

1 Plattengrenzschicht:

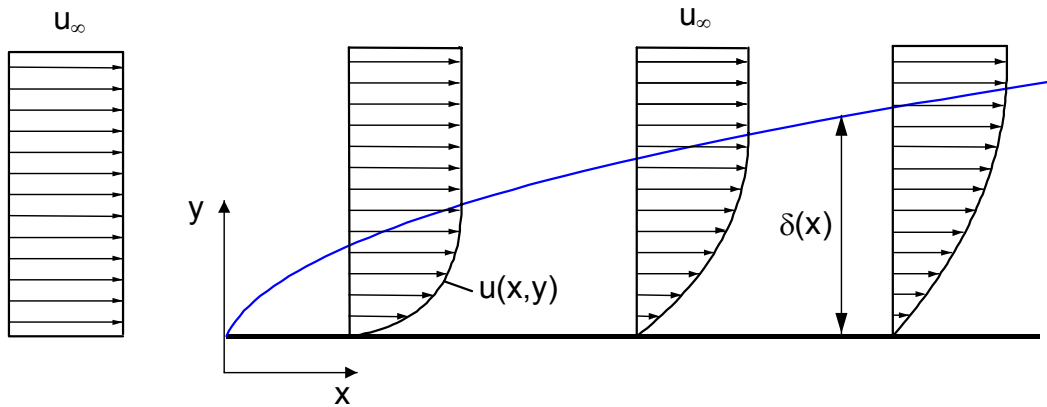


Bild VII - 1: Grenzschicht an einer längsangeströmten ebenen Platte (schematisch)

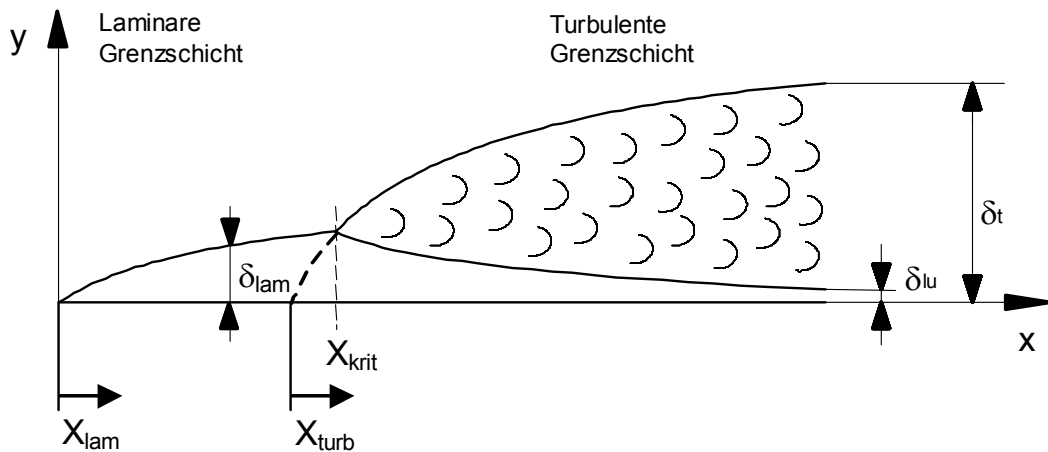
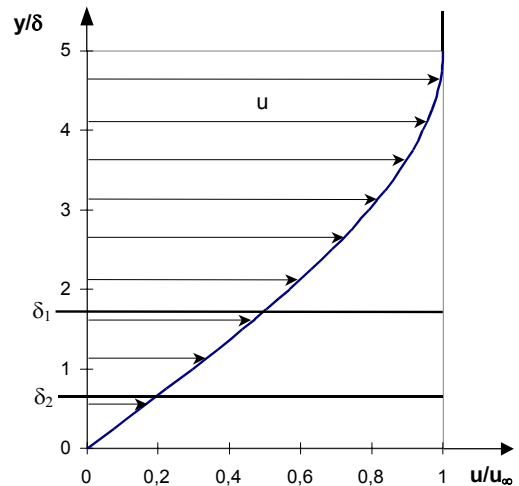


Bild VII - 2: Grenzschichtarten (laminar – turbulent)

Umschlagpunkt: $Re_{krit} = 5 \cdot 10^5$ ($3 \cdot 10^5 \dots 3 \cdot 10^2$)

Laminare Grenzschicht:

Grenzschichtdicke	$\frac{\delta}{x} = \frac{5}{\sqrt{Re_x}}$
Verdrängungsdicke	$\frac{\delta_1}{x} = \frac{1,72}{\sqrt{Re_x}}$
Impulsverlustdicke	$\frac{\delta_2}{x} = \frac{0,665}{\sqrt{Re_x}}$
Wandschubspannung	$\frac{\tau_w}{\rho \cdot u_\infty^2} = \frac{0,332}{\sqrt{Re_x}}$
Widerstandsbeiwert	$c_w = \frac{1,328}{\sqrt{Re_l}}$



$\frac{\delta_1}{\delta} = 0,344$ $\frac{\delta_2}{\delta} = 0,133$

Turbulente Grenzschicht:

