechter als ohne
- bei höheren Frequenzen nimmt der Einfluss des Fahrers wieder ab, nicht mehr in der Lage zu reagieren
- Fahrer 2 kommt mit dem weniger sensiblen Fahrzeug B schlecht zurecht
- Es gibt einen Lerneffekt



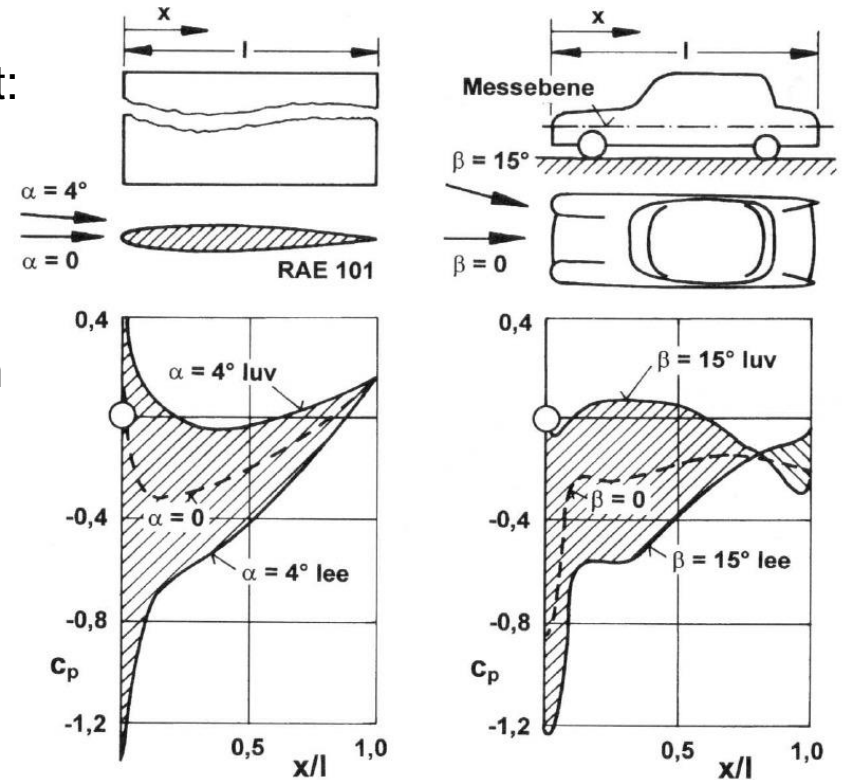
Aerodynamik bei Schräganströmung

Wichtigste Komponenten für die Querstabilität:
Giermoment und Seitenkraft

- wo kommen sie her
- wie kann man sie beeinflussen

Vergleichbar mit Auftrieb und Nickmoment am
Tragflügel

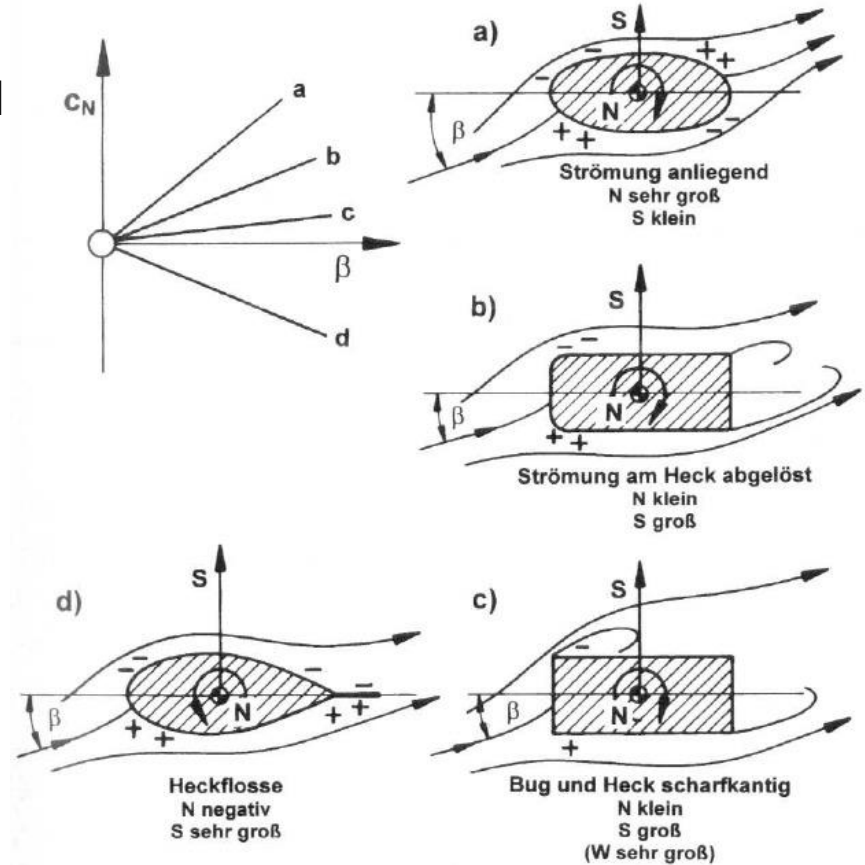
- Schiebewinkel β = Anstellwinkel α
- Überdruck auf der Windseite (luv)
- Unterdruck auf der Leeseite
- Seitenkraft (Fahrzeug) = Auftrieb (Flügel)
- Bei gut gerundeter Vorderseite (Draufsicht)
→ anliegende Strömung mit einer Saugspitze
vorne auf der Leeseite
→ Daraus folgt ein Gier- bzw. Nickmoment



Vergleich der Druckverteilung an einem Tragflügel mit einem PKW-Modell

Aerodynamik bei Schräganströmung

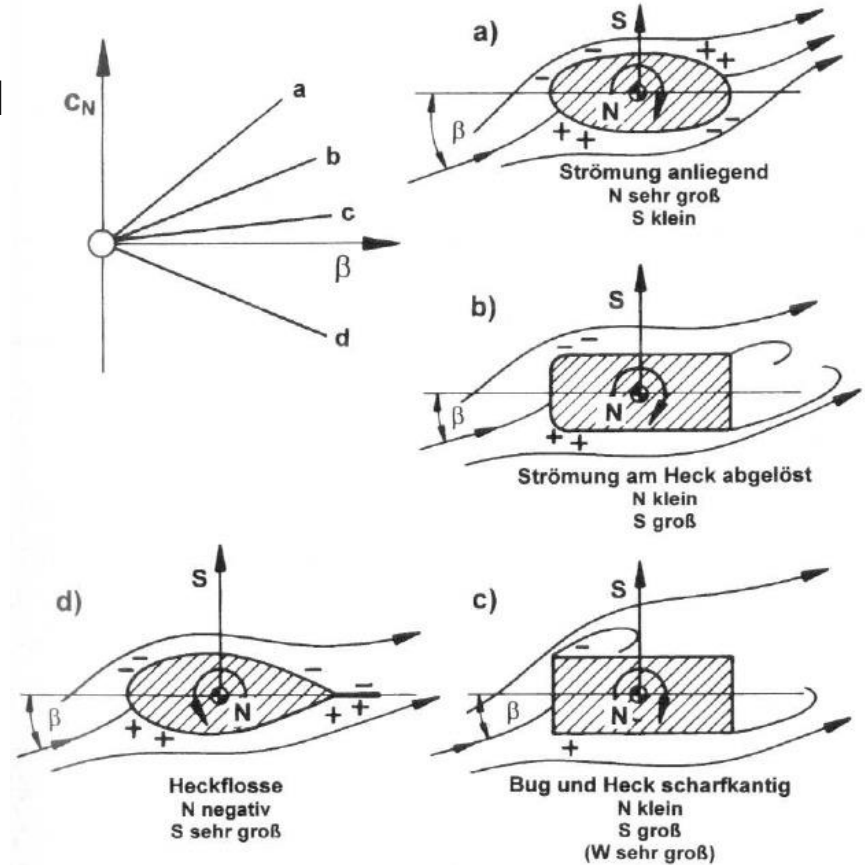
- Normalerweise ist das Giermoment instabil
→ versucht, das Fahrzeug aus dem Wind zu drehen: Vergrößerung des Schiebewinkels
- $d c_N / d \beta$ möglichst klein
- a) Strömungsgünstige Formgebung:
 - keine Ablösung, kleine Seitenkraft, großes Giermoment
- b) Scharfkantiges Heck:
 - Abriss, nahezu gleicher Druck in luv und lee am Heck, große Druckdifferenz vorne: kleineres Moment, große Seitenkraft
- a) und b) sind instabil



Abhängigkeit des Giermomentes vom Schiebewinkel

Aerodynamik bei Schräganströmung

- Normalerweise ist das Giermoment instabil
→ versucht, das Fahrzeug aus dem Wind zu drehen: Vergrößerung des Schiebewinkels
- $d c_N / d \beta$ möglichst klein
- c) Scharfer Bug und Heck:
 - Ablösung an der Nase, große Seitenkraft, verkleinertes Giermoment, aber sehr großer Widerstand
- c) ist instabil
- d) Heckflosse am schlanken Heck:
 - große Seitenkraft mit stabilem Giermoment, leider für PKW völlig ungeeignet, wg sehr starker Verlängerung des Fahrzeuges

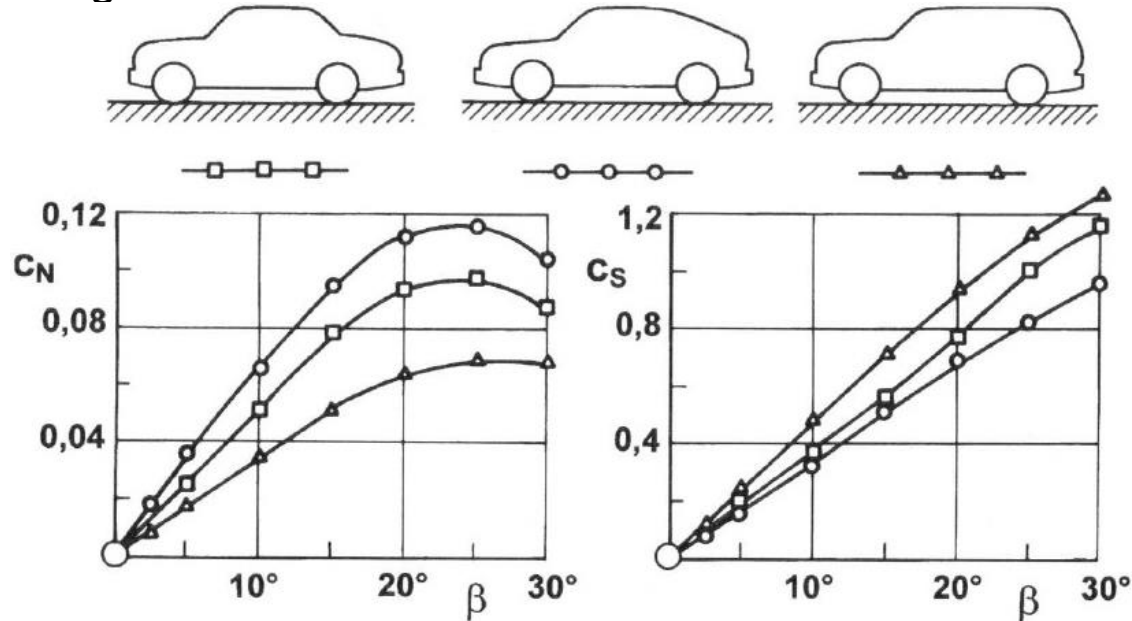


Abhängigkeit des Giermomentes vom Schiebewinkel

Aerodynamik bei Schräganströmung

Der Seitenriss ist ebenfalls wichtig für Seitenkraft und Giermoment

- Fließheck: kleine Seitenkraft, großes Giermoment
- Variant: große Seitenkraft, kleineres Giermoment, relativ unempfindlich gg Seitenwind
- Stufenheck: mäßige Seitenkraft und Giermoment



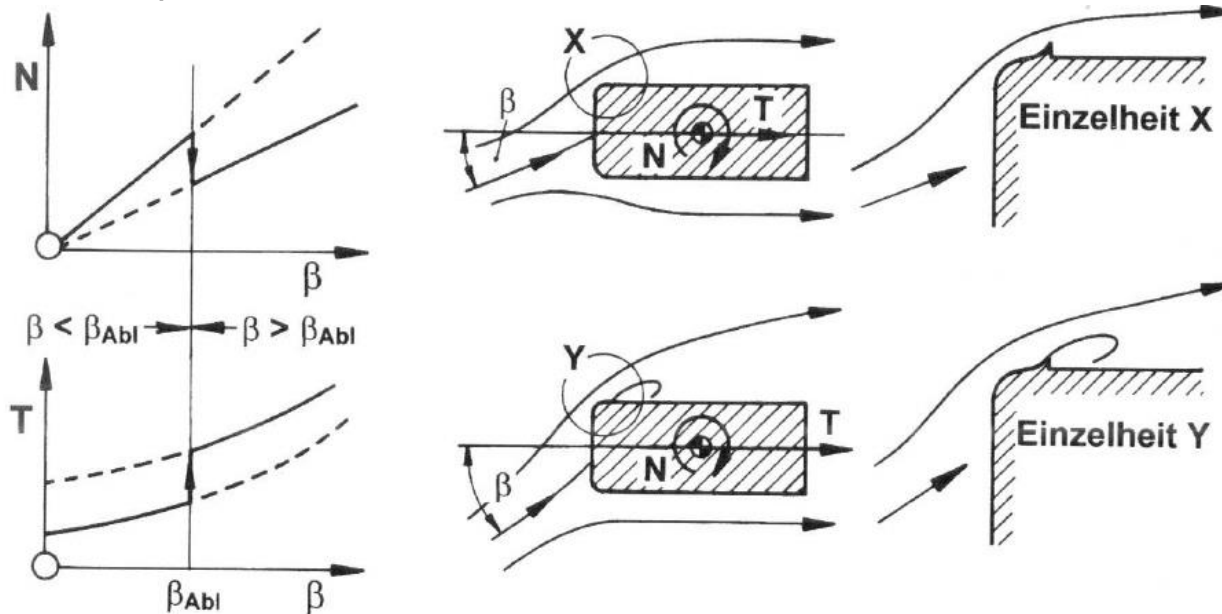
Aerodynamik bei Schräganströmung

Verringerung des Giermomentes durch willentliche Ablösung am Bug

Große Schiebewinkel treffen nicht oft auf, nur bei starken Böen

→ Der Widerstand ist dann nicht wichtig

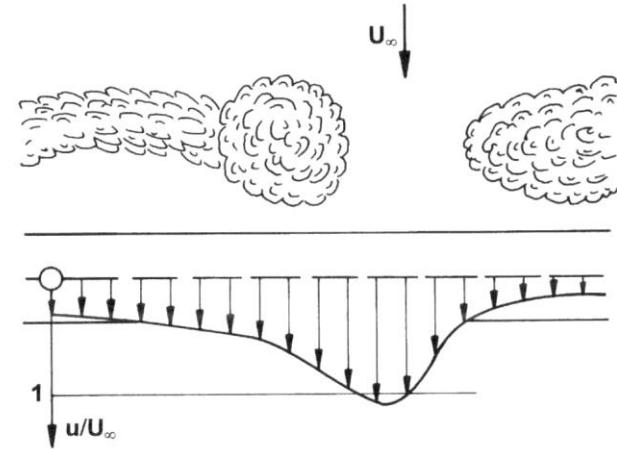
Optimal gerundeter Bug → anliegende Strömung und kleiner Widerstand bei kleinen Schiebewinkeln
Bei ca. 10° wirkt die Stolperkante: kleineres Giermoment, kleinerer Gradient, höherer Widerstand



Reale Zuströmung

Außer bei Windstille:

- atmosphärische Bodengrenzschicht
- verwundene Geschwindigkeitsprofile
- instationär:
 - Überholvorgänge
 - böiger Wind
 - Begegnung zweier Fahrzeuge
 - Seitenwindstrahlen
- Stochastische und deterministische Effekte
- In der Reihenfolge abnehmender Frequenz
- Umschlag laminar/turbulent, veränderte Ablösung
- veränderte Kräfte und Momente durch aeroelastische Effekte
- Anregung von Eigenfrequenzen (des Gierens) durch Böen
- Erzeugung von Windgeräuschen

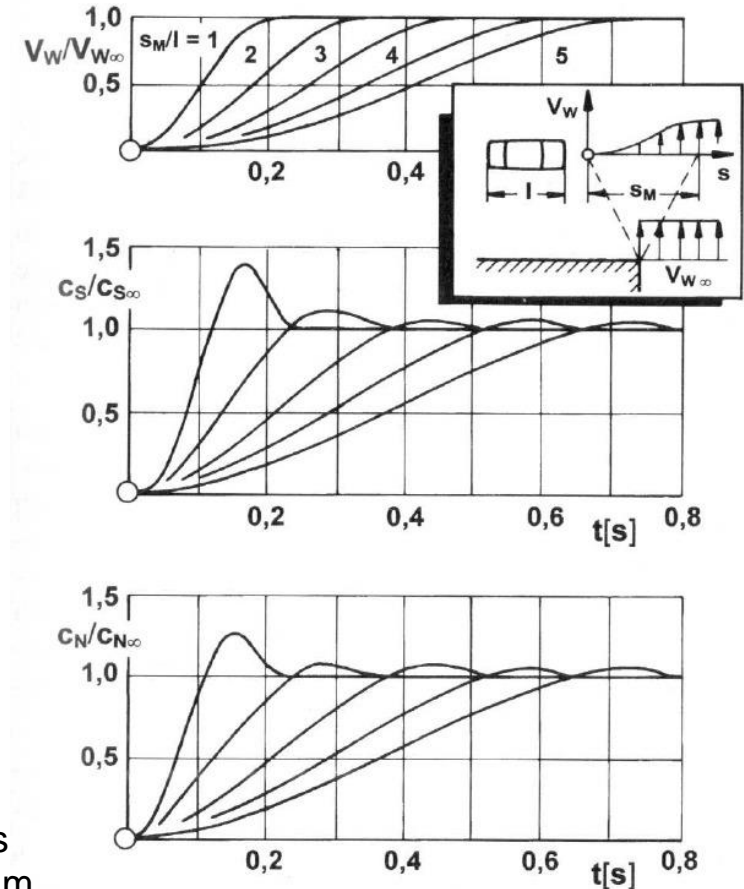


Reale Zuströmung

Idealisierte Verhältnisse im Kanal und auf dem Rechner

- stationär
- Grenzschicht ist unabhängig von z und unverwunden
- niedriger Turbulenzgrad
- Die Frage, wie groß die Fehler wegen der Idealisierung sind, kann nicht schlüssig beantwortet werden

Überschießen der Seitenkraft und des Giermomentes beim Eintauchen in einen Seitenwind



Strömung auf der Oberfläche

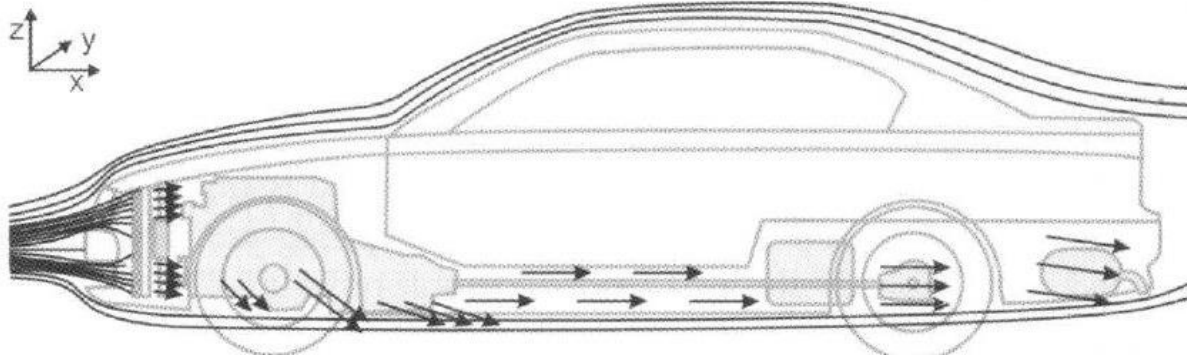
Nicht nur integrale Größen der Luftkräfte sind Teil der Fahrzeugaerodynamik

Auch Details sind wichtig:

- Platzieren und Gestalten von Öffnungen
- Ermittlung der Kräfte auf Einzelteile der Karosserie, Dichtigkeit
- Freihalten der Scheiben und Spiegel von Wasser und Schmutz
- Verminderung der Windgeräusche

Öffnungen:

- Kühlluft für Motor, Aggregate, Bremsen
- Verbrennungsluft für den Motor
- Frischluft für die Klimatisierung



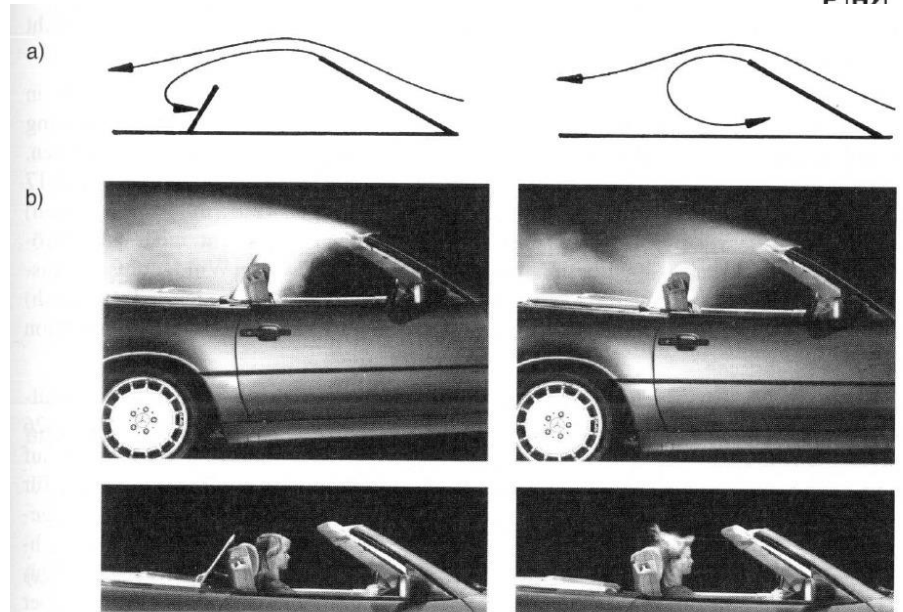
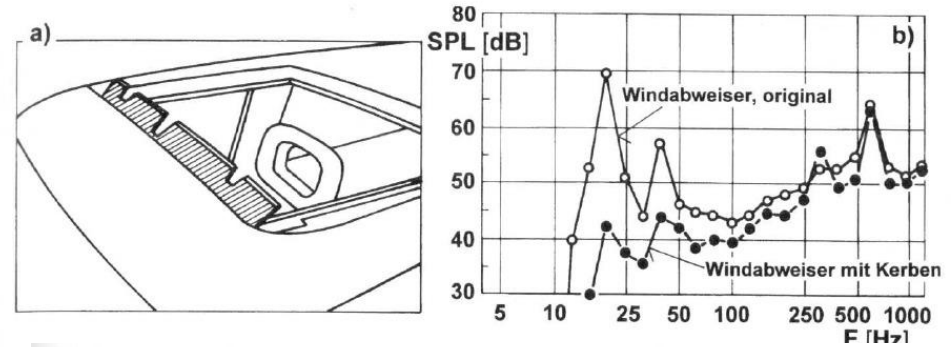
Öffnungen

Schiebedach

- großflächige Verbindung zwischen Innenraum und Außenströmung
- niederfrequente Schwingungen
- „Wummern“
- kann durch Kerben im Windabweiser beeinflusst werden
- kein oder nur leicht erhöhter Pegel bei höheren Frequenzen

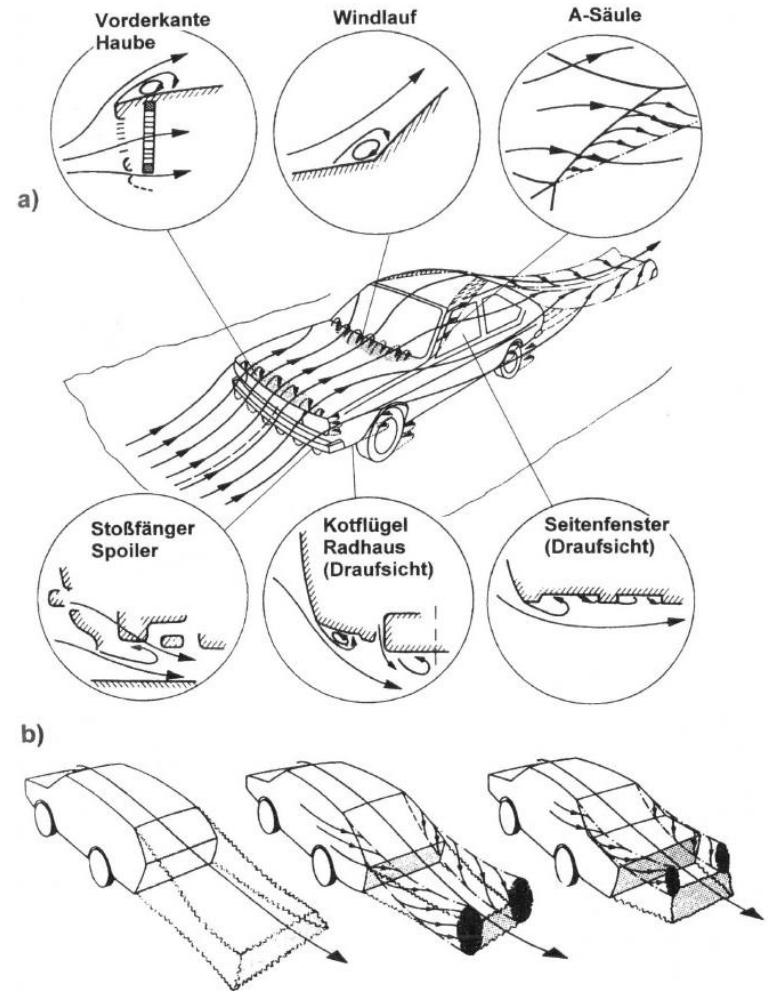
Kabriolets:

- Vermeidung der Rückströmung hinter den Sitzen
- Windschott



Windgeräusche

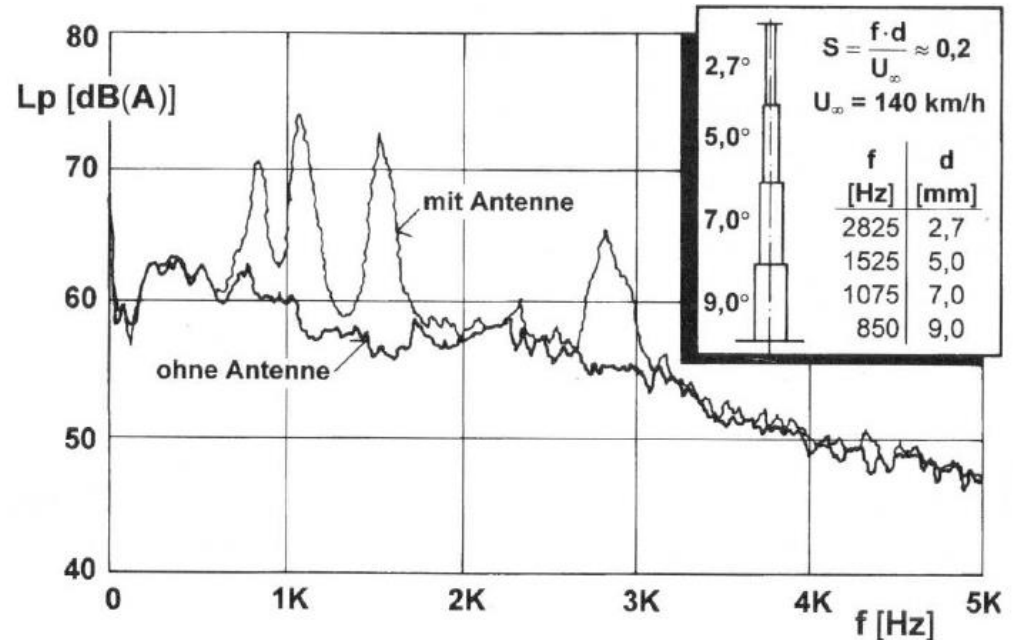
- werden immer wichtiger, da die Reifen und der Motor schon leiser geworden sind
- Innengeräusch ist wichtig für den Komfort, aber Außengeräusche werden immer wichtiger
- Leckagen
- Pfeifgeräusche → Dichtungen optimieren
- turbulente Grenzschicht → air frame noise ist unvermeidlich, daher Ablösungen lokalisieren und vermeiden
- A-Säulen
- Außenspiegel
- Optimierung der Form des Spiegels, Befestigung an der Karosserie. Nachlauf soll nicht auf die Scheiben treffen, denn Glas hat schwache Dämmung



Acoustics

- Einzeltöne sind besonders unangenehm
- entstehen an zylindrischen und prismatischen Teilen

$$Sr = \frac{f \cdot d}{U_\infty} = 0.2 \dots 0.3$$



Töne an einer Teleskopantenne, BMW

Mehrphasenströmung

Mehrphasenströmung

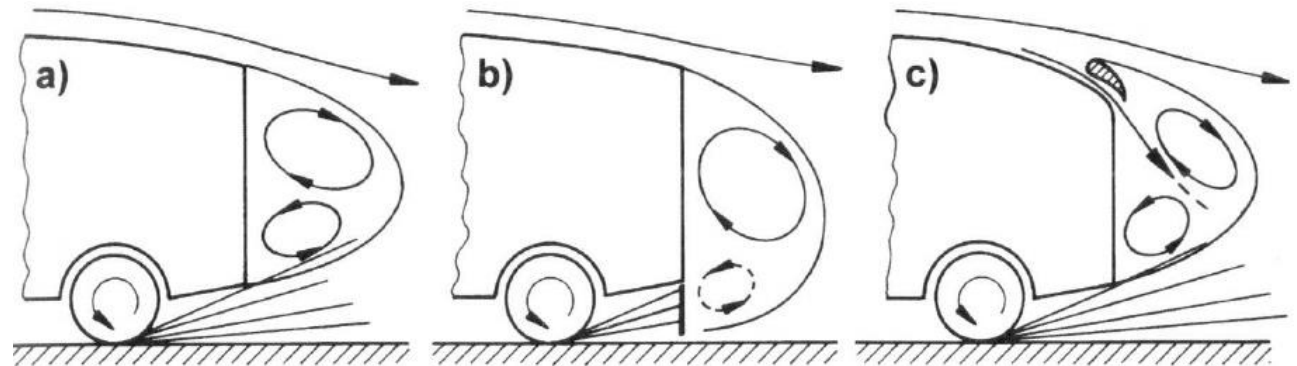
- Luft enthält Partikel: Tropfen und Schmutz
- Partikel sind schwerer als Luft
→ folgen nicht den Stromlinien
- lagern sich auf der Karosserie ab
- 2 Aspekte: Sicherheit + Aesthetik
- Integration von Fangleisten
- Zierleiste an der Heckscheibe



Photo: Daimler Chrysler AG

Mehrphasenströmung

- Vermeidung der Ablagerung von Schmutz ist schwierig
- sammelt sich am Bug in Staupunkten, auf Scheinwerfern
- Seitenwände, am Heck
- aerodynamische Kräfte sind nicht stark genug
- Scheibenwischer oder Wasserstrahlen werden eingesetzt
 - a) Schmutzeintragung in das Totwasser, Partikel werden vom Hinterrad aufgewirbelt, landen im Totwasser und lagern sich am Heck ab
 - b) Schutzschild über die gesamte Breite → Erhöhung des Widerstandes, wird bei Stadtbussen eingesetzt wg niedriger Geschwindigkeit
 - c) Umlenkflügel „Luftschleier“: weniger Verschmutzung im oberen Teil und an der Scheibe, aber mehr im unteren Teil (Kennzeichen); ein effektiver Flügel muss aus der Grenzschicht herausragen → höherer Widerstand



Mehrphasenströmung

- Fremdverschmutzung
- vor allem wichtig für PKW (je dichter am Boden, desto mehr sprüht es)
- Verkleidung sämtlicher un gelenkten Räder
- Platz für Vorderräder muss bleiben
- Vorteil: niedrigerer Widerstand bei Schräganströmung
- Gestaltung des Unterbodens



**Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit**



Fahrzeug- und Windkraftaerodynamik

Vehicle and windturbine aerodynamics

Dr.-Ing. A. Henze, Prof. Dr. sc. D. Krug

Institute of Aerodynamics, RWTH Aachen University

High Performance Vehicles

Inhalt

- Definition und Geschichte
- Fahrzeugklassen
- Aerodynamik, Fahrleistungen, Fahrverhalten
- Aerodynamik der Bauteile

Definition und Geschichte

Definition

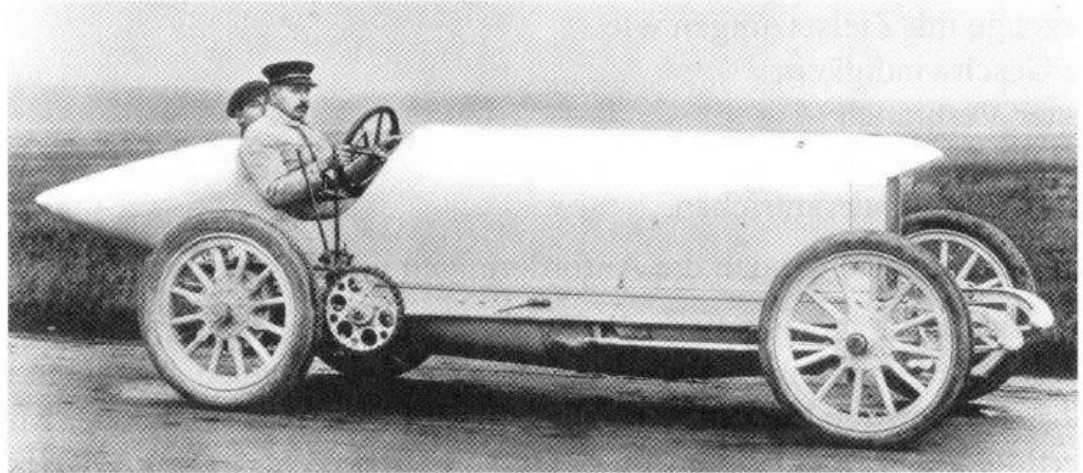
- Sportwagen:
 - Für den Straßenverkehr zugelassene Fahrzeuge
 - Hohe Fahrleistungen
 - Kaum Einschränkungen bzgl. der Alltagstauglichkeit
- Rennwagen:
 - Nur für Rennstrecken
 - Wettbewerbe
 - Prototypen
 - Aus Serienfahrzeugen abgeleitet
- Rekordfahrzeuge
 - Höchste Geschwindigkeit
 - Niedrigster Verbrauch
 - Größte Reichweite
 - Erprobung von Sonderantrieben (Solar, ...)

Definition und Geschichte

Geschichte

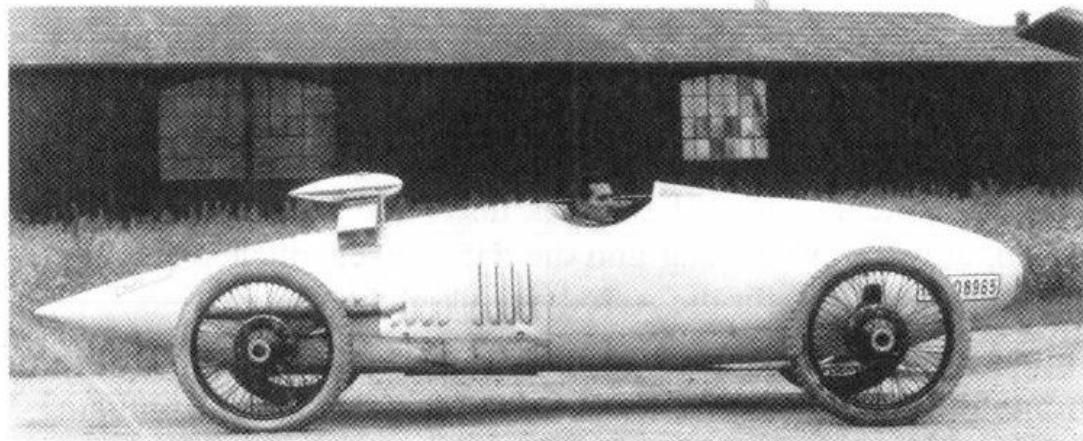
„Blitzen“ Benz, 1911

- 21.5 l, 200 hp, > 200 km/h
- Spitzkühler
- schlanker Rumpf
- spitzes Heck
- Fahrer und Beifahrer
- freistehende Räder



Tropfenwagen, Benz, 1923

- freie Räder
- glatte Unterseite
- l/d ~ 6.8 schlanker Körper

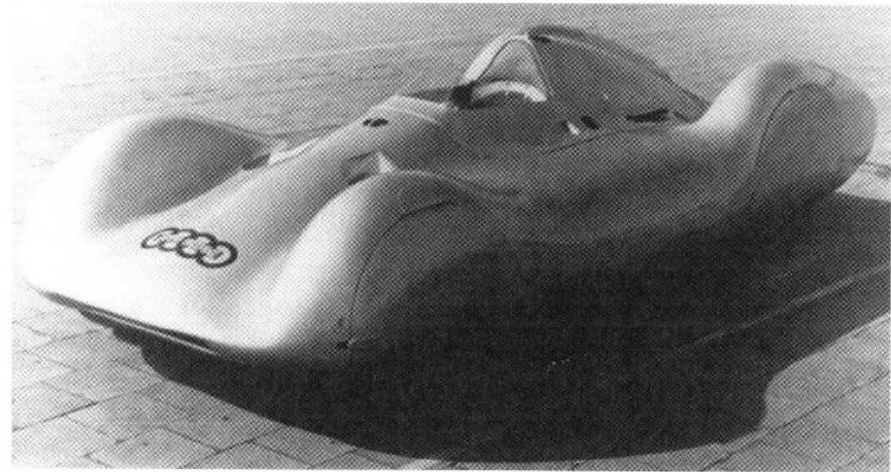
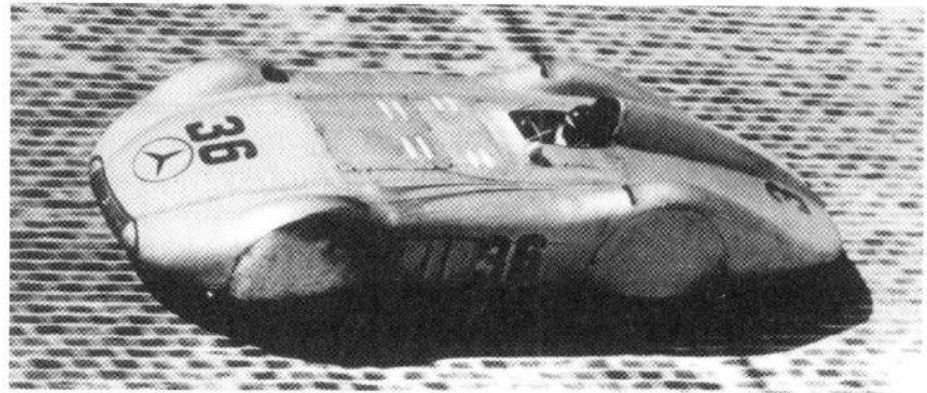


Definition und Geschichte

Geschichte

stromlinienförmiger Rennwagen

- vollverkleidete Räder
- Daimler-Benz, 1937
- Auto Union, 1937



Definition und Geschichte

Geschichte

Mercedes 300 SLR, 1955

- 24 h von Le Mans
- Bremsklappe am Heck
- Zunahme von c_W von 0.44 auf 1.09



Daimler-Benz AG



http://www.uniquecarsandparts.com.au/images/heritage/mercedes_300SLR.jpg

Porsche Carrera 6 Langheck

- 220 PS, 265 km/h
- $c_W = 0.33$



CD Peugeot 66

- 105 PS, 245 km/h



- niedriger Widerstand
- geringe Fahrstabilität
- limitierte Kurvengeschwindigkeit

Definition und Geschichte

Geschichte

Rennwagen mit Flügel für negativen Auftrieb= Abtrieb



Chaparral 2C

http://www.histomobile.com/dvd_histomobile/usa/784/1965_Chaparral_2C.htm <http://www.metaphorsinmotion.com/posts/16-Jim-Hall-s-New-Chaparral-2-C>



<http://www.auto-power-girl.com/high-resolution-wallpapers/porsche-celebrates-40th-anniversary-of-porsche-917/1973-porsche-917-30-sypder.jpg>

Porsche 917/30, 1973. 1100 hp, 370 km/h, $c_W = 0.57$



<http://www.porsche.com/germany/sportandevents/motorsport/history/historical-gallery/?gtabindex=1&gitemindex=7>

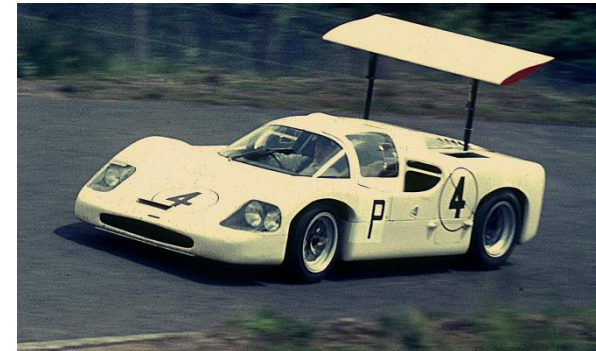
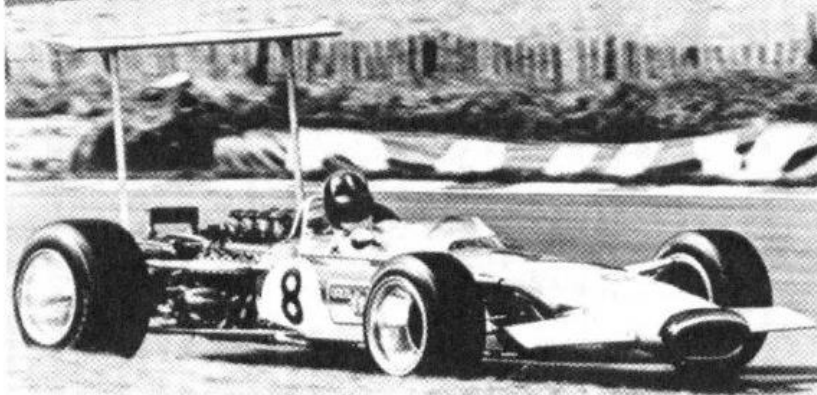
Porsche 935/78, 1978, 845 hp. 370 km/h

Definition und Geschichte

Geschichte

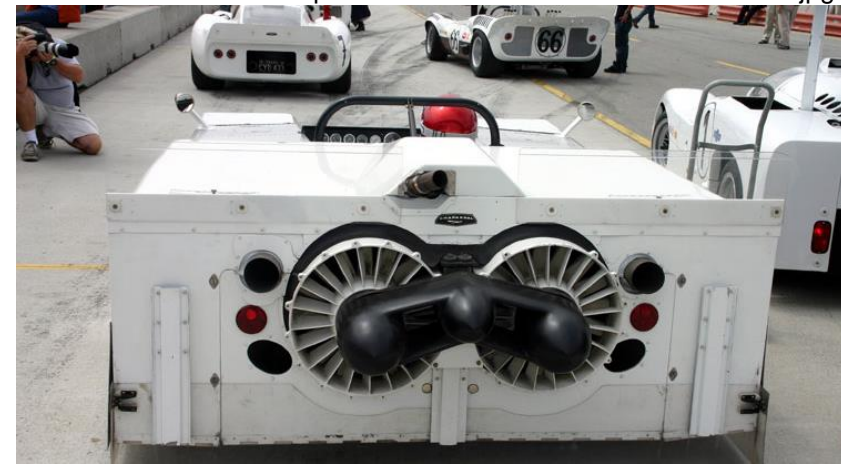


<http://1.bp.blogspot.com/-0VPU0wW-ifs/TV7-z3hV7a/AAAAAAAAAGGM/88quDXQqg9Q/s1600/Chaparral2E.jpg>



http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2d/Chaparral_2F_-_Mike_Spence_-_1967.jpg

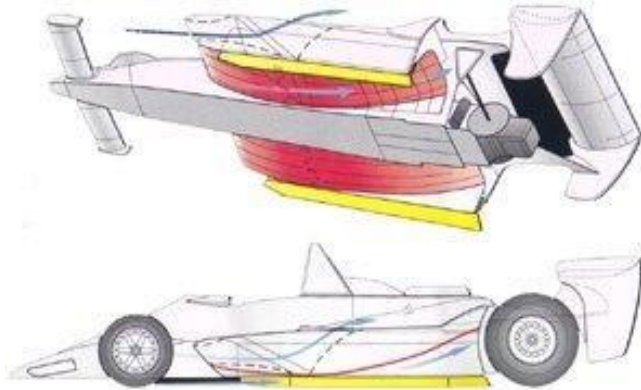
<http://ashcom.homestead.com/RMH3257W.jpg>



Definition und Geschichte

Geschichte

Bodeneffekt



<http://www.ddavid.com/formula1/lotus79.htm>

http://www.more.racing-history.de/Porsche_962_1988.jpeg, 385 km/h



<http://www.ddavid.com/formula1/images/lotus79b.jpg>

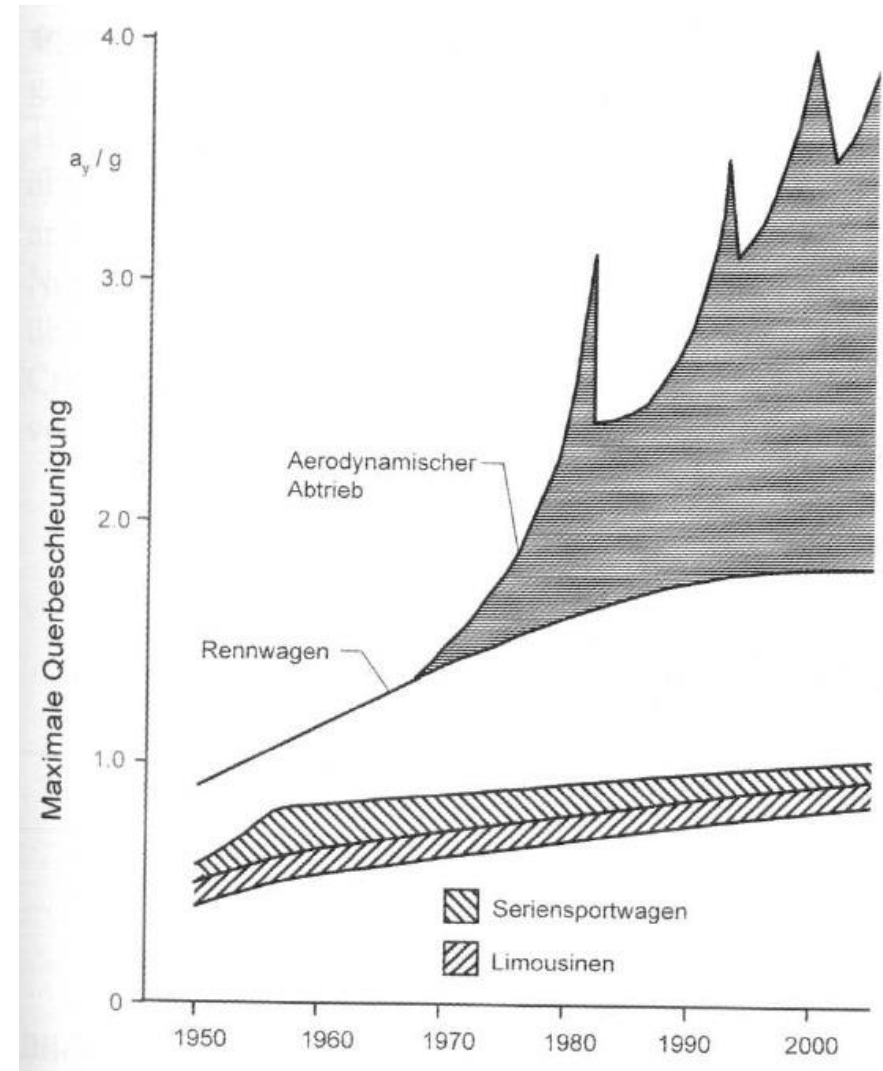
Heckflügel mit bis zu 9 Elementen
Maximum von 3 Elementen ist erlaubt



Definition und Geschichte

Geschichte

- Zeitliche Entwicklung der maximalen Querbeschleunigung von Limousinen, Sport- und Rennwagen

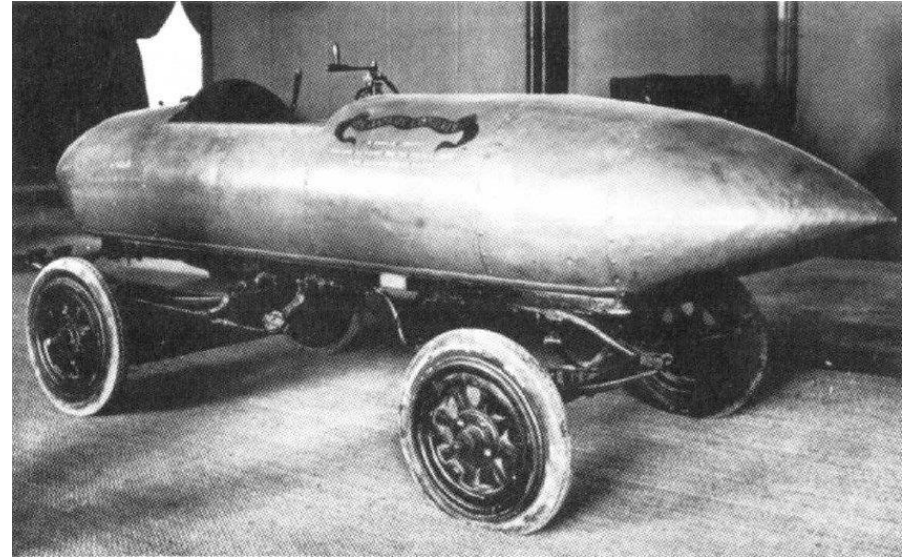


Definition und Geschichte

Rekordfahrzeuge

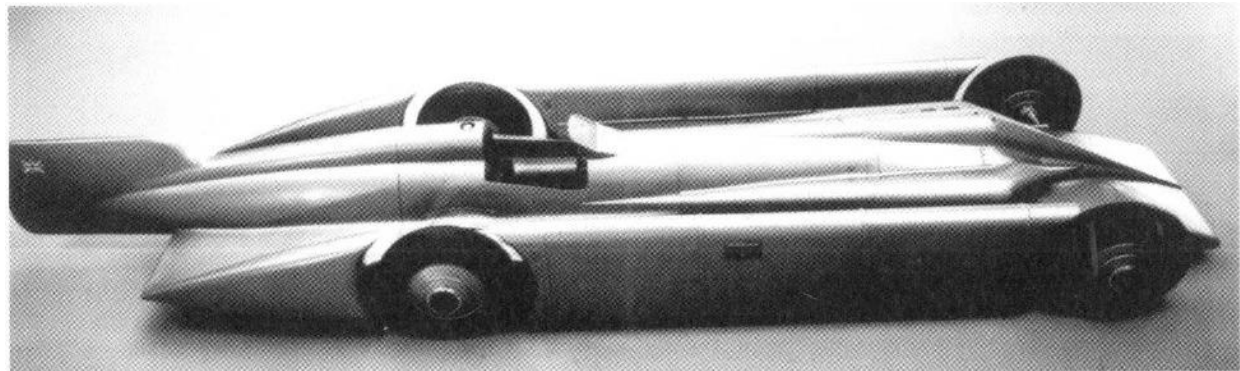
Erstes Fahrzeug mit mehr als 100 km/h

- Jenatzky, 1899
- Elektromotor
- $l/d \sim 4$
- zigarrenförmiger Rumpf
- nicht optimierter Unterboden
- nicht integrierter Fahrer



Golden Arrow, 1929

- 372 km/h
- Senkrechte Heckflosse
- Unterbodenaerodynamik



Definition und Geschichte

Rekordfahrzeuge

Railton Mobil Special, 1947, bis in die 60er

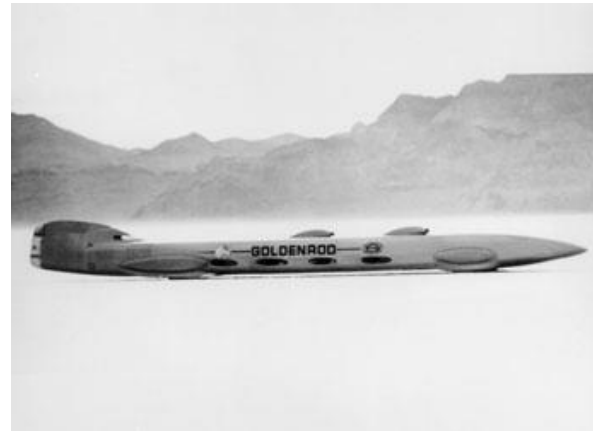
- 634.4 km/h = 394.2 mph



<http://other-roads.blogspot.com/2009/07/railton-napier-mobil-special-merdeka.html>

Golden Rod, 1965

- 658.649 km/h
- 409.3 mph
- Weltrekord für rädergetriebene Fahrzeuge



<http://www.motoringpicturelibrary.com/docs/hi-mpl340001197c.jpg>



Definition und Geschichte

Rekordfahrzeuge



<http://www.jetblack.co.nz/site/cms/lsr-history>

Raketentriebenes Fahrzeug „Blue Flame“
1001,671 km/h, 1970



http://artschoolvets.com/blog/superblast/files/2009/03/the_blue_flame.jpg



<http://www.jetblack.co.nz/site/cms/lsr-history>

Thrust SSC Super Sonic Car 2 turbo jet engines
1227.985 km/h



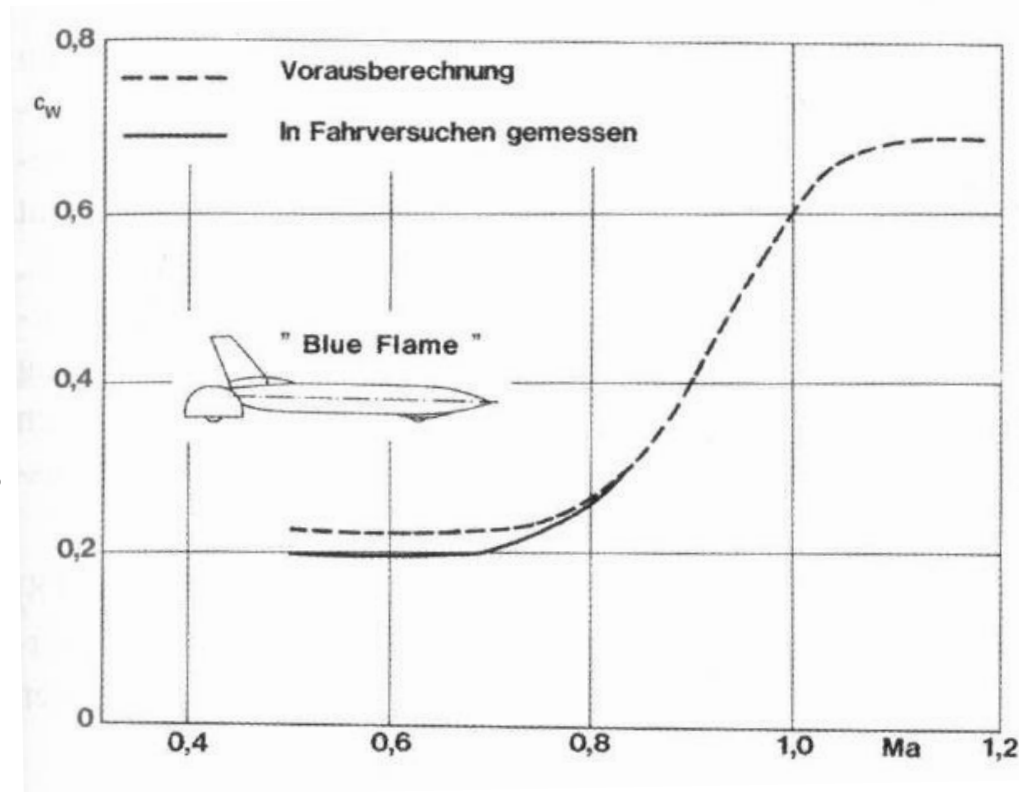
Definition und Geschichte

Schallnahe Geschwindigkeiten

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{1}{2}(\gamma - 1)\text{Ma}^2$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left(1 + \frac{1}{2}(\gamma - 1)\text{Ma}^2\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}$$

- Kompressibilität
- Verlagerung des Kraftangriffspunktes
- Starker Anstieg des Widerstandes



Definition und Geschichte

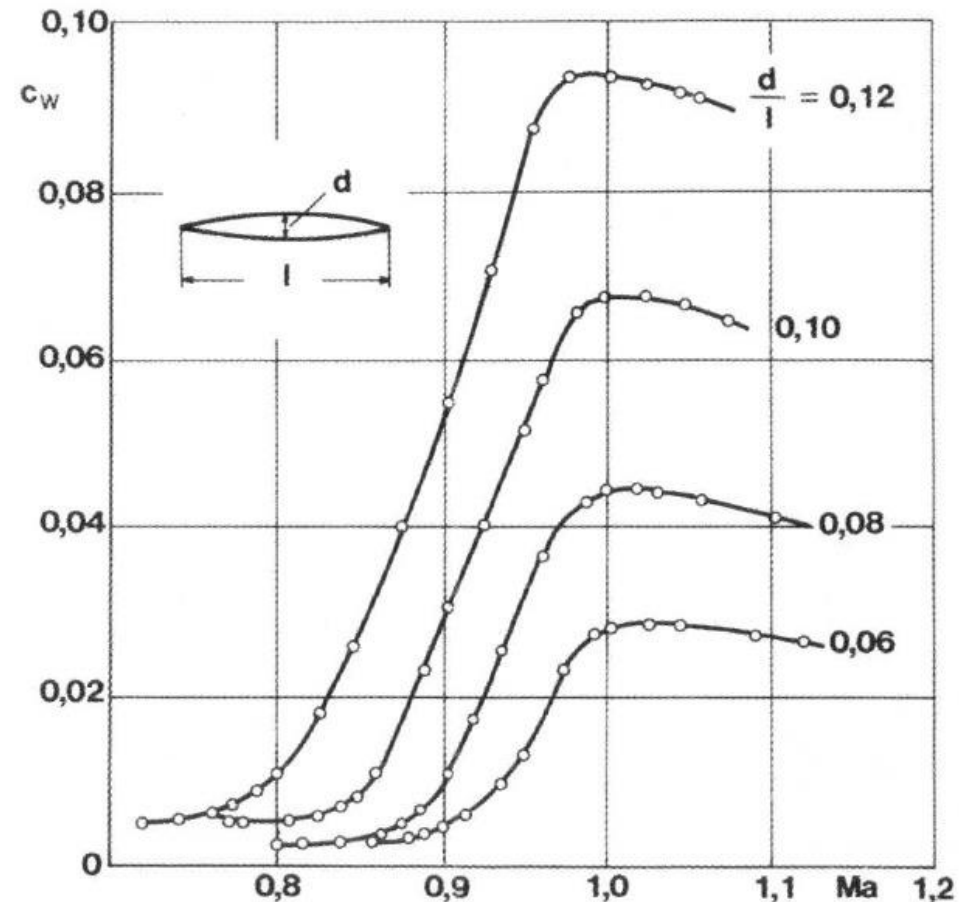
Schallnahe Geschwindigkeiten

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{1}{2}(\gamma - 1)\text{Ma}^2$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left(1 + \frac{1}{2}(\gamma - 1)\text{Ma}^2\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}$$

Auftrieb wurde bei allen Geschw. vermieden

- Beim Schalldurchgang wird der negative Druck positiv und es entsteht Auftrieb
- Unterschall: Beschleunigung → Unterdruck
- Überschall: schräger Stoss → Überdruck
- Kann instabil werden



Definition und Geschichte

Andere Rekordziele

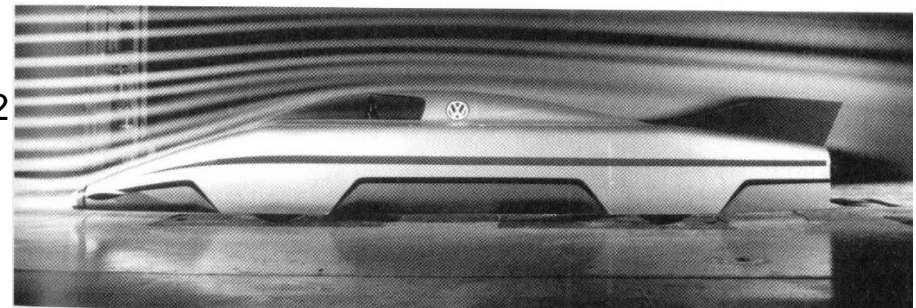
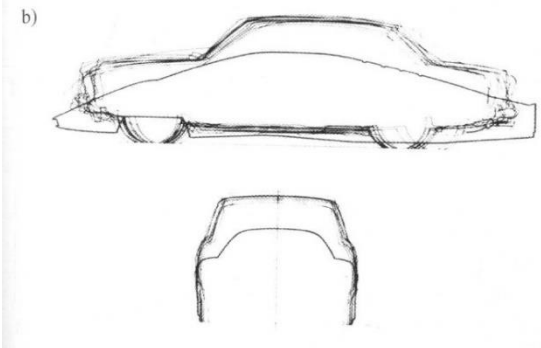
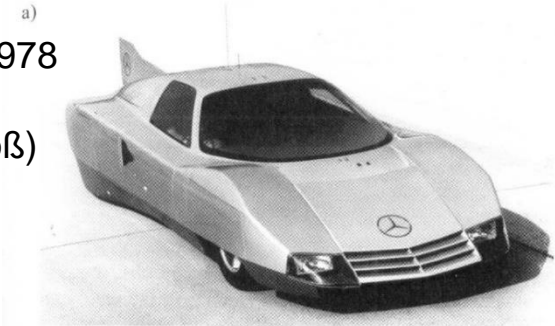
- Optimierter c_W
- Erreichen einer bestimmten v_{\max} mit einem bestimmten Antrieb
 - Dieselmotor
 - Wankel
 - Turbomotor
 - Turbo diesel
 - Solarmobil
- minimierter Kraftstoffverbrauch
- maximale Reichweite mit einer gegebenen Menge an Treibstoff

ARVW Aerodynamic Research Volkswagen, 1982

- $l/h = 5.93$, $c_W = 0.15$
- Strinfläche $A = 0.73 \text{ m}^2$
- 173 PS: 360 km/h
- 13.6l/100km Diesel

C111 Mercedes Benz, 1978

- $c_W = 0.18$
- $l/h = 4.94$ (relativ groß)
- Integrierte Räder

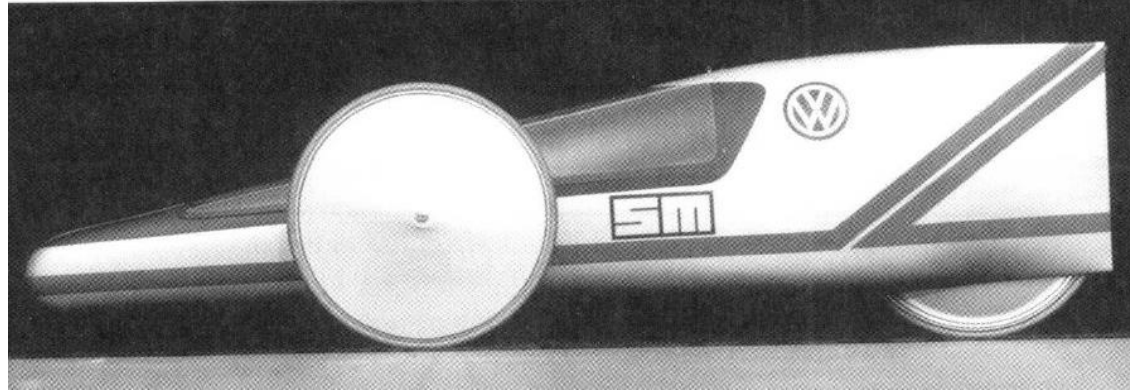


Definition und Geschichte

Andere Rekordziele

“Sparmobil” 1982, Volkswagen

- $c_W = 0.15$, $A = 0.32$
- 1491.3 km mit 1 l Diesel
- average velocity: 16.9 km/h



Ein-Liter Auto

- 3-Rad
- $l/h = 3.56/1.1 = 3.2$
- $c_W = 0.159$, $A = 1 \text{ m}^2$
- 2 Personen
- 237 km, 95 km/h, 0.99 l Diesel/100km



Definition und Geschichte

Andere Rekordziele

- gute Übereinstimmung für den Widerstand
- keine gute Übereinstimmung für Auftrieb

	Messung 1 : 1	CFD
c_W	0,213	0,214
$c_W \cdot A \text{ m}^2$	0,290	0,291
c_{AV}	-0,111	-0,255
c_{AH}	0,073	0,025

- Diesel 1.3 l CDTL, 110 PS
- $v_{\max} = 250 \text{ km/h}$
- 2.5 l/ 100km



<http://www.autoplenum.de/Bilder/P/p0014821/OPEL/OPEL-Speedster-2-0-Turbo--2003-2005-.jpg>

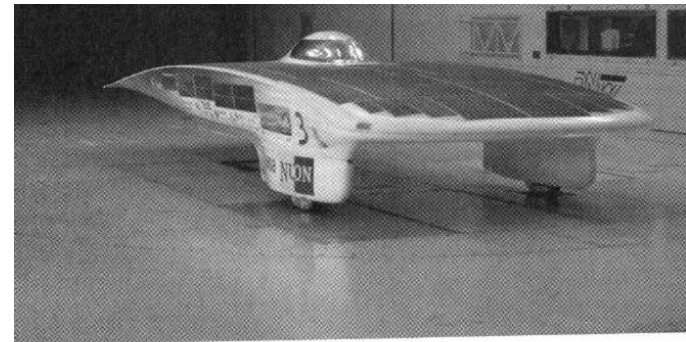


http://www.netcarshow.com/opel/2002-eco_speedster_concept/1024x768/wallpaper_02.htm

Definition und Geschichte

Solarmobile

- Lange laminare Lauflänge
 - Spirit of Biel-Bienne, TH in Switzerland
 - $A = 1.1 \text{ m}^2$
 - $c_W = 0.105$
 - Solarzellenoberfläche 7.9 m^2
-
- Flying dutchman
 - University Delft, Rotterdam
 - 3010 km
 - mittlere Geschwindigkeit 96.8 km/h
 - $v_{\text{max}} : 110 \text{ km/h}$

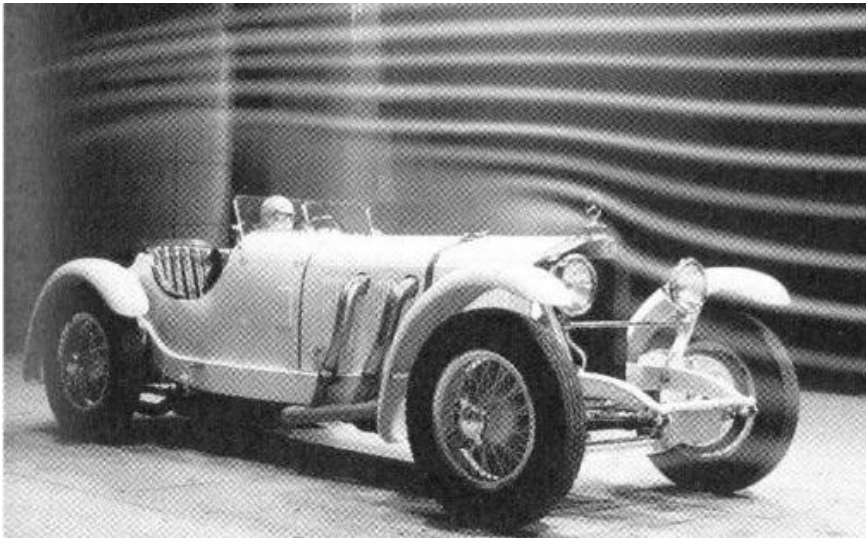


Definition und Geschichte

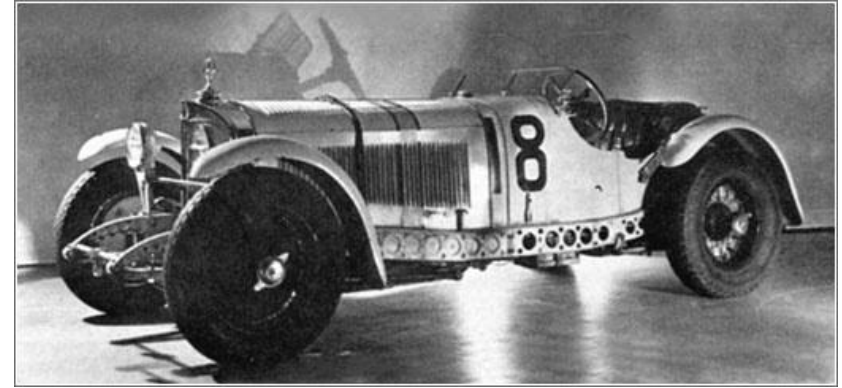
Sportwagen

Vor dem Krieg

- große Kühler
- separate Korflügel
- nicht aerodynamisch optimiert

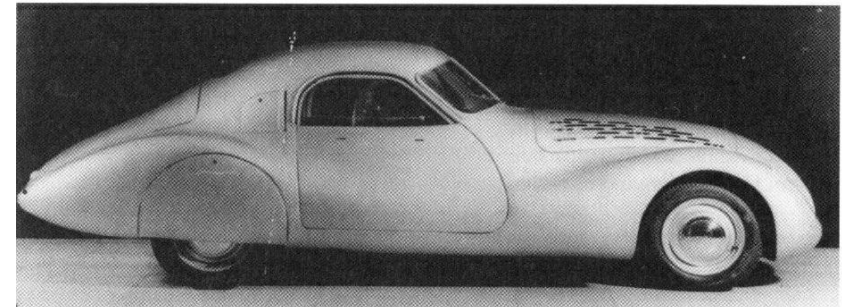


Beispiel: Mercedes-Benz 720 SSK, 1928
 $A = 1.57 \text{ m}^2$, $c_w = 0.91$, 180 km/h



<http://www.kompressor-club.de/fahrzeuge.htm>

- Rudolf Caracciola, Gewinner der 1000 Meilen, 1931
- Strassenrennen in Norditalien
- Gewichtersparnis: 125 kg



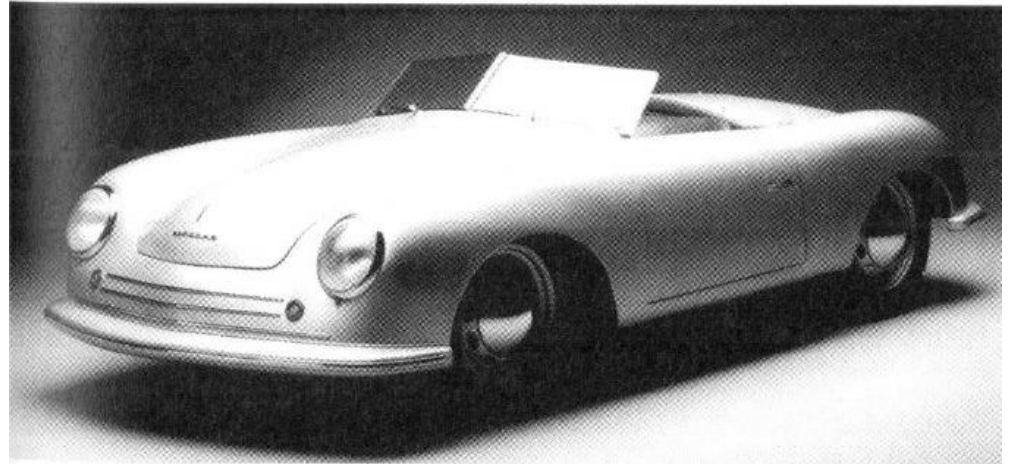
DKW basiert auf F8, 1939
Stromlinienförmige Karosserie Nur 3 Exemplare

Definition und Geschichte

Sportwagen

Porsche 356, 1948

- offene Version
- $c_W = 0.46$, $A = 1.41 \text{ m}^2$



Porsche 356 A, 1950

- geschlossene Version
- $c_W = 0.28$, $A = 1.68 \text{ m}^2$
- $c_A = 0.26$, relatively high,
- tolerierbar, weil die Höchstgeschwindigkeit nicht so hoch war (140 km/h)



Definition und Geschichte

Sportwagen

Porsche 911 Turbo, 1983

- 300 hp
- 260 km/h
- $c_W = 0.4$
- $A = 1.87 \text{ m}^2$



http://www.elferhelfer.com/Galerie/1983gal/magic/1983_turbo_magic.htm

Erkenntnisse aus der Rennaerodynamik werden auch in Sportwagen eingesetzt

- Porsche 959, 1987
- Integrierter Heckspoiler
- verkleideter Unterboden
- $c_W = 0.31$
- $A = 1.92 \text{ m}^2$

http://www.conceptcarz.com/view/photo/5282,762/1987-Porsche-959_photo.aspx



Definition und Geschichte

Sportwagen

Heckspoiler wird bei höheren Geschwindigkeiten automatisch ausgefahren

Ferrari F60 "Enzo"

- verstellbarer Frontdiffusor
 - beweglicher Heckspoiler
- Aerodynamische Balance wird bei verschiedenen Geschwindigkeiten geregelt

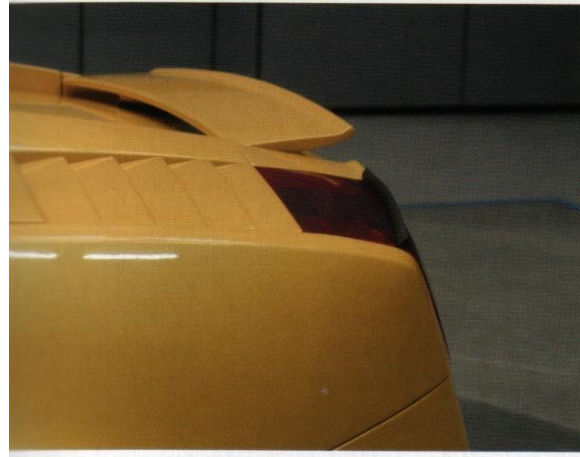
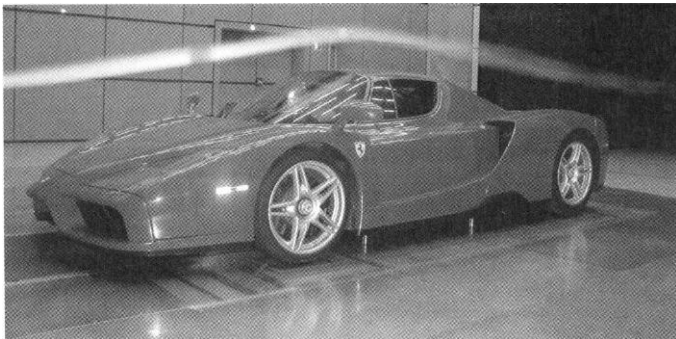


Bild 8.35:

Lamorghini Galardo, Modelljahr 2003
im Aeroakustik Windkanal von Audi;

Spoiler eingefahren:

$$c_w = 0,331;$$

$$c_{AV} = 0,036;$$

$$c_{AH} = 0,137;$$

Heckspoiler ausgefahren:

$$c_w = 0,352;$$

$$c_{AV} = 0,039;$$

$$c_{AH} = 0,042.$$

Fotos: Automobili Lamborghini.

Fahrzeugklassen

Fahrzeugklassen – 3 Gruppen

1.) Freistehende Räder

- Formula 1
- Formel 3
- Formel 3000
- Indy racing league (IRL)
- Champ Cars (CART)

2.) Tourenwagen

- Deutsche Tourenwagen-Masters (DTM)
- European touring car cup (ETTC)
- ...
- Ausgangspunkt sind Limousinen oder Coupes
- mehr oder weniger starke Modifikationen je nach Reglement

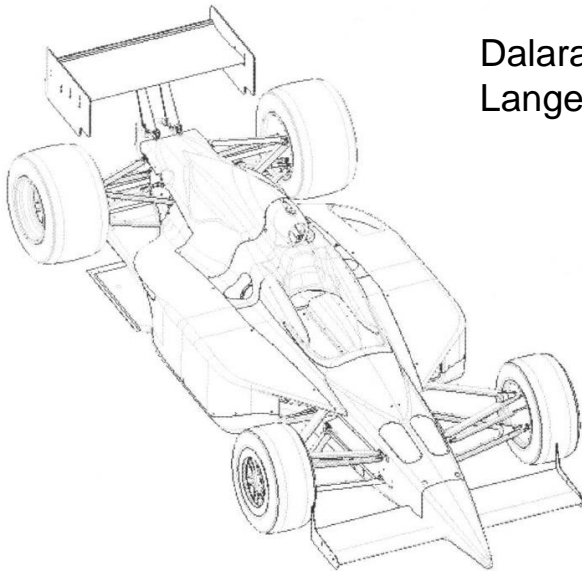
3.) Langstreckenwagen

- 2 Stunden Sprintrennen
- 24 Stunden Le Mans Langstreckenklassiker
- ...
- Unterteilung in Klassen
 - Prototypen
 - Grand Touring Cars

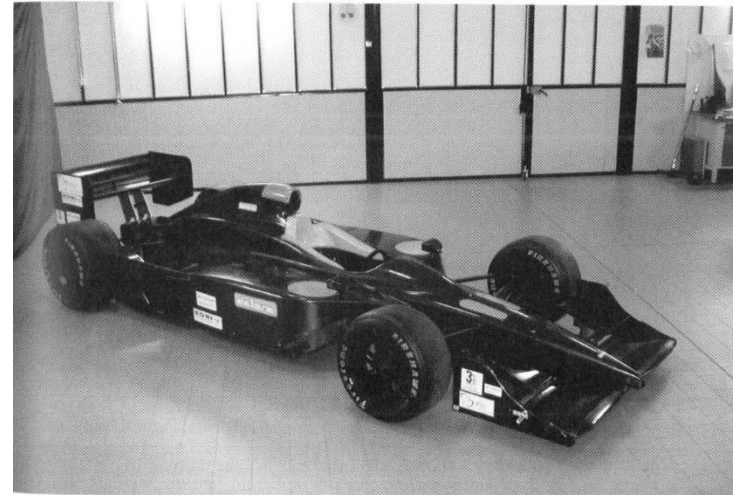
Fahrzeugklassen

Fahrzeugklassen

Formula 1 Mercedes McLaren, 2005



Dalara Indianapolis
Langes Oval



Dalara IRL, kurzes Oval, 2003

Dalara Formula 3, 2001



Fahrzeugklassen

Fahrzeugklassen

Zur Vergleichbarkeit

- $A = 2 \text{ m}^2$
- $c_w = 0.33$
- $c_A = 0$
- $m = 1400 \text{ kg}$
- $P = 500 \text{ PS}$

Audi, 2014, Sieger in Le Mans

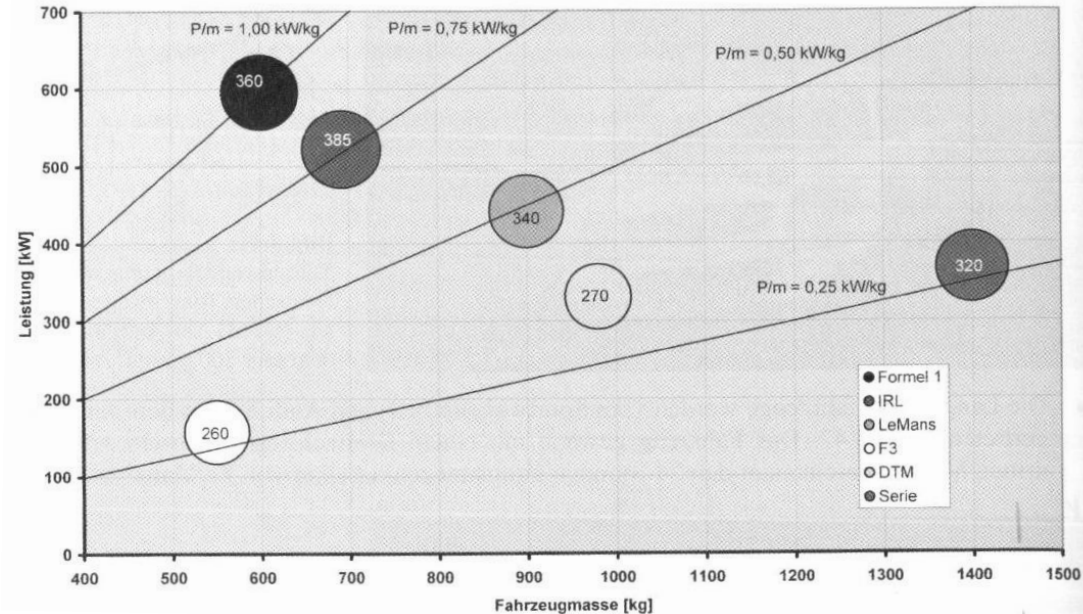


Abt Audi TTR, 2002, Meisterfahrzeug aus der DTM

Fahrzeugklassen

Fahrzeugklassen

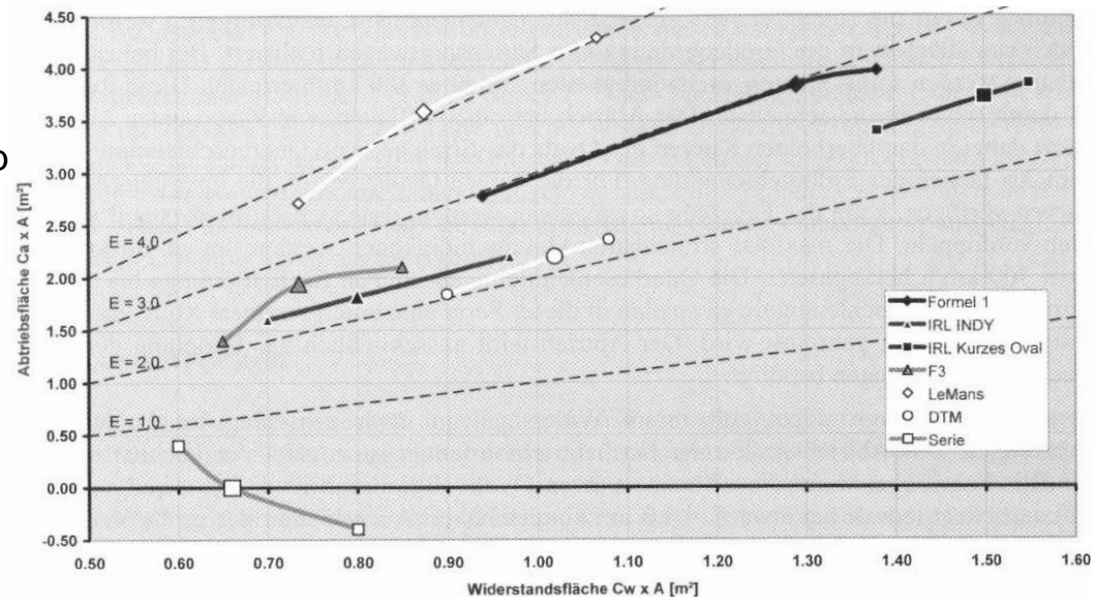
- generisches Fahrzeug
 - $P/m = 0.25 \text{ kW/kg}$
 - $v_{\max} = 320 \text{ km/h}$
- Formula 3
 - ähnliches Leistungs-Masse-verhältnis
 - weniger Leistung \rightarrow weniger v_{\max}
- DTM:
 - leicht größerer P/m
 - hoher Widerstand \rightarrow weniger v_{\max}
- Langstreckenfahrzeug
 - gutes P/m -Verhältnis
 - für hohe Durchschn.-Geschw ausgelegt
 - bis zu 340 km/h
- IRL cars:
 - sehr gutes P/m
 - höchste Geschwindigkeit wg. kleinem
 - Widerstand in den Ovalen
- Formel 1
 - größtes P/m
 - leicht geringeres v_{\max}



Fahrzeugklassen

Fahrzeugklassen

- generischer Wagen
 - typische Werte für gute Sportwagen
- Formel 3
 - ähnlicher W.-stand aber geringer Auftrieb
 - besser in Kurven u. beim Bremsen
- DTM
 - deutlich höherer Widerstand
 - Reglement
 - ❖ vorgeschriebene Flügel
 - ❖ kaum Variationen möglich
 - höheres P/m
- IRL
 - langes Oval: Widerstand ähnlich wie Serie, hoher Abtrieb
 - Querbeschleunigung: 3.5 g
 - kurzes Oval: Werte sind 2 mal höher, Beschl: 4.5 g



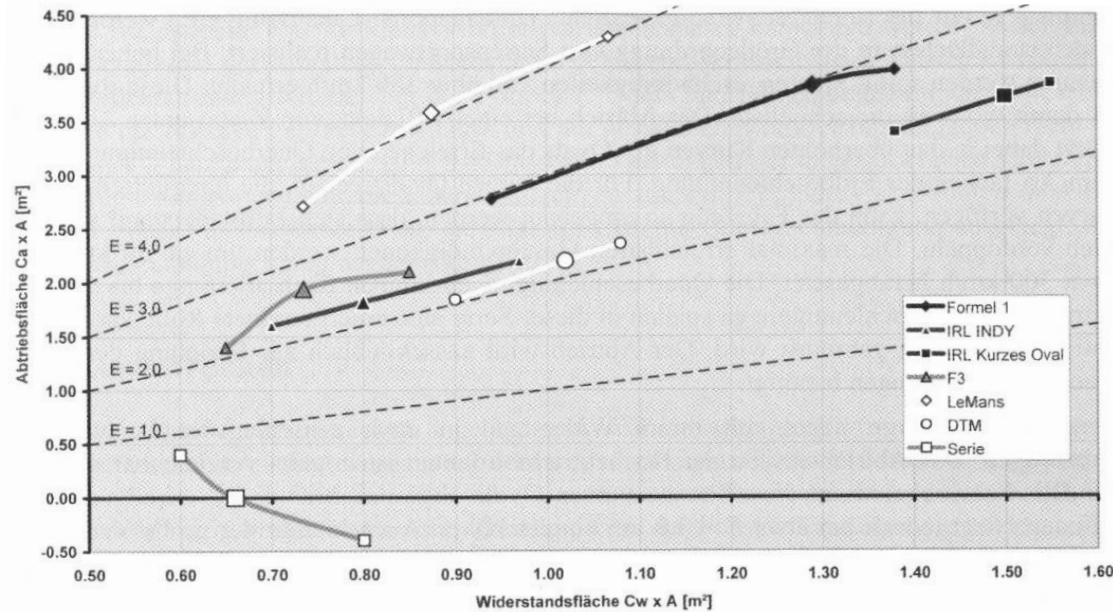
Luftwiderstandsflächen und Auftriebsflächen für verschiedene Klassen

E: Effizienz = Auftrieb/Widerstand

Fahrzeugklassen

Fahrzeugklassen

- Formel 1
 - Widerstand zwischen IRL
 - höhere Effizienz
 - höherer Verstellbereich
 - hohe Querbeschleunigung: 3 g
 - hohe Längsbeschleunigung
 - beim Bremsen: 4g
- Langstreckenfahrzeuge
 - Widerstand wie bei Formula 1
 - Ausgelegt für die schnelle Le Mans-Strecke
 - weniger Beschleunigung als in der Formel 1

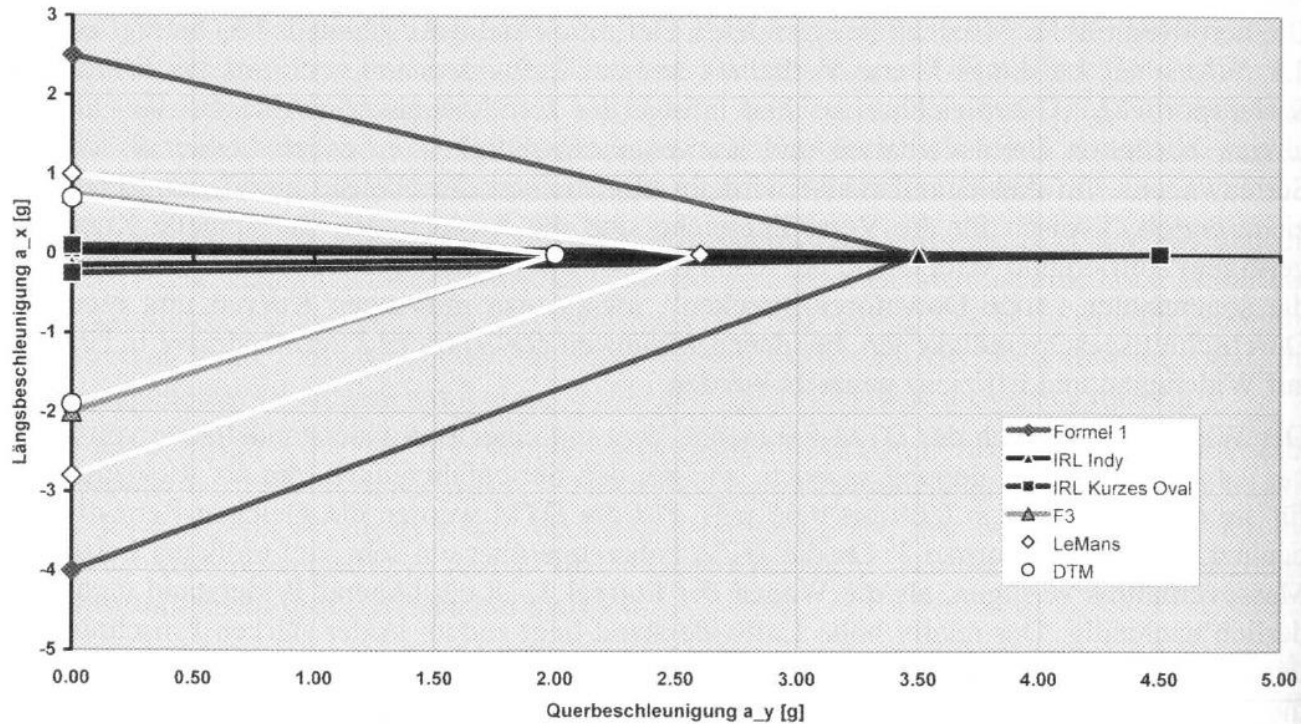


Luftwiderstandsflächen und Auftriebsflächen für verschiedene Klassen

E: Efficiency = Lift/Drag

Fahrzeugklassen

Fahrzeugklassen

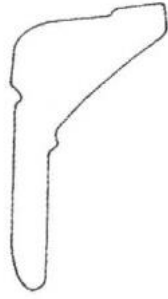

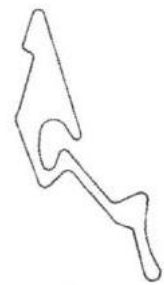



Längs- und Querbeschleunigung

Fahrzeugklassen

Rennstrecken

- Monza: 75 % Volllast
- Monte Carlo
 - langsamste Kurve, 40 km/h
 - welliger Kurs
 - Bodeneffekt bringt nichts
 - höherer Abtrieb mit den Flügeln
 - größerer Widerstand
- Fahrbarkeit
- Verzögerungsvermögen
- Überholmöglichkeiten
- Reifen
- Optimierung von Abtrieb und Widerstand
- Veränderungen während des Rennens sind nur geringfügig erlaubt
- generische Strecke (3 Kurven and 3 Geraden)
- Variation der Kurvenradien und Längen
- längere Geraden → weniger Abtrieb
- große Kurvenradien → mehr Abtrieb
- nicht zu großer Widerstand (zusätzlicher Boxenstop)

	Monza	Monte Carlo	Nürburg	Hockenheim
Rennstrecke				
Länge km	5,973	3,340	5,148	4,574
V_{durch} km/h	250	155	190	194
V_{max} km/h	359	298	310	310

Aerodynamik, Fahrleistungen und Fahrverhalten

Aerodynamik, Fahrleistungen und Fahrverhalten

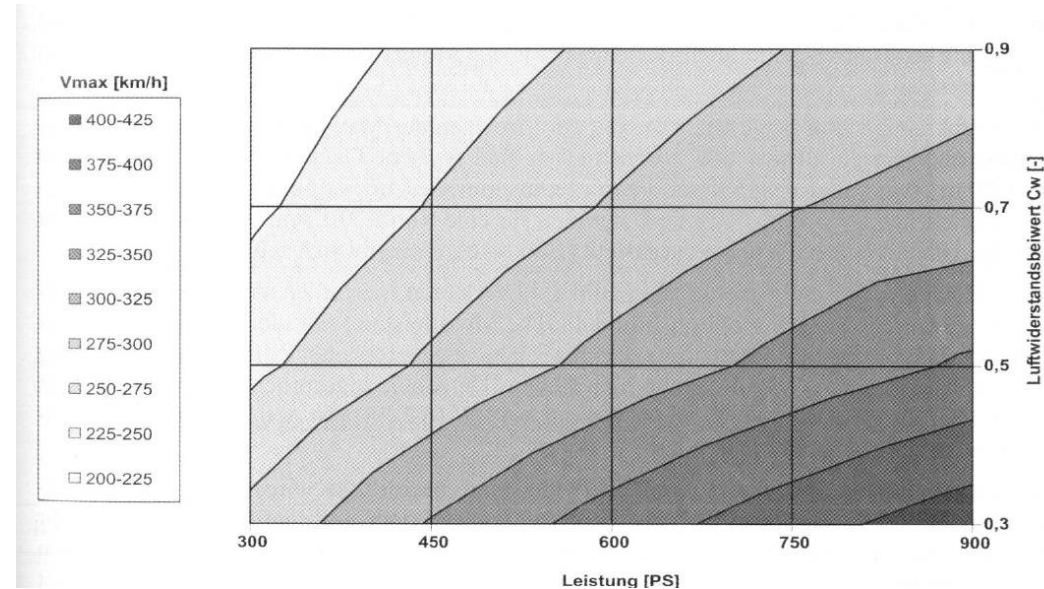
- Widerstand ist proportional zu c_w und Fläche
- Minimieren von beiden führt zu Konflikten
- Reglement
 - freie Räder
 - Mindestmaße
- Kühlung
- Reifenbreite

Beispiel:

- $m = 1100 \text{ kg}$, Massenverh. Vorne/hinten = 47/53
- $A = 2 \text{ m}^2, c_{AV} = -0.45, c_{AH} = -0.55$

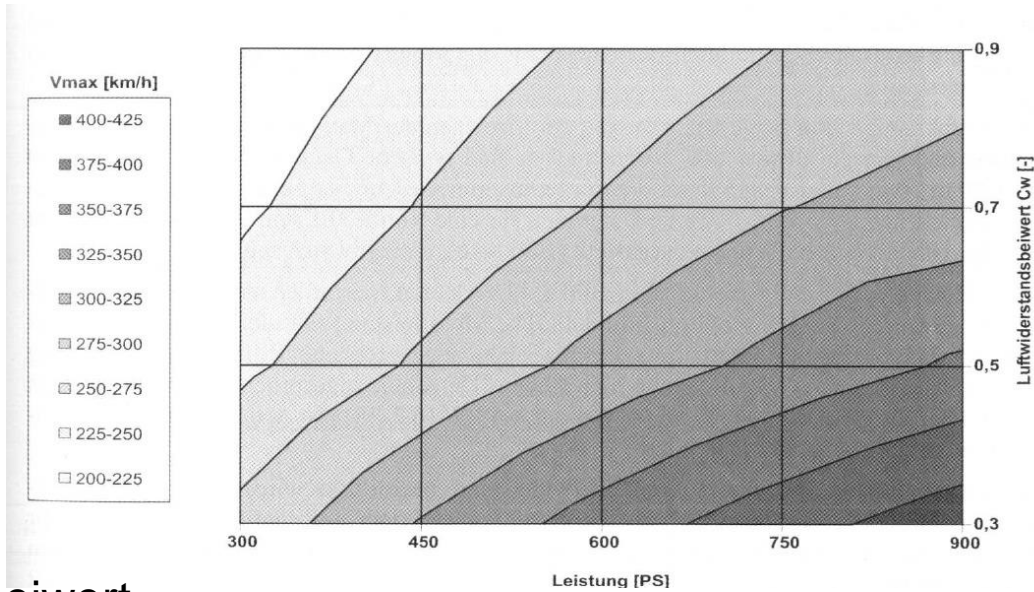
Annahme:

- Höchster Gang ist an die Höchstgeschw.
- angepasst
- Sehr lange Gerade > 2000 m



Aerodynamik, Fahrleistungen und Fahrverhalten

- Mehr Leistung bei kühlerem Motor (in gewissen Grenzen)
- Aber, mehr Kühlleistung → höherer Widerstand
- Höhere Geschwindigkeit für 450 PS bei $c_w = 0.5$,
- Wenn der Zuwachs an $P > 7$ hP, bei einem Anstieg c_w von 0.01
- V_{\max} als Funktion von Widerstandsbeiwert
- und Motorleistung
- Niedriger Widerstand und hohe Leistung → v_{\max}
- Bei wenig P : Anstieg des Widerstandes : Faktor 3
→ Reduktion von v_{\max} um 28.2 %
- Bei viel P : Anstieg des Widerstandes : Faktor 3
→ Reduktion von v_{\max} um 30.2 %

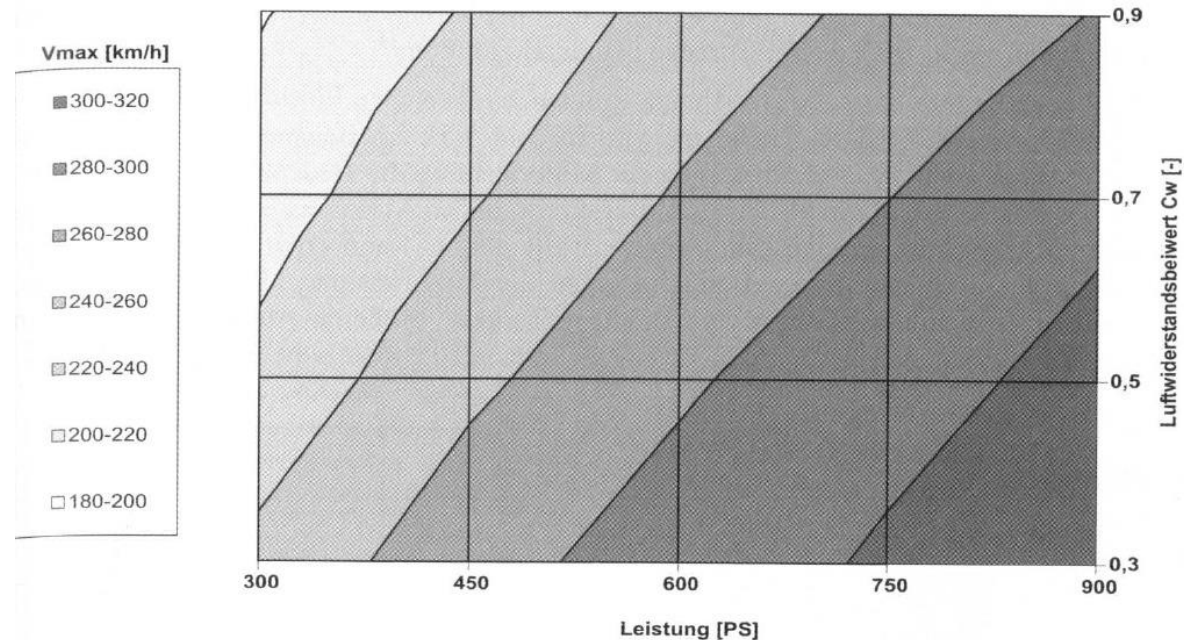


Aerodynamik, Fahrleistungen und Fahrverhalten

- Linien mit konstanter v_{\max} sind viel steiler
- Leistung wird wichtiger
- Höhere Geschwindigkeit für 450 hP bei $c_w = 0.5$,
- Wenn die Leistungszunahme > 6.2 hP, bei einem
- Anstieg c_w von 0.01