Grenzschichtdicke	$\frac{\delta}{x} = \frac{0,37}{\sqrt[5]{Re_x}}$
Verdrängungsdicke	$\frac{\delta_1}{x} = \frac{0,046}{\sqrt[5]{Re_x}}$
Impulsverlustdicke	$\frac{\delta_2}{x} = \frac{0,036}{\sqrt[5]{Re_x}}$
Wandschubspannung	$\frac{\tau_w}{\rho \cdot u_\infty^2} = \frac{0,0296}{\sqrt[5]{Re_x}}$
Widerstandsbeiwert	$c_w = \frac{0,074}{\sqrt[5]{Re_l}}$

$$\delta_{lu} = 680 \frac{\ln^2 Re_x}{Re_x}$$

$$\frac{\delta_1}{\delta} = 0,124$$

$$\frac{\delta_2}{\delta} = 0,097$$

hydraulisch glatt:

$$\frac{k}{L} Re_x < 100$$

$$c_w = \frac{0,074}{\sqrt[5]{Re_l}}$$

hydraulisch rauh:

$$c_w = 0,024 \left(\frac{k}{L} \right)^{1/6}$$

$$c_w = \left(1,89 - 1,62 \cdot \lg \frac{k_s}{L} \right)^{-2,5}$$

$$10^{-6} \leq k/L \leq 10^{-2}$$

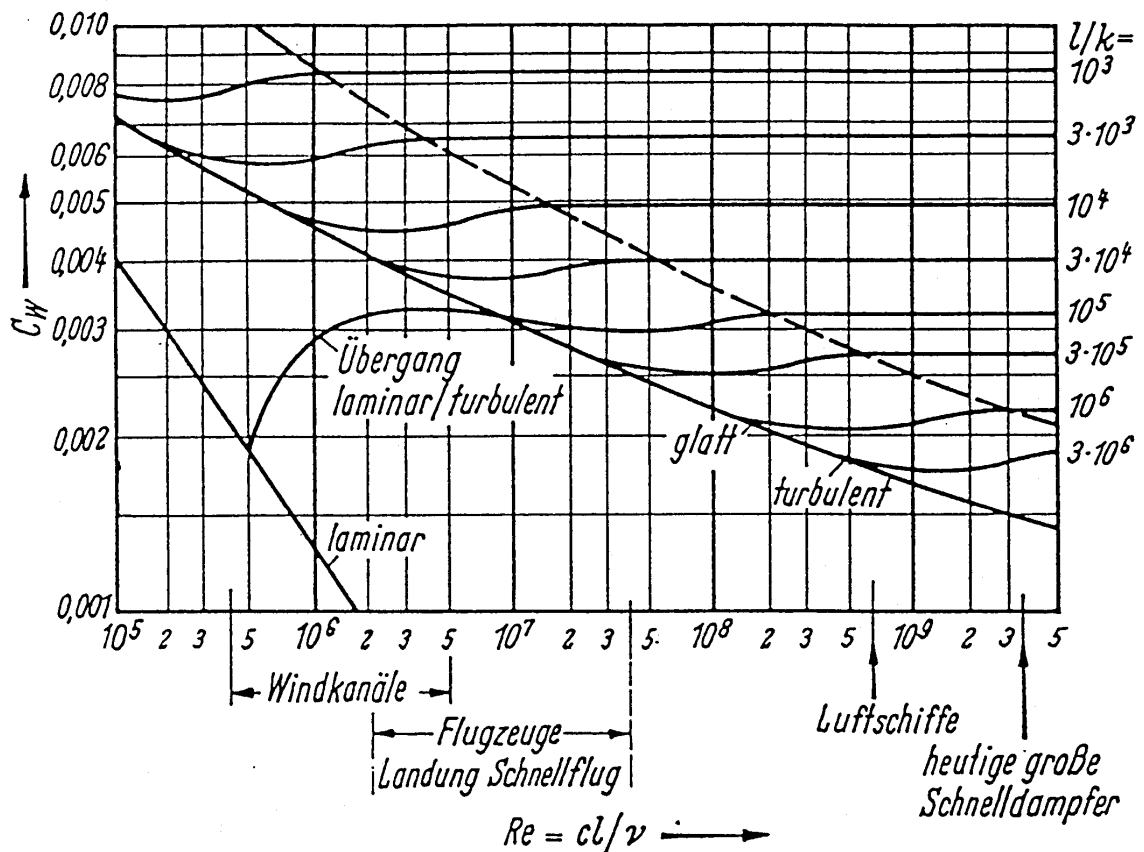


Bild VII - 3: Widerstandsbeiwert c_w längsangeströmter ebener Flächen (einseitig benetzt) nach [10].

2 Kugelumströmung:

Widerstand:
$$F_W = c_W \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w_\infty^2$$

$$c_W = \frac{24}{Re} \quad \text{für: } Re < 0,1 \text{ (... 1)}$$

$$c_W = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt{Re}} + 0,4 \quad \text{Näherung nach KASKAS}$$

$$Re_{krit} \approx 3 \cdot 10^5$$