Selbes Beispiel auf dem Hockenheimring

- Länge der Geraden: 1050 m

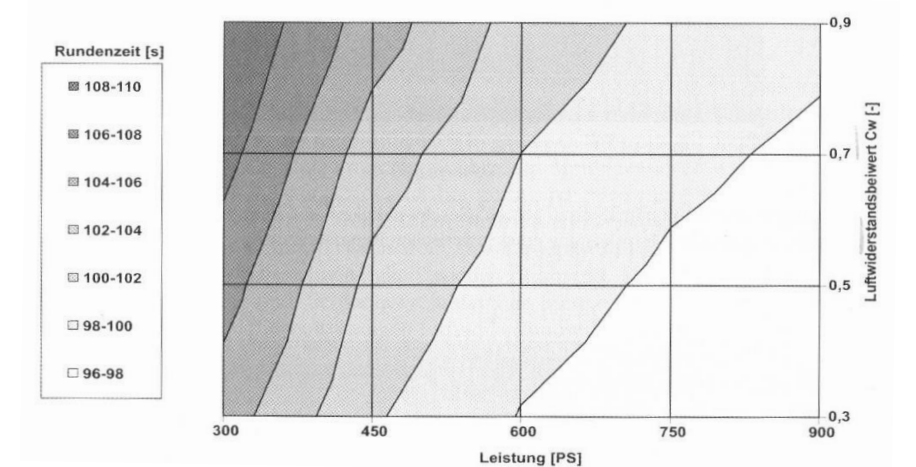
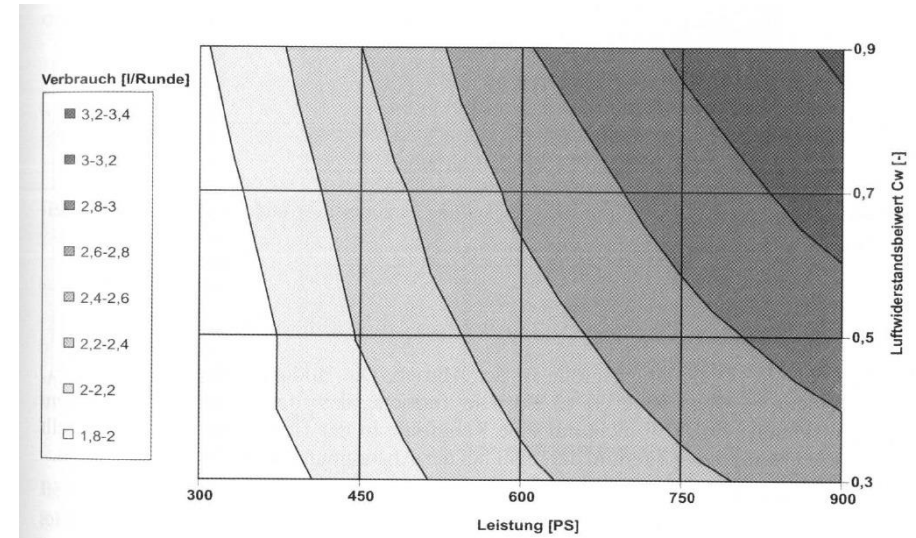


Aerodynamik, Fahrleistungen und Fahrverhalten

- Kraftstoffverbrauch als Funktion von Motorleistung und Luftwiderstand
 - Tankvolumen, Anzahl der Tankstopps (wenn überhaupt erlaubt)
 - Treibstoffmenge beeinflusst die Fahrzeugmasse

Rundenzeit

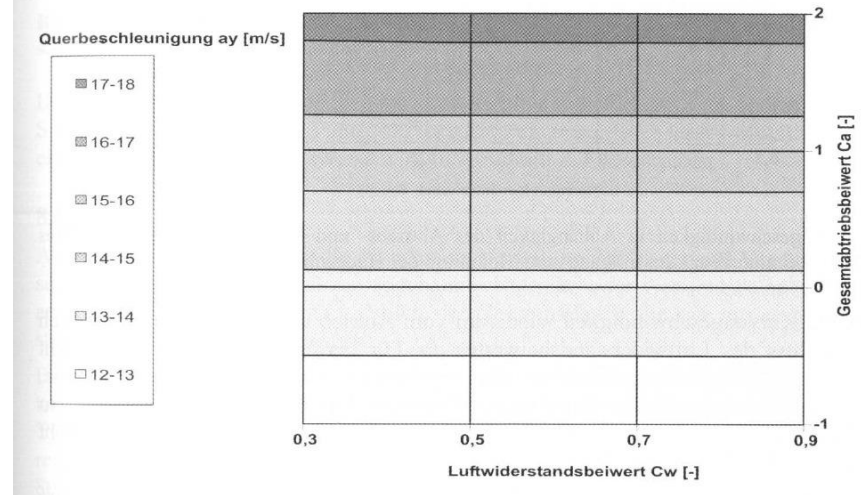
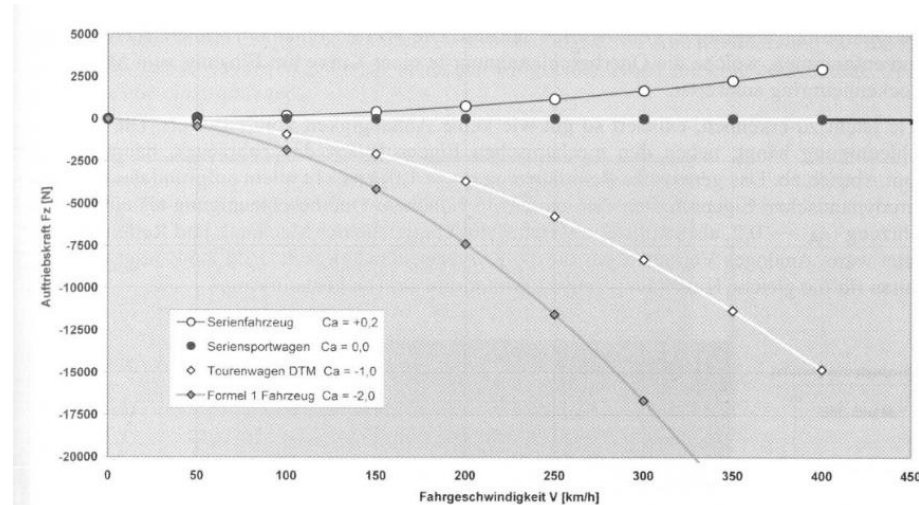
- Die Steigung der Linien mit konstanter Rundenzeit hängt von der Motorleistung ab
- Die Leistung in verschiedenen Klassen ist mehr oder weniger bedeutend



Aerodynamik, Fahrleistungen und Fahrverhalten

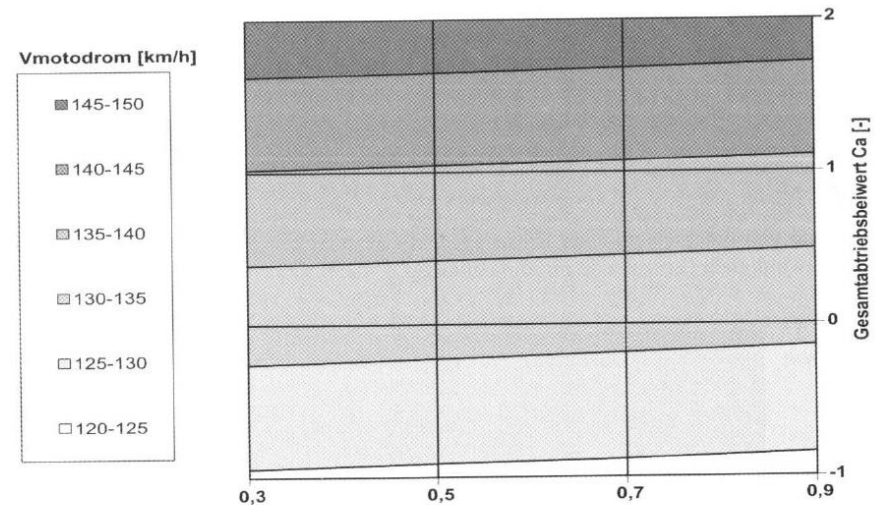
- Auftrieb als Funktion der Geschwindigkeit
 - Die aerodynamischen Kräfte sind in derselben Größenordnung wie die statischen Kräfte
- Immenser Einfluss auf die Stabilität in Kurven und bei Seitenwind

- Querbeschleunigung für das generische Fahrzeug
- mit Standard Rennreifen
- Nur eine Funktion des Auftriebes



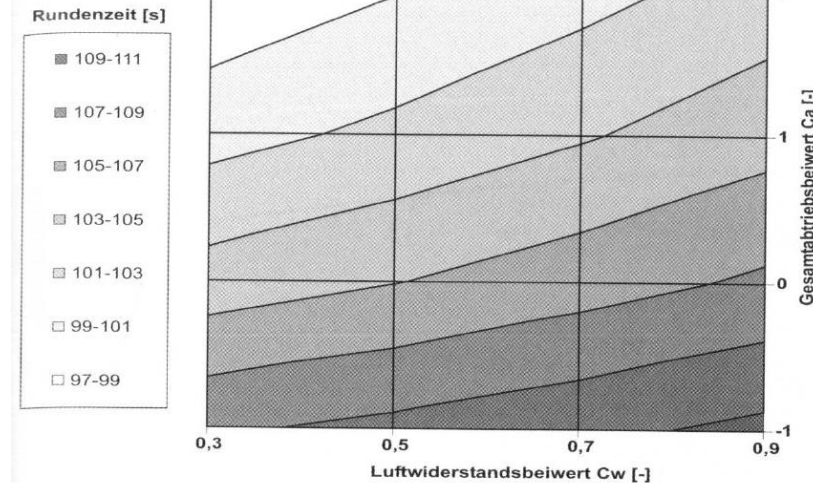
Aerodynamik, Fahrleistungen und Fahrverhalten

- Kurvengeschwindigkeit Eingang zum Motodrom, Hockenheim)
- Wenig Einfluss des Widerstands
- Niedriger C_w → höhere Geschwindigkeit am Beginn → stärker Bremsen
- → Runder Fahren, größerer Radius → leicht höhere Geschwindigkeit bei gleicher Beschleunigung



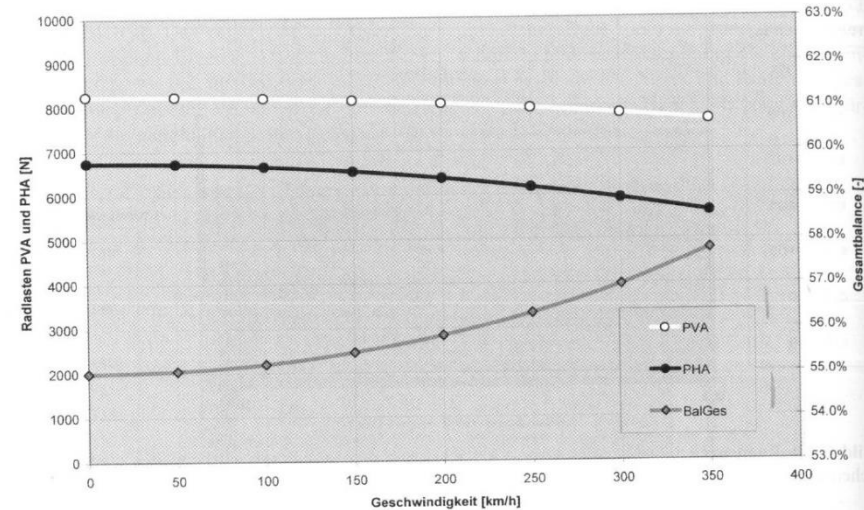
Rundenzeit

- $C_w / c_L = 0.3/0.5$ hat das gleiche Ergebnis wie $0.9/2.0$
- Optimales Verhältnis hängt vom Arbeitspunkt ab
- Bei hohem C_w muss der Auftrieb stärker verändert werden, um die Rundenzeit zu verbessern, als bei niedrigem C_w

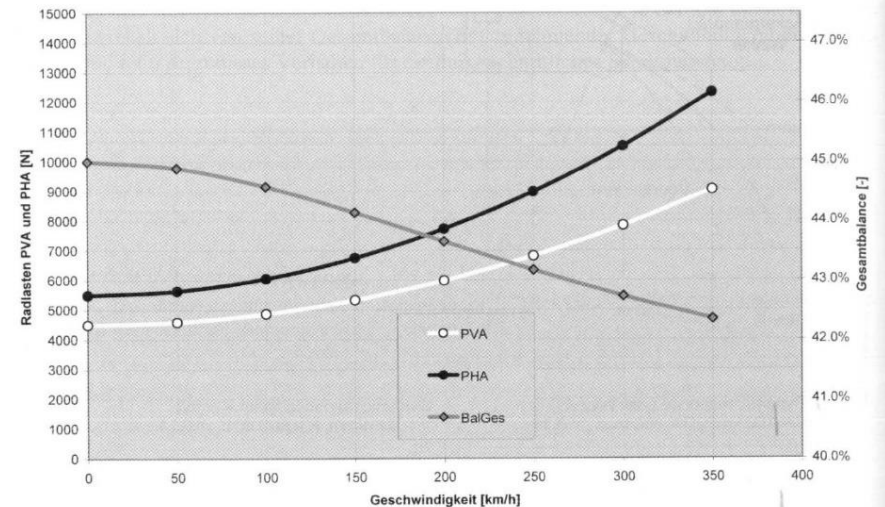


Aerodynamik, Fahrleistungen und Fahrverhalten

- Radlast- und Gesamtbalanceveränderung eines Serienfahrzeugs
- Statische Balance = 0.55
- $c_{AV} = 0.05$, $c_{AH} = 0.1$
- Bei 350 km/h: 0.578 → frontlastig
- Balance = Verteilung der Lasten auf Vorder- und Hinterachse
- Aerodynamische, statische und totale Balance
- $Bal_{Aero} = c_{AV} / c_A$

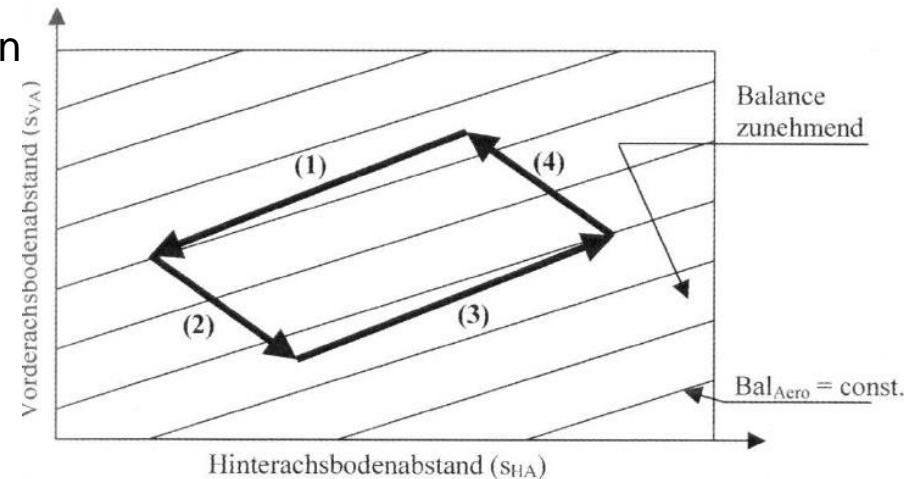


- Radlast- und Gesamtbalanceveränderung eines Rennwagens
- Statische Balance 0.45
- $c_{AV} = -0.4$, $c_{AH} = -0.6$
- Bei 350 km/h: 0.424
- Bei hohen Geschw.: Tendenz zum Untersteuern
- (nur für gute Rennfahrer geeignet)



Aerodynamik, Fahrleistungen und Fahrverhalten

- Abstand der Achsen zum Boden
- Nickmoment beim Bremsen und Beschleunigen
- Bremse → zusätzliche Kraft auf Vorderachse
- Tendenz zum Übersteuern
- Bodeneffekt wird beeinflusst
- Abnahme des Abstandes der V.-Achse → steigende Balance
- Abnahme des Abstandes der H.-Achse → abnehmende Balance

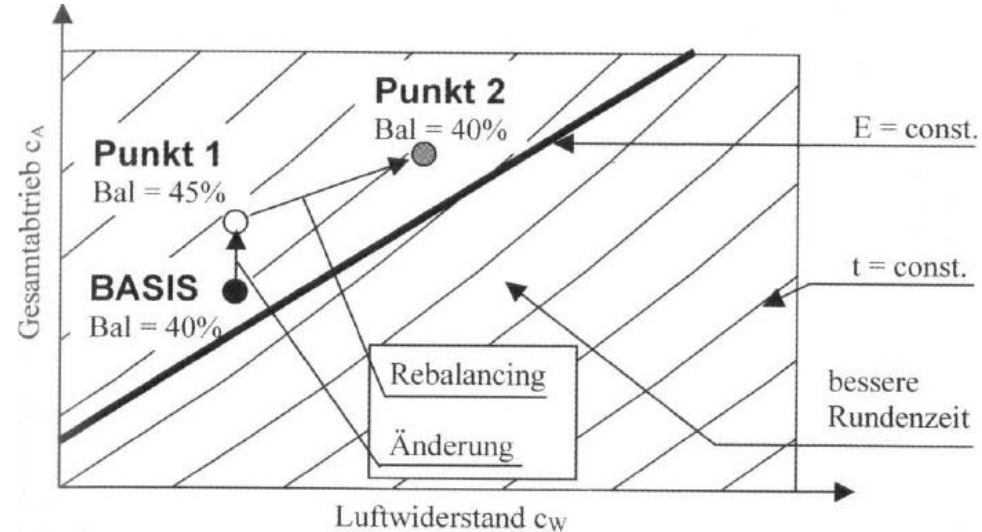


Typische Fahrsituation

1. Beschleunigung auf der langen Geraden, höhere Abwärtskräfte, beide Achsen gehen nach unten
2. Übergang vom Beschleunigen zum Bremsen: abrupter Lastwechsel, Vorderachse wird belastet, der Abstand sinkt
3. Verzögerungsphase, geringere Geschwindigkeit, beide Achsen werden entlastet
4. Übergang zum Beschleunigen: Hinterachse wird belastet, Abstand sinkt

Aerodynamik, Fahrleistungen und Fahrverhalten

- Stabile Balance ist wichtig
- schon vor den ersten Fahrversuchen
- Definition von Zielwerten für statische und aerodynamische Balance
- nicht nur Rundenzeiten und Effizienz
- „Rebalancing“



Annahme: Massnahme für mehr Abtrieb auf der Vorderachse ohne zusätzlichen Widerstand

- positiv, weil die Effizienz erhöht wird (Punkt 1)
- aerodynamische Balance verschiebt sich nach vorne → Tendenz zum Übersteuern
- mehr Abtrieb auf die Hinterachse (größerer Anstellwinkel)
- Heckflügelpolare
- Zunahme des Widerstandes (Punkt 2)
- kann zu schlechteren Rundenzeiten führen

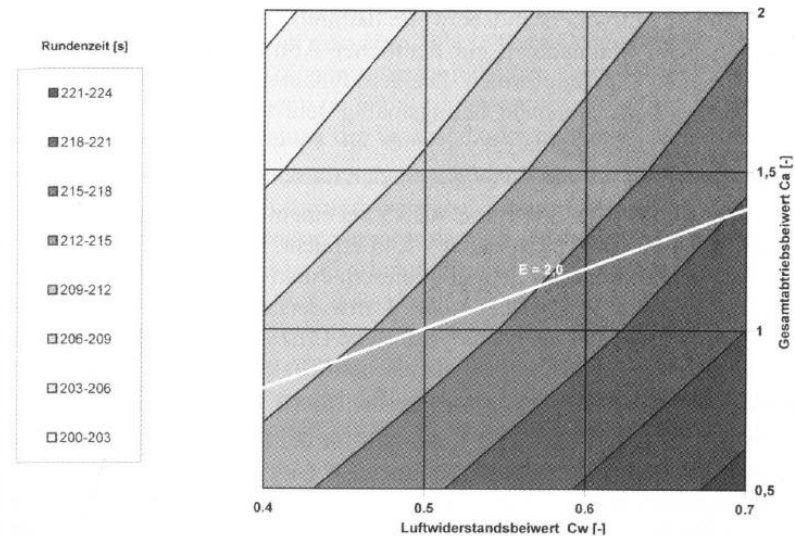
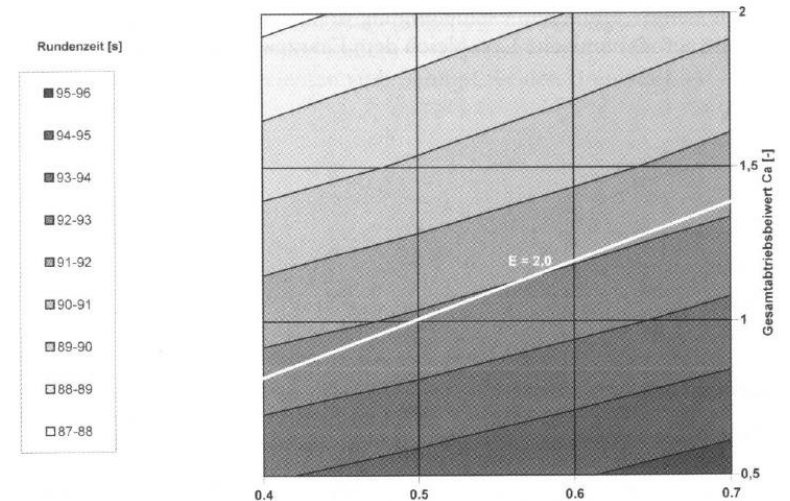
Aerodynamik, Fahrleistungen und Fahrverhalten

Hockenheim

- Höhere Effizienz = bessere Zeit
- Zunahme von lift = Zunahme von drag
- → konstante Effizienz
- → Bessere Rundenzeit

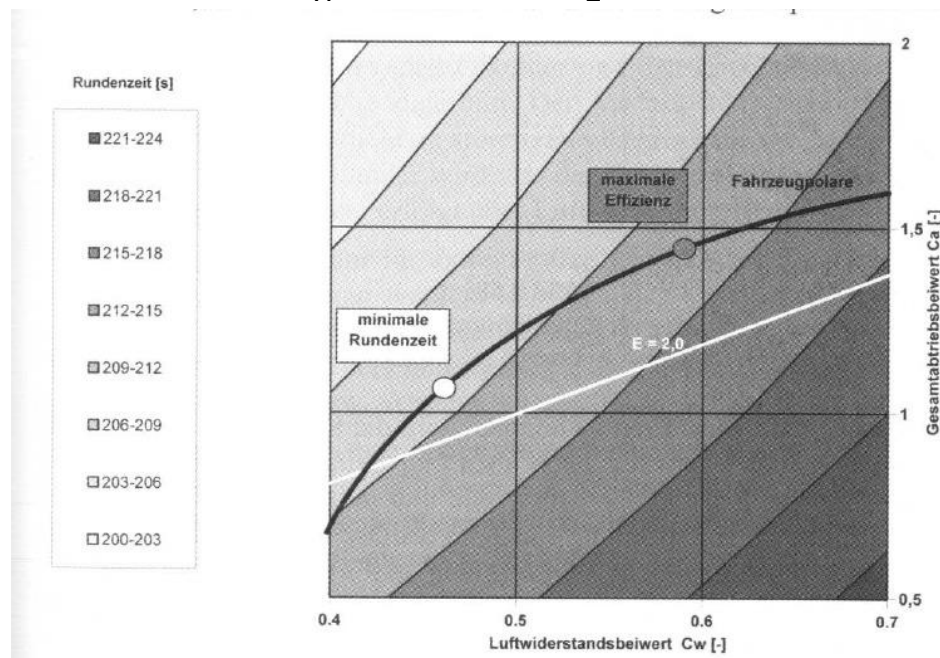
Generisches Fahrzeug: 600 hP, 1000 kg, 2 m²
Typisch für LeMans

- Le Mans = schnelle Kurven, sehr lange Geraden
- Zunahme von lift = Zunahme von drag
- Schlechtere Rundenzeit
- niedriger Widerstand ist erforderlich

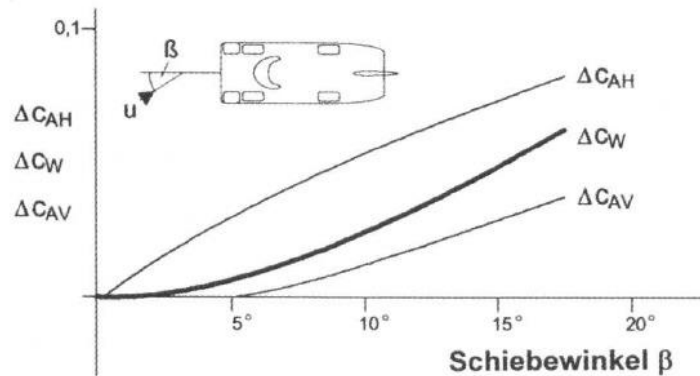


Aerodynamik, Fahrleistungen und Fahrverhalten

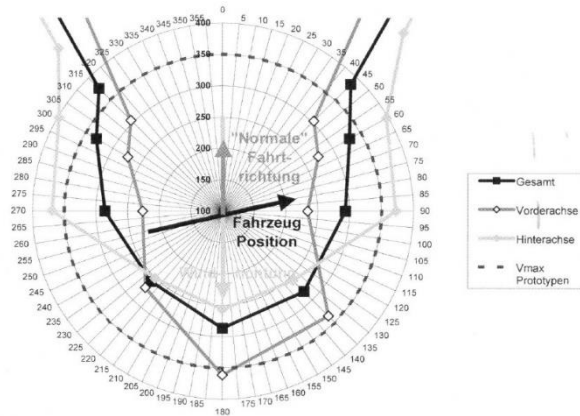
- aus Windkanaldaten → Fahrzeugpolare
- Verstellung von Front- und Heckflügeln
- Zusätzliche aerodynamische Bauteile
- darauf achten, dass die aerodynamische Balance nicht verändert wird
- Steigung der Polare ist nicht konstant
- höchste Effizienz $E = 2.45$ für $c_W = 0.59$ und $c_L = 1.45$, lap time = 213.5 secs
- beste Rundenzeit = 211 secs für $c_W = 0.46$ und $c_L = 1.05$, $E = 2.28$



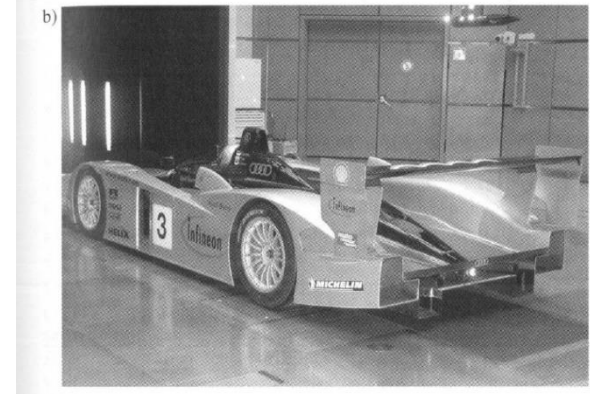
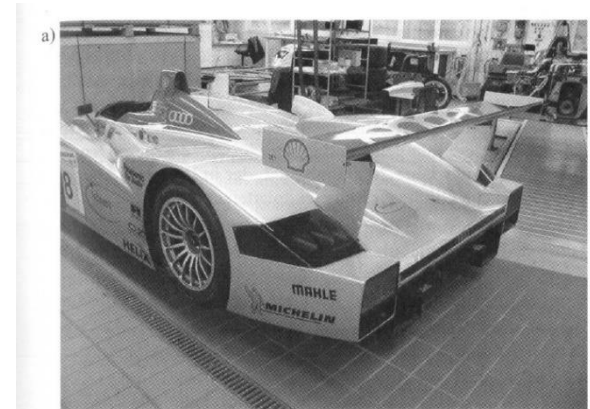
Aerodynamik, Fahrleistungen und Fahrverhalten



Auftrieb und Widerstand bei Schräganströmung ($< 10^\circ$)



Kritische Geschwindigkeit: Auftrieb $>$ Gewicht
 $< 45^\circ$ Vorderachse, $v < 300$ km/h
 $> 120^\circ$: Hinterachse ist kritisch

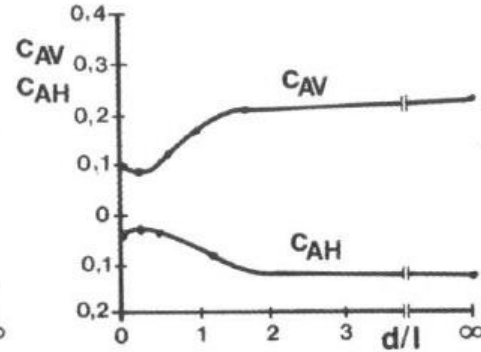
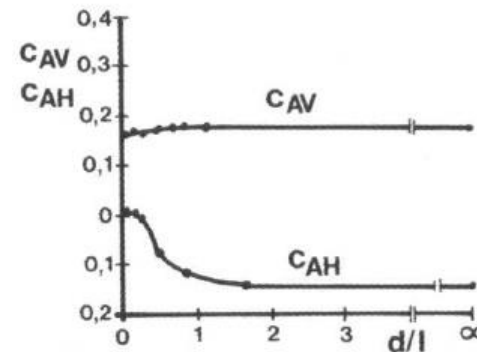
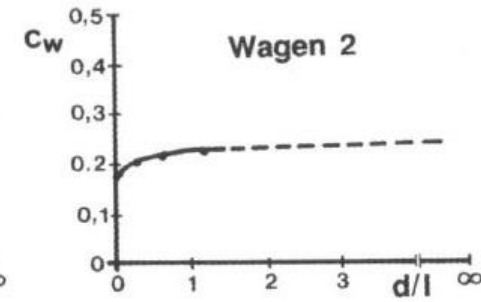
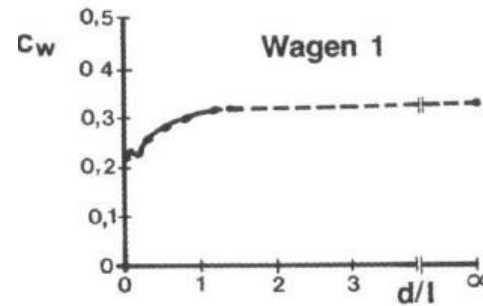
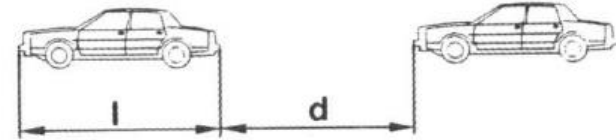


Große und kleine Endplatten
 bewirken Stabilität durch
 Verschieben des Druckpunktes
 nach hinten

Aerodynamik, Fahrleistungen und Fahrverhalten

- höhere Geschwindigkeit für das folgende Fahrzeug wg geringerer v_∞
- Widerstandsreduktion für das führende Fahrzeug (Zunahme des Basisdruckes)
- folgendes Fahrzeug mit Auftrieb verliert Auftrieb \rightarrow Übersteuern
- folgendes Fahrzeug mit Abtrieb verliert Abtrieb \rightarrow Untersteuern
- führendes Fahrzeug: Reduktion des Heckabtriebs \rightarrow Übersteuern

geringere Abstände als im normalen Verkehr



Fahrt in lee

Aerodynamik der Bauteile

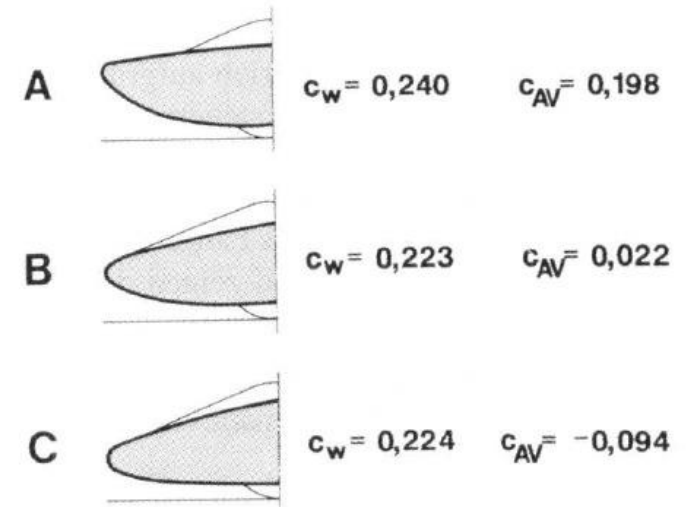
Aerodynamik der Bauteile

Grundkörper

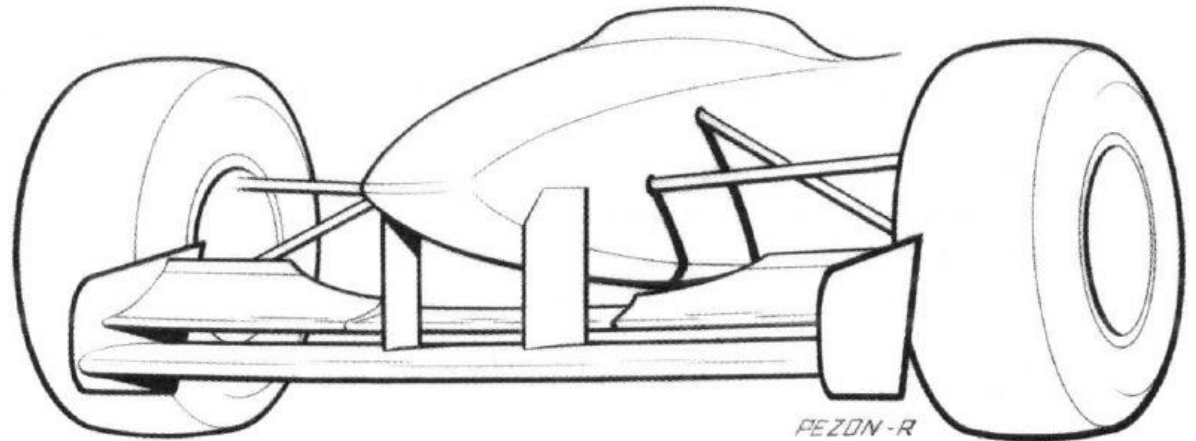
- Tropfenform
- klassischer Sportwagen: flache Nase, stumpfes Heck
- Serienwagen

Einfluss der Bugform auf Widerstand und Auftrieb

- Minimierung des Widerstandes durch senken der Nase
- Veränderung von Auftrieb zu Abtrieb

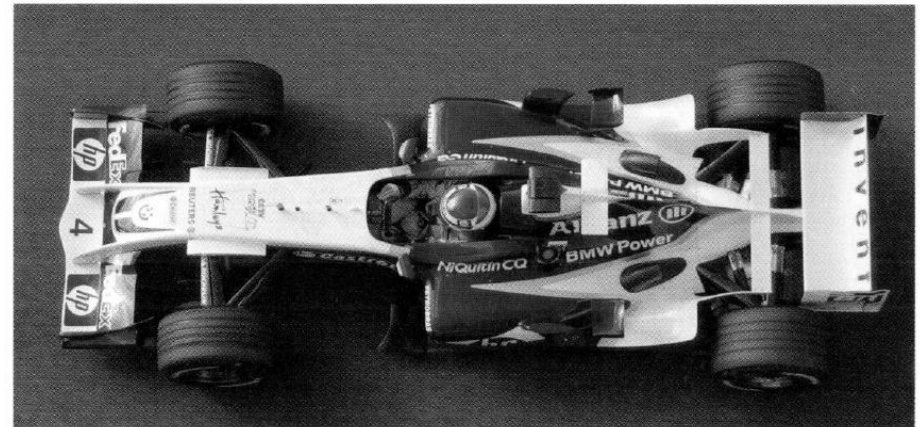
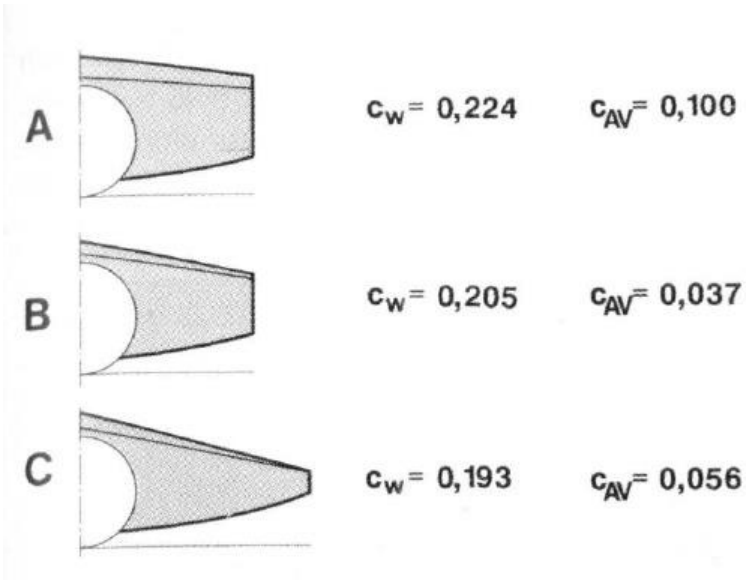


Nach oben gezogene Nase
in der Formel 1 wg.
Frontflügel



Aerodynamik der Bauteile

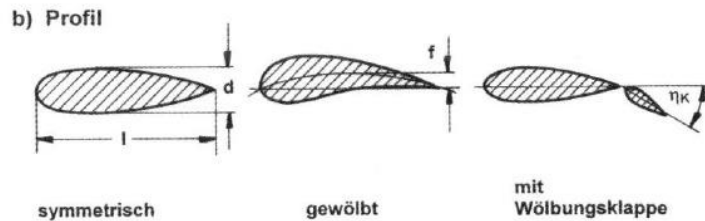
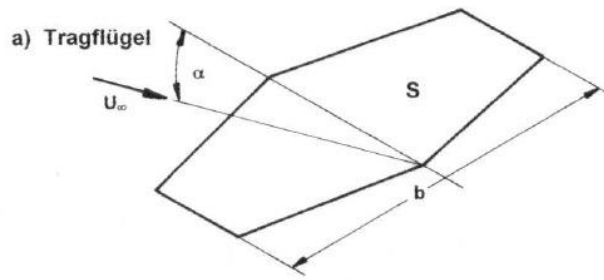
- Heck: lange, tropfenförmige Form
- Kamm-Heck: Abschneiden ohne große Erhöhung des Widerstandes



Grundform ist größeren Zwängen ausgeliefert
(Sicherheit, Wettbewerbsfähigkeit)

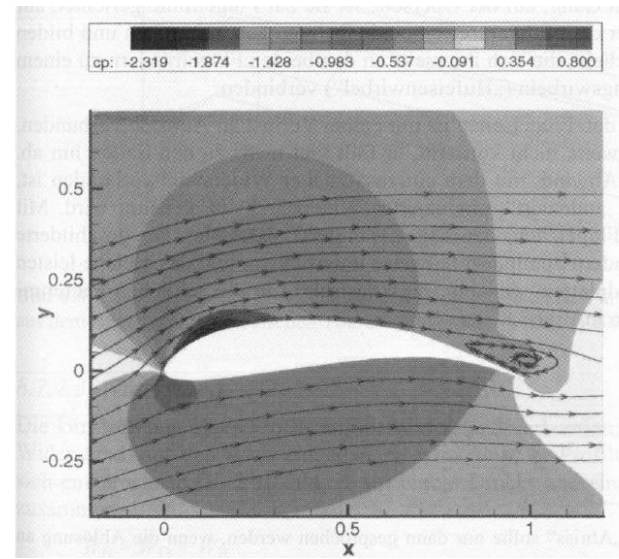
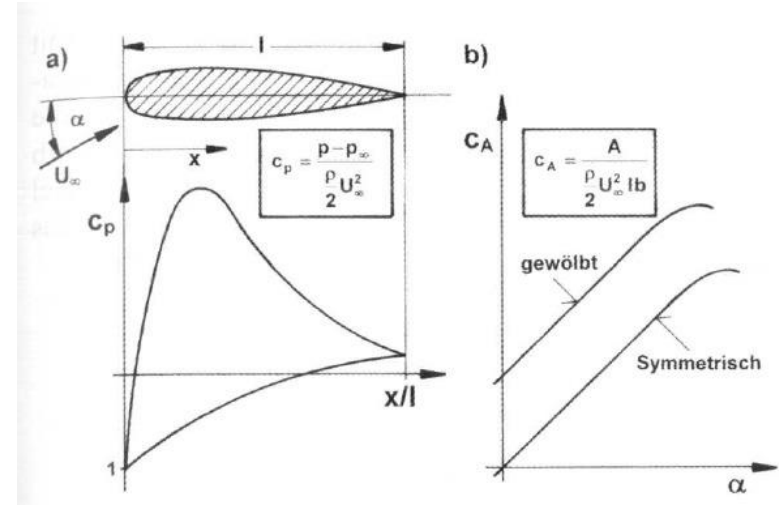
Aerodynamik der Bauteile

- Funktion: Erzeugung von Abtrieb
- Grundriss
- Profil, unterstützt durch Klappen
- Winglets, Endplatten



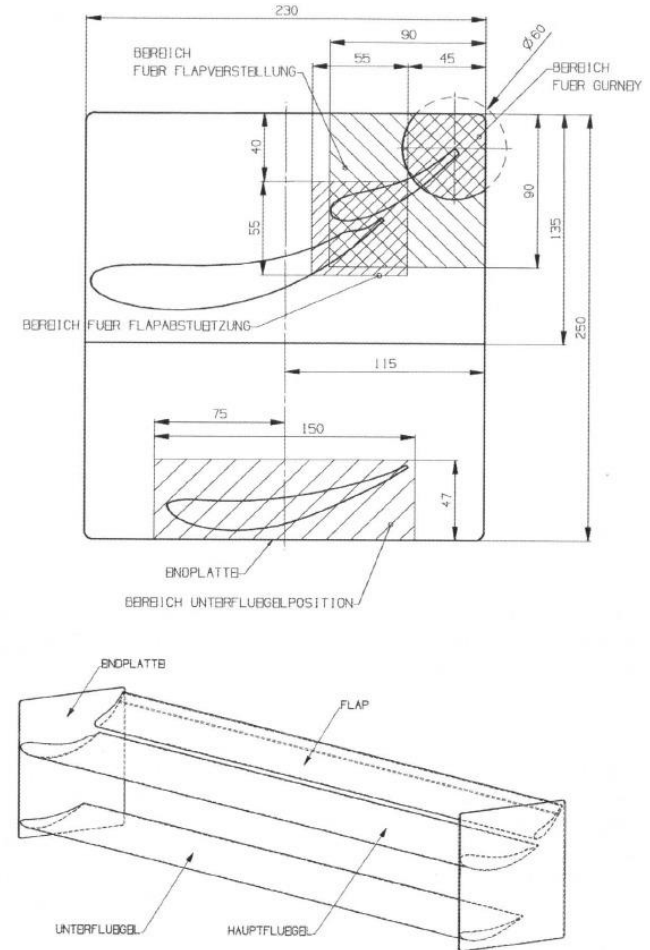
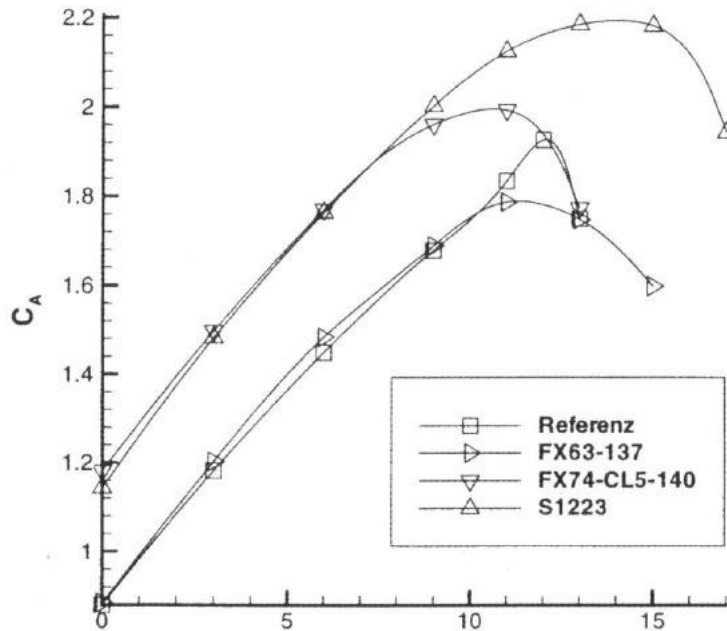
Seitenverhältnis $\Lambda = b^2/S$

for rectangles $\Lambda = b/l$



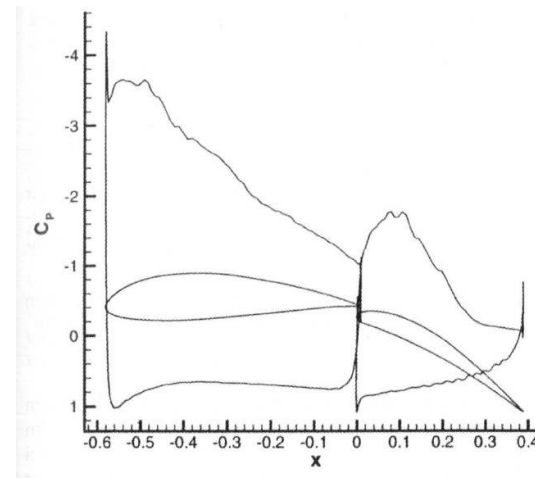
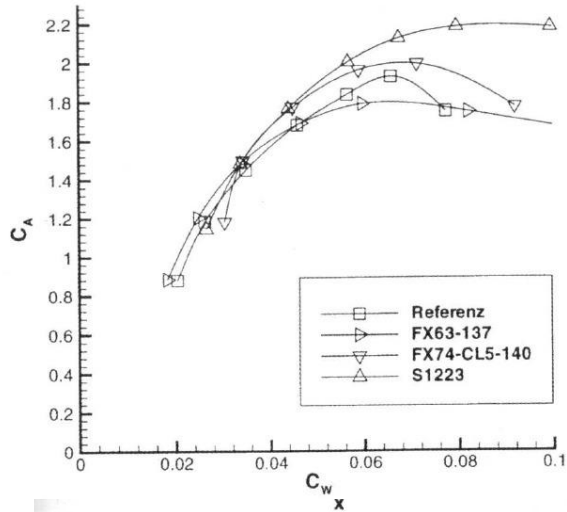
Aerodynamik der Bauteile

- Auftrieb über Anstellwinkel
- 2 symmetrische und 2 asymmetrische Profile

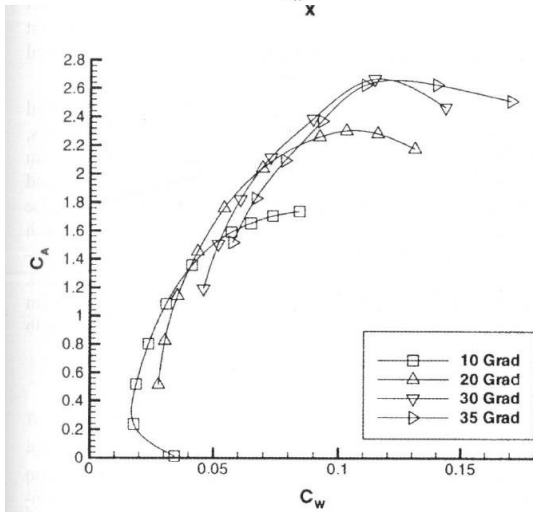


Typische Konfiguration in der DTM

Aerodynamik der Bauteile



Druckverteilung eines gewölbten Profils mit Wölbungsclappe

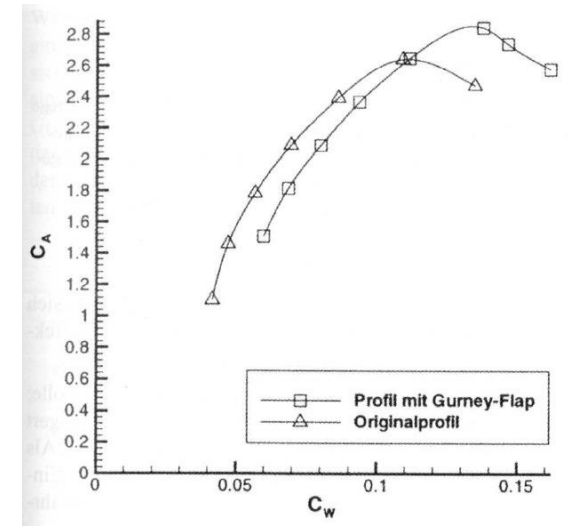
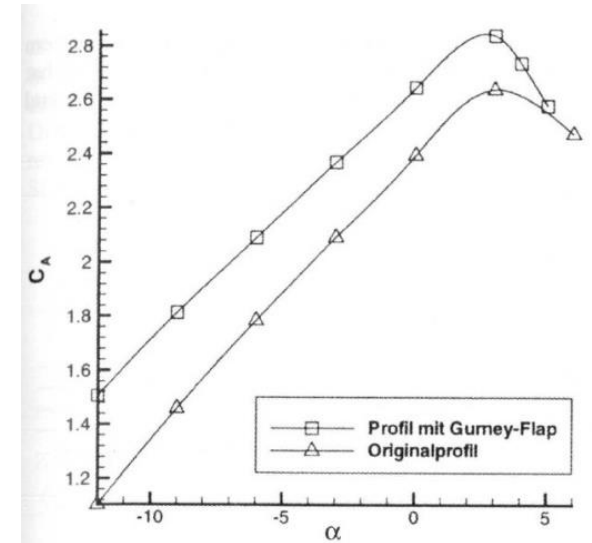
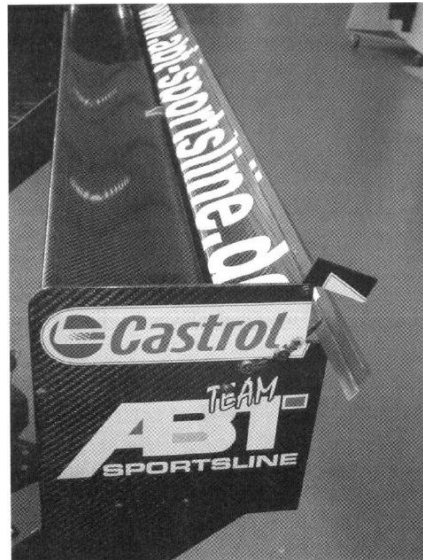
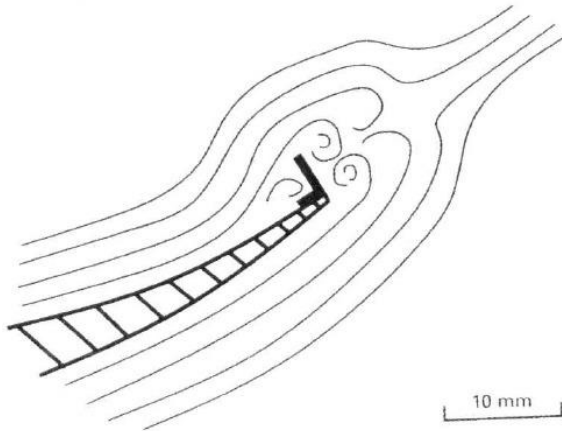


Polare ohne (oben) und mit (unten) Klappe

Aerodynamik der Bauteile

Gurney Flap

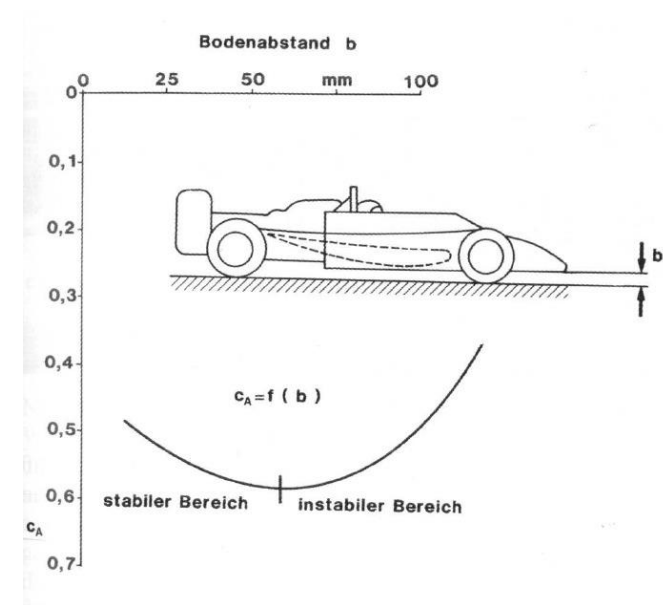
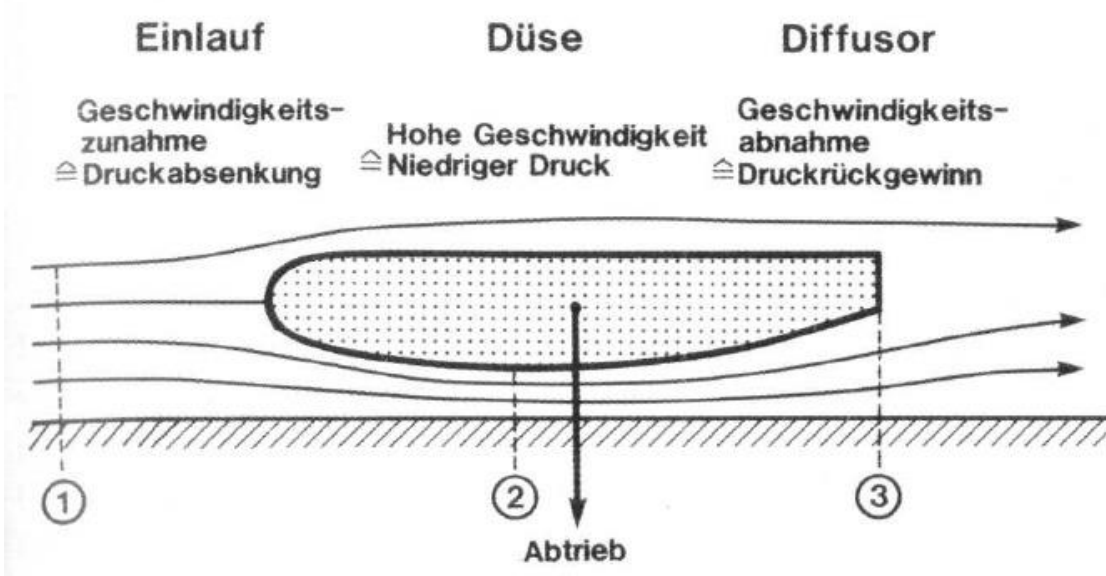
- 2 gegensätzlich rotierende Wirbel und Umlenkung der Strömung nach oben
- Zusätzlicher Auftrieb und Widerstand
- Verbesserung für das Gesamtfahrzeug, bei vorgeschriebenen Profilen oder beschränktem Bauraum



Aerodynamik der Bauteile

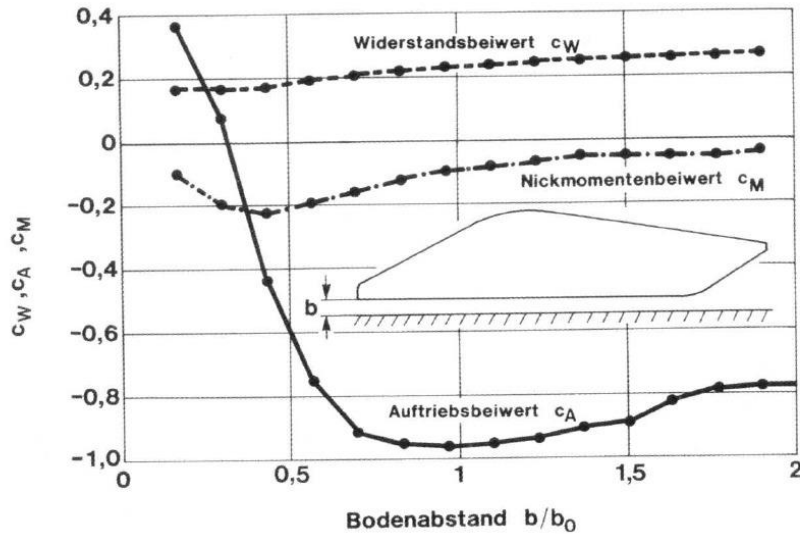
Bodeneffekt

Prinzip des Bodeneffektes

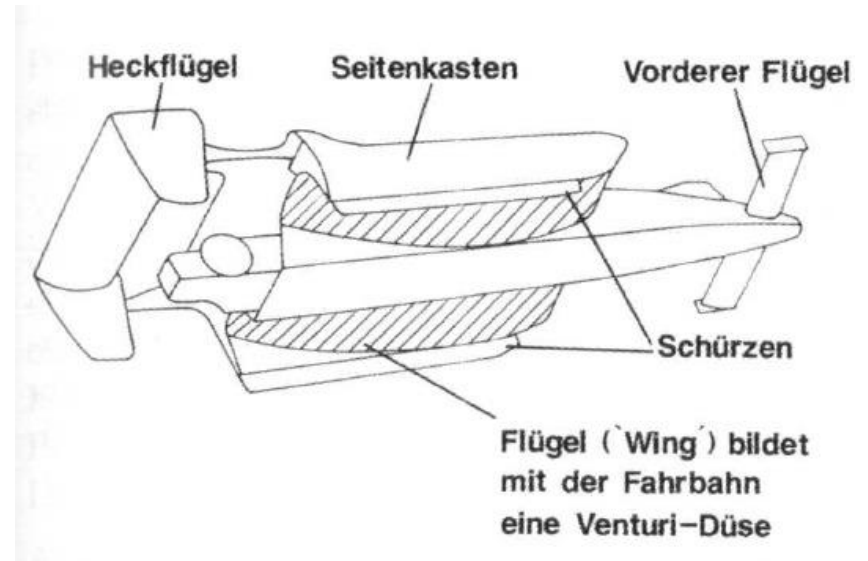


- Maximaler Abtrieb
- Ablösung im Diffusor
- Zusammenwachsen der Grenzschichten

Bodeneffekt

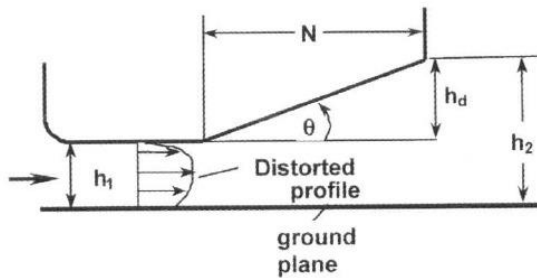


Lift, drag and pitching moment

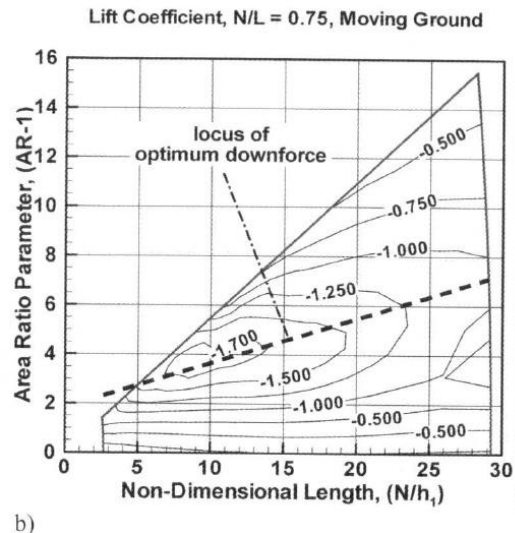
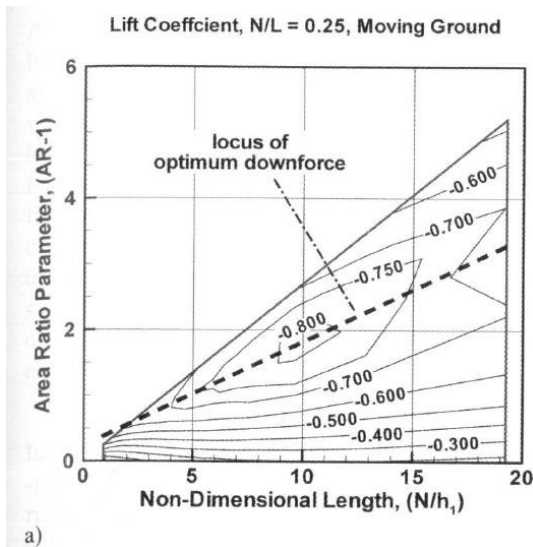
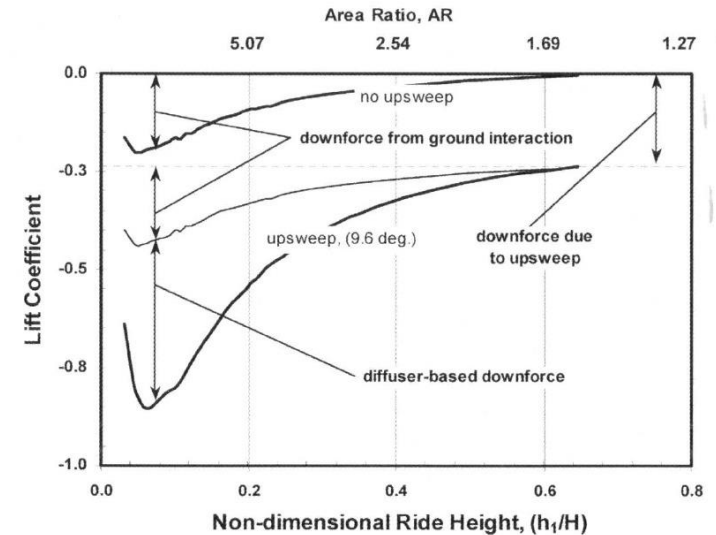


Schematische Darstellung des Unterbodens

Diffusor

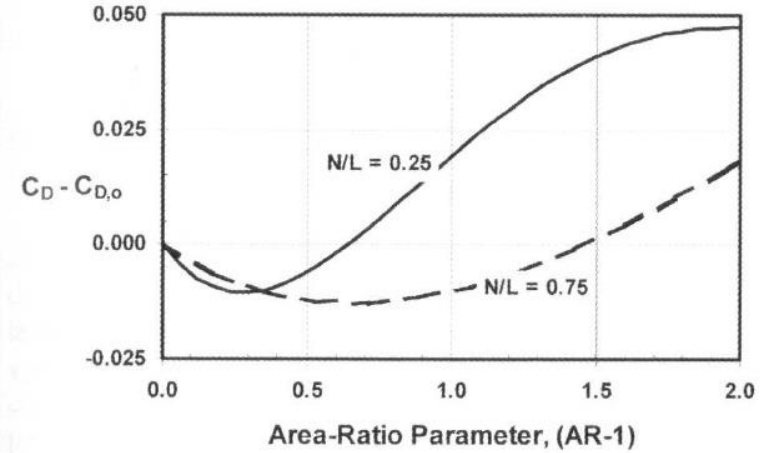
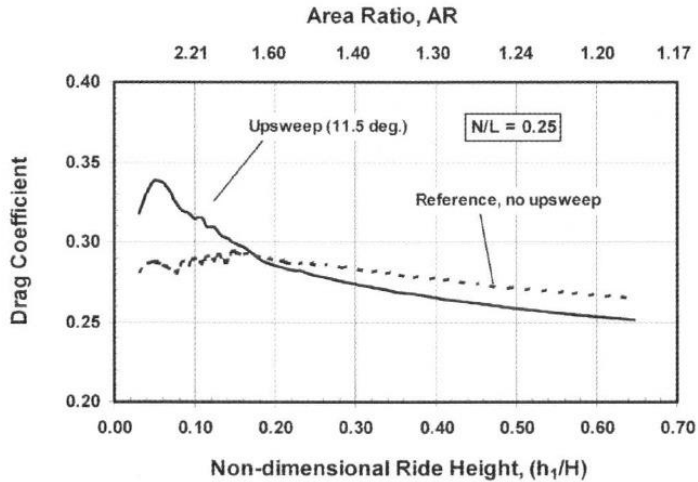


Komponenten des Abtriebs
als Funktion von h_1 / H

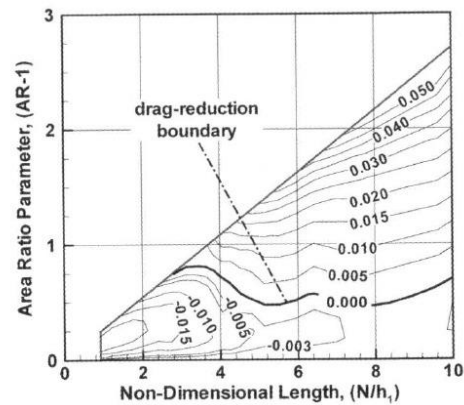


Abtrieb als Funktion von N / h_1

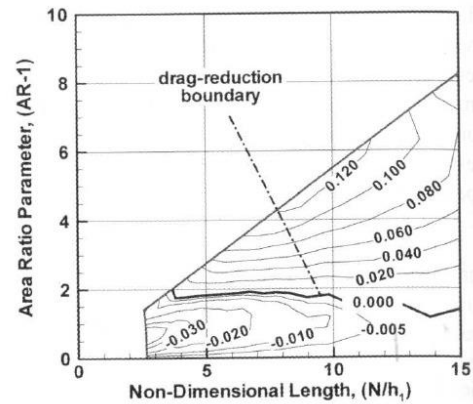
Diffusor



Drag-Reduction Coefficient, $N/L = 0.25$, Moving Ground



Drag-reduction Coefficient, $N/L = 0.75$, Moving Ground



**Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit**



Fahrzeug- und Windkraftaerodynamik

Vehicle and windturbine aerodynamics

Dr.-Ing. A. Henze, Prof. Dr. sc. D. Krug

Institute of Aerodynamics, RWTH Aachen University

Windenergieanlagen (Windkraftanlagen)

Windenergieanlagen (Windkraftanlagen)

Inhalt

- Historischer Überblick
- Windenergie Deutschland/international
- Bauformen von Windenergieanlagen
- Physikalische Grundlagen, Modelle und Optimierung
- Windentwicklung und Störeinflüsse

Historischer Überblick

Historischer Überblick

- 3.000 Jahre alt, nicht bewiesen
- Erste zuverlässige Hinweise: 644 n.C. in Persien und Afghanistan

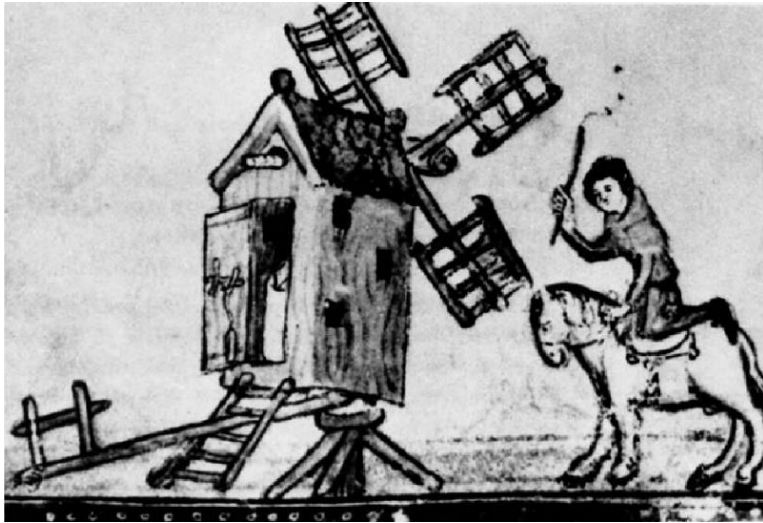


Chinesisches Windrad zum Wasserschöpfen



Vertikalachsen-Mühle zum Getreidemahlen aus Afghanistan

Historischer Überblick

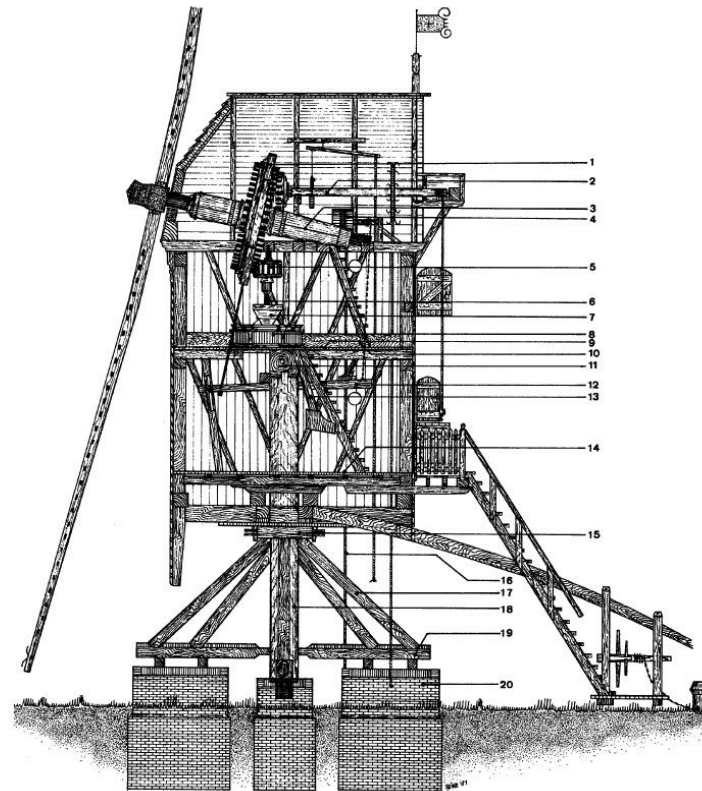


Horizontal-Achs Windmühlen
Normandie, 1180



Bockwindmühle zum Mahlen von Mehl,
drehbar gelagert

Historischer Überblick



Bockwindmühle, Aufriß	7 Mahltrichter	14 Mehlboden
1 Kammrad mit Backenbremse	8 Mahlwerk	15 Sattel
2 Aufzug	9 Steinboden	16 Bremsseil
3 Flügelwelle	10 Mehlleiste	17 Kreuzstrebe
4 Trommelbremse	11 Hammer oder Mehlbalken	18 Hausbaum oder Ständer
5 Spindelrad	12 Bremsbalken	19 Kreuzschwelle
6 Spindel	13 Mehlrutsche	20 Steinsockel

Deutsche Bockwindmühle, 13./15. Jhdt

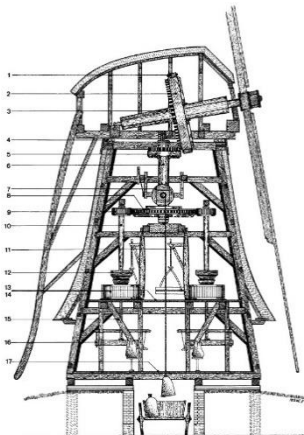
Historischer Überblick



Wipp- oder Köchermühle zur Entwässerung
Feststehender Unterbau,
drehbares Mühlhäuschen



Holländer-Windmühle,
Galerietyp, automatische
Windrichtungsnachführung,
Azimuthverstellantrieb



Holländische Windmühle
Nur der obere Teil rotiert
→ Sehr stabil
Verschiedene Verwendungs-
zwecke

- Wasserschöpfen
- Mehl
- Hammerwerke
- Holzsägen

- | | | |
|------------------------------|----------------------------|--|
| 1 Backelbremse | 4 Einigungselle oder König | 12 Mahlbüchse |
| 2 Kastenrad | 7 Saackaufzug | 13 Saackboden |
| 3 Flügelbohle | 8 Stimmrad | 14 Mahlgang |
| 4 Kalkelager des Drehblasses | 9 Spindelrad | 15 Mahlwerkzeuge |
| 5 Backel oder Krommel | 10 Spindel | 16 Fächerverstellung für des Laufesens |
| | 11 Stecker | 17 Mahlboden |

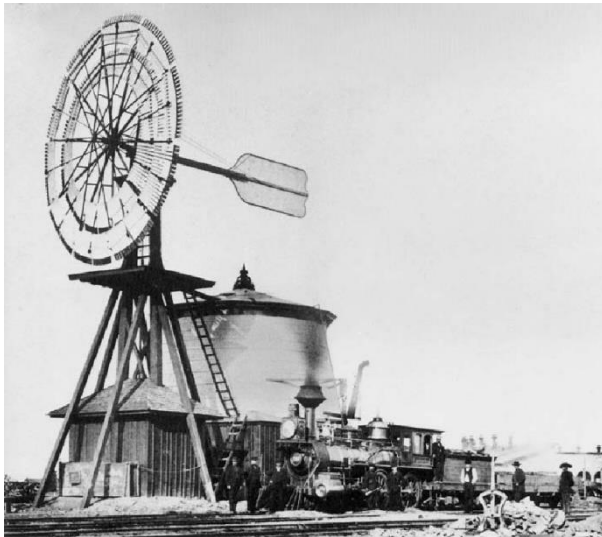


Turmwindmühle im
Mediterranen Raum

Historischer Überblick



Jalousieflügel, Drehzahl- und Leistungs-Regelung plus Windrichtungsnachführung

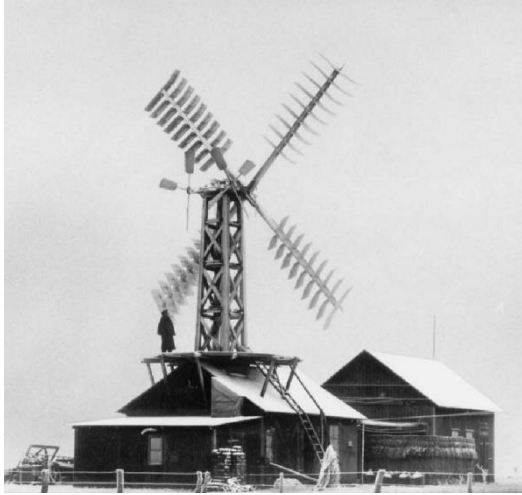


Selbstregelung durch Fliehkraft
→ Kein Segelreffen bei Sturm



Amerikanische Windmühlen = mobile Mühlen auf dem Weg nach Westen

Historischer Überblick



Erste Windkraftanlage zu Erzeugung elektrischen Stroms
Dänemark, 1891



Smidth Aeromotor, mit Stahlfachwerk- und Betonturm
1941/42, $P = 50 \text{ kW}$, $D = 17.5 \text{ m}$, 2 Blätter, Schnellaufzahl = 9,
Unverwundene, nicht verstellbare Blätter



Historischer Überblick



- Reichsarbeitsgemeinschaft Windkraft, RAW
- MAN (Maschinenfabrik Augsburg –Nürnberg)
- Kleinhenz, 1942
- $D = 130$ m
- 3 oder 4 Blätter
- Schnelllaufzahl 5
- $P = 10,000$ kW
- leeseitiger Rotor
- Nabenhöhe 250 m
- oberer Teil drehbar
- not realized to WW II

Historischer Überblick



Orkney Inseln, 1950
D = 15 m
100 kW



Deutschland, 1959
D = 34 m
100 kW

Frankreich, 1958
D = 30,1 m
800 kW



Dänemark, 1957
D = 24 m
200 kW

Historischer Überblick – nach der Energiekrise 1973/1979



MOD-2
USA, 1980
D = 91 m
2500 kW

Deutschland, Growian, 1982
100 m
3000 kW



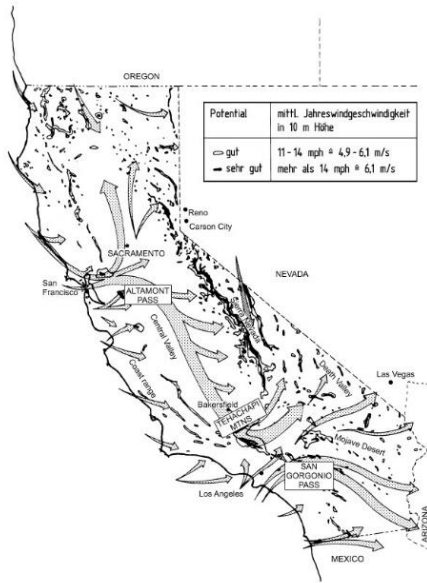
Dänemark, 1878
D = 52 m
2000 kW

Darrieus configuration
Canada, 1987
4000 kW, Höhe 100m
D = 64m



Windfarmen in den USA

Karte der Aufstellgebiete und Windverhältnisse in Kalifornien



USA, 1985, gesamt 400 MW mit 15000 Turbinen verschiedener Typen



Windenergie Deutschland/international

Windenergie in Deutschland



Abbildung 1: Entwicklung der jährlich installierten und kumulierten Leistung [MW] aus Windenergie an Land in Deutschland, Status 31.12.2013

Repowering in Deutschland

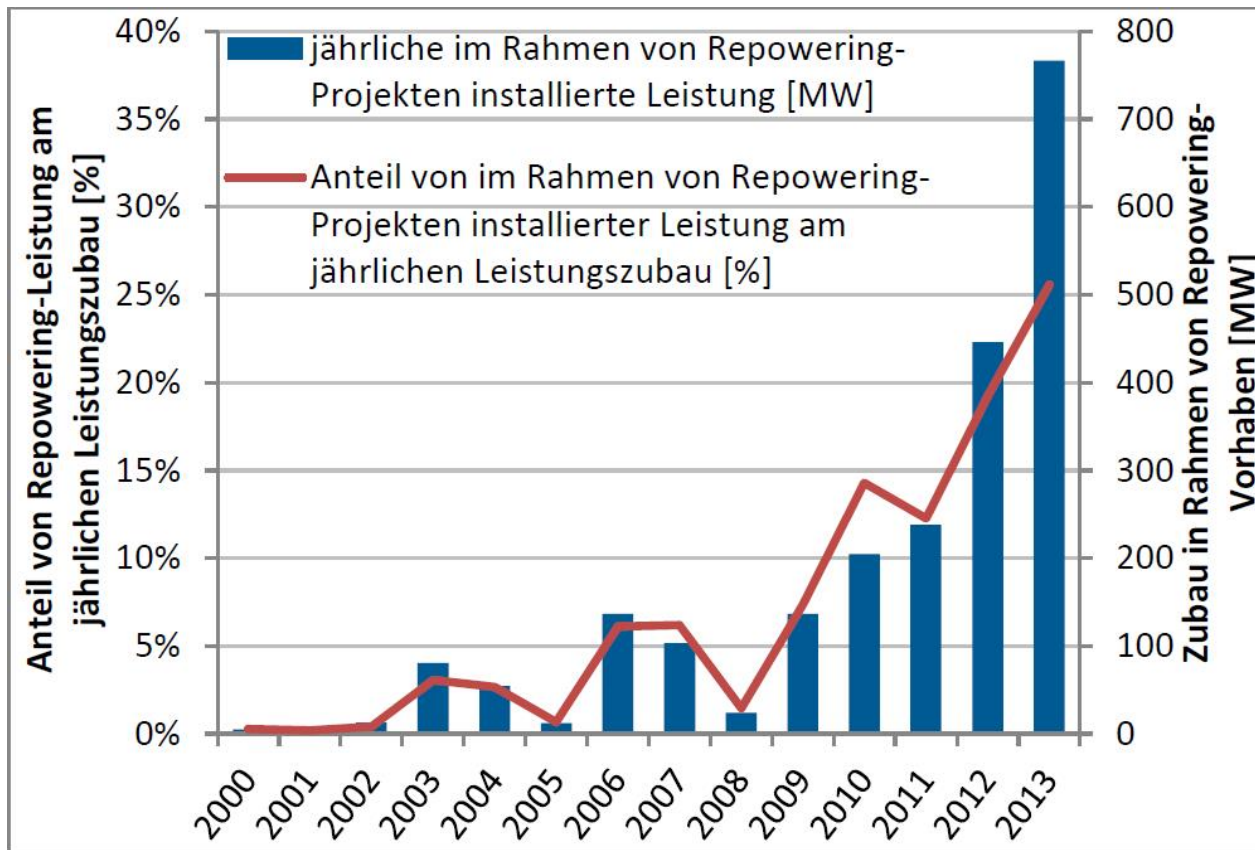


Abbildung 2: Entwicklung der anteiligen und absoluten installierten Leistung im Rahmen von Repowering-Projekten

Anlagengröße

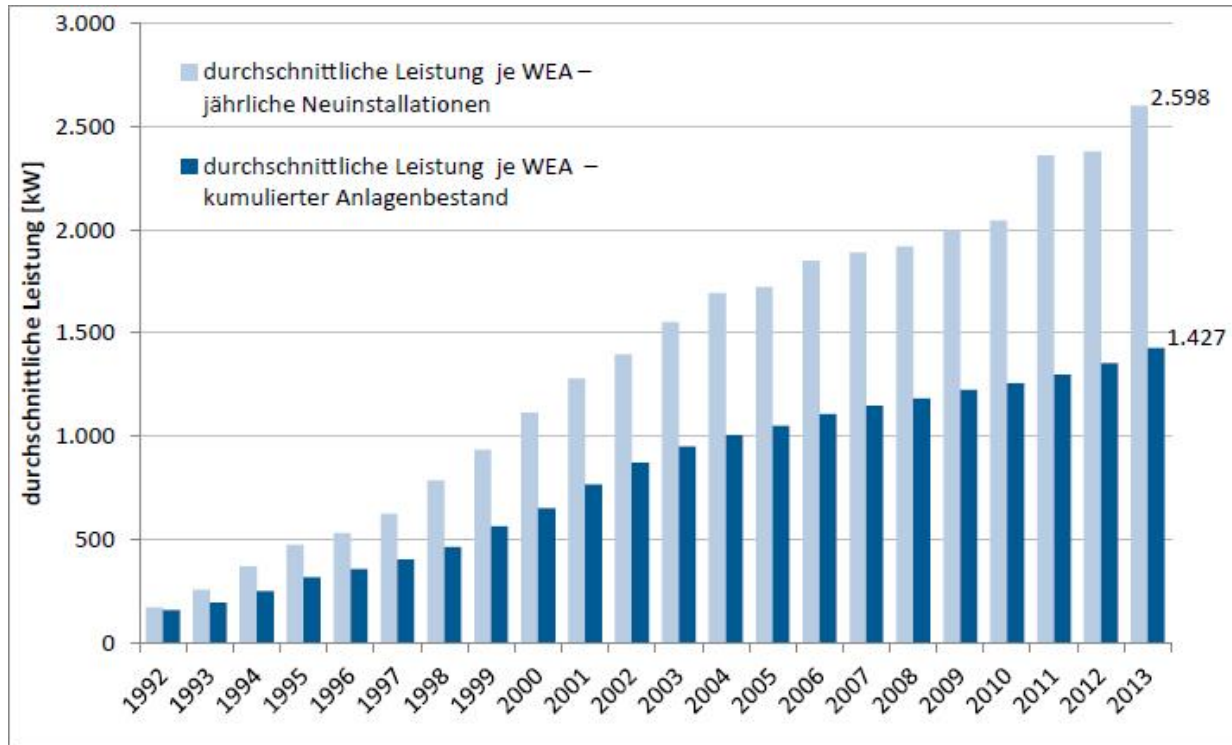
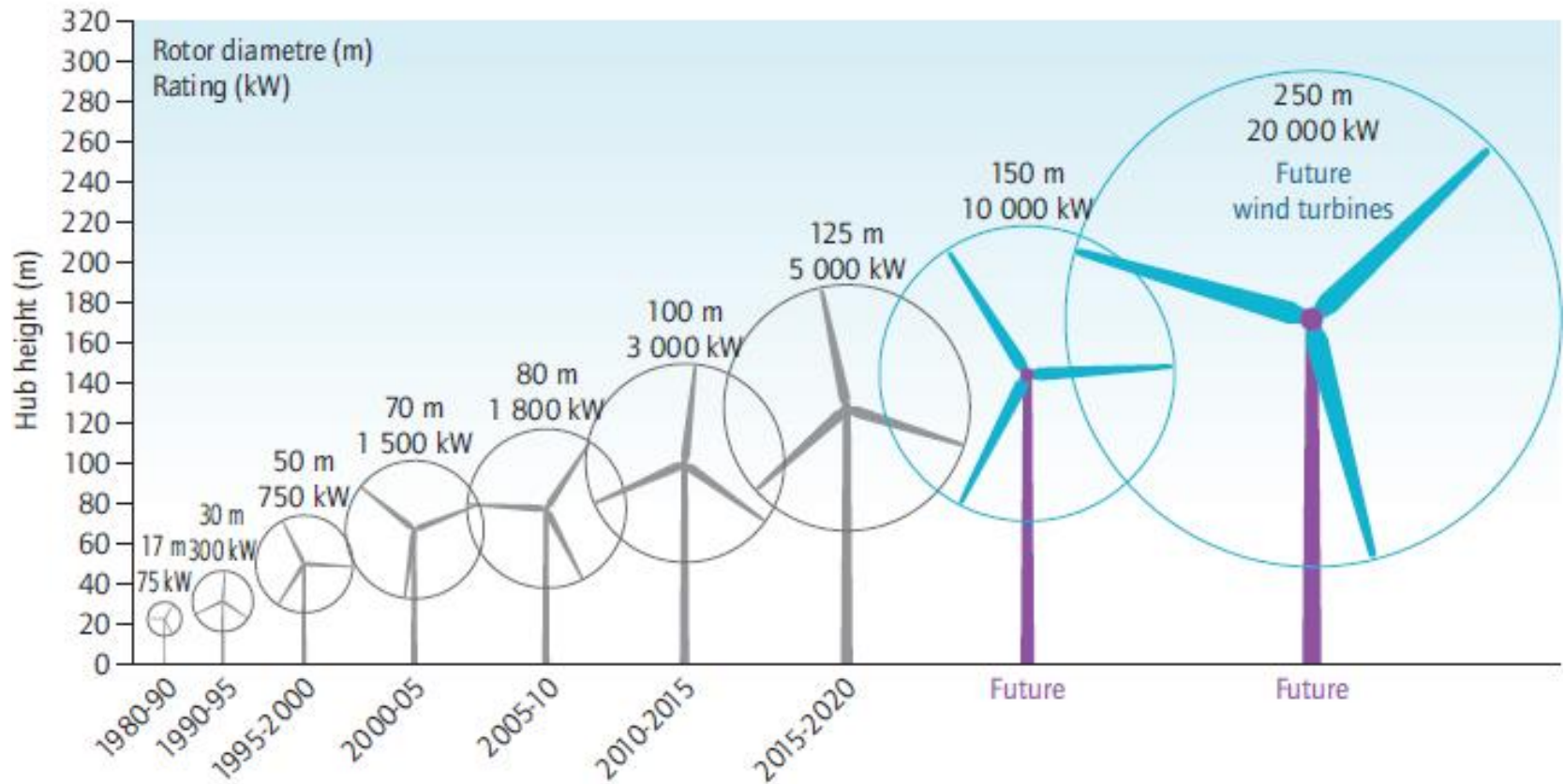


Abbildung 3: Entwicklung der durchschnittlichen Leistung der jährlich in Deutschland errichteten und kumuliert im Anlagenbestand befindlichen WEA an Land, Status 31.12.2013.

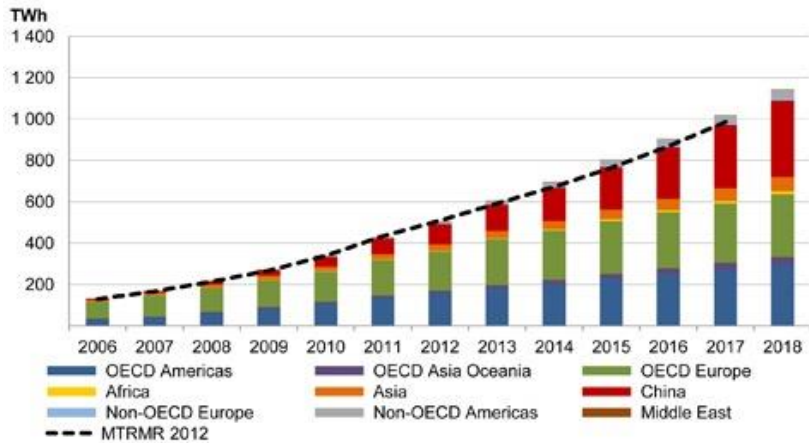
Durchschnittliche Anlagenkonfiguration an Land, Errichtung 2013		
2013	durchschnittliche Anlagenleistung	2.598 kW
	durchschnittlicher Rotordurchmesser	95 m
	durchschnittliche Nabenhöhe	117 m

Anlagengröße

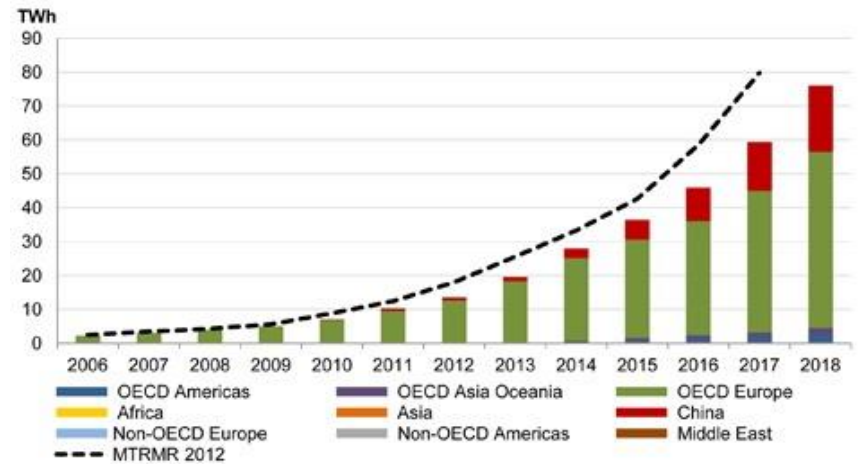
Figure 14: Growth in size of wind turbines since 1980 and prospects



Source: adapted from EWEA, 2009.

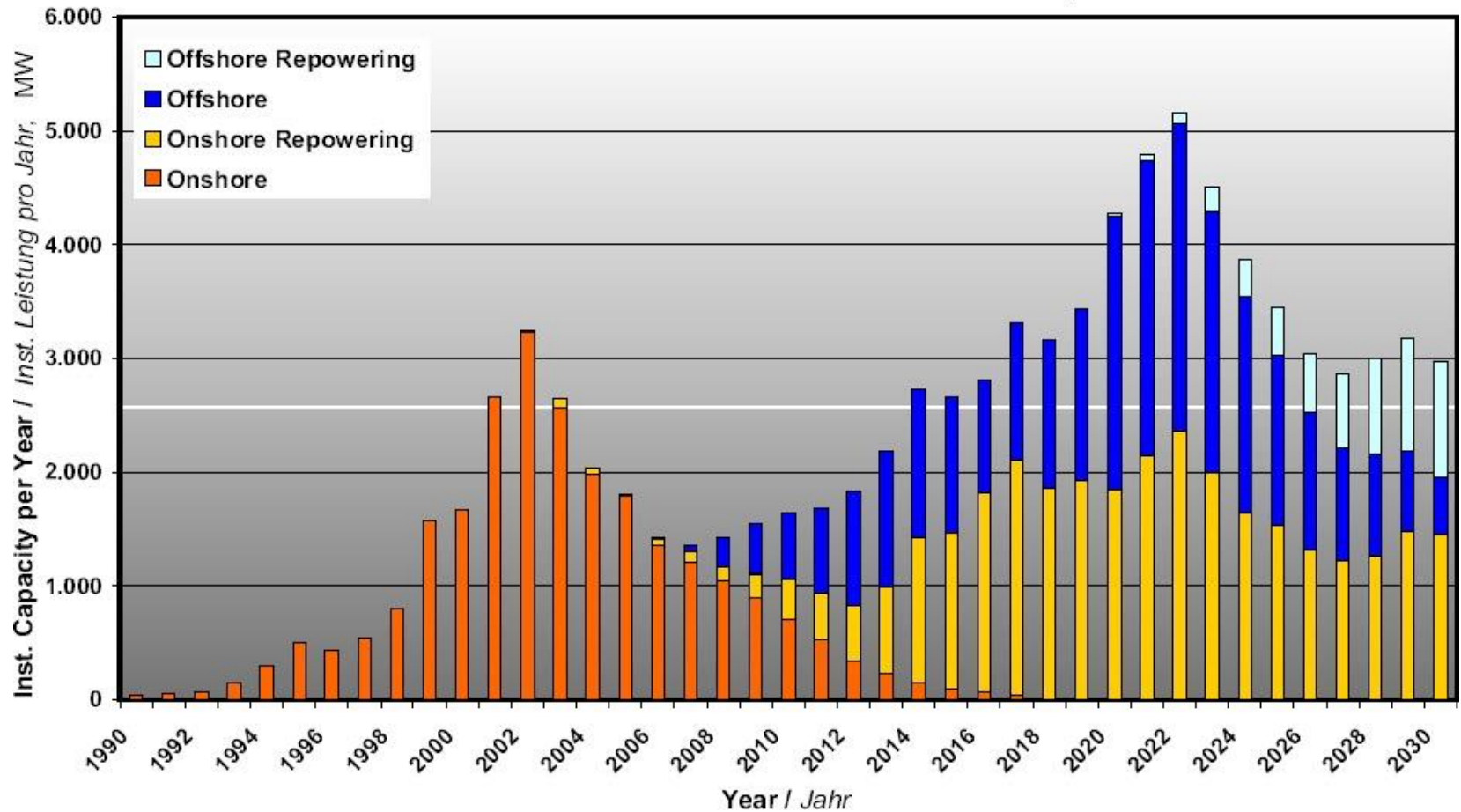


Onshore-Winderzeugung und Projektion, IEA

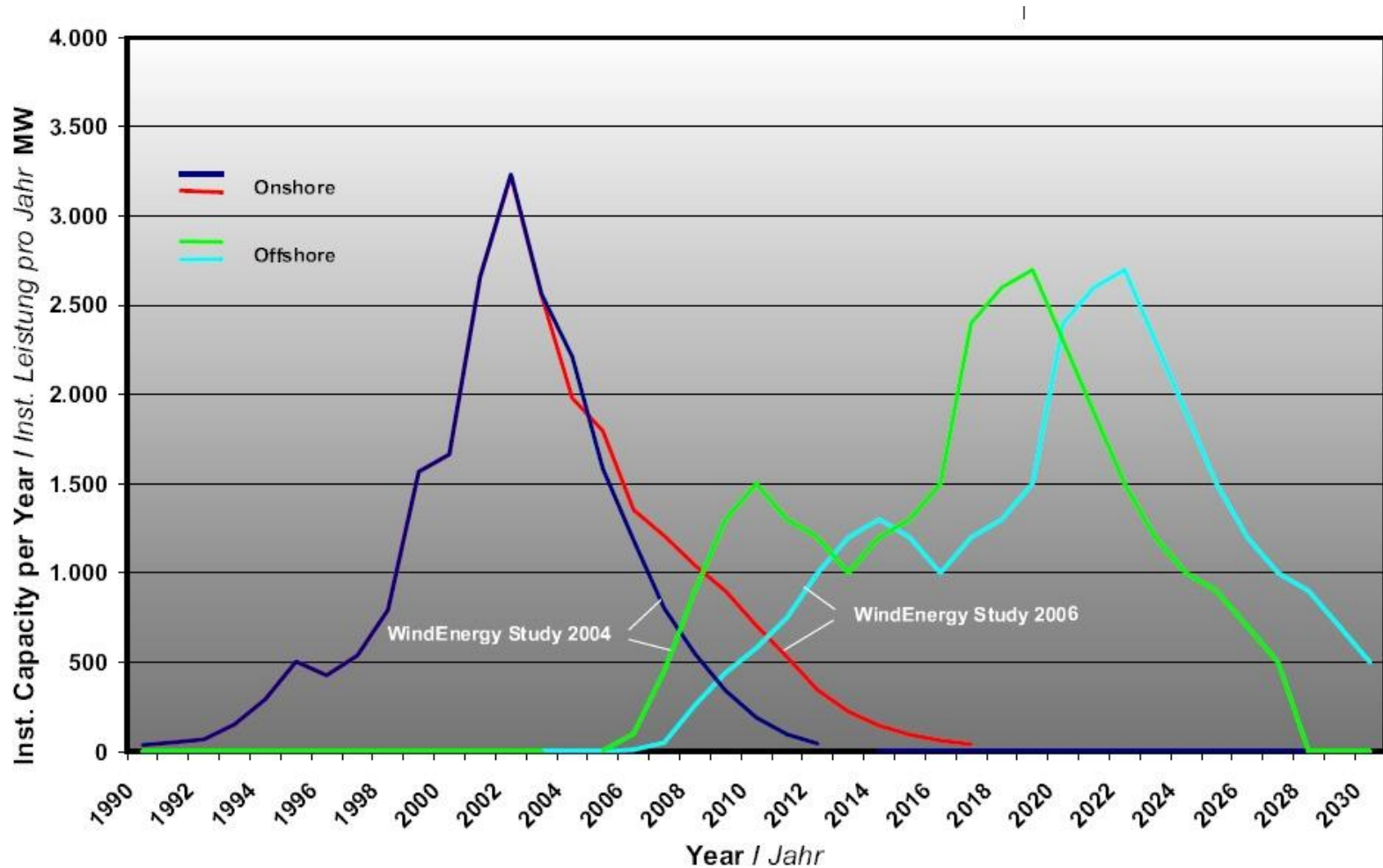


Offshore-Winderzeugung und Projektion, IEA

Prognose für Deutschland

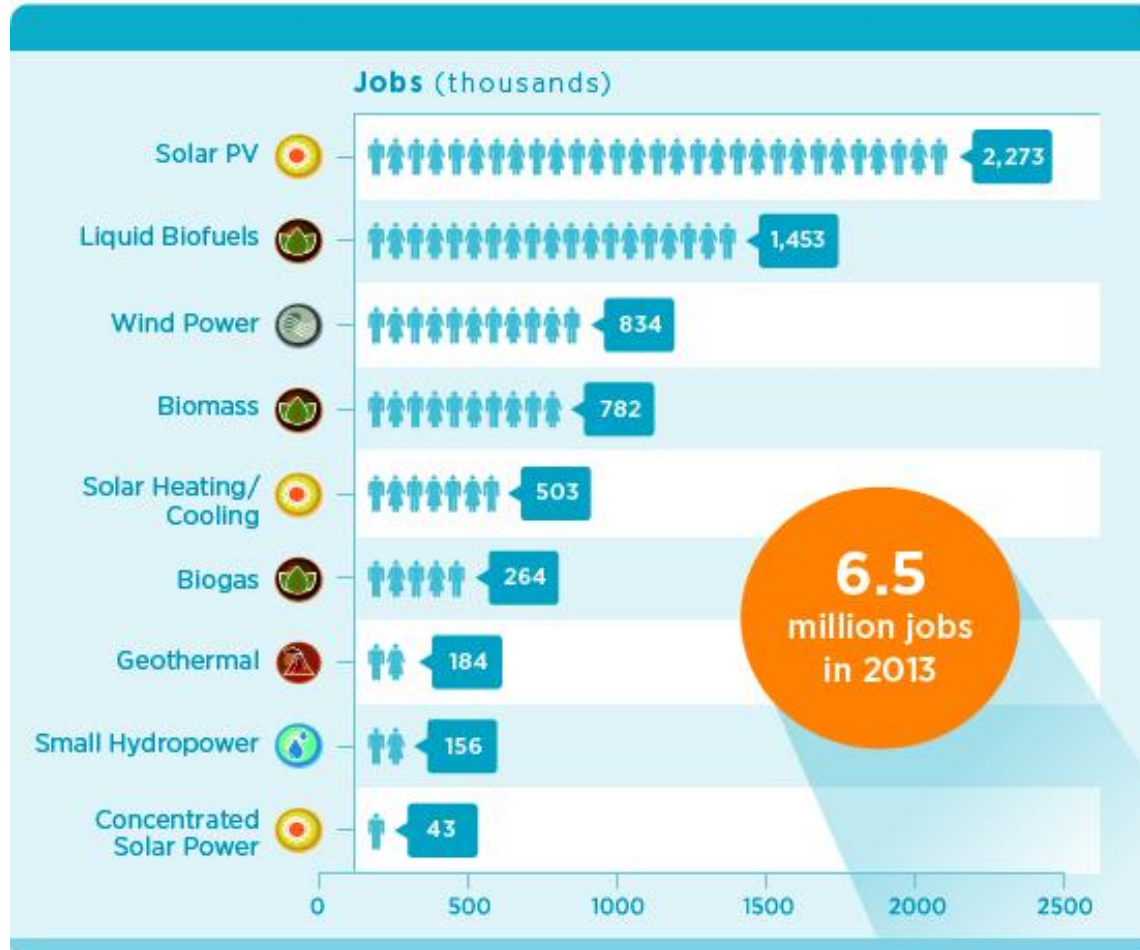


Veränderung der Prognosen



Arbeitsplätze

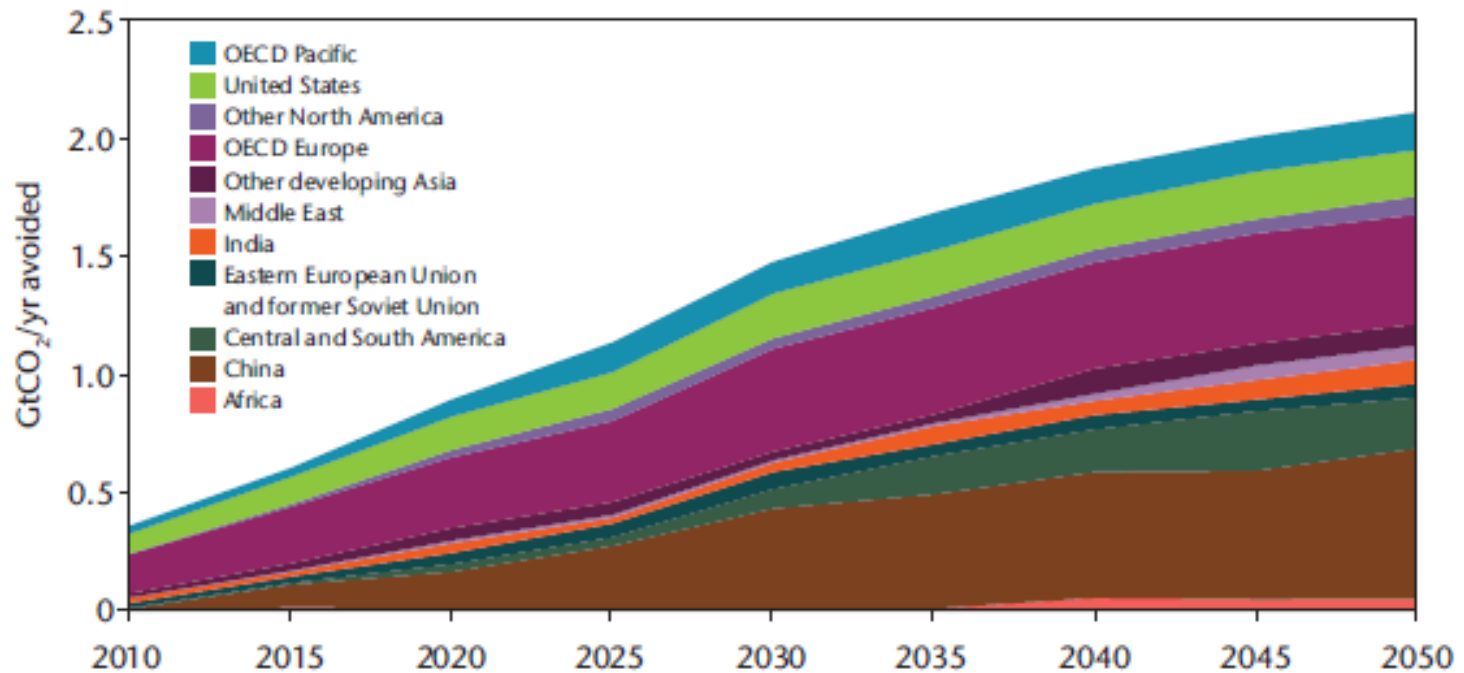
Renewable energy employment by technology



Source: IRENA (2014e)

CO₂-Einsparung

Regional CO₂ abatement through wind power in the 2008 BLUE Map scenario, 2010 – 2050, over the reference scenario



► Key point: In 2050, China (30%) and OECD Europe (22%) deliver the greatest shares of CO₂ emissions abatement through wind power, followed by Latin America (10%) the US (9%) and OECD Pacific countries (6%).

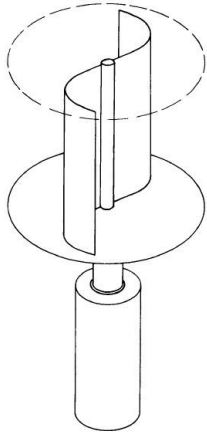
Bauformen von Windenergieanlagen

Bauformen von Windkraftanlagen

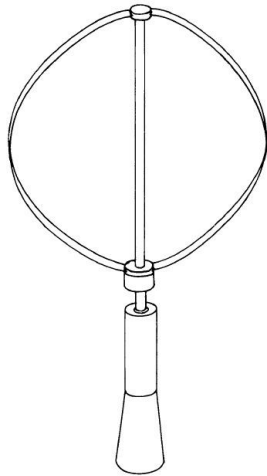
- Aerodynamische Wirkungsweise
 - Widerstandsläufer
 - Auftriebsläufer
- Schnelllaufzahl
 - Langsamläufer
 - Schnellläufer (heutzutage fast alle)
- konstruktive Eigenschaften
 - Vertikalachser (VAWT)
 - Horizontalachser (HAWT)

Vertical axis wind turbine (VAWT)

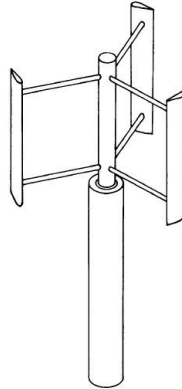
Savonius-Rotor



Darrieus-Rotor



H-Rotor



Anemometer



http://www.ecosources.info/en/topics/Savonius_vertical_axis_wind_turbine



http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Darrieus_rotor002.jpg

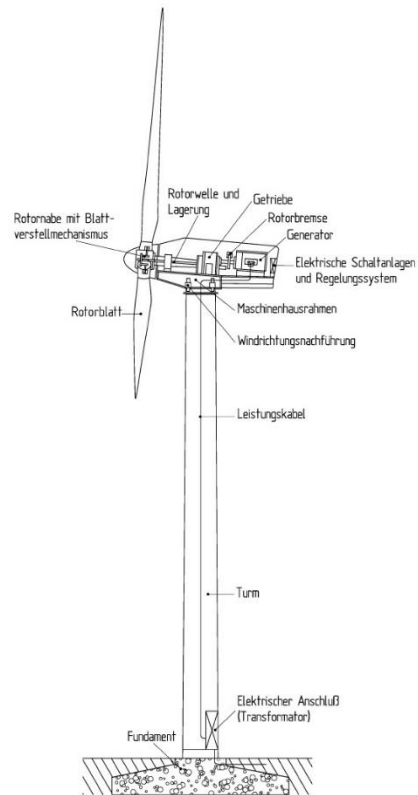


<http://www.sbgenergy.net/neue-energie/technik/windkraftwerke/darrieus.htm>

Horizontal axis wind turbine (HAWT)



http://www.solarnavigator.net/wind_turbines.htm

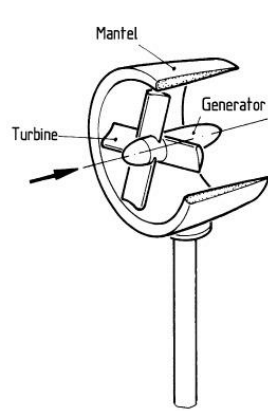


Skizze einer HAWT

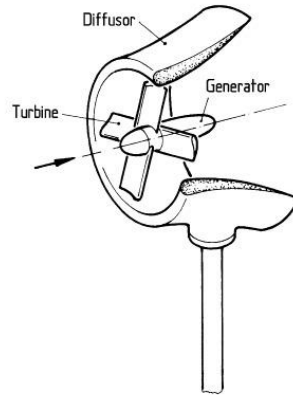


http://profile.ak.fbcdn.net/hprofile-ak-snc4/50252_121164064580420_3179513_n.jpg

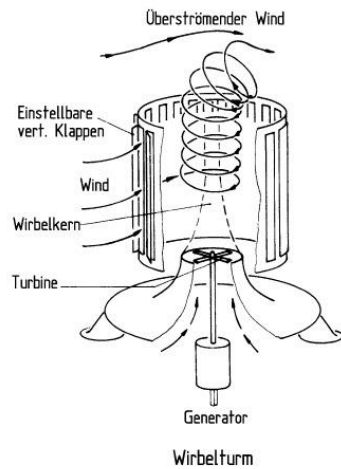
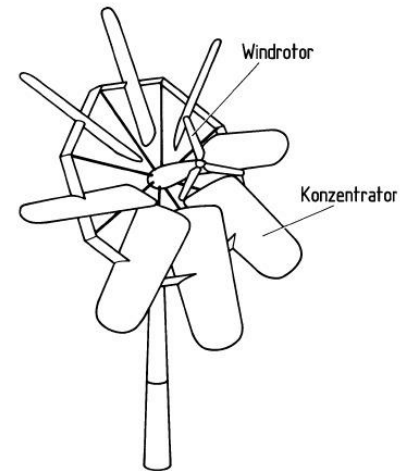
Windenergie-Konzentratoren



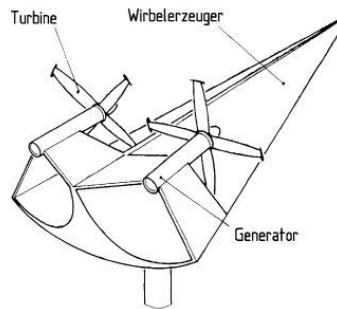
Einfache Mantelturbine



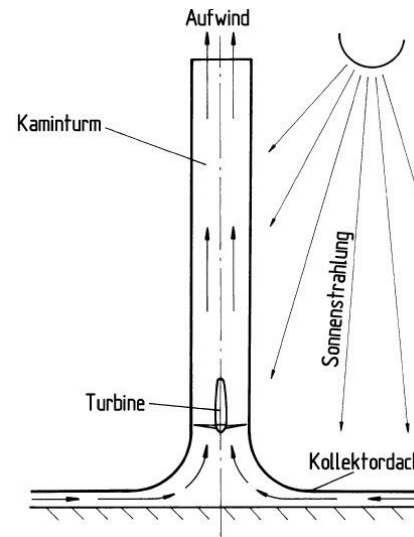
Windturbine mit Diffusor



Wirbelturm



Delta-Konzentrator





<http://www.udo-leuschner.de/basiswissen/SB111-04.htm>

Thermal upwind power plant, Spain, 1982



Mantled turbine

http://handelshaus-nebe.de/html/nebe_d_grossprojekte_wind_details.htm



Diffuser turbine

<http://www.twecs.org/>

Physikalische Grundlagen, Modelle und Optimierung

Physikalische Grundlagen der Windenergiewandlung

Kraft auf die Turbine

$$F = \dot{m}(v_1 - v_2)$$

Leistung

$$P = Fv' = \dot{m}(v_1 - v_2)v'$$

Geschwindigkeit in der Rotorebene (Froudesches Theorem)

$$v' = \frac{1}{2}(v_1 + v_2)$$

Massenstrom

$$\dot{m} = \rho A v' = \frac{1}{2}\rho A (v_1 + v_2)$$

Mechanische Leistung

$$P = \frac{1}{4}\rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2)$$

Gesamtleistung

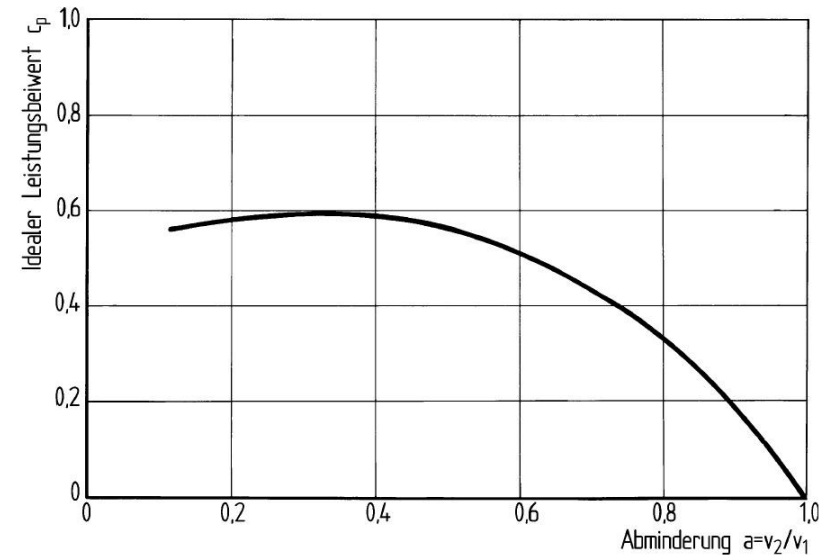
$$P_0 = \frac{1}{2}\rho v_1^3 A$$

Leistungsbeiwert

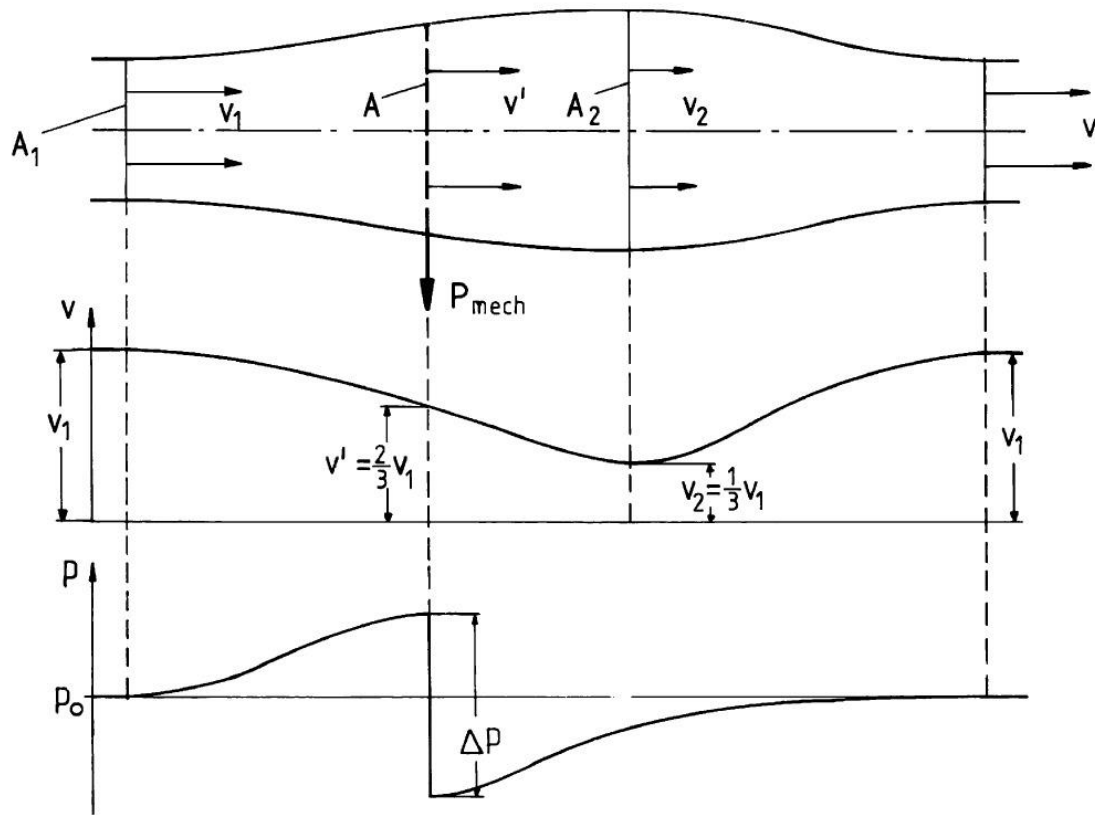
$$c_p = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{1}{4}\rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2)}{\frac{1}{2}\rho v_1^3 A}$$

$$c_p = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right)$$

$$c_p = \frac{16}{27} \quad v' = \frac{2}{3} v_1 \quad v_2 = \frac{1}{3} v_1$$



Physikalische Grundlagen der Windenergieumwandlung



- Die mechanische Leistung, die dem Wind entnommen werden kann, ist proportional zur dritten Potenz der Geschwindigkeit
- Die Leistung ist proportional zum Rotorquerschnitt, d.h. quadratisch zum Durchmesser
- $c_{p,\text{max}} = 0.593$
- $v' = \frac{2}{3}v$
- $v_2 = \frac{1}{3}v$

Strömungsverhältnisse bei der Durchströmung eines idealen Windenergieumwandlers mit maximalem Entzug an mechanischer Leistung

Widerstandsnutzende Windenergieumwandler

Leistung

$$P = F_W v_r$$

Kraft

$$F_W = c_W \frac{1}{2} \rho (v_W - v_r) A$$

→

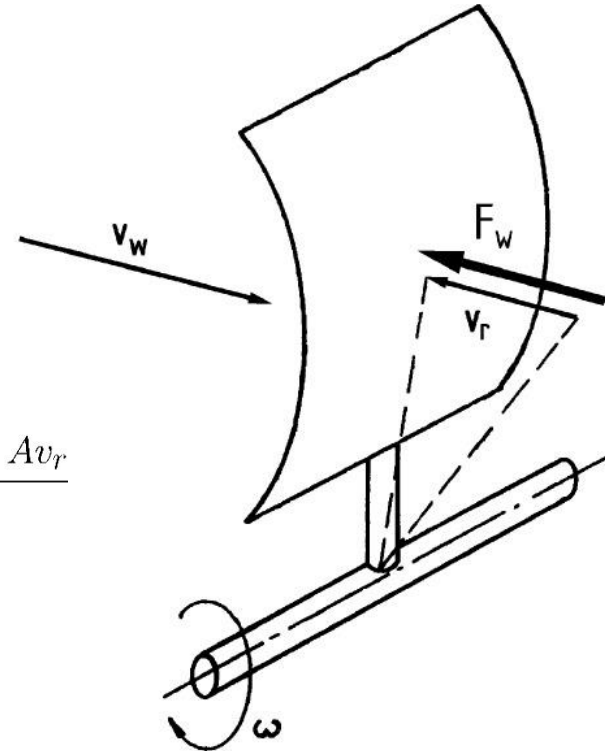
$$P = \frac{1}{2} \rho c_W (v_W - v_r) A v_r$$

Leistungskoeffizient

$$c_P = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{1}{2} \rho c_W (v_W - v_r) A v_r}{\frac{1}{2} \rho v_W^3 A}$$

Max Koeffizient

$$c_{P,max} = \frac{4}{27} c_W$$

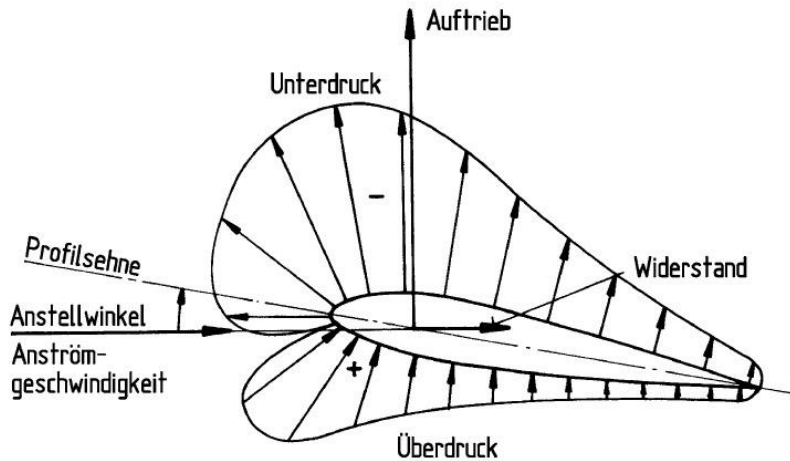


Der Widerstandsbeiwert einer konkav zur Windrichtung gekrümmten Fläche ist kaum größer als 1.3

$$c_{P,max} \approx 0.2$$

- nur 1/3 von Betz
- nur gültig für eine Translation ohne Rotation

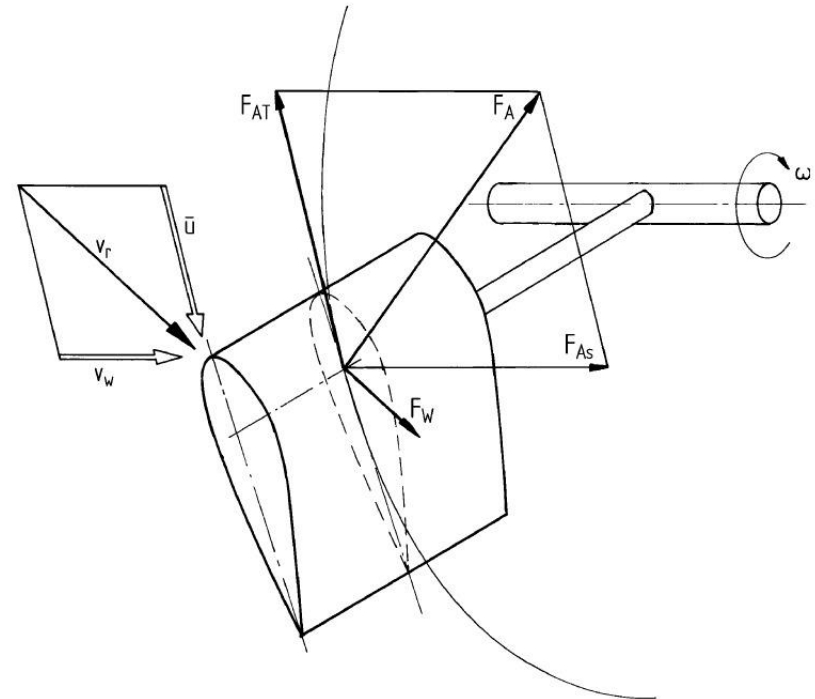
Auftriebsnutzender Rotor



Luftkräfte an einem umströmten Tragflügelprofil
-> erheblich besserer Wirkungsgrad

Aufspaltung der Gesamtkraft in 2 Teile

- in Richtung der Anströmung \rightarrow Widerstand
- senkrecht zur Anströmung \rightarrow Auftrieb



Anströmgeschwindigkeiten und Luftkräfte an einem
Propellerartigen auftriebsnutzenden Rotor
(Proportionen nicht realistisch)

Zerlegung des Auftriebs in 2 Teile
in der Rotorebene \rightarrow Antriebsmoment
senkrecht zur Rotorebene \rightarrow Schub

Die aerodynamischen und dynamischen Eigenschaften des Rotors sind in mehrfacher Hinsicht bedeutend für das Gesamtsystem

- Die Fähigkeit, möglichst viel Windenergie in **mechanische Arbeit** umzusetzen
- Fähigkeit, das instationäre Angebot des Windes in ein **gleichförmiges Drehmoment** umzuwandeln bei niedrigen dynamischen Lasten
→ Verringerung der Belastungen für die nachfolgenden Systeme, Getriebe, Generator, ...
- **Regelung**
- **Betriebsführung** (ungünstiges Drehmomentverhalten, Strömungsablösungsverhalten)
- aerodynamisches **Geräusch** bei hohen Blattspitzengeschwindigkeiten

Theorie von Betz, 1922-25, Leiter der Aerodynamischen Versuchsanstalt, Göttingen

Annahmen:

- eindimensional
- stationär
- inkompressibel
- keine Wärmeströme
- reibungsfreie Strömung ohne Verluste
- der Rotor befindet sich in einer einzelnen Ebene
- Kein Einfluss der Rotation
- Kein Einfluss der Blattanzahl

Physikalische Grundlagen der Windenergieumwandlung

Kinetische Energie einer Masse m mit der Geschwindigkeit v $E = \frac{1}{2}mv^2$

Volumenstrom $\dot{V} = v \cdot A$

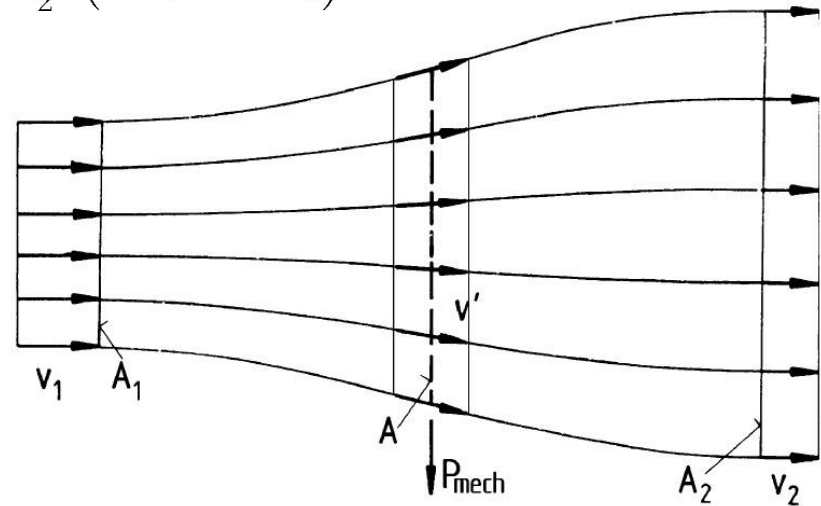
Massenstrom $\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A$

Gesamtleistung $P = \frac{1}{2}\rho v^3 A$

Mechanische Leistung $P = \frac{1}{2}\rho A_1 v_1^3 - \frac{1}{2}\rho A_2 v_2^3 = \frac{1}{2}\rho (A_1 v_1^3 - A_2 v_2^3)$

Massenerhaltung $\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2$

$$\rightarrow P = \frac{1}{2}\rho v_1^2 A_1 (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2}\dot{m} (v_1^2 - v_2^2)$$

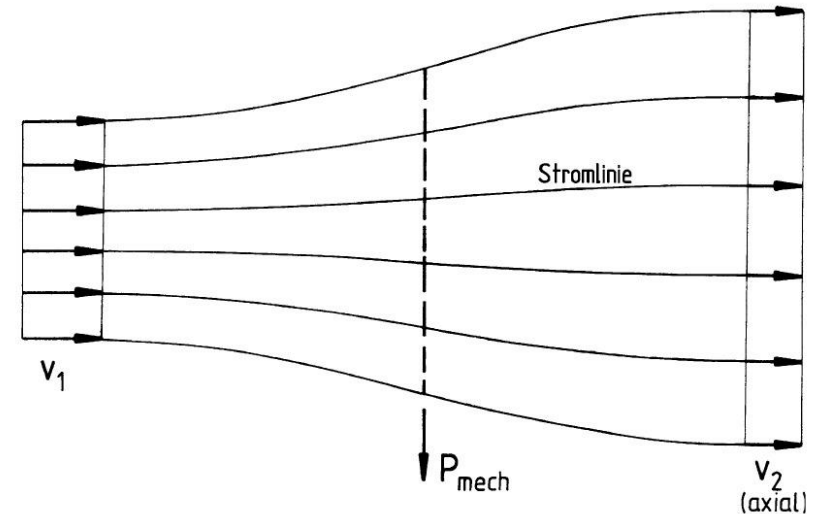


In der Realität:

- Die Luft erhält eine drehende Bewegung.
- Der Nachlauf hat einen Drall
- Drehimpulserhaltung
- Die Rotationsenergie reduziert den nutzbare Anteil der Gesamtenergie im Luftstrom
- Der Leistungsbeiwert wird kleiner als in der Betz-Theorie
- Der Leistungsbeiwert wird abhängig vom Verhältnis der Rotationsgeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit

Betz Theorie:

- stark vereinfacht, 1-D, etc.
- Verzögerung der Geschwindigkeit
- Auslenkung der Stromlinien in nur einer Ebene

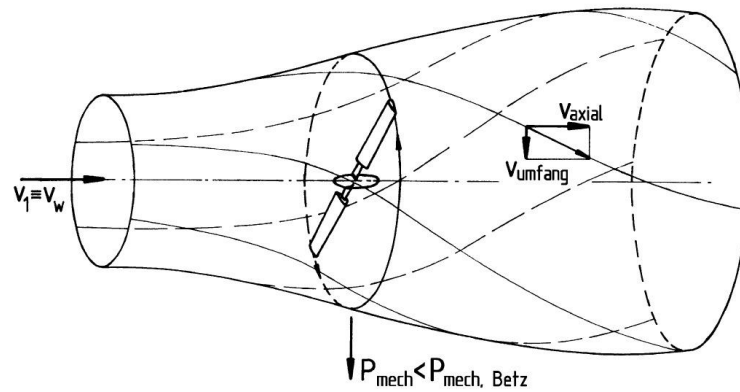


Tip speed ratio λ , Schnelllaufzahl

$$\text{tip speed ratio} = \lambda = \frac{u}{v_W} = \frac{\text{circumferential velocity}}{\text{wind velocity}}$$

Tip speed ratio λ , Schnelllaufzahl

$$\text{tip speed ratio} = \lambda = \frac{u}{v_W} = \frac{\text{circumferential velocity}}{\text{wind velocity}}$$



Erweiterte Impulstheorie mit Berücksichtigung des Dralls

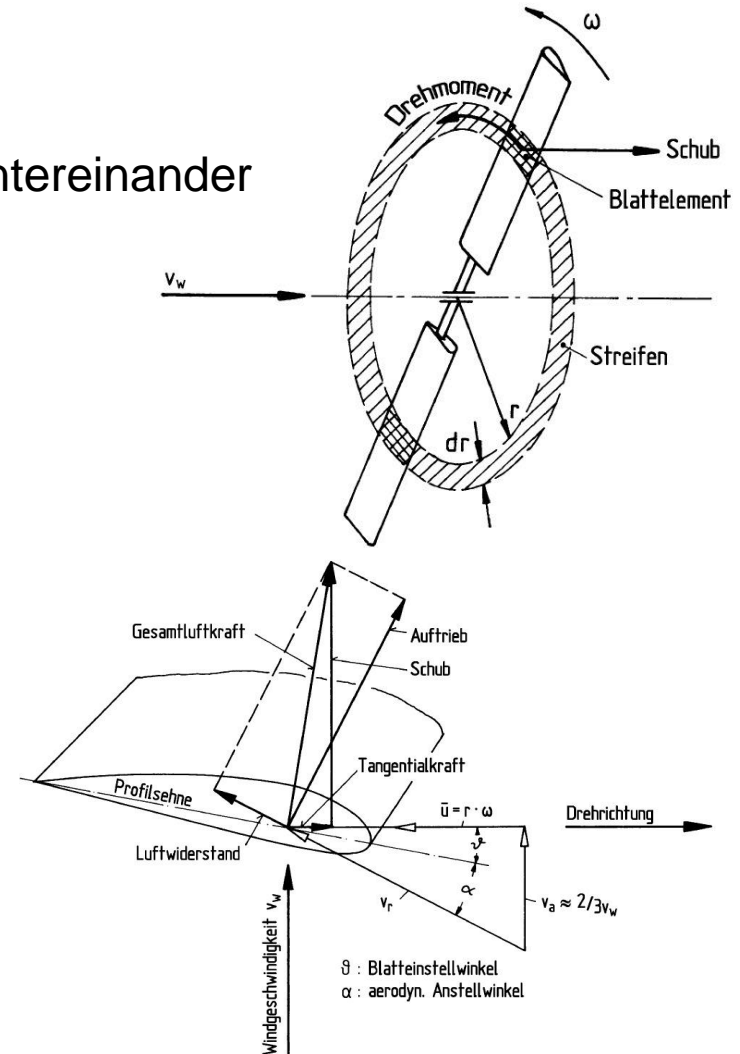
Blattelementtheorie = strip theory

Blattelementtheorie:

- Blattelemente im Abstand r von der Achse
- Vereinfachung: kein Einfluss der Elemente untereinander
- örtliche Rotorblatttiefe, radiale Erstreckung
- lokaler Anstellwinkel
- axiale Geschw. + Rotationsgeschw.
= resultierende Anstellgeschwindigkeit
- Luftkraftbeiwerte aus Profilpolaren

Halbempirische Ansätze für zusätzliche Verluste:

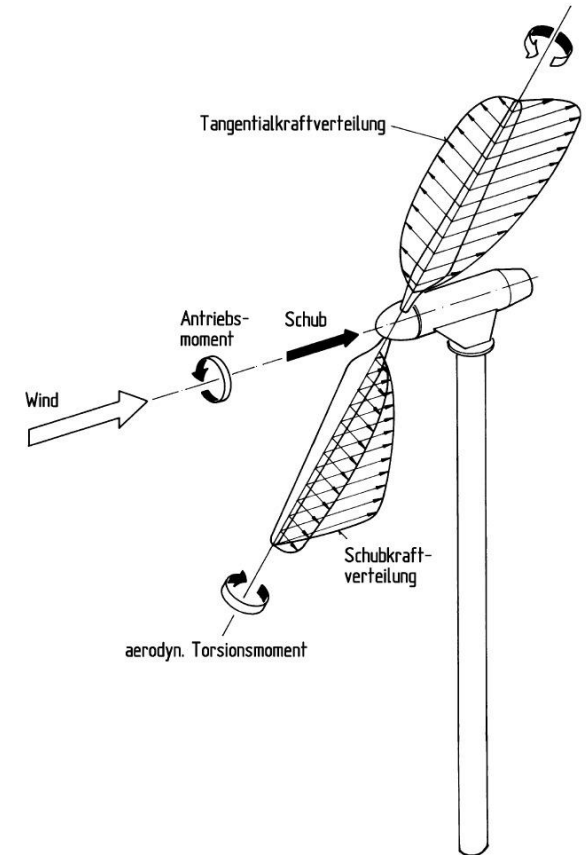
- freie Wirbel am Rotorende
- Nabenverluste



Blattelementtheorie

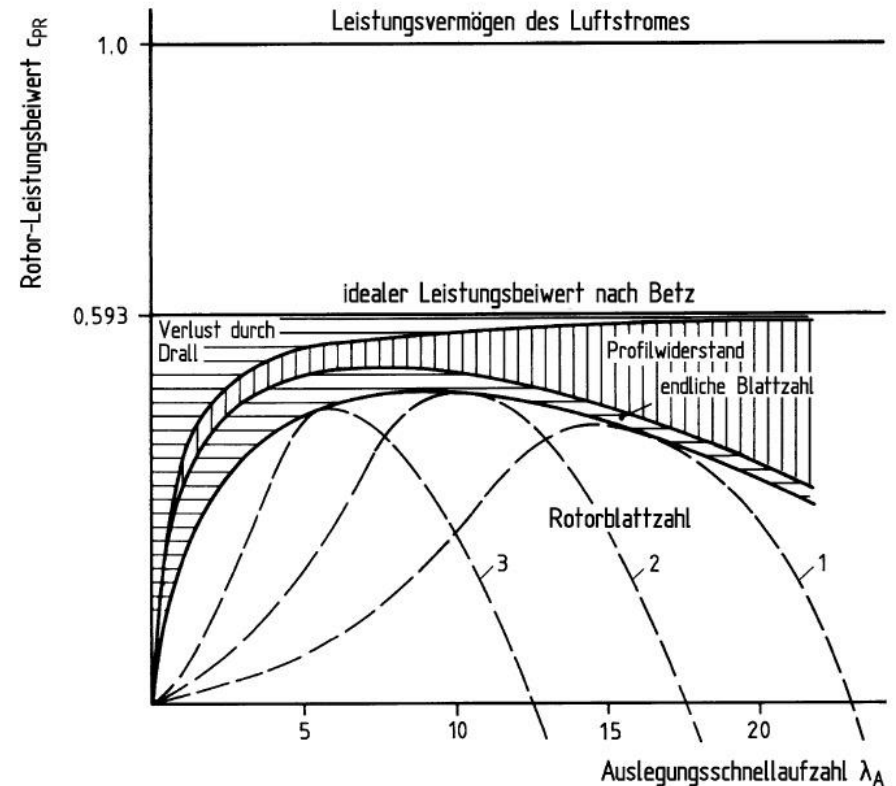
Die Blattelementtheorie ergibt:

- Die **Tangentialkräfte** über der Blattlänge
- **Normalkräfte** entlang der Blattlänge
- Integration der Kräfte
→ **Antriebsmoment** (+ Drehzahl = Leistung)
+ **Rotorgesamtschub**



Leistungsbeiwert

- **Oben: Betz**
- **Mitte: Berücksichtigung des Drehimpulses im Nachlauf**
 - Betz wird bei unendlich großer Schnelllaufzahl erreicht
- **Unten: Einführung der Luftkräfte**
 - weitere Reduktion
 - Optimum bei einer Schnelllaufzahl
 - gute Übereinstimmung mit realer Kurve
 - einfache mathematische Beziehungen
 - gut für den Entwurf
- **Ganz unten**
 - 3-dimensionales Strömungsfeld
 - halbempirische Modelle für Nabe und Spitze
 - Radialkomponente der Geschwindigkeit
 - keine instationären Effekte durch schnelle Anstellwinkeländerungen

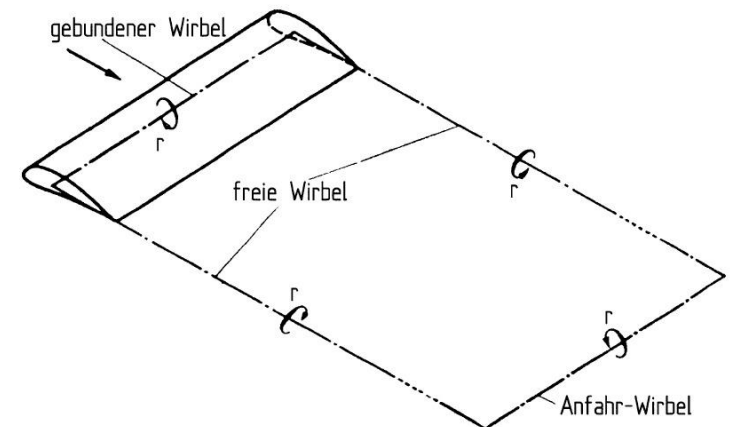


Wirbelmodell der Rotorströmung

- Rotor aerodynamik:
komplexere physikalisch-mathematische Modelle
- geeignete Verfahren stehen zur Verfügung aus der Luftfahrt
- Anpassung für Windrotoren

Singularitätenmodell aus den 30er Jahren

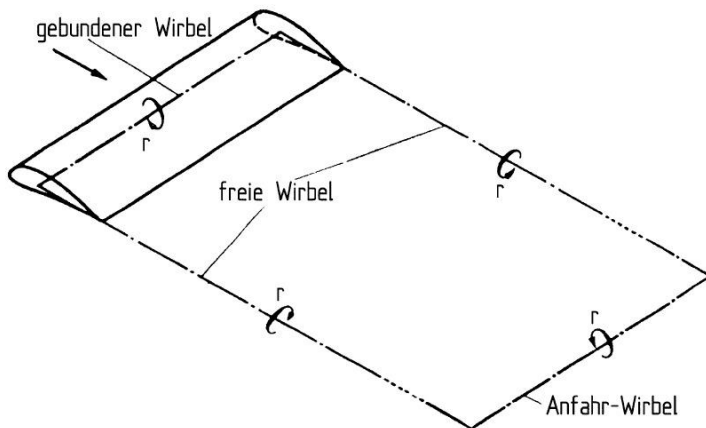
- Profiltheorie ist 2-dimensional
- Flügeltheorie ist 3-dimensional
- Die räumliche Umströmung eines endlichen Profils wird mit Quellen, Senken und Wirbeln beschrieben (Singularitäten)



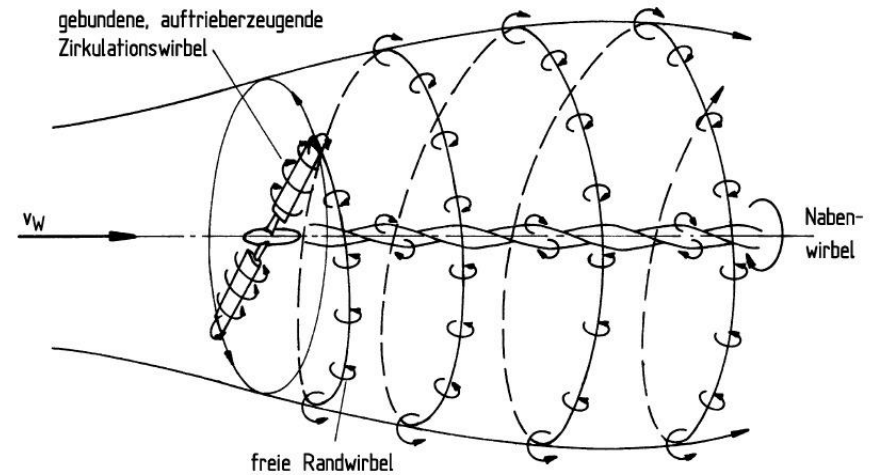
Einfachstes Wirbelmodell eines Tragflügels

Singularitätenmodell aus den 30er Jahren

- Die Singularitäten sind mathematisch erfassbar
- Die Singularitäten werden der Hauptströmung überlagert
- Der Auftrieb kann durch einen „gebundenen Wirbel“ berechnet werden
- Der induzierte Widerstand in den „freien Randwirbeln“ kann berechnet werden
- ähnliche Ergebnisse wie die Blattelementtheorie
- enthält räumliche Strömungsvorgänge



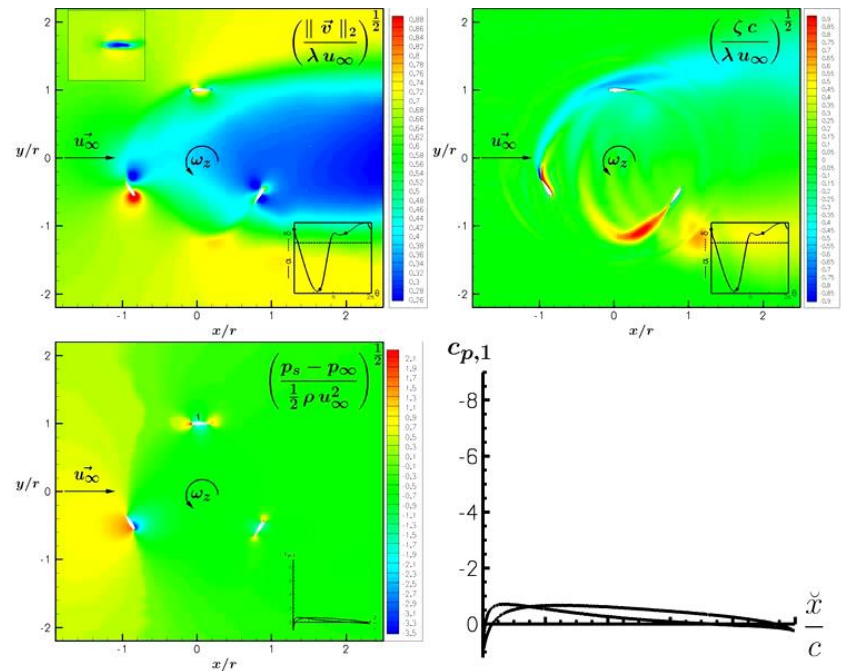
Einfachstes Wirbelmodell eines Tragflügels



Wirbelmodell der Rotorströmung

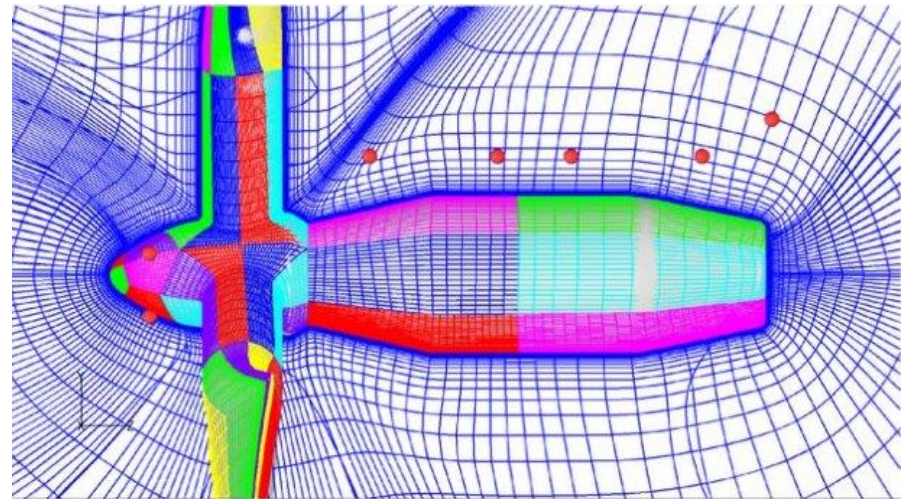
CFD – Computational Fluid Dynamics

- Unterteilung des Strömungsfeldes in kleine Volumenelemente
- Lösung der Erhaltungsgleichung für jedes Element
- Integration liefert Kräfte und Momente
- Eulergleichungen
 - reibungsfrei
 - keine Grenzschichten
 - aber räumlich und instationär
- Euler plus Grenzschichtgleichungen
 - reibungsbehaftet
 - laminar und turbulent
 - keine Strömungsablösungen

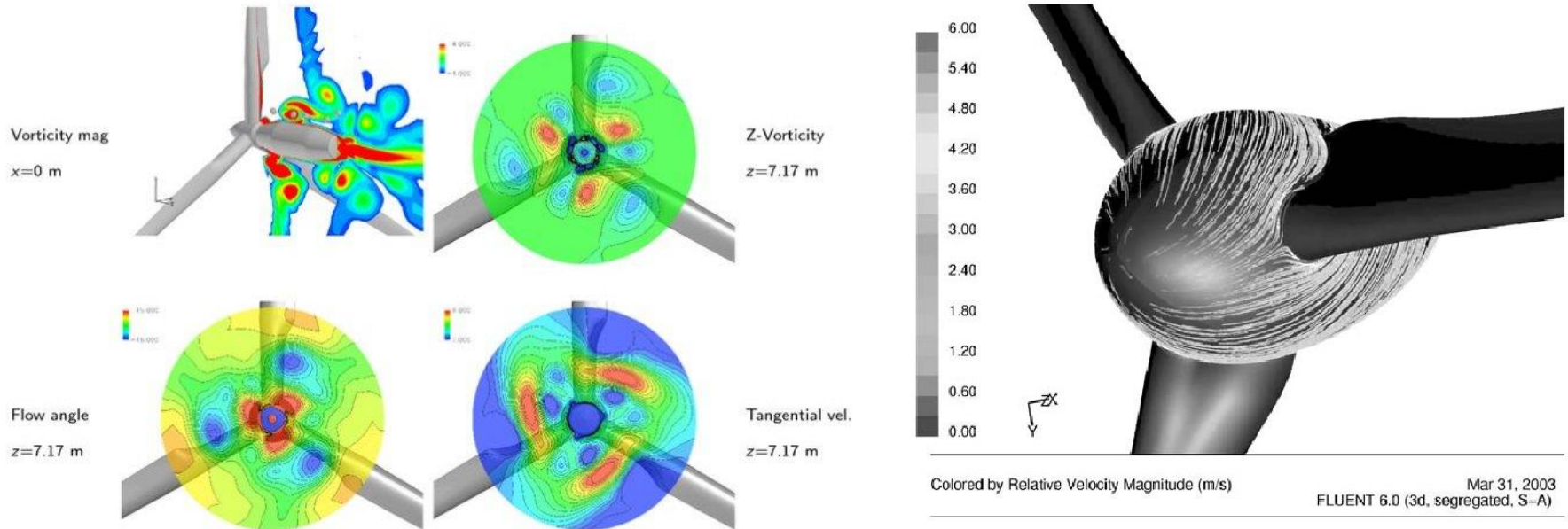


CFD – Computational Fluid Dynamics

- Navier-Stokes-Gleichungen
 - laminar und turbulent
 - kann prinzipiell auch Ablösungen
 - abhängig vom Turbulenzmodell
- Large eddy simulation, (Grobstruktursimulation)
 - sehr teuer
 - kann für Akustik verwendet werden
- Direkte numerische Simulation
 - noch teurer
 - kann für Akustik verwendet werden



CFD – Computational Fluid Dynamics



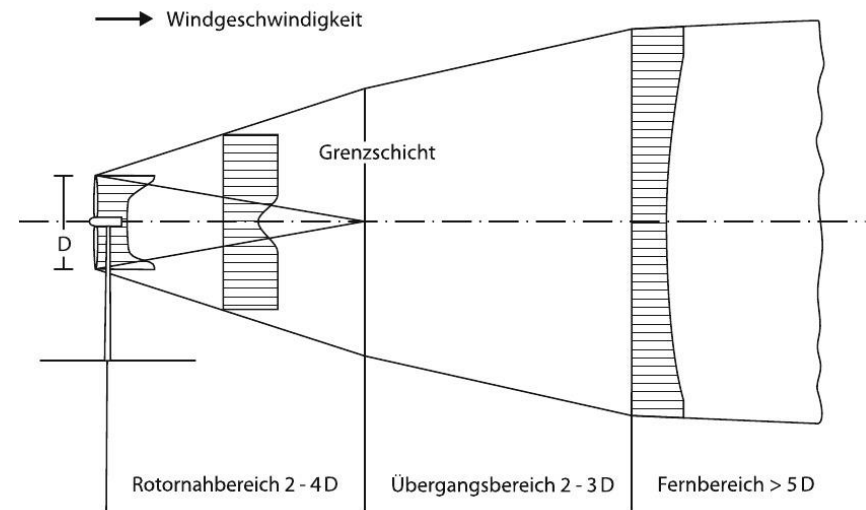
Nicht für Konzeptstudien für den Entwurfsingenieur geeignet. Aber die räumliche Lösung gibt einen Einblick in das komplexe Strömungsfeld.

Rotornachlaufströmung

- In Windparks stehen WKA's sehr nahe beieinander w
- windabwärts stehende Anlagen werden vom Nachlauf beeinflusst.
- verminderte Geschwindigkeit im Nachlauf verringert die Energieausbeute der folgenden WKA's
- höhere Turbulenz erhöht die dynamischen Lasten
- reduzierte statische Lasten durch niedrigere Geschwindigkeit
- Blatteinstellwinkelregelung (pitch control) der nachfolgenden Anlagen wird beeinflusst

3 Regionen

- Nahbereich
 - Druckausgleich
 - Wirbelschleppen
 - Minimale Geschwindigkeit bei $\sim 1 - 2 D$
- Übergangsbereich
 - Erzeugung von Turbulenz in der G.-S.
 - Vermischung mit der Umgebung
 - Wirbel verschwinden weitgehend
- Fernfeld
 - Gauß-Verteilung der Geschwindigkeit
 - Mischung mit der Umgebung
 - hängt von der Tu-Intensität der Umgebung ab

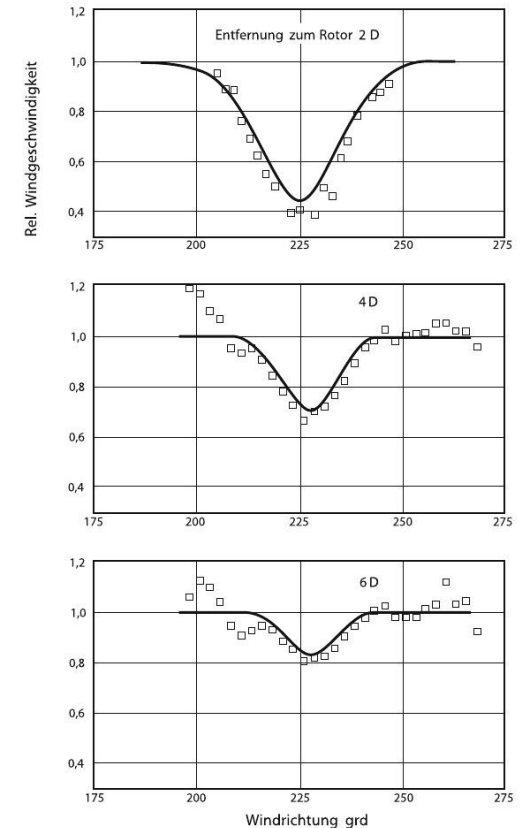


Wichtige Erkenntnisse aus der theoretischen Analyse

- Schubbeiwert entscheidend für Impulsverlust und Ausmaß des Nachlaufes
- Nachlauf hängt von Schnelllaufzahl, Blatteinstellwinkel, etc. ab
- Rotoren mit nicht verstellbaren Blättern erzeugen bei Vollast eine steigende Schubkraft
- Fernfeld wird maßgeblich durch Umgebungsturbulenz bestimmt
 - Je höher die Umgebungsturbulenz desto schneller der Geschwindigkeitsausgleich
- Im Nachlauf wird erhebliche Turbulenz erzeugt, die sich zur Umgebungsturbulenz addiert
 - Zusätzlich 130 bis 150 % des Umgebungswertes. Der Effekt ist bedeutend für die Ermüdungsfestigkeit

Wichtige Erkenntnisse aus der theoretischen Analyse

- Maximale Verzögerung der Geschwindigkeit im Zentrum
- 2D ca. 60 %
- 4D ca. 30 %
- 6 D ca. 20 %
- (nur beispielhaft für eine ältere Anlage)



Leistungscharakteristik des Rotors

- Diagramme für Leistung, Drehmoment und Schub über der Windgeschwindigkeit
- Üblicherweise dimensionslos: Leistungsbeiwert über Schnelllaufzahl, sinnvoll für die Aerodynamik
- Für den Benutzer einer WKA ist die Leistungskennlinie der Gesamtanlage wichtiger. Sie enthält den elektr. Strom in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit und beinhaltet auch Getriebe, Generator, etc.

$$P_R = c_{PR} \frac{1}{2} \rho v_W^3 A$$

$$M_R = c_{MR} \frac{1}{2} \rho v_W^2 A R$$

$$c_{PR} = \lambda c_{MR}$$

A: Rotorkreisfläche

v_W : Windgeschwindigkeit

c_{PR} : Rotorleistungsbeiwert

ρ : Luftdichte

P_R : Rotorleistung

Leistungscharakteristik des Rotors

- Der Leistungsbeiwert wird für eine bestimmte Schnelllaufzahl berechnet. Die Berechnung für mehrere Schnelllaufzahlen ergibt eine Kennlinie
- Leistungsbeiwert bei fester Drehzahl für versch. Windgeschw. oder bei einer Windgeschwindigkeit und mehreren Drehzahlen
- Bei Anlagen mit Blatteinstellwinkelregelung gibt es eine Linie für jeden Einstellwinkel und es ergibt sich ein Leistungskennfeld.

$$P_R = c_{PR} \frac{1}{2} \rho v_W^3 A$$

$$M_R = c_{MR} \frac{1}{2} \rho v_W^2 A R$$

$$c_{PR} = \lambda c_{MR}$$

A: Rotorkreisfläche

v_W : Windgeschwindigkeit

c_{PR} : Rotorleistungsbeiwert

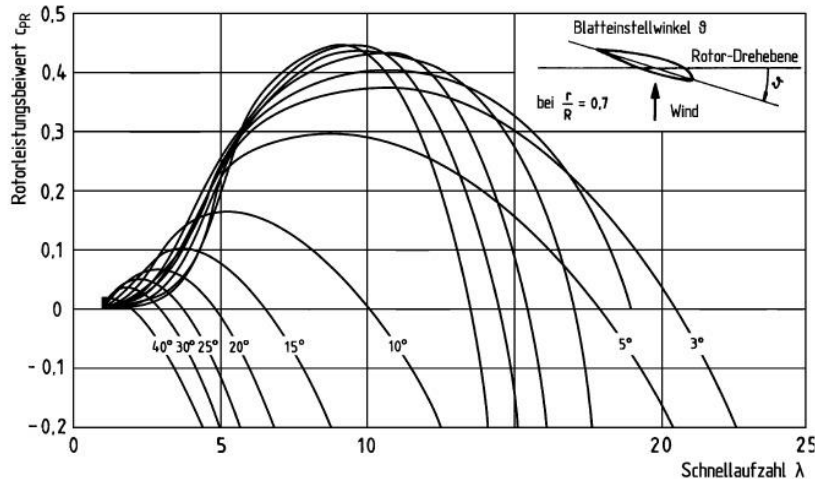
ρ : Luftdichte

P_R : Rotorleistung

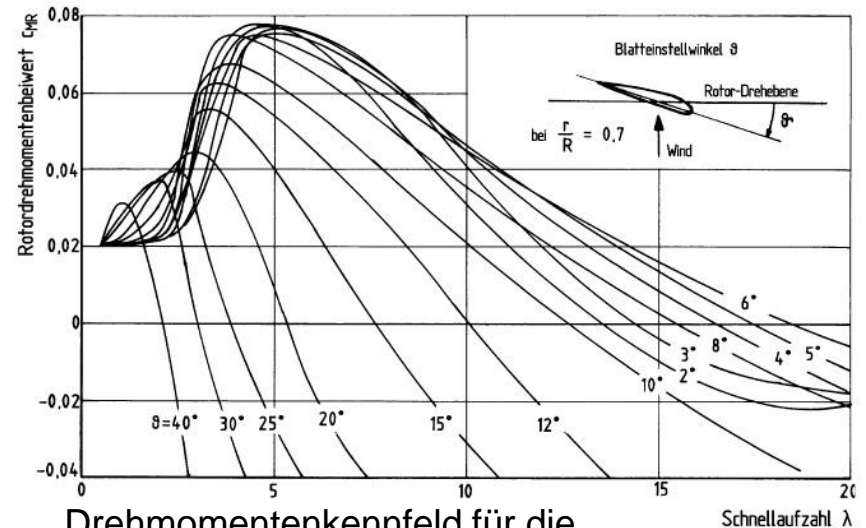
Rotorleistungskennfeld

Wesentliche Parameter:

- Anzahl der Rotorblätter
- Tiefenverteilung der Blätter (Grundriss)
- aerodynamische Profileigenschaften
- Verwindungsverlauf der Blätter



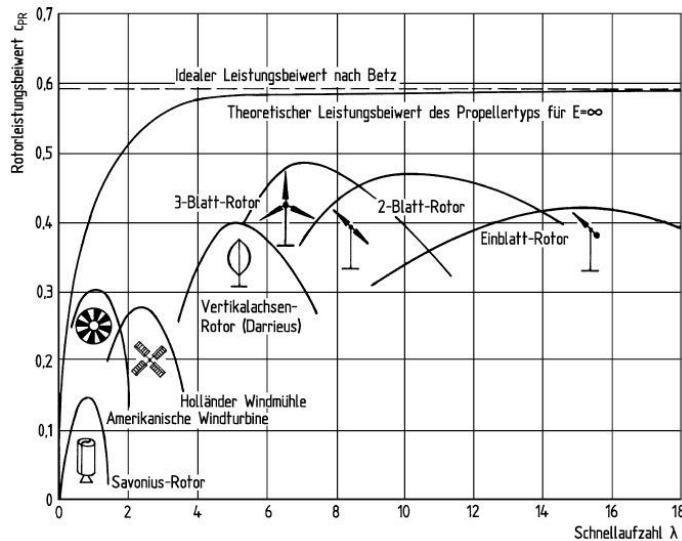
Leistungskennfeld für die Experimentalanlage WKA 60 (NACA 4415)



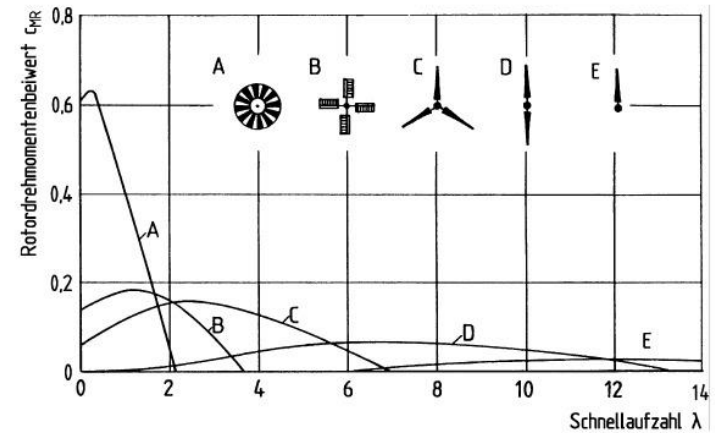
Drehmomentenkennfeld für die Experimentalanlage WKA 60 (NACA 4415)

Leistungscharakteristik

- Historische Rotoren nutzten nur den Widerstand $\rightarrow c_{PR} \sim 0.2 \dots 0.3$
- Auftriebsnutzende Schnellläufer erreichen 0.5
- Langsamläufer mit vielen Blättern haben ein hohes Moment



Rotorleistungsbeiwerte von Rotoren unterschiedlicher Bauart



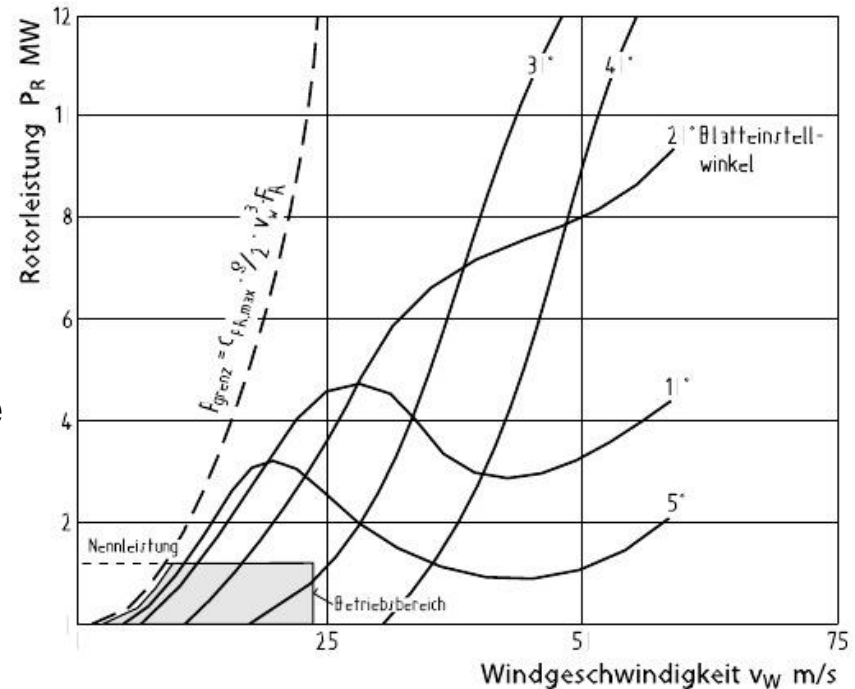
Rotorleistungsbeiwerte von Rotoren unterschiedlicher Bauart

Der schnelle 2-Blatt-Rotor ist extrem ungünstig. Er kann nur mit Blattverstellung anlaufen

Aerodynamische Leistungskontrolle

Grenzen:

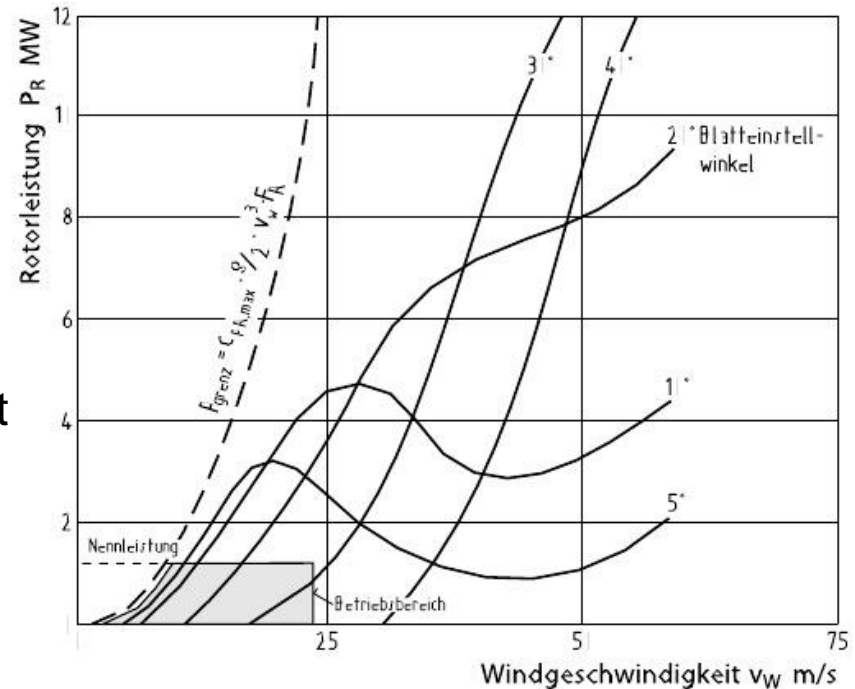
- Belastungen bei höheren Windgeschwindigkeiten werden höher als die Grenzen durch die Festigkeit
- bei großen Anlagen werden Sicherheitsabstände klein
- Der Generator hat ebenfalls eine zulässige Höchstleistung
- Drehzahlbegrenzung bei einem Störfall (Netzausfall)



Aufgenommene Rotorleistung des WKA-60-Rotors bei verschiedenen Einstellwinkeln und fester Drehzahl

Mögliche Abhilfen:

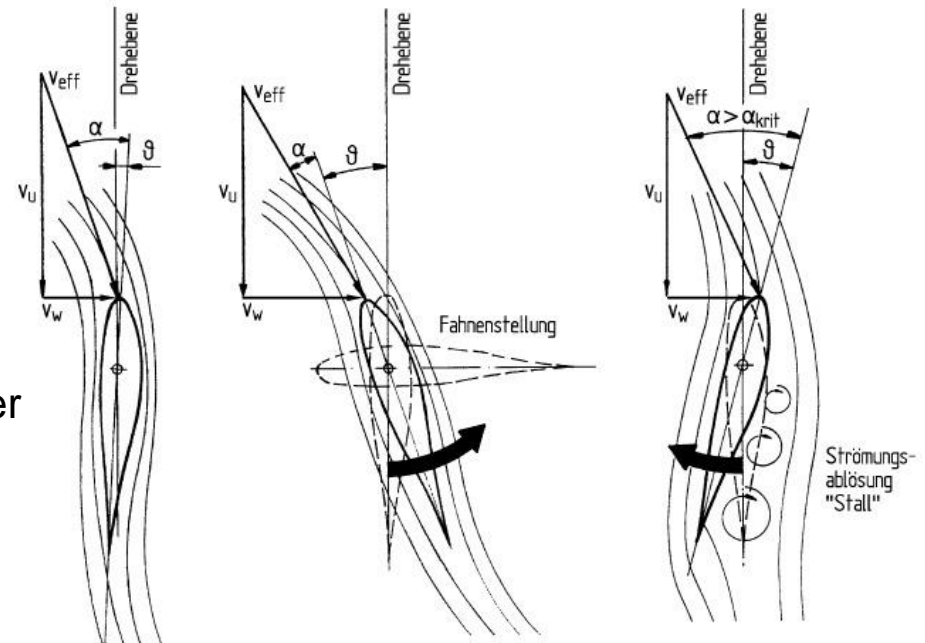
- Anstellwinkel verändern
- Verkleinern der Rotorangriffsfläche
- Veränderung der effektiven Anströmgeschwindigkeit
→ Variation der Drehzahl
- Regelung mit der Drehzahl ist nur begrenzt möglich (50Hz)
- Verringerung der Rotorkreisfläche, d.h. Drehen des Rotors aus der Windrichtung ist nur für sehr kleine Rotoren sinnvoll.



Aufgenommene Rotorleistung des WKA-60-Rotors bei verschiedenen Einstellwinkeln und fester Drehzahl

Blatteinstellwinkelregelung

- Die mechanische Verstellung des Einstellwinkels ist effektivste Methode
- Prinzipiell 2 Möglichkeiten
 - Verringerung des aero-dynamischen Anstellwinkels zu Reduzierung der Leistung
 - Vergrößerung des Anstellwinkels über den kritischen Winkel führt zur Strömungsablösung
- Stall geht auf kürzerem Weg

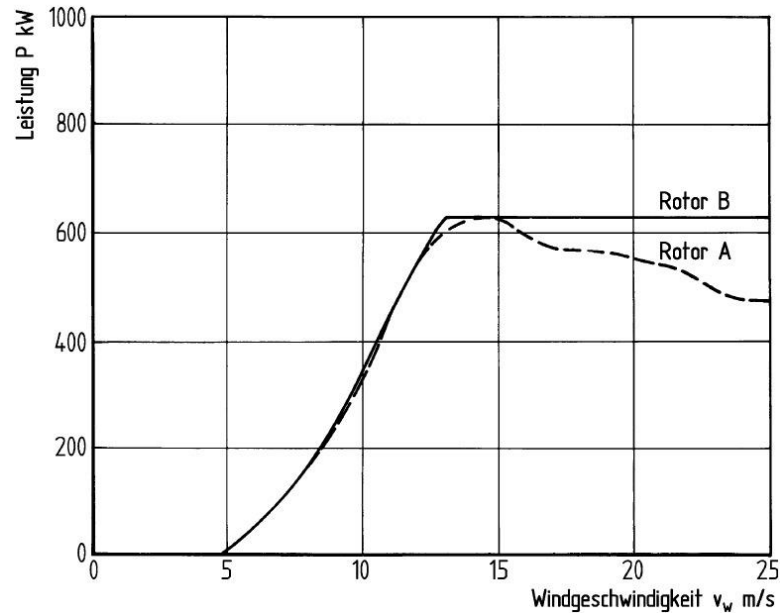


Regelung der Leistung durch Verstellen des Einstellwinkels in Richtung „Fahnenstellung“ oder in Richtung Ablösung, „Stall“

Blatteinstellwinkelregelung



Stall position
Strömungsblösung



Fahnenstellung
„Feathering position“

Model A:

- partiell verstellbare Blätter
- 3 feste Positionen
- nicht sehr genau
- hohe Belastungen für die Anlage
- flattern → hohe dynamische Lasten

Model B:

- kontinuierlich
- wesentlich ruhiger
- elektrische Leistung bleibt bis zur Abschaltgeschwindigkeit konstant

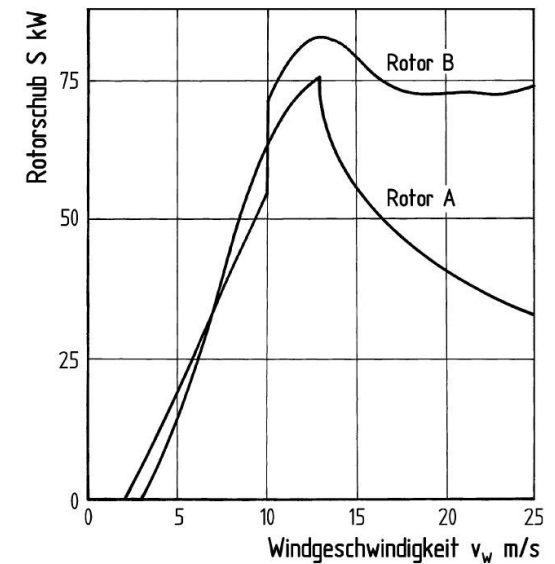
Blatteinstellwinkelregelung

Vorteile der Fahnenstellung:

- genaue Regelung der Leistung und Drehzahl ist möglich
(wichtig bei Inselbetrieb und beim Hochfahren)
- Der Schub nimmt nicht so stark ab
- Bei vollständiger Fahnenstellung sind die Lasten auf die Blätter und die gesamte Anlage kleiner

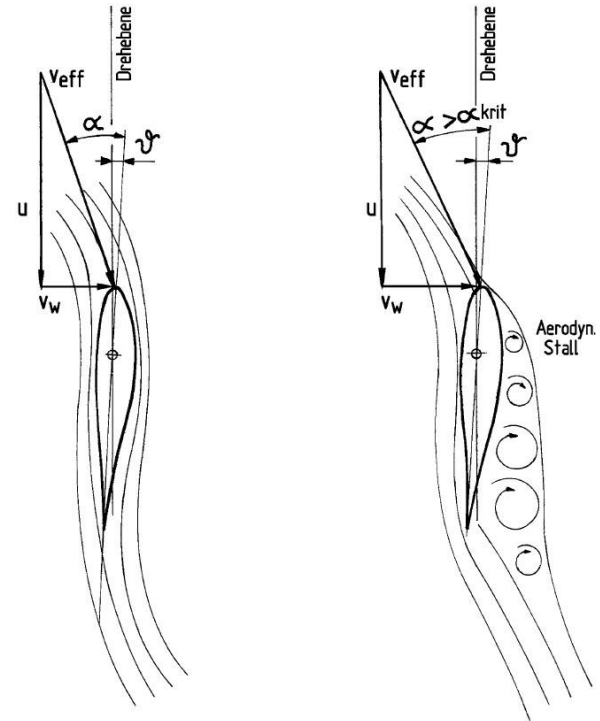
- Ganzblattverstellung ist nicht erforderlich, weil die meiste Leistung in den äußeren Bereichen erzeugt wird → Verstellung in den äußeren 25 – 30 % ist ausreichend
- Größerer Verstellbereich ist nötig
- Die Stillstandslasten sind größer als bei der Ganzblattverstellung

2-Blattanlage ohne Nabe



Leistungsbegrenzung durch Ablösung

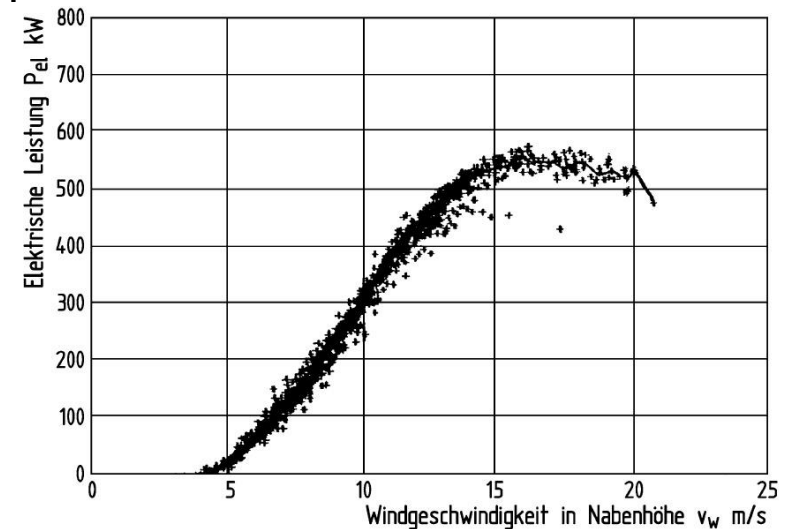
- besonders bei kleineren Anlagen
- bei großen Windgeschwindigkeiten löst die Strömung alleine ab
- Auslegungspunkt kurz unterhalb der optimalen Drehzahl
- „dänische“ Bauart
- erfordert hohe Festigkeit und Steifigkeit des Rotors
- Die Generatorleistung muss hoch sein (bei Böen)
- benötigt gutes Anlaufmoment (3 oder mehr Blätter)
- beschränkt auf Netzparallelbetrieb an einem starren Netz
- mechanische und aerodynamische Bremsen sind notwendig bei Wegfall des Generatormomentes



Ablösung bei zunehmendem Wind und konstanter Drehzahl ohne Blattverstellung

Leistungsbegrenzung durch Ablösung

- besonders bei kleineren Anlagen
- bei großen Windgeschwindigkeiten löst die Strömung alleine ab
- Auslegungspunkt kurz unterhalb der optimalen Drehzahl
- „dänische“ Bauart
- erfordert hohe Festigkeit und Steifigkeit des Rotors
- Die Generatorleistung muss hoch sein (bei Böen)
- benötigt gutes Anlaufmoment (3 oder mehr Blätter)
- beschränkt auf Netzparallelbetrieb an einem starren Netz
- mechanische und aerodynamische Bremsen sind notwendig bei Wegfall des Generatormomentes

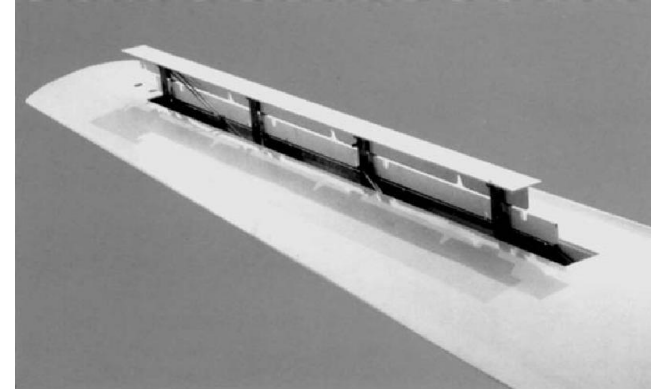


Leistungsbegrenzung bei ca. 15 m/s

Leistungsbegrenzung



Typische dänische WKA mit 3-Blattrotor ohne Einstellwinkelverstellung



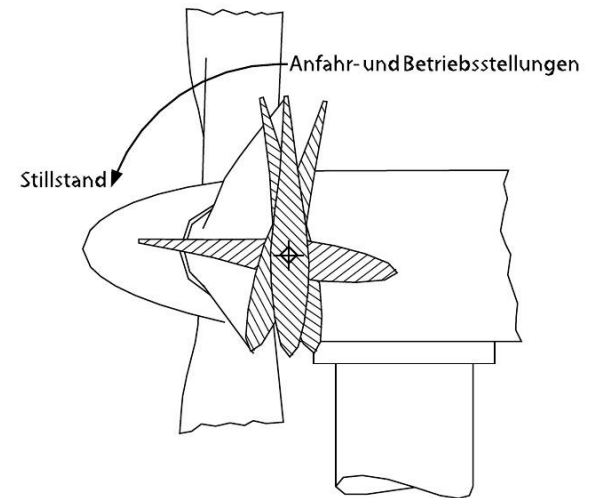
Spoiler (unüblich)

Verstellbare Rotorblattspitzen

Bei älteren Anlagen muss die Bremse von Hand wieder in Stellung gebracht werden. Heutzutage gibt es hydraulische Bremsklappen, bedeuten aber zusätzlichen konstruktiven Aufwand

Leistungsbegrenzung

- Stall control ist bei konstantem Einstellwinkel kaum möglich bei größeren Anlagen
- Aero-Bremsen sind absolut notwendig
- Sehr hohe Lasten bei Stillstand
→ große Dimensionierung von Turm und Fundament
- schwer zu berechnen und zuverlässig vorherzusagen
- Der Einfluss der Dichte (Sommer/Winter) wird wichtig
Bei geringerer Dichte ergibt sich ein anderer Einstellwinkel, vielleicht auch Rotordrehzahl
- starker Einfluss der Oberflächenrauigkeit
- daher „Active stall“-Regelung für verschiedene Bedingungen
- bei extremen Windbedingungen wird die Hinterkante nach vorne gedreht
- Ähnlich wie „Pitch“-Control , aber weniger Verschleiß wegen seltener Stellvorgänge



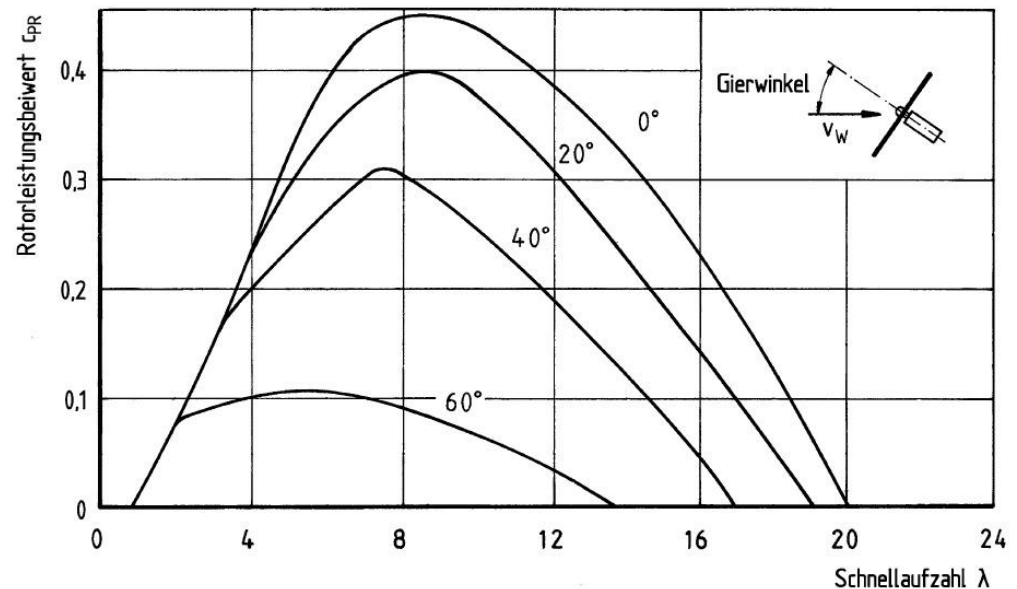
Fast alle Hersteller verwenden konventionelle Blatteinstellwinkelregelung in Verbindung mit variabler Drehzahl

Leistungsbegrenzung

Aus dem Wind drehen:

- sehr altes Verfahren
- wird bei historischen und amerikanischen Windmühlen verwendet
- die senkrecht wirkende Komponente der Anströmgeschwindigkeit wird reduziert
- oder die effektive Fläche wird reduziert
- bei größeren Schräganströmungswinkeln löst die Strömung schneller ab

- gut für eine grobe Begrenzung
- ungeeignet für eine schnelle und feinfühligere Regelung

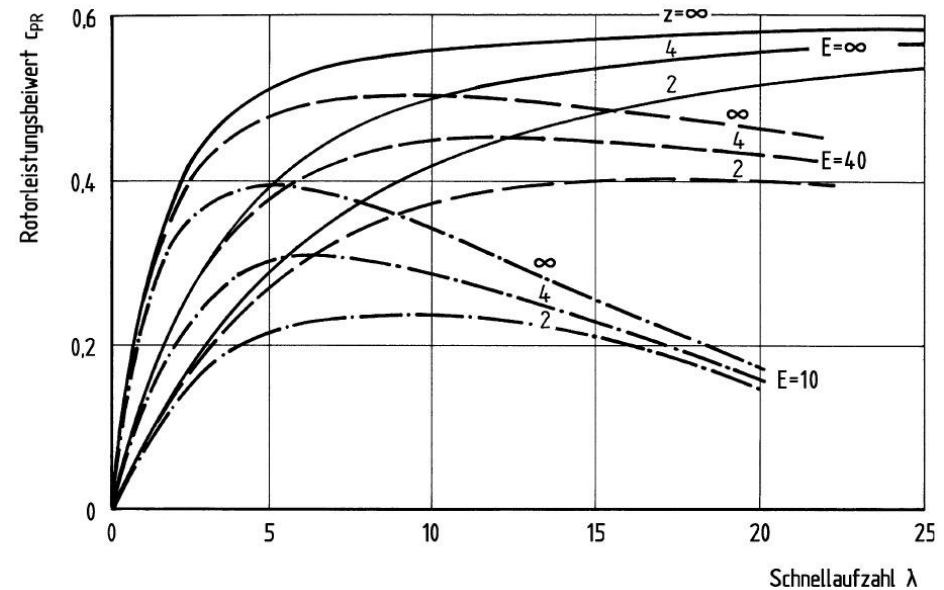


Aerodynamisches Profil

- Mit kleinerer Gleitzahl nimmt der Leistungsbeiwert ab
- Das Optimum verschiebt sich zu niedrigen Auslegungsschnelllaufzahlen
- Bei hoher Gleitzahl und hoher Schnelllaufzahl wird die Blattanzahl nicht so wichtig
- bei schlechter Gleitzahl und kleiner Schnelllaufzahl ist die Anzahl wichtig
- Langsamläufer brauchen viele Blätter
- Schnellläufer brauchen wenige, aber gute Blätter

- Auftriebs- zu Widerstandsverhältnis

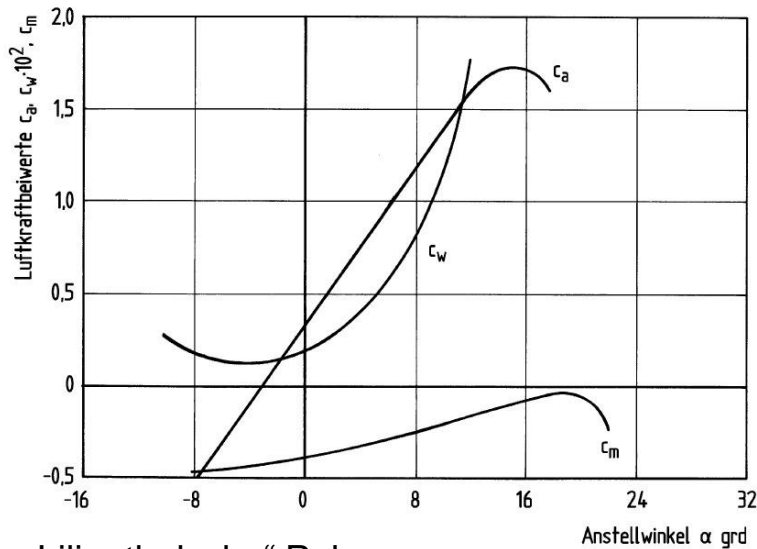
$$\frac{c_A}{c_W} = \frac{c_L}{c_D} = E$$



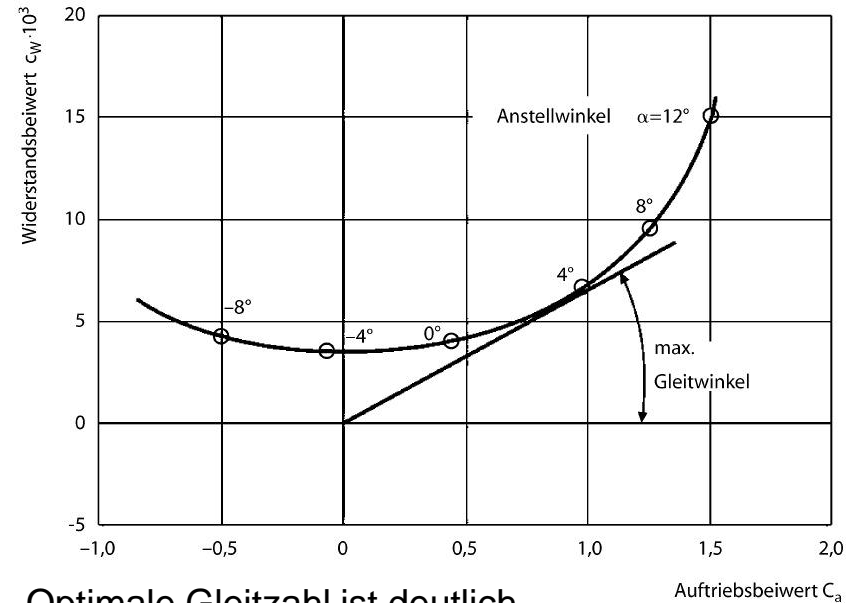
Aerodynamisches Profil

Die aerodynamischen Eigenschaften werden in Windkanälen vermessen:

- Auftrieb
- Widerstand
- Momentenbeiwert bezogen auf 25 % der Sehnenlänge

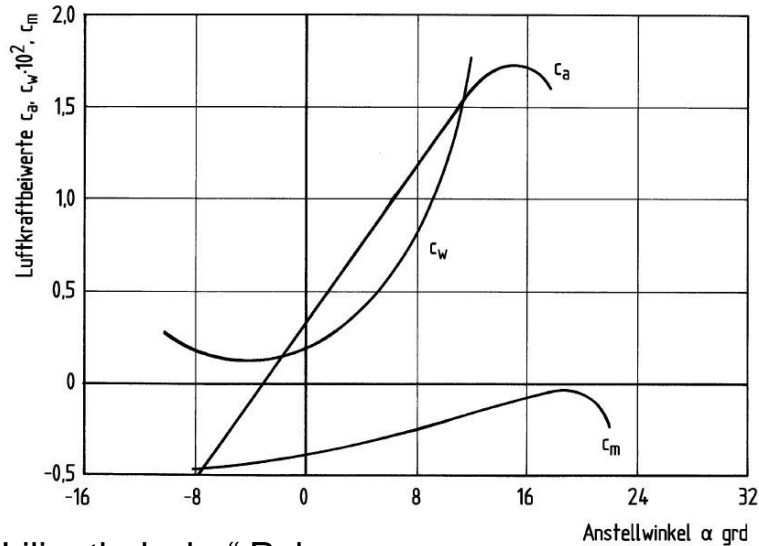


„Lilienthalsche“ Polare

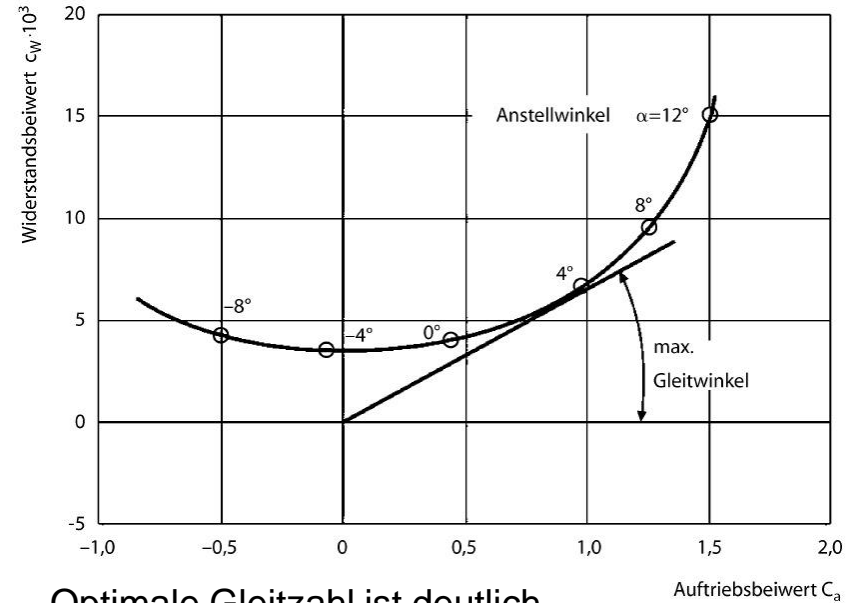


Optimale Gleitzahl ist deutlich

Aerodynamisches Profil



„Lilienthalsche“ Polare



Optimale Gleitzahl ist deutlich

$$Re = 1 \dots 8 \times 10^6$$

Etwa wie bei Tragflügeln
langsamer Flugzeuge

→ Rotorblätter kommen aus der
Luftfahrt

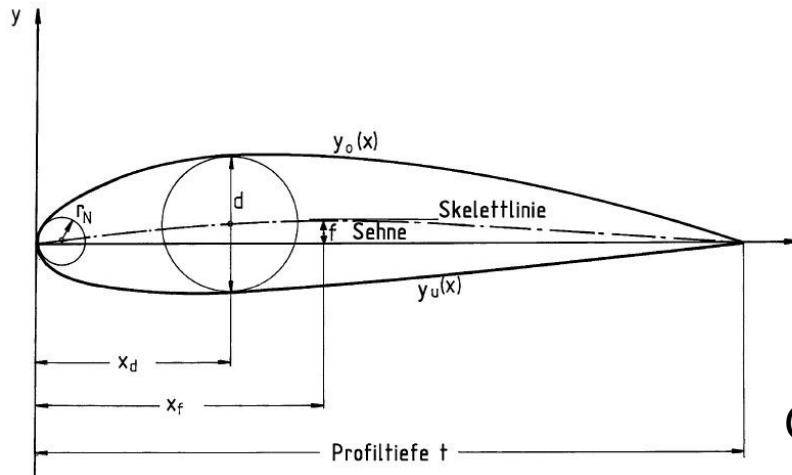
$$Re = \frac{v l}{\nu}$$

v : Anströmgeschwindigkeit

l : charakteristische Länge (Profiltiefe)

ν : kinematische Zähigkeit bei NN = 1.5×10^{-5} (m²/s)

Profilgeometrie und Systematik



Geometrische Profilparameter der NACA-Serie

4-ziffrige NACA-Profile

- 1.: max Wölbung f in %
- 2.: Wölbungsrücklage x_f in Zehnteln
- 3.: größte Profildicke d

Beispiel

NACA 4412: 4% Wölbung bei 40%

Profiltiefe maximale Dicke 12%

Dickenrücklage $x_d = 30\%$

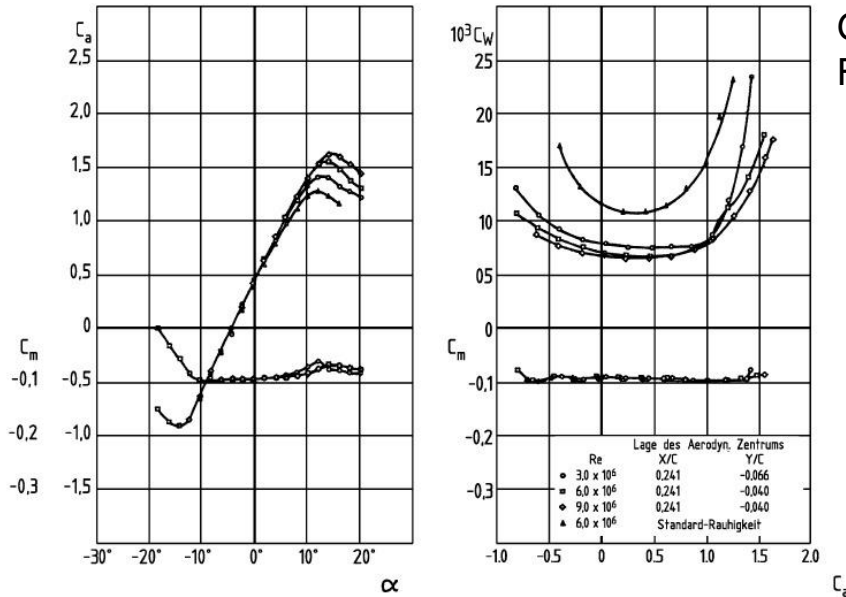
5-ziffrige NACA-Profile

- 1.: Maß für Wölbungshöhe $\times 15 =$ Auftriebsbeiwert
- 2.: doppelte Wölbungsrücklage
- 3.: Form der Skelettlinie (0 ohne, 1 mit Wendepunkt)
- 4/5.: Dicke in Prozent

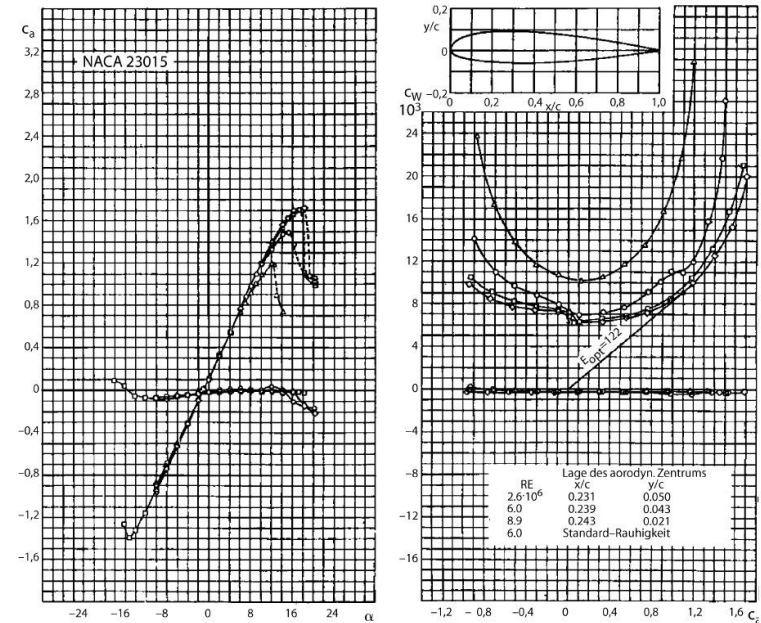
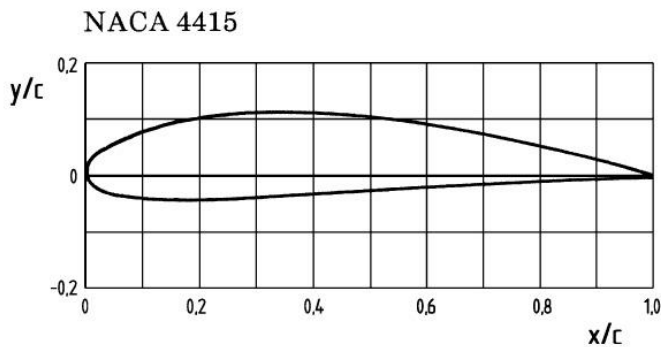
Beispiel NACA 23018

$c_l = 0.3$, max Wölbung bei 15%, max Dicke 18%

Profilgeometrie



Geometrie und Polaren
Für NACA 4415



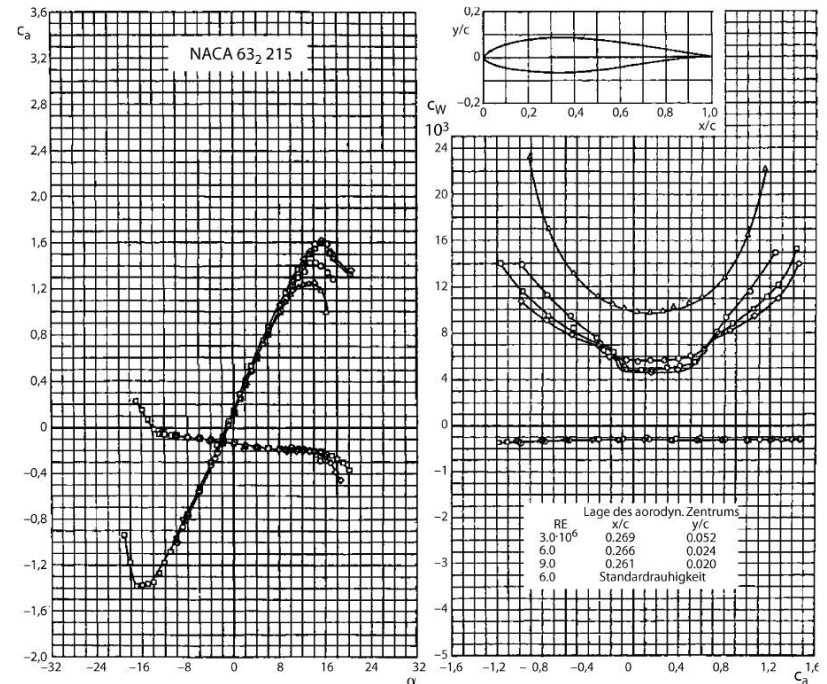
Geometrie und Polare für NACA 23015

44er Serie hat eine etwas kleinere Gleitzahl, ist aber unempfindlicher gegen Wandrauigkeiten

Aerodynamische Profile

Andere Profile:

- Wortmann „Laminar“ Profiles
- „Stuttgart“ Katalog, entwickelt für Segelflugzeuge
- FFW (fast free wake)
- SERI Solar energy research institute
- Die neueste Generation ist speziell für WKA entwickelt
- Wichtige Anforderungen:
- ger. Leistungsabfall bei Verschmutzung
- maximale Gleitzahl
- stabiler Auftrieb im Stall-Bereich und bei Verschmutzung
- begrenzter Auftrieb im Außenbereich bei Böen



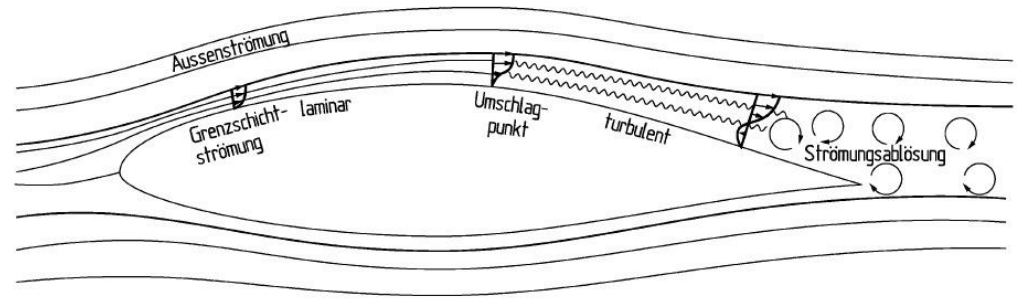
Geometrie und Polaren für NACA 63₂-215
Typische Profile für WKA

Laminarprofile

Andere Profile:

- geringer Profilwiderstand
- benötigen geometrisch genaue
- und extrem glatte Profile

- 2 Regionen im Strömungsfeld
- Grenzschicht
 - Viskosität
 - Haftbedingung
 - Wandrauigkeit
 - Grenzschichttheorie von Prandtl
- äußeres Strömungsfeld
 - reibungsfrei
 - Potentialtheorie
- 2 Anteile des Widerstandes
 - Schubspannungen, Reibung
 - Druck

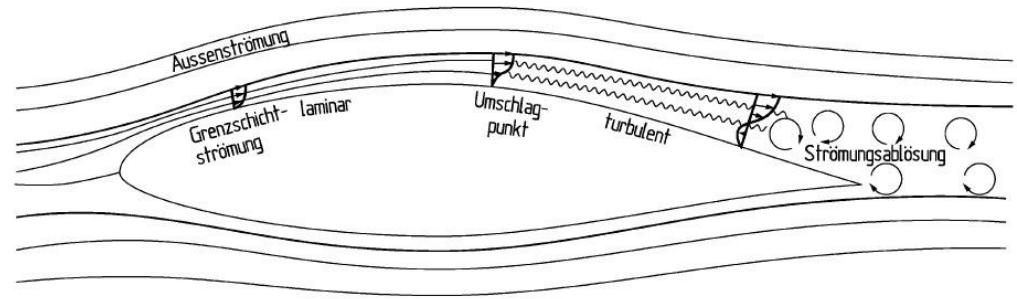


Grenzschichtströmung um ein aerodynamisches Profile
(Grenzschichtdicke stark überhöht)

Laminarprofile

Andere Profile:

- geringer Profilwiderstand
- benötigen geometrisch genaue
- und extrem glatte Profile

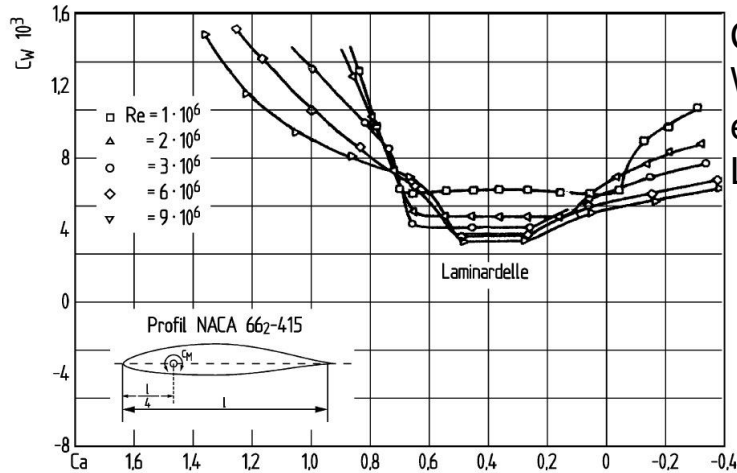


Grenzschichtströmung um ein aerodynamisches Profile
(Grenzschichtdicke stark überhöht)

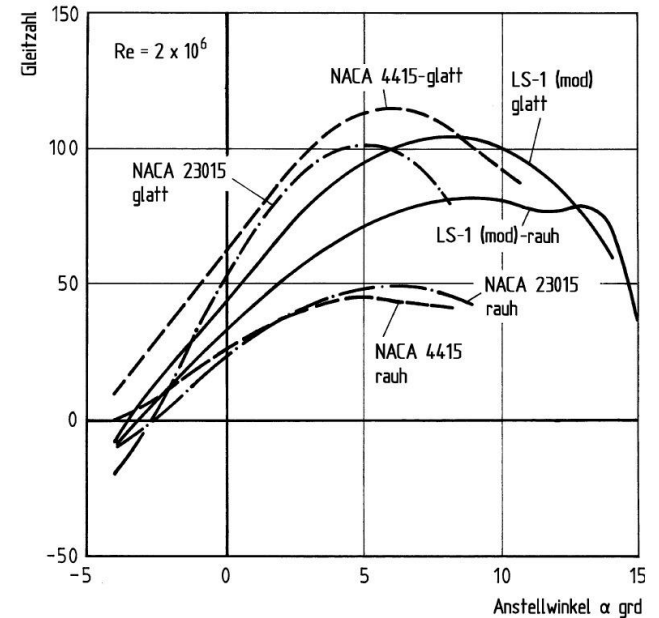
Grenzschicht:

- laminar am Anfang
- je nach Re-Zahl und Rauigkeit:
Transition, Turbulenz, Wirbel, Mischung, Querbewegung
- Grenzschichtdicke wächst, löst ab
- veränderte Druckverteilung → Druckwiderstand
- Turbulenz erhöht den Reibungswiderstand, stabilisiert aber die Grenzschicht
- Verschiebung der dicksten Stelle nach hinten → Verzögerung ist später
- Strömung bleibt bis 60 % laminar

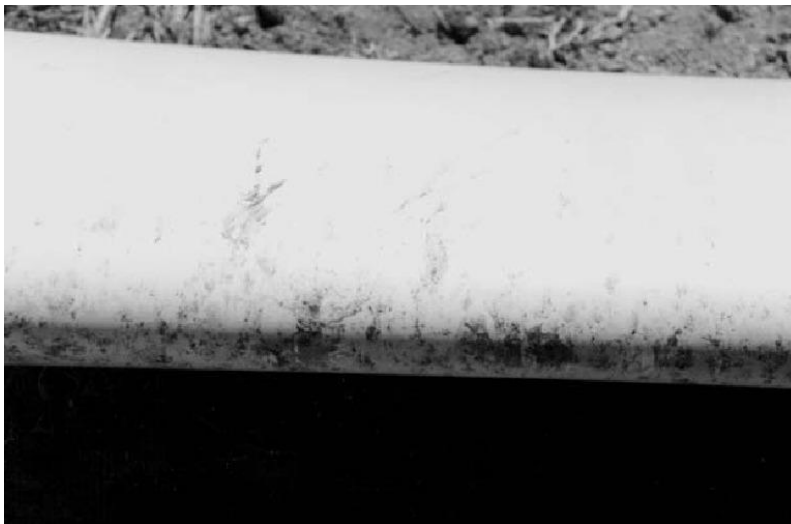
Profilgeometrie



Charakteristischer Widerstandsverlauf eines Laminarprofiles

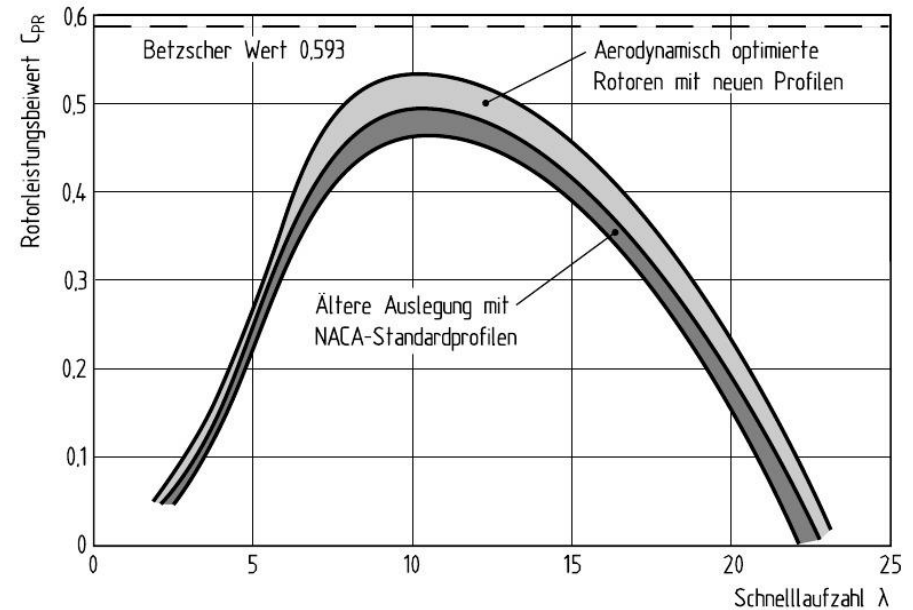
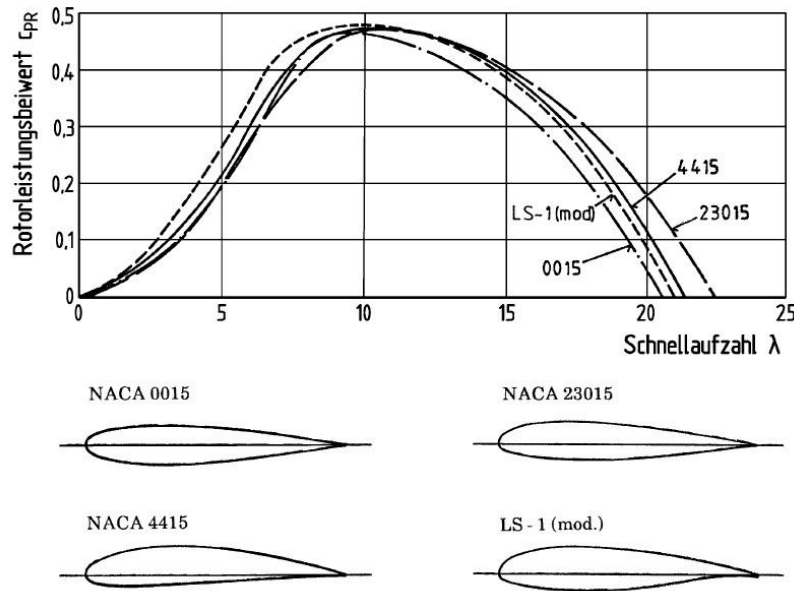


Gleitzahl von verschiedenen Profilen bei glatter und rauher Oberfläche. Das moderne LS-Profil hat einen kleineren Abfall



Verschmutztes Rotorblatt durch Staub und Insekten

Blatteinstellwinkelregelung



Einfluss verschiedener Profile auf den Leistungsbeiwert eines 2-Blattrotors:

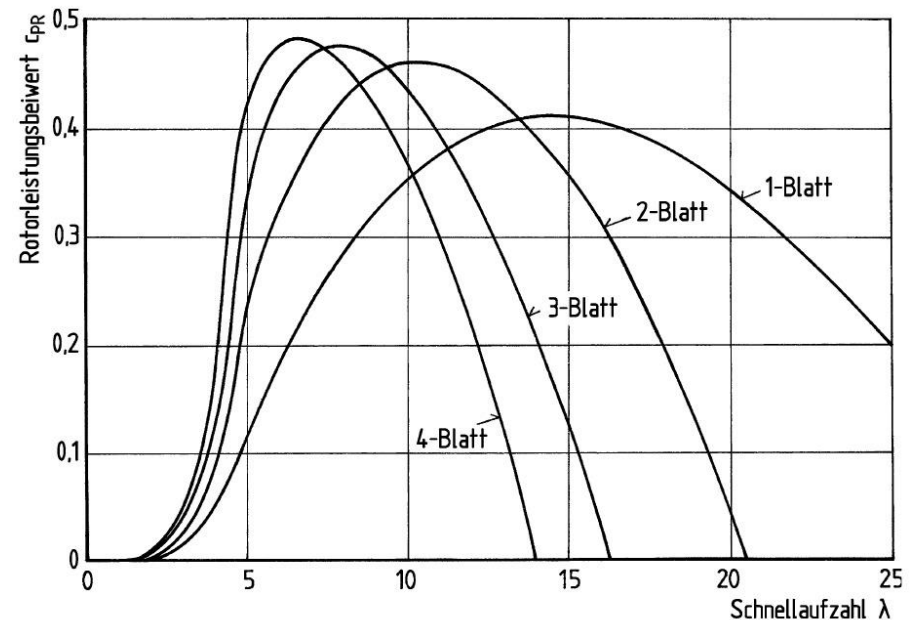
- Die Geometrie des Profils sollte sehr sorgfältig ausgewählt werden. Der Wirkungsgrad erhöht die Energieausbeute und die Wirtschaftlichkeit
- Wenn die Polaren vorhanden sind, kostet die Auswahl des Profils nichts
- Erreichbare Leistungsbeiwerte von Dreiblattrotoren mit älterer und neuerer aerodynamischer Auslegung

Konzeptionelle Rotormerkmale und Leistungscharakteristik

- Vorgabe der Leistungsabgabe bei einer bestimmten Windgeschwindigkeit
- Grobe Abschätzung des Rotorleistungsbeiwertes → Rotordurchmesser
- Aerodynamischer Entwurf des Rotors
 - Kann nicht mathematisch gelöst werden
 - Kompromiss aus aerodynamischer Leistung, festigkeitsmäßige Notwendigkeiten und fertigungstechnische Vereinfachungen → Iteration
- Einfluss von
 - Anzahl der Blätter
 - Optimale Form des Blattumrisses
 - Verwindung der Rotorblätter
 - Blattdicke
 - Auslegungsschnelllaufzahl

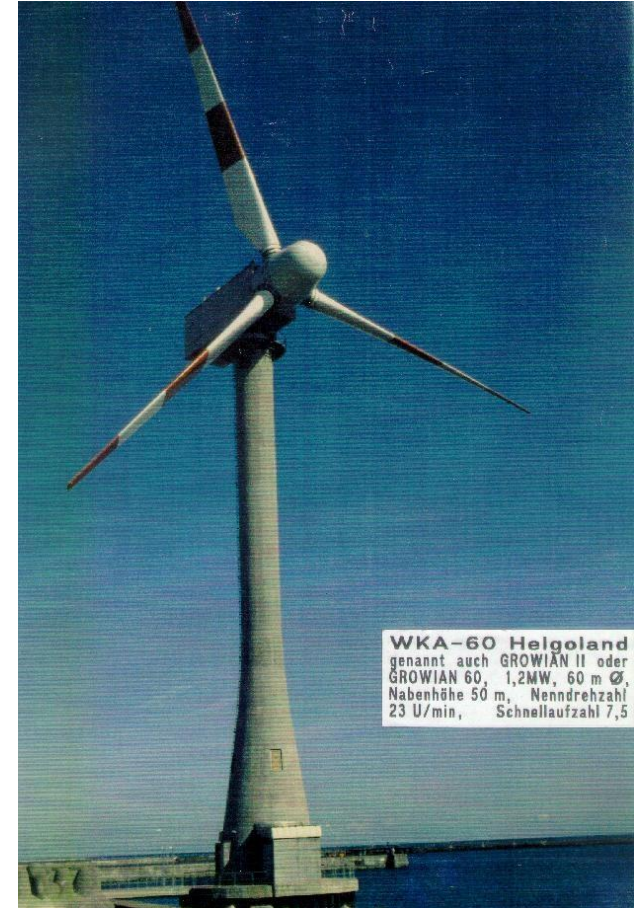
Anzahl der Rotorblätter

- Geringer Leistungszuwachs bei steigender Rotorblattanzahl
- 1 – 2 Blätter : 10%
- 2 – 3 Blätter: 3-4%
- 3 – 4 Blätter: 1-2%
- Theorie: zunehmende Blattanzahl → mehr Leistung
- Bei sehr großen Blattanzahlen nimmt der Leistungsbeiwert wieder ab wegen der komplexen 3-D-Strömung
- Optimale Schnelllaufzahl: je mehr Blätter, desto geringer die optimale Schnelllaufzahl



Anzahl der Rotorblätter

- Die Anzahl der Blätter hat nur geringen Einfluss auf die Leistung
 - Rotoren mit geringer Blattzahl werden bevorzugt. Leistungsgewinn von wenigen Prozent reicht nicht aus, um die zusätzlichen Kosten zu rechtfertigen.
 - Das dynamische Verhalten wird bei wenigen Blättern ungünstiger, besonders zwischen 2 und 3 Blättern
 - bei großer Schnelllaufzahl → Geräuschemission
 - optische Wirkung ist unruhig bei Ein- und Zweiblattrotoren
- 3-Blatt-Rotor hat sich kommerziell durchgesetzt
- (Dies kann sich z.B. bei großen Offshore-Anlagen ändern)



Optimale Form des Blattumrisses

$$t_{opt} = \frac{2\pi}{z} \frac{8}{9c_A} \frac{v_{WA}}{\lambda v_r \cdot r}$$

t_{opt} = optimale lokale Blatattiefe

v_{WA} = Auslegungswindgeschwindigkeit

u = Umfangsgeschwindigkeit

v_r = örtliche resultierende Anströmgeschwindigkeit $\lambda_A = 10$

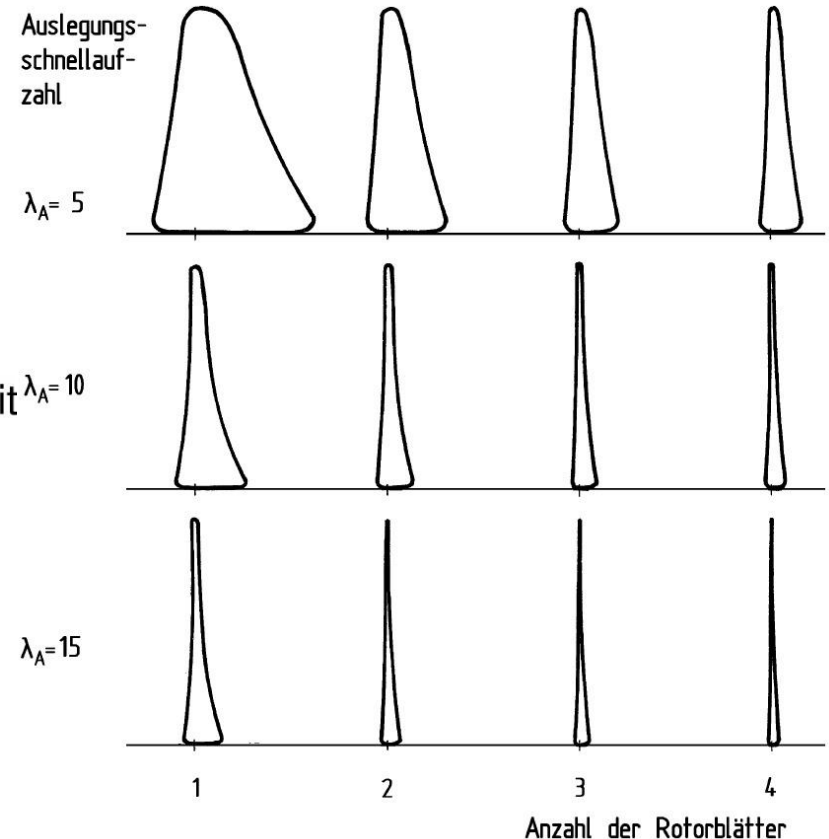
λ = lokale Schnelllaufzahl

c_A = lokaler Auftriebskraftbeiwert

r = Blattradius

z = Anzahl der Blätter

- analytische Gleichung → hyperbolische Tiefenverteilung
- für große Schnelllaufzahlen → sehr schlanke Profile → Festigkeits- und Steifigkeitsprobleme



Aerodynamisch optimale Rotorblattformen für versch. Auslegungsschnelllaufzahlen und Blattzahlen, für NACA4415 und $c_A = 0.9$

Optimale Blatttiefe

$$t_{\text{opt}} = \frac{2\pi}{z} \frac{8}{9c_A} \frac{v_{\text{WA}}}{\lambda v_r}$$

Hau, 3.Auflage

mit:

- t_{opt} = optimale örtliche Blatttiefe (m)
- v_{WA} = Auslegungswindgeschwindigkeit (m/s)
- u = Umfangsgeschwindigkeit (m/s)
- $v_r = \sqrt{v_w^2 + u^2}$ örtliche resultierende Anströmgeschwindigkeit (m/s)
- λ = örtliche Schnellaufzahl (-)
- c_A = örtlicher Auftriebsbeiwert (-)
- r = örtlicher Blattradius (m)
- z = Blattzahl des Rotors (-)

$$t_{\text{opt}} = \frac{2\pi}{z} \frac{8}{9c_A} \frac{v_{\text{WA}}}{\lambda v_r r}$$

Hau, 5.Auflage

mit:

- t_{opt} = optimale örtliche Blatttiefe (m)
- v_{WA} = Auslegungswindgeschwindigkeit (m/s)
- u = Umfangsgeschwindigkeit (m/s)
- $v_r = \sqrt{v_w^2 + u^2}$ örtliche resultierende Anströmgeschwindigkeit (m/s)
- λ = örtliche Schnellaufzahl (-)
- c_A = örtlicher Auftriebsbeiwert (-)
- r = örtlicher Blattradius (m)
- z = Blattzahl des Rotors (-)

$$t_{\text{opt}} = \frac{2\pi}{z} \frac{8}{9c_A} \frac{v_{\text{WA}}}{\lambda v_r * r}$$

Hau, 4.Auflage

mit:

- t_{opt} = optimale örtliche Blatttiefe (m)
- v_{WA} = Auslegungswindgeschwindigkeit (m/s)
- u = Umfangsgeschwindigkeit (m/s)
- $v_r = \sqrt{v_w^2 + u^2}$ örtliche resultierende Anströmgeschwindigkeit (m/s)
- λ = örtliche Schnellaufzahl (-)
- c_A = örtlicher Auftriebsbeiwert (-)
- r = örtlicher Blattradius (m)
- z = Blattzahl des Rotors (-)

$$c(r) \approx 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \frac{1}{z} \cdot \frac{8}{9 \cdot c_L} \cdot \frac{1}{\lambda_D^2 \cdot \left(\frac{r}{R}\right)},$$

Gasch

$$\frac{W}{U_\infty} B \frac{c}{R} C_l (1 - a) = 8\pi \lambda \mu^2 a' (1 - a)$$

Burton

Optimale Blatttiefe

$$dA = \frac{1}{2} \rho v_{res}^2 c_a \cdot t \cdot z \cdot dr \quad dW = 0$$

$$dF = dA \cos \varphi \quad v_{res} = \sqrt{(\Omega r)^2 + v'^2} \quad v' = \Omega r \tan \varphi$$

$$v_{res} = \Omega r \sqrt{1 + \tan^2 \varphi} = \frac{\Omega r}{\cos \varphi}$$

$$dF = \frac{1}{2} \rho \frac{\Omega^2 r^2}{\cos \varphi} c_a \cdot t \cdot z \cdot dr \quad \text{BEM}$$

$$dF = \rho v' (v_1 - v_2) dS \quad dS = 2 \pi r dr$$

$$v_1 - v_2 = 2 v_1 - (v_1 + v_2) = 2 (v_1 - v') = 2 (v_1 - \Omega r \tan \varphi)$$

$$dF = 4 \pi \rho \Omega r^2 \tan \varphi (v_1 - \Omega r \tan \varphi) dr \quad \text{Betz}$$

Optimale Blatttiefe

$$\frac{1}{2} \rho \frac{\Omega^2 r^2}{\cos \varphi} c_a \cdot t \cdot z \cdot dr = 4 \pi \rho \Omega r^2 \tan \varphi (v_1 - \Omega r \tan \varphi) dr$$

$$t = \frac{8\pi}{c_a z} \sin \varphi \frac{v_1 - \Omega r \tan \varphi}{\Omega}$$

Betz'sches Optimum: $v' = \Omega r \tan \varphi = \frac{2}{3} v_1 \Rightarrow v_1 - \Omega r \tan \varphi = \frac{1}{3} v_1$

$$\tan \varphi = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \frac{2/3 v_1}{\Omega r} \Rightarrow \left(\frac{\cos \varphi}{\sin \varphi} \right)^2 + 1 = \frac{\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi}{\sin^2 \varphi} = \frac{1}{\sin^2 \varphi} = \left(\frac{3}{2} \frac{\Omega r}{v_1} \right)^2 + 1$$

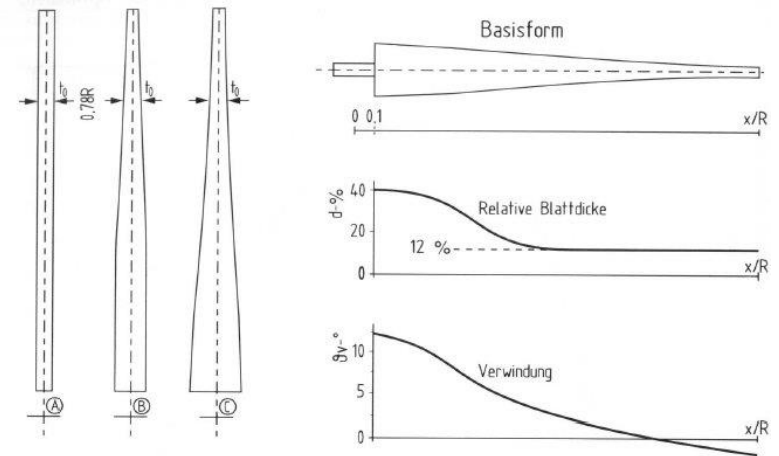
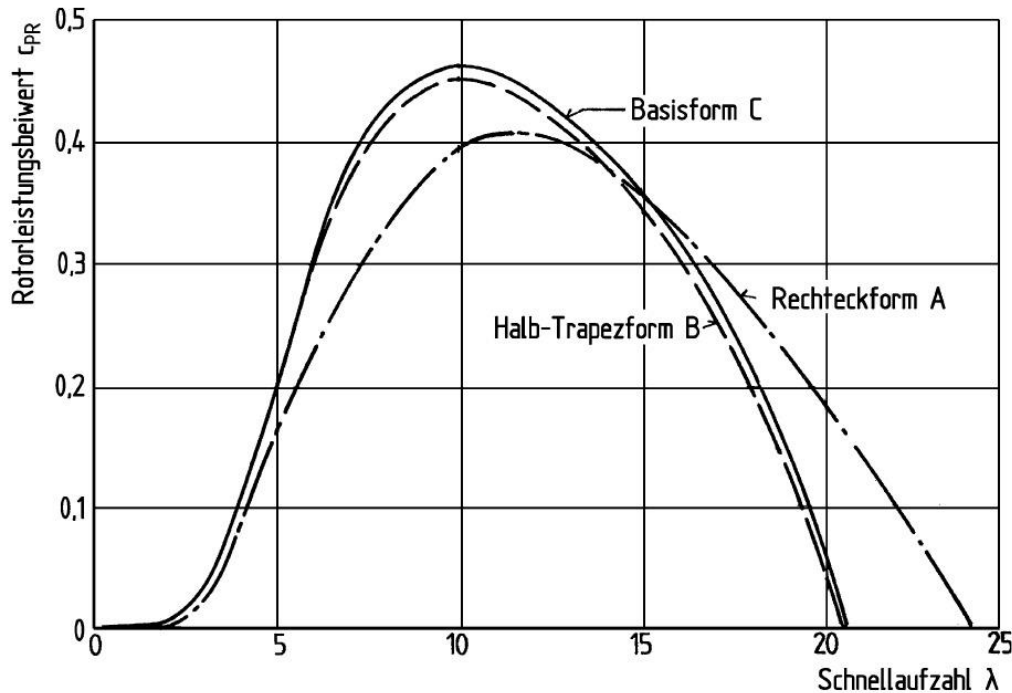
$$t = \frac{8\pi}{c_a z} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{3}{2} \frac{\Omega r}{v_1} \right)^2 + 1}} \frac{1}{3 \Omega R} R = \frac{8\pi R}{3 c_a z \lambda} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{3}{2} \frac{\Omega r}{v_1} \right)^2 + 1}}$$

Annahme: $\Omega r \gg v_1$

$$t = \frac{16}{9} \cdot \frac{\pi R v_1}{c_a z \lambda \Omega r}$$

Optimale Form des Blattumrisses

- Hyperbolische Form ist optimal aber schwer zu fertigen
- Einfachere Formen sind linear und preiswert



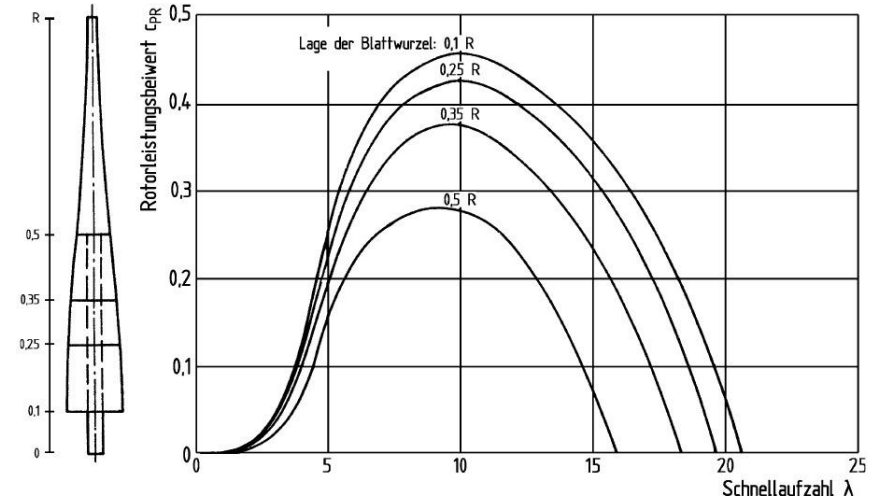
$$\text{Blattflächendichte} = \frac{\text{Gesamtfläche der Rotorblätter}}{\text{Rotorkreisfläche} \cdot \text{Rotorradius}^2}$$

$$\text{Streckung} = \frac{\text{Fläche eines Rotorblatts}}{\text{Blatttiefe an der Spitze}}$$

$$\text{Zuspitzung} = \frac{\text{Blatttiefe an der Spitze}}{\text{Blatttiefe an der Wurzel}}$$

Optimale Form des Blattumrisses

- Der innere Teil des Blattes ist von geringer Bedeutung (niedrige Geschwindigkeit)
- Aerodynamische Optimierung kann gg.-über der Festigkeit oder der Einfachheit vernachlässigt werden
- Die Profildicke wird zugunsten der Festig- und Steifigkeit vergrößert (Platz für Rippen)
- Um Gewicht und Kosten zu sparen, wird auf Energie verzichtet



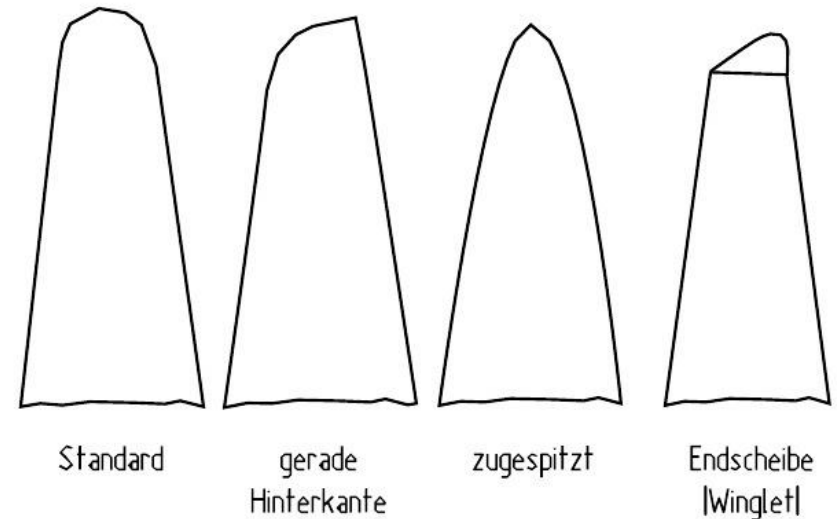
Einfluss des Weglassens von Teilen des Innenbereiches



Beispiel für eine spezielle Blattform im Wurzelbereich, Enercon E-70 E4

Optimale Form des Blattumrisses

- Der Außenbereich ist wichtig (hohe Geschwindigkeit)
 - Profile müssen sehr sorgfältig gewählt werden
 - gute Oberflächenqualität ist nötig
 - genaue Tiefenverteilung
- Gestaltung der äußersten Spitze (Randbogen)
 - Randwirbel
 - induzierter Widerstand
 - Optimierung funktioniert nur im Windkanal, nicht in der Praxis
- Merklicher Einfluss auf die Geräuschentwicklung



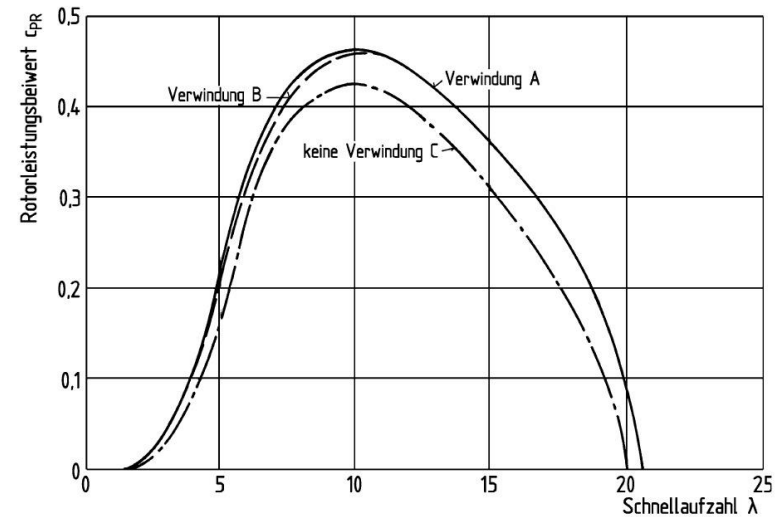
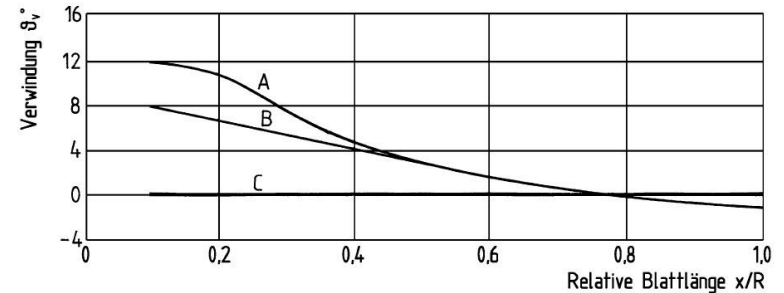
Optimale Form des Blattumrisses

- Standard vermeidet Ablösungen an scharfen Ecken und Kanten, besonders bei stallgeregelten WKA's
- Gerade Hinterkante: hält das aerodynamische Moment (um die Blattachse) stabil über einen weiten Anstellbereich → Günstiges Regelverhalten
- Spitzer Randbogen und Endplatten sind günstig für Geräuschemission
- Winglets: Beeinflussen die Randwirbel , Verringerung des Luftwiderstandes bei hohen Anstellwinkeln, „Durchmesserergrößerung“



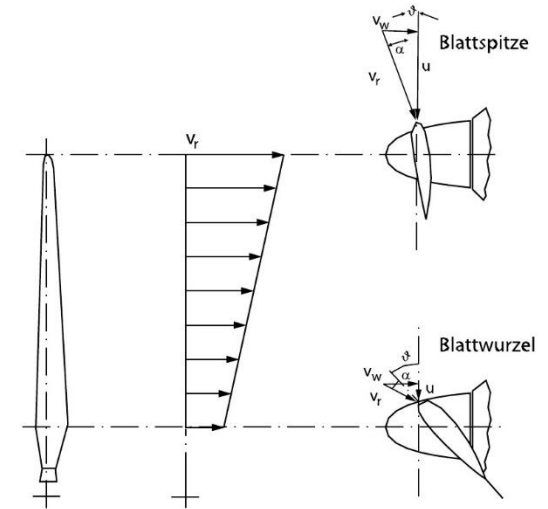
Verwindung der Rotorblätter

- Verwindung ist notwendig, weil die Strömungsbedingungen in der Wurzelregion völlig anders sind an der Spitze
- Größere Umfangsgeschwindigkeit → veränderter Anstellwinkel, effektive Anströmgeschwindigkeit
- Verwindungswinkel zwischen Sehne bei 70% Radius (oder an der Spitze)
- Berechnung des Torsionswinkels geht nur für einen Betriebspunkt
- Nicht nur der Anstellwinkel ist wichtig
- Ablöseverhalten
- Anfahrmoment



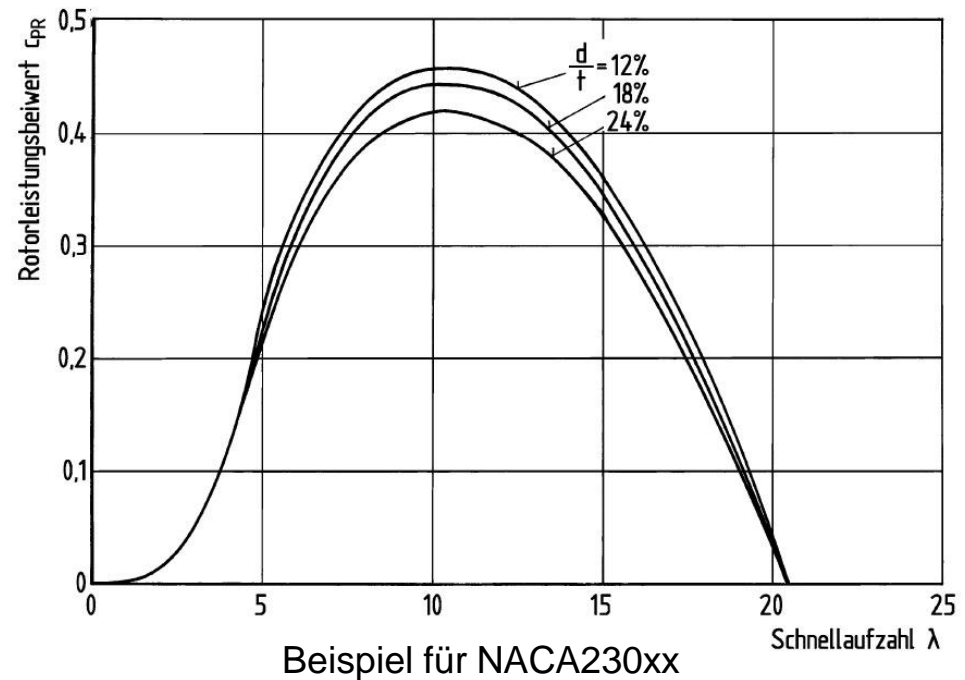
Verwindung der Rotorblätter

- Ohne Verwindung: preisgünstig zu fertigen, aber weniger Energieausbeute
- Lineare Torsion ist schon ganz gut



Blattdicke

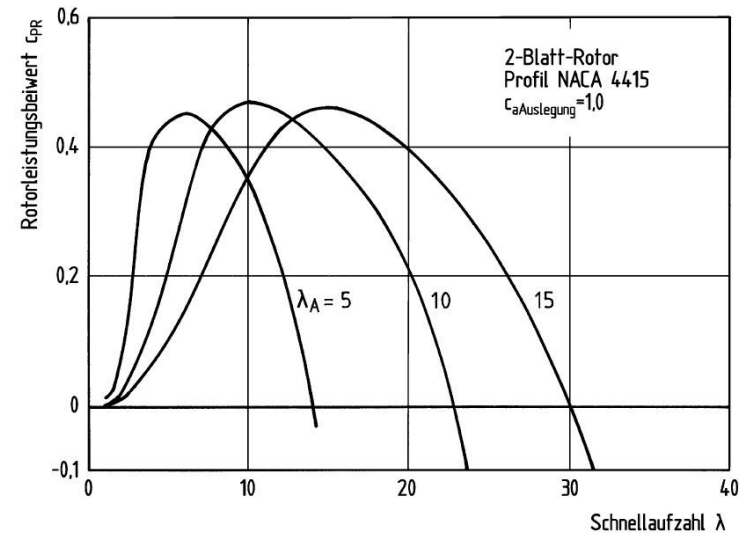
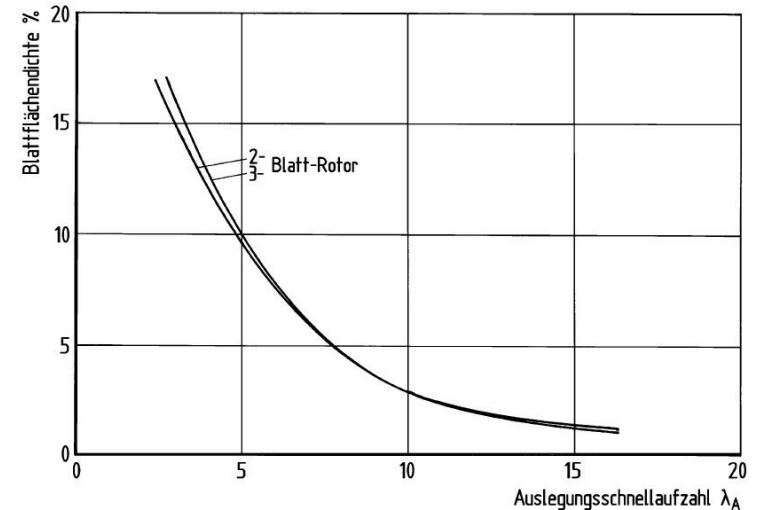
- Klassischer Konflikt zwischen Aerodynamik und Festigkeit
- Aerodynamiker möchte dünne Rotorblätter mit hoher Leistung
- Strukturauslegung verlangt nach ausreichenden Querschnitten für Rippen, etc. . Die Bauhöhe geht mit der 3. Potenz in die Widerstandsmomente der Holme ein
- Optimierung der Kosten



Auslegungsschnelllaufzahl

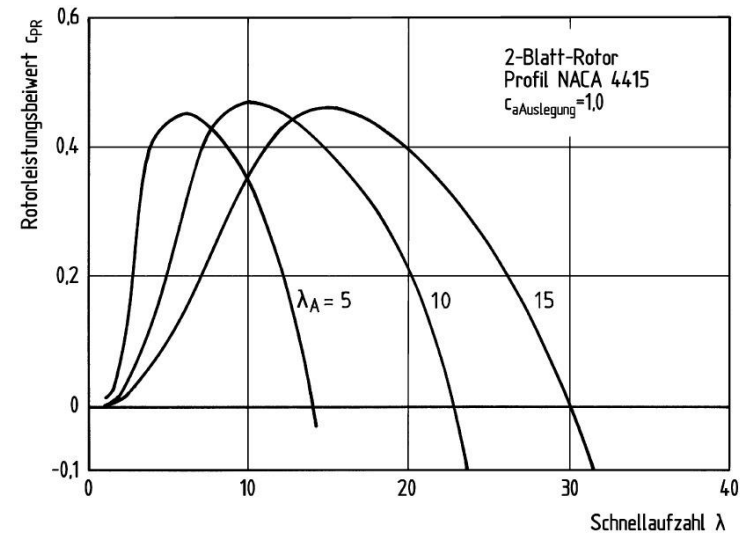
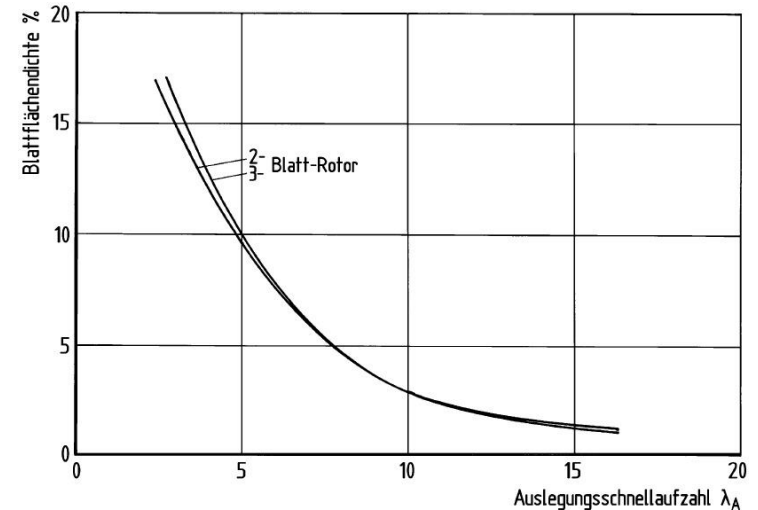
Auslegungskriterien

- Generatoren haben eine hohe Drehzahl
- → Differenz zwischen Rotor- und Generator Drehzahl so klein wie möglich (in der Vergangenheit)
- mechanische Getriebe mit großer Übersetzung waren schwer und teuer
- höhere Drehzahl → kleineres Drehmoment
- → leichtere Massen für Getriebe und Wellen
- Zunahme der Schnelllaufzahl → Abnahme der Blattflächendichte → weniger Material → weniger Kosten



Auslegungsschnellaufzahl

- Aber: hohe Schnellaufzahl → schlanke Blätter → Steifigkeitsprobleme → teure Materialien
- der maximale Leistungskoeffizient hängt fast nicht von der Auslegungsschnellaufzahl ab
- heutzutage: Geräuschentwicklung ist wichtiger → eher niedrige Schnellaufzahlen
- Typische Werte: 9-10 für 2 Blätter, 7-8 für 3 Blätter



Ausgeführte Rotorblätter

- Kompromiss zwischen aerodynamischem Optimum, Festigkeit und Herstellungstechnik
- In Verbundbauweise bessere Annäherung an Optimalform als bei Stahlblech
- optimale aerodynamische Dicke reicht nicht für Steifigkeitsanforderungen
- im Außenbereich: 15% -18% relative Dicke, aerodynamisch wichtig
- im inneren Bereich: 20 % für genügende Querschnitte
- das aerodynamische Profil geht in den Kreisquerschnitt des Anschlussflansches über

Ausgeführte Rotorblätter

- weniger Zuspitzung als Optimum → größere Breite an der Spitze
 - bessere Leistung bei Teillast
 - besseres Anfahrmoment
 - aber höhere aerodynamische Lasten
- neuere Anlagen haben aerodynamisch optimierte Blattspitzen
- alt: NACA44, NACA230
- neu: Series 63, unempfindlicher gegenüber Verschmutzung
- alte stallgeregelte Rotoren brauchen steife Blätter → nur bei geringer Streckung realisierbar (materialabhängig)

Ausgeführte Rotorblätter

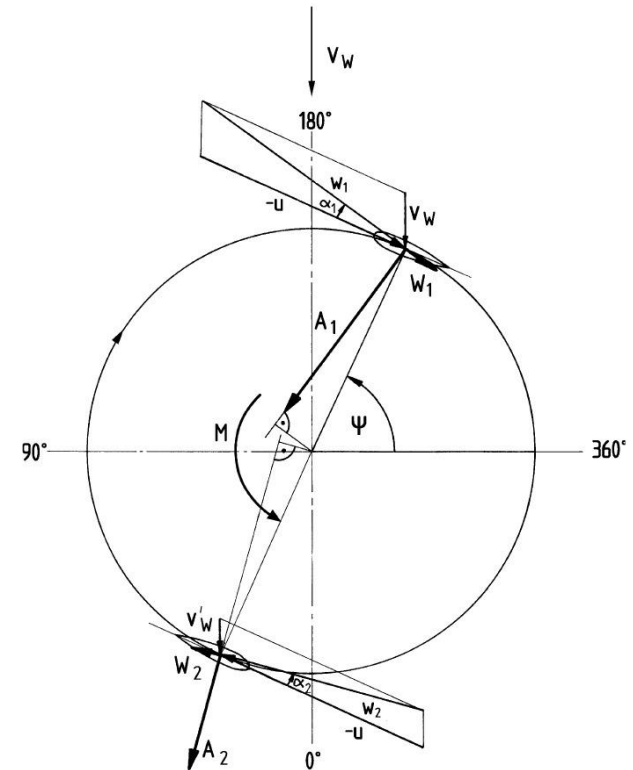
Examples of current Rotor Blades



© 1800 | September 2014 | All data subject to change without notice

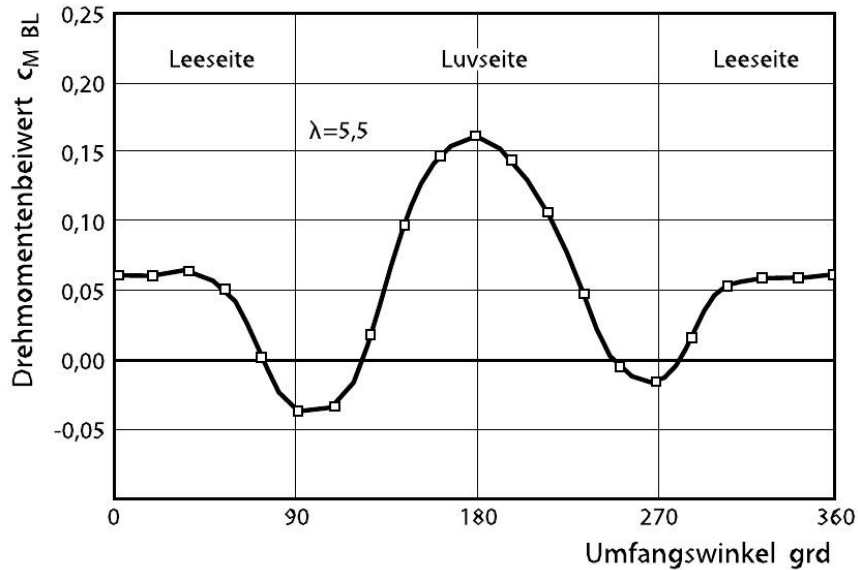
Vertikalachsen-Rotoren (VAWT)

- Propeller erzeugen stationäre Luftkräfte (außer 1-Blatt-Rotoren) bei stationären Windbedingungen
- Vertikalachser erzeugen dynamische Lasten
- Der aerodynamische Anstellwinkel ändert sich ständig
- Die Lee-seitigen Blätter befinden sich im Nachlauf der Luv-Blätter → verringerte Anströmgeschwindigkeit → weniger Leistung

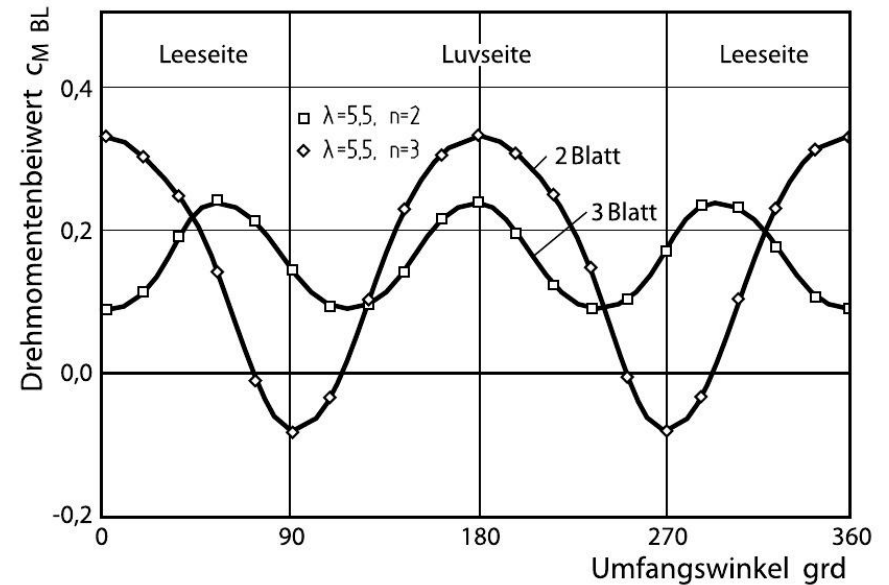


Anströmbedingungen und Luftkräfte für einen Darrieus-Rotor

Vertikalachsen-Rotoren (VAWT)



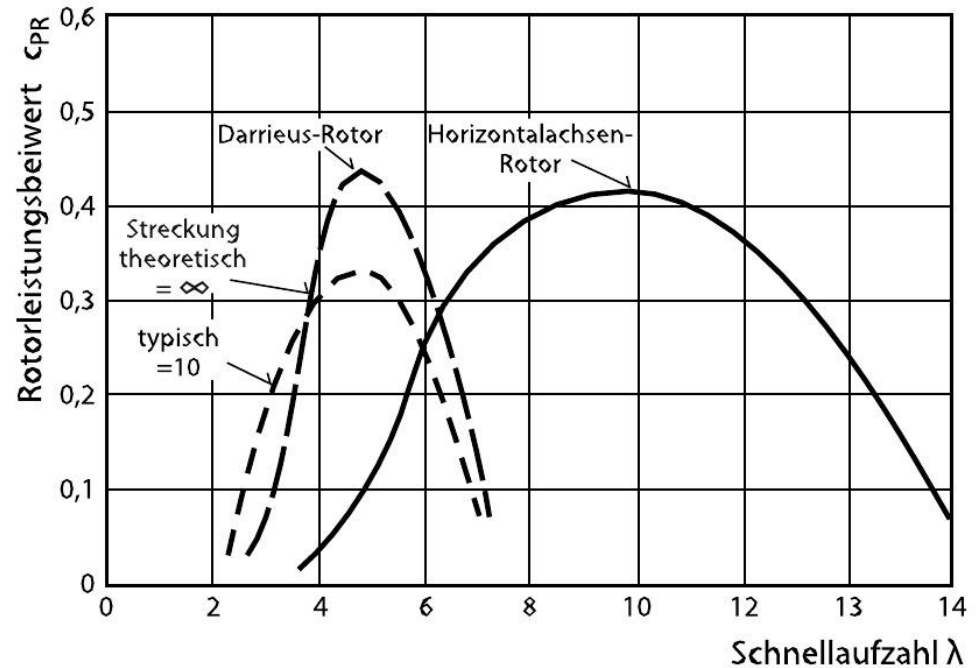
Ein einzelnes Blatt erzeugt im Mittel ein positives Moment, hat aber auch negative Anteile



Das Gesamtmoment ist erst mit 3 Blättern ständig positiv

Vertikalachsen-Rotoren (VAWT)

- Das Drehmoment benötigt eine Umfangsgeschwindigkeit
→ Der Rotor startet nicht alleine(??)
- komplexeres Strömungsfeld als beim Propeller
- Leistungskoeffizient Darrieus-Rotor 0.4 - 0.42 → kleiner als bei HAWT



Verlauf des Leistungsbeiwertes für zweiblättrige Vertikal- und Horizontalanlagen

Vertikalachsen-Rotoren (VAWT)

- H-Rotor (Variante von Darrieus) erreicht höhere Wirkungsgrade wg. konstantem Radius
- Halterungen und Verstrebungen erzeugen Widerstand zusätzliche Leistungsminderung
- optimale Schnelllaufzahl ist 2 mal kleiner als bei HAWT → größere Momente → mehr Masse
- Eine Menge Forschung und Entwicklung ist noch nötig.

Windentwicklung und Störeinflüsse

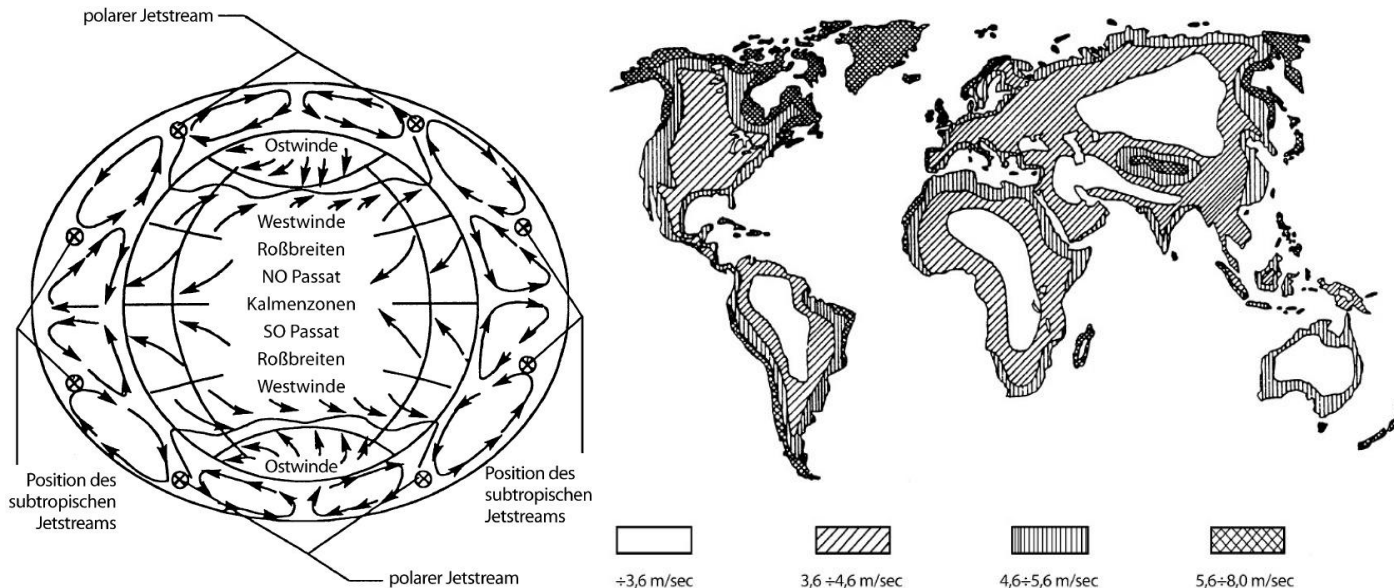
Windverhältnisse

Ursachen des Windes

- Erwärmung der Erde durch die Sonne
- inhomogene Erdoberfläche (Land, Wasser, Wüste, Wald)
- instationär (Tag/Nacht, 4 Jahreszeiten)
- Temperatur-, Dichte-, Druckgradienten
- globale Rotation: 2 Effekte
- jährlich aufgefangene Sonnenenergie: 1.5×10^{18} kWh
- 2% werden in Bewegung umgesetzt $\rightarrow 4 \times 10^{12}$ kW

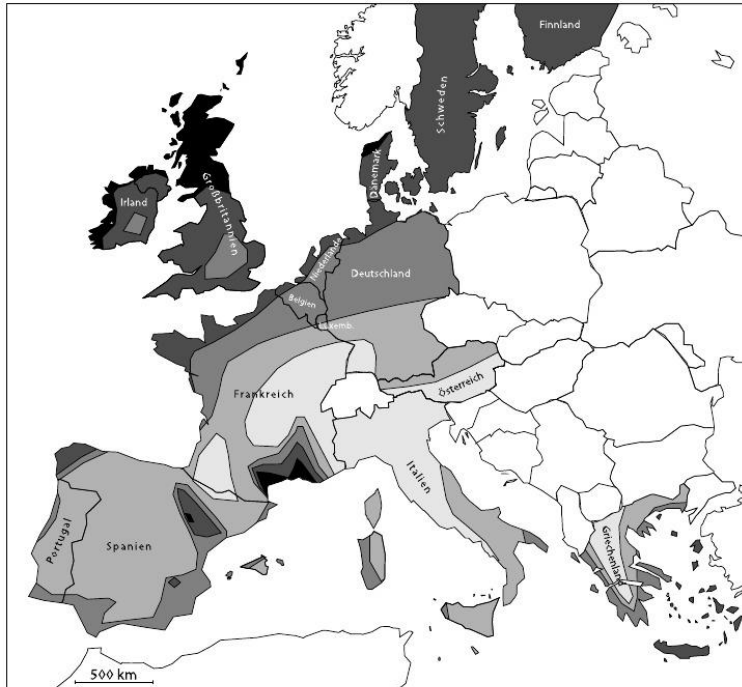
Windverhältnisse

- Corioliskräfte:
 - Ablenkung nach rechts auf der Nordhalbkugel
 - Ablenkung nach links auf der Südhalbkugel
 - spiralförmige Ausgleichsbewegung zwischen 100 – 2000 m (geostrophischer Wind)
 - Partikel, die sich in Richtung der Pole bewegen, nähern sich der Rotationsachse
 - die Impulserhaltung verursacht die Westdrift
- Oberflächenreibung in Bodennähe verringert die Wirkung der Corioliskräfte
 → die Umlenkung in Bodennähe ist um 10 und 30° kleiner als in der geostrophischen Schicht



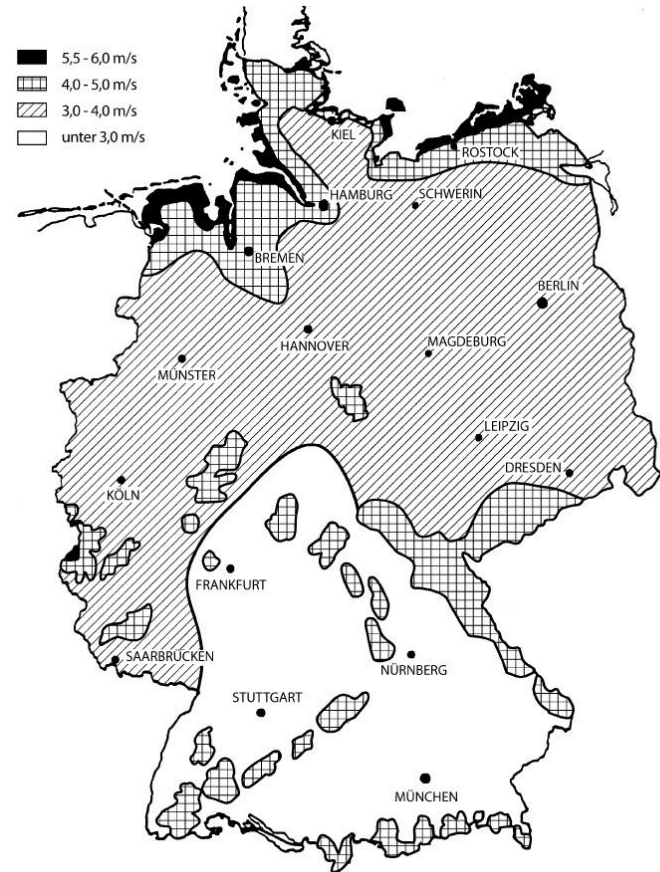
Globale Verteilung der mittleren Jahreswindgeschwindigkeit in 10m Höhe

Windverhältnisse



Windressourcen in 50 m Höhe über Grund für fünf verschiedene topografische Bedingungen									
Geschütztes Gelände		Offenes Land		Meeresküste		Offenes Meer		Hügel und Käme	
ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²
> 6,0	> 250	> 7,5	> 500	> 8,5	> 700	> 9,0	> 800	> 11,5	> 1800
5,0-6,0	150-250	6,5-7,5	300-500	7,0-8,5	400-700	8,0-9,0	600-800	10,0-11,5	1200-1800
4,5-5,5	100-150	5,5-6,5	200-300	6,0-7,0	250-400	7,0-8,0	400-600	8,5-10,0	700-1200
3,5-4,5	50-100	4,5-5,5	100-200	5,0-6,0	150-250	5,5-7,0	200-400	7,0-8,5	400-700
< 3,5	< 50	< 4,5	< 100	< 5,0	< 150	< 5,5	< 200	< 7,0	< 400

Europäischer Windatlas in 50 m
Küstengebiete der Nordsee und am
Mittelmeer

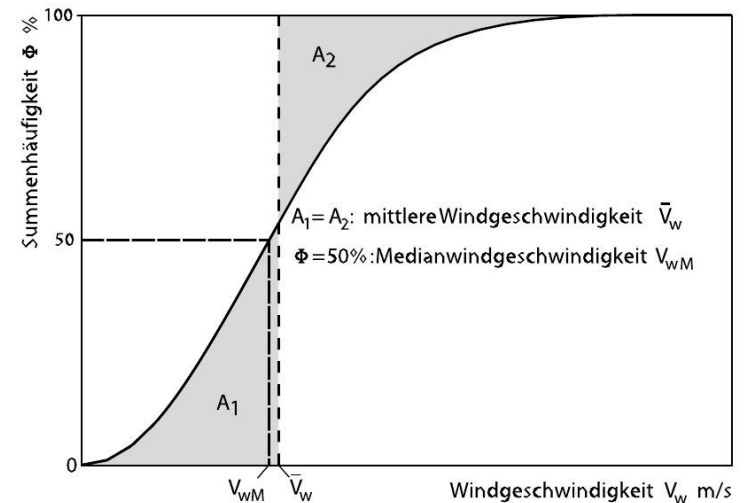
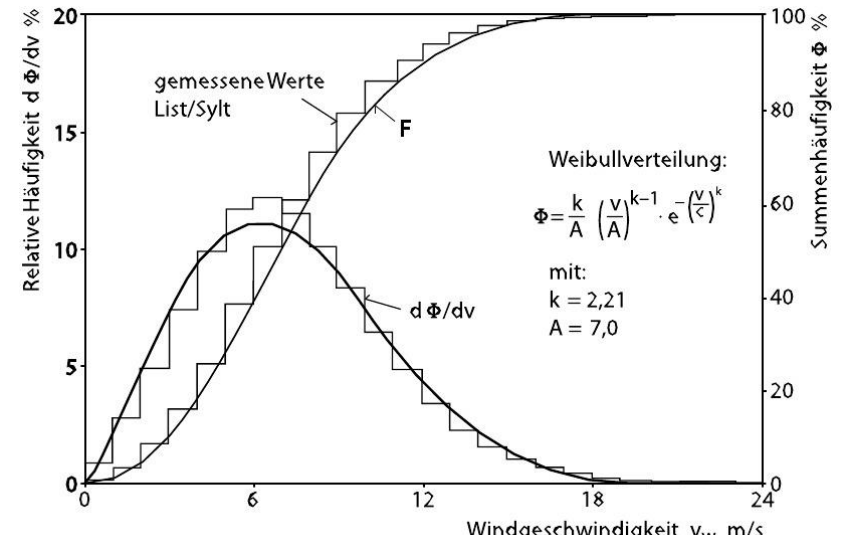
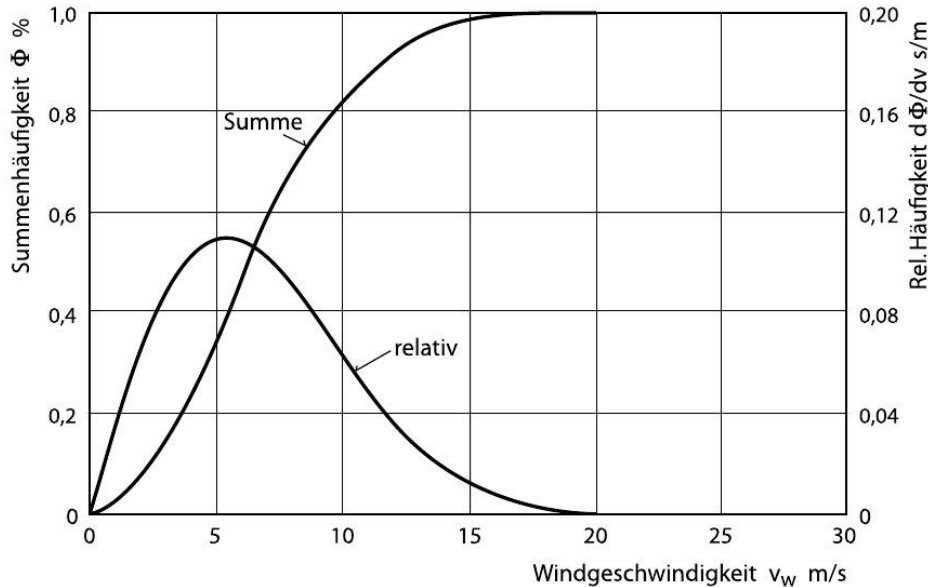


Deutscher Windatlas in 10 m
Minimum: 4 – 5 m/s
In der deutschen Bucht und in der Ostsee 8-10 m/s

Windverhältnisse

Weibull-Verteilung:

- Mathematische Formulierung für die Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit, wenn keine ausreichenden Daten zur Verfügung stehen



Windverhältnisse

Je nach Tageszeit und Wetterlage 600 – 2000 m

- Bodennaher Bereich: Prandtl-Schicht
- 10 – 50 m nachts
- 50 – 150 m tagsüber
- Die Rauigkeit hängt von der Bodenbeschaffenheit ab
- Für zeitlich gemittelte Geschwindigkeitsprofile: logarithmisches Wandgesetz

$$\bar{v}_H = \bar{v}_{ref} \cdot \frac{\ln \frac{H}{z_0}}{\ln \frac{H_{ref}}{z_0}}$$

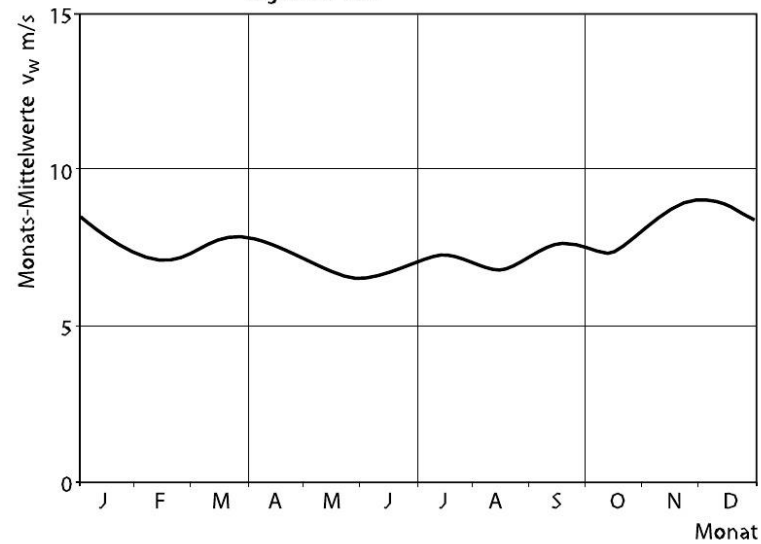
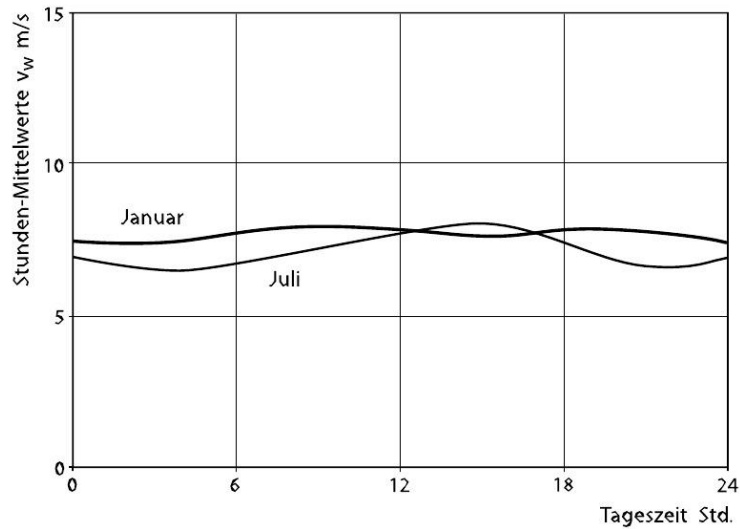
- Einfache Beschreibung mit dem Hellmann-Exponenten

$$v_H = v_{ref} \left(\frac{H}{H_{ref}} \right)^\alpha$$

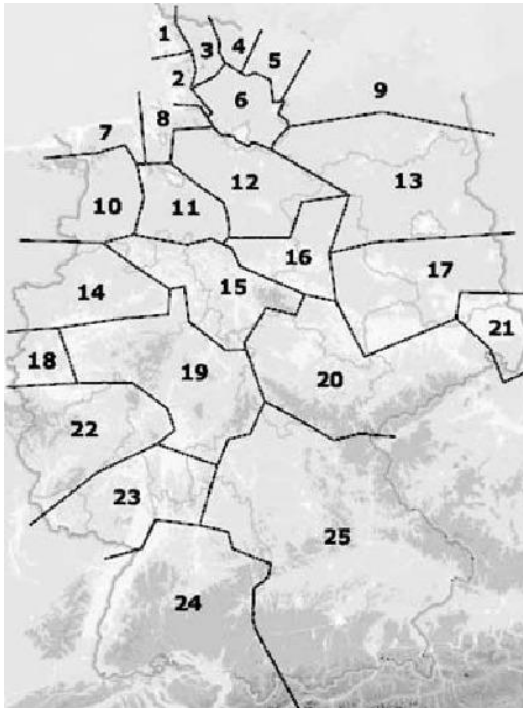
- Kann nicht für Ermüdungssimulationen verwendet werden, wg der Schwankungen

z_0 [m]	Typen von Geländeoberflächen	Rauhigkeits-Klasse
1.00	Stadt Wald	3
0.50	Vorstädte	
0.30	Bebautes Gelände	
0.20	Viele Bäume und/oder Büsche	2
0.10	Landwirtschaftliches Gelände mit geschlossenem Erscheinungsbild	
0.05	Landwirtschaftliches Gelände mit offenem Erscheinungsbild	1
0.03	Landwirtschaftliches Gelände mit sehr wenigen Gebäuden, Bäumen usw. Flughäfen mit Gebäuden und Bäumen	
0.01	Flughäfen, Start- und Landebahn Weidegras	0
$5 \cdot 10^{-3}$	Blanke Erde (glatt)	
10^{-3}	Schneeoberflächen (glatt)	
$3 \cdot 10^{-4}$	Sandoberflächen (glatt)	0
10^{-4}	Wasserflächen (Seen, Fjorde und das Meer)	

Zeitlicher Verlauf

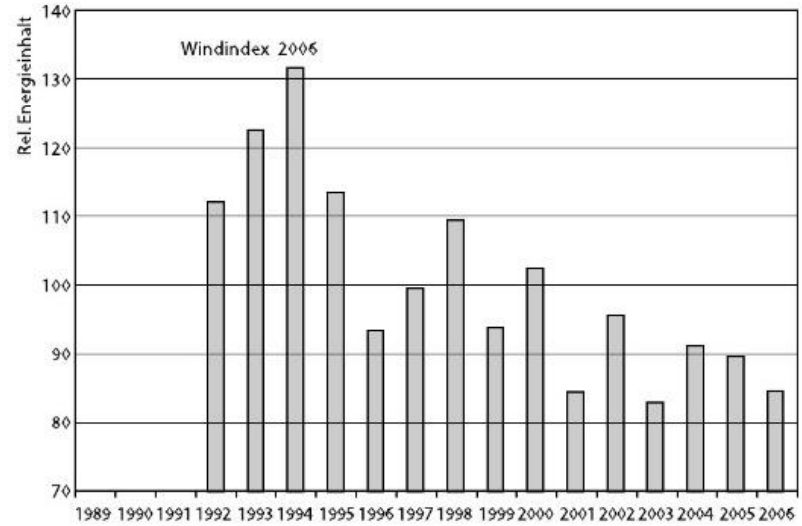
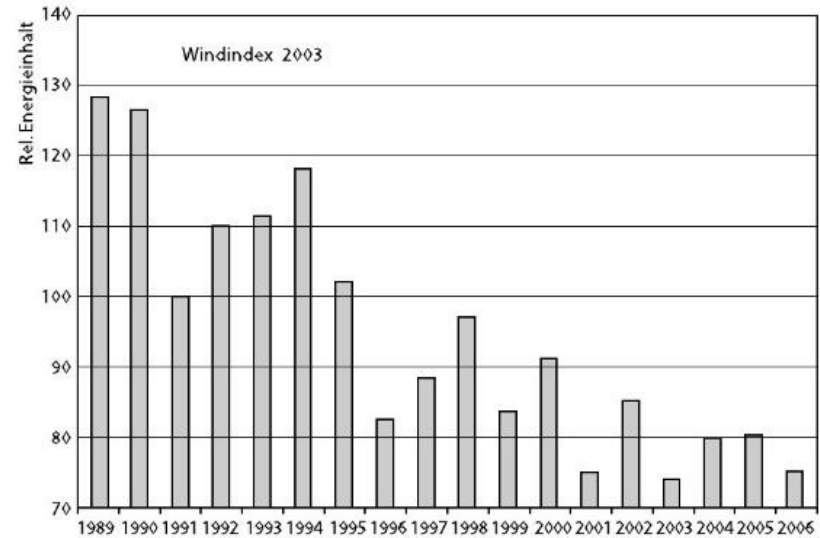


Zeitlicher Verlauf



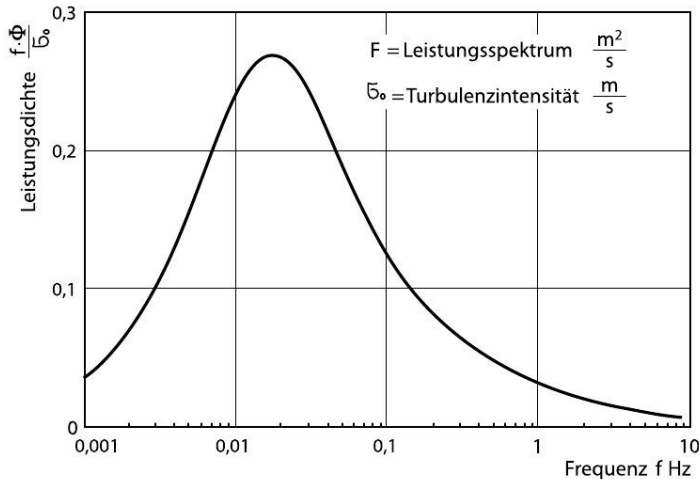
Windindex = Produktionsindex

- Windverhältnisse
- Effizienz, Verfügbarkeit



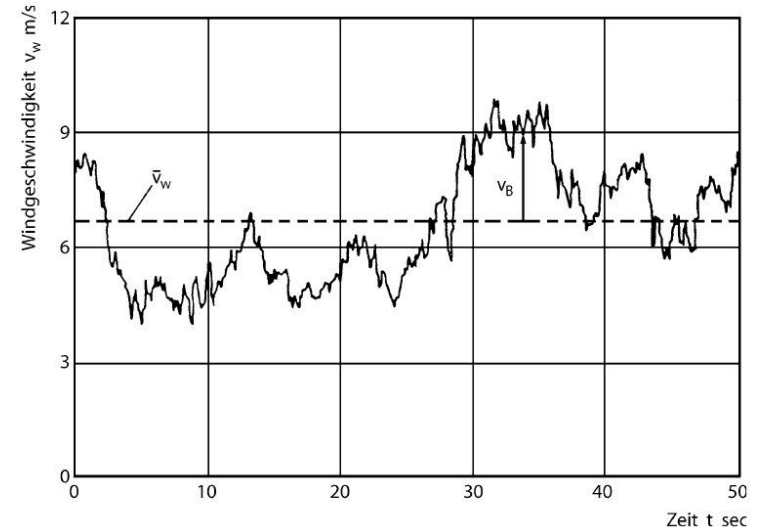
Turbulenzen und Böen

- dynamische Lasten: Materialermüdung
 - werden durch Turbulenz beeinflusst
- Bruchgrenze wird bei extremen Windgeschwindigkeiten erreicht
- Messdaten sind immer nur begrenzt verfügbar
→ Statistische Darstellung



- Turbulenzintensität
 - mittl. Geschw.
 - Rauigkeit
- Offenes Meer: < 5%
- bis > 20% in Wäldern und bebauten Gebieten
- Üblicherweise: 13 – 20 %

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_v}{\bar{v}_W}$$



Verlauf der Windgeschwindigkeit

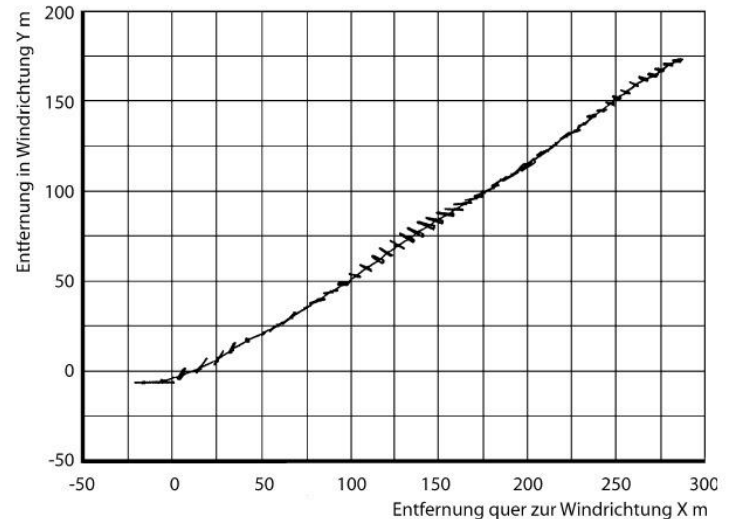
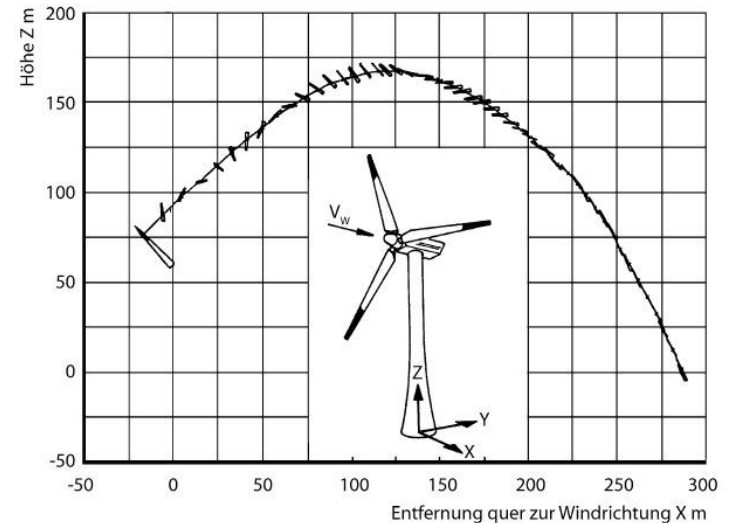
$$v_W(t) = \bar{v}_w + v_B(t)$$

- Keine allgemeine Definition für Böen
- Böenfaktor: erhöhter Wert über dem Mittelwert
- Negativbö
- Jahrhundertbö
 - Deutsche Bucht: 47 m/s
 - offenes Meer: 60 m/s
 - Antarktis: 95 m/s

Wie weit kann ein Rotorblatt fliegen?

2 Fälle:

- Erreichen der max. Drehzahl bei Überlast
 - 2 – 3 mal höher als die Nenndrehzahl
 - Ermüdungsbruch bei Nenndrehzahl
 - taumelnde unkontrollierende Bewegung
 - Schwerpunkt erlaubt keinen stabilen Flug
 - Nach kurzer Zeit ist das schwere Ende vorne
 - Mittlerer Widerstand $c_W = 0.25$
 - Der äußere Teil des Rotors hat die größte Reichweite
-
- Flugbahn des äußeren Rotordrittels in der Rotorebene
 - Turmhöhe: 60 m
 - Durchmesser: 60 m
 - Blattgewicht: 8 t
 - Spitzengeschwindigkeit: 100 m/s (50% höher als Nenndrehzahl)



Geräuscentwicklung

- Akustische Kenngrößen: Schalldruckpegel dB(A)
- tonhaltige und impulshafte Geräusche werden stärker wahrgenommen
 - Gewerbegebiet, Tag 65 dB(A), Nacht 50 dB(A)
 - Mischgebiet, Tag 60 dB(A), Nacht 45 dB(A)
 - allgemeines Wohngebiet, Tag 55 dB(A), Nacht 40 dB(A)
 - reines Wohngebiet, Tag 50 dB(A), Nacht 35 dB(A)
 - Hintergrundlärm abhängig von Windgeschwindigkeit
- Approximation $L_A = 27.7\text{dB} + 2.5 \cdot v_W\text{dB}$
 - Geräusch einer WKA nimmt ca 1 dB(A) pro m/s Windgeschwindigkeit zu
 - Wenn der Hintergrund um ca. 6dB(A) lauter ist als WKA → WKA vernachlässigbar

Geräuscentwicklung

- Schalleistungspegel $L_A = 27.7\text{dB} + 2.5 \cdot v_W\text{dB}$
 - Messung des Schalldruckpegels an 5 definierten Punkten
 - R: räumlicher Abstand vom Messpunkt zum Rotormittelpunkt
- Schallausbreitung
 - Eigenschaften der Schallquelle (emittierte Schalleistung, Richtcharakteristik, Tonhaltigkeit)
 - Geometrie des Schallfeldes (Höhe und Entfernung zum Immissionsort)
 - Topographie (Geländeform, Bewuchs, Bebauung)
 - Witterungsbedingungen (Windrichtung, -geschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit, Temperatur)

Geräuscentwicklung

- Schalldruckpegel am Immissionsort

$$L_A = L_W + DI + K_0 - D_S - D_L - D_{BM} - D_D - D_G + D_W$$

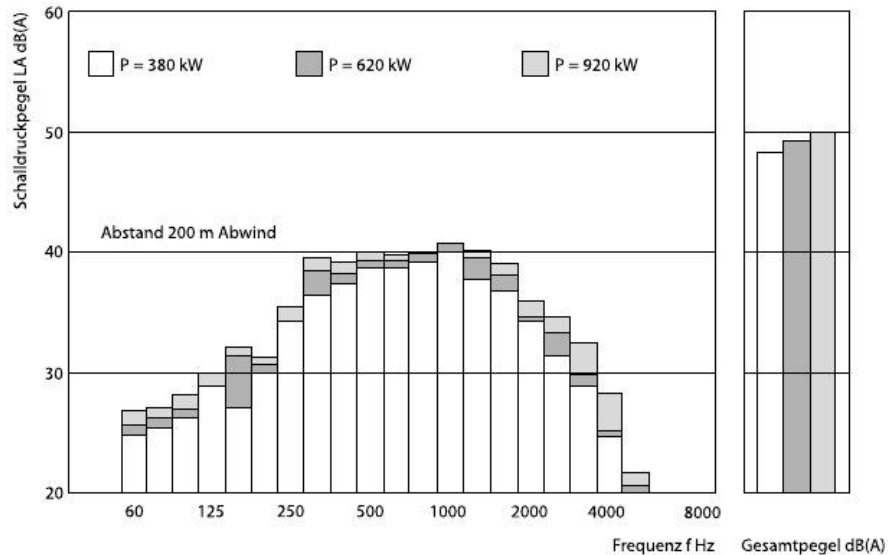
- L_W Schalleistungspegel
- DI Richtwirkungsmaß
- K_0 Raumwinkelmaß
- D_S Abstandsmaß
- D_L Luftabsorptionsmaß
- D_{BM} Boden- und Meteorologiedämpfungsmaß
- D_D Bewuchsdämpfungsmaß
- D_G Bebauungsdämpfungsmaß
- D_W Windeinfluss

Mehrere Schalquellen, z.B. Windpark

- n = Anzahl der Schallquellen
- L_i = Einzelschalldruckpegel der Schallquell i

$$L_{AZ} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{0.1 L_i}$$

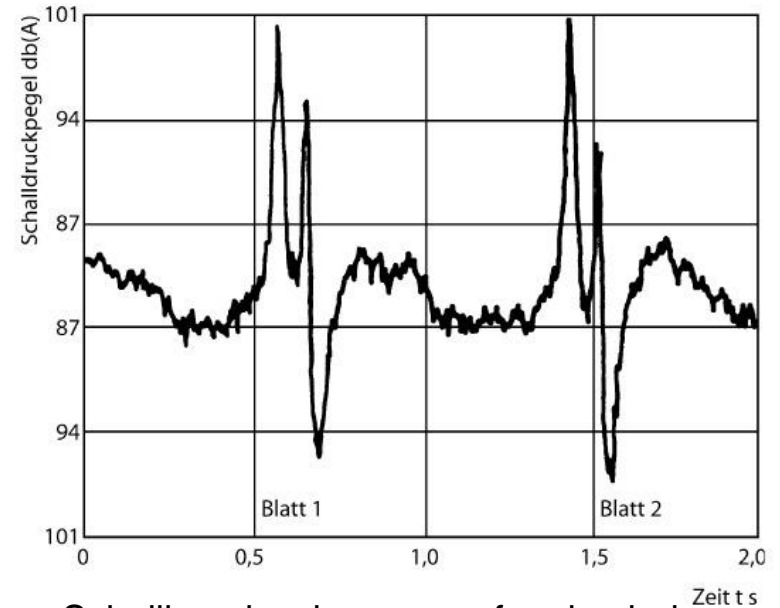
Geräuscentwicklung



Gemessenes Spektrum des Schalldruckpegels in 200 m Entfernung (windabwärts) eine WKA-60 auf Helgoland

Verschiedene Effekte sind verantwortlich

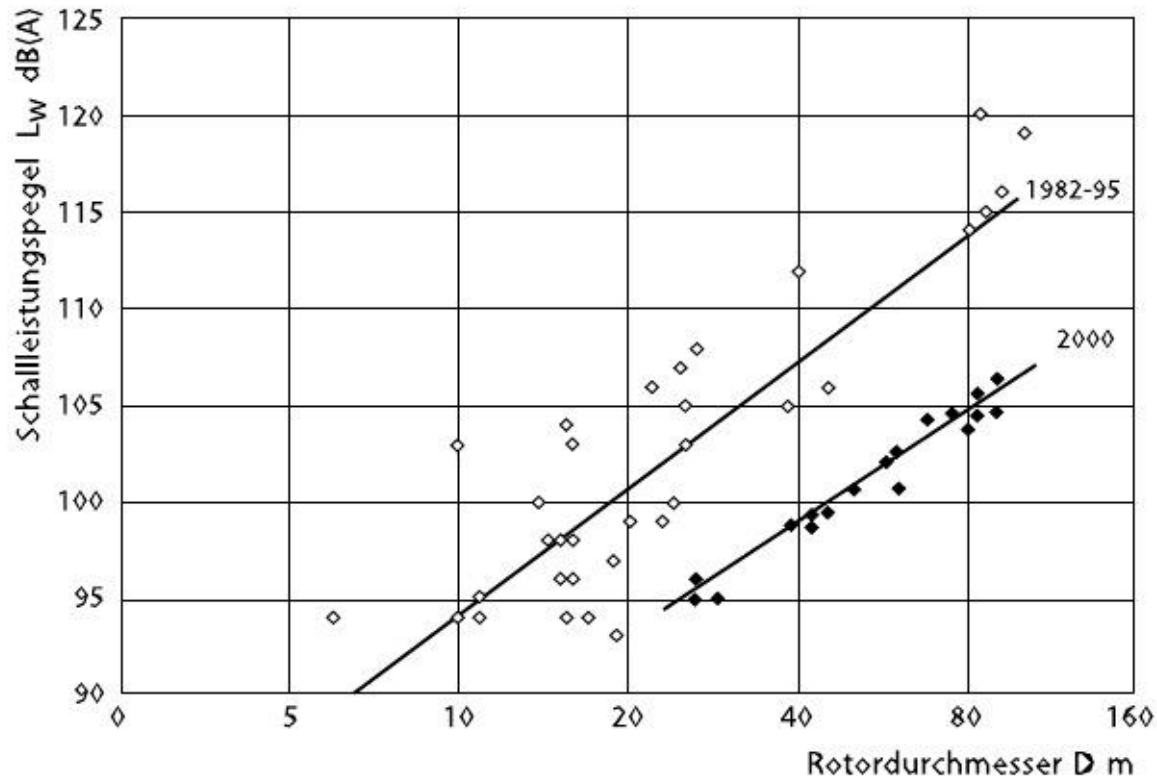
- Turbulente Grenzschicht
- Wirbelbildung an der Profilhinterkante
- Turbulenz des Rotornachlaufs
- Strömungsablösungen, z. B. am Blattende
- Kanten, Spalten, Vertstrebungen



Schallimpulse, hervorgerufen durch den Turmschatteneffekt

- kann zu Resonanz führen
- Karman-sche Wirbelstrasse
- Beschwerden der Anwohner, Klirren von Tassen, etc.

Geräuscentwicklung



Typische Werte für 3-Blatt-Rotoren mit Schnelllaufzahl 6—7

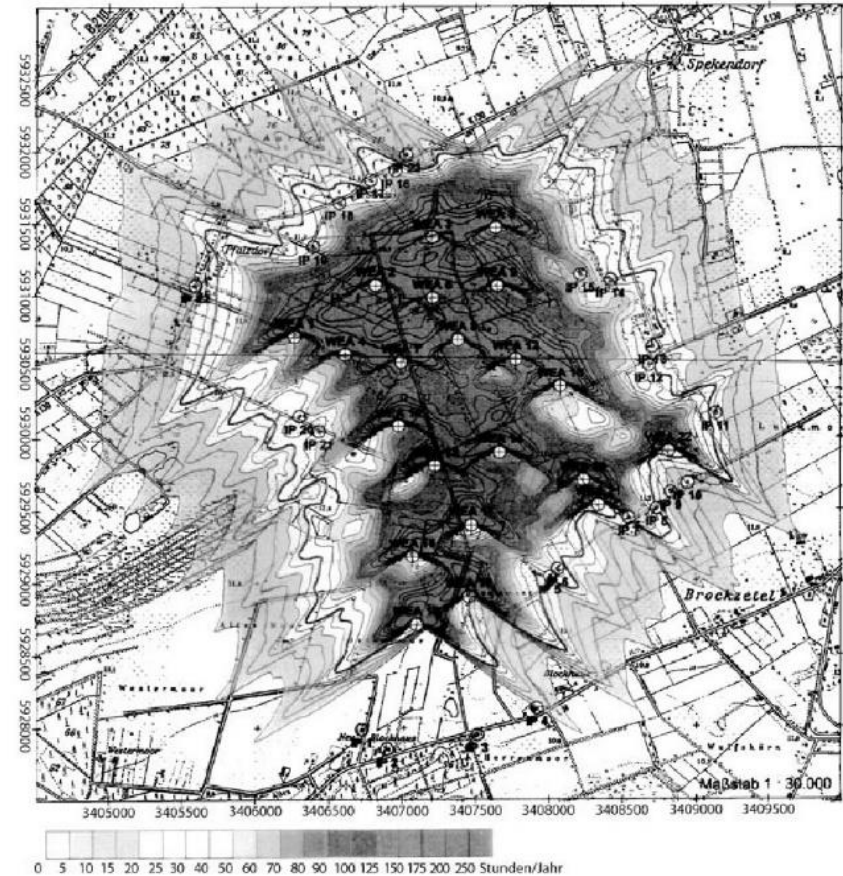
- kleine Anlagen, - 20m D, 100 kW: 95 dB(A)
- mittlere Anlagen, 20 – 40 m, 500 kW 100 dB(A)
- große Anlagen, 70 –80 m, 1 MW 102 – 105 dB(A)
- Multi Megawatt Anlagen , - 130 m 105 – 107 dB(A)

Einflüsse auf die Umwelt

Schattenwurf



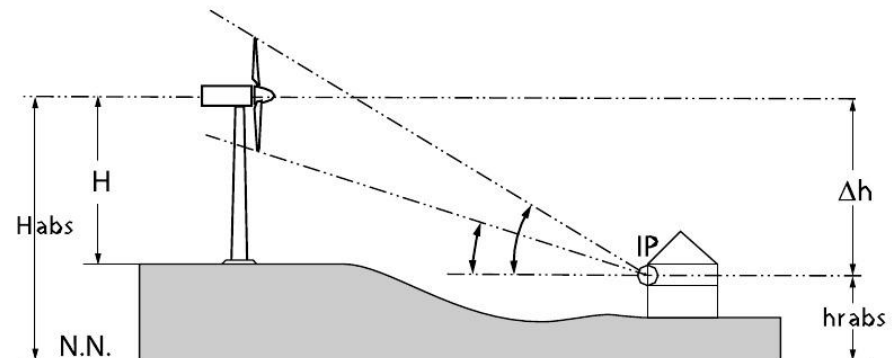
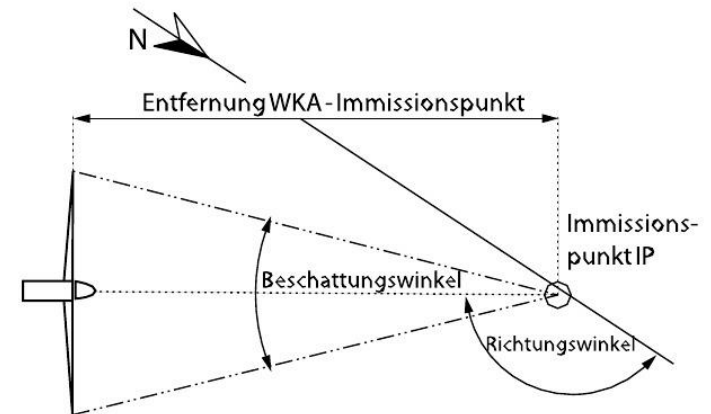
- Stroboskop-Effekt
- Nur bis zu einer gewissen Grenze zumutbar
- 30 Minuten pro Tag
- 30 Stunden pro Jahr



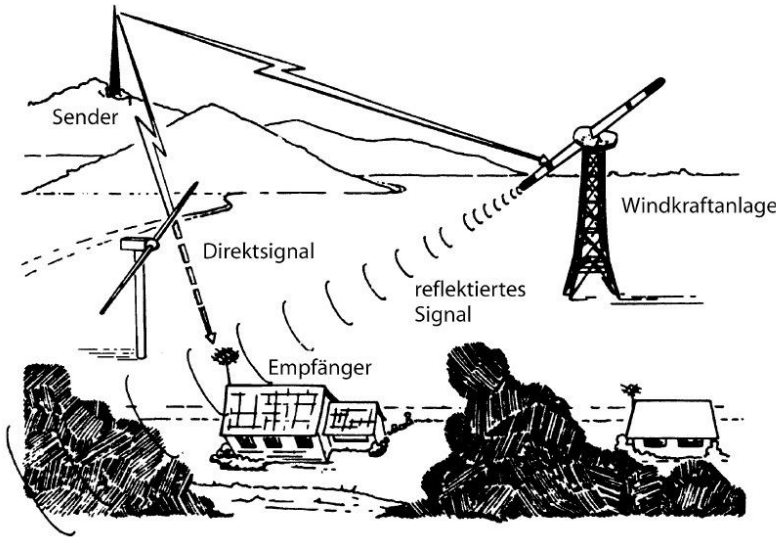
Einflüsse auf die Umwelt

Schattenzeiten können berechnet werden

- Winkel der WKA von Norden aus gesehen
- Entfernung vom Immissionspunkt
- Nabenhöhe, Durchmesser
- Höhendifferenz von Nabe und Immissionspunkt
- Längen- und Breitengrad von Turbine und Immissionspunkt
- Die Sonne ist eine Punktquelle
- Rotorkreisfläche steht senkrecht zur Sonneneinstrahlung
- Sonnenstand von unter 3° wird vernachlässigt (Bebauung, Bewuchs)
- Schattenreichweite von 1.5 – 2 km
- Statistisch viel seltener wegen des Wetters



Einflüsse auf die Umwelt



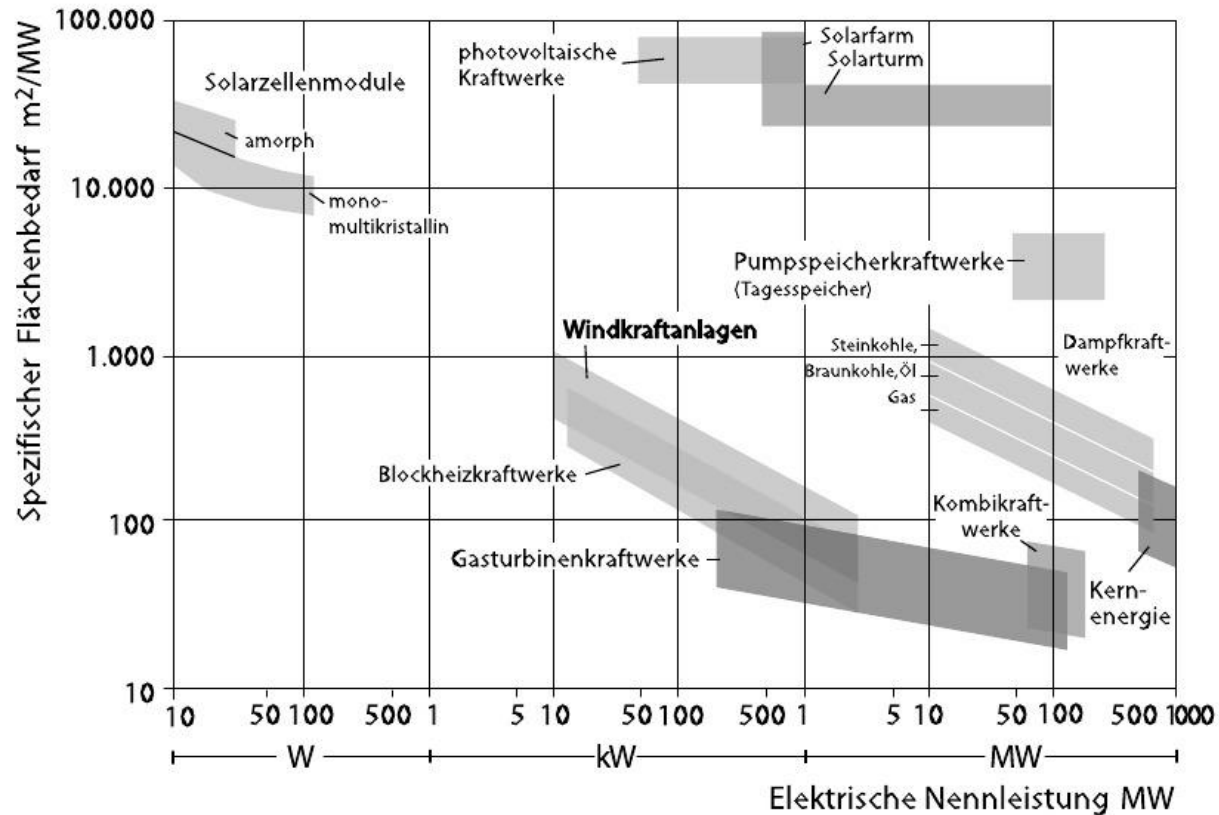
Störungen von Funk und Fernsehen



Störungen der Vogelwelt

Einflüsse auf die Umwelt

Landverbrauch



Einflüsse auf die Umwelt

Optische Beeinträchtigung der Landschaft



**Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit**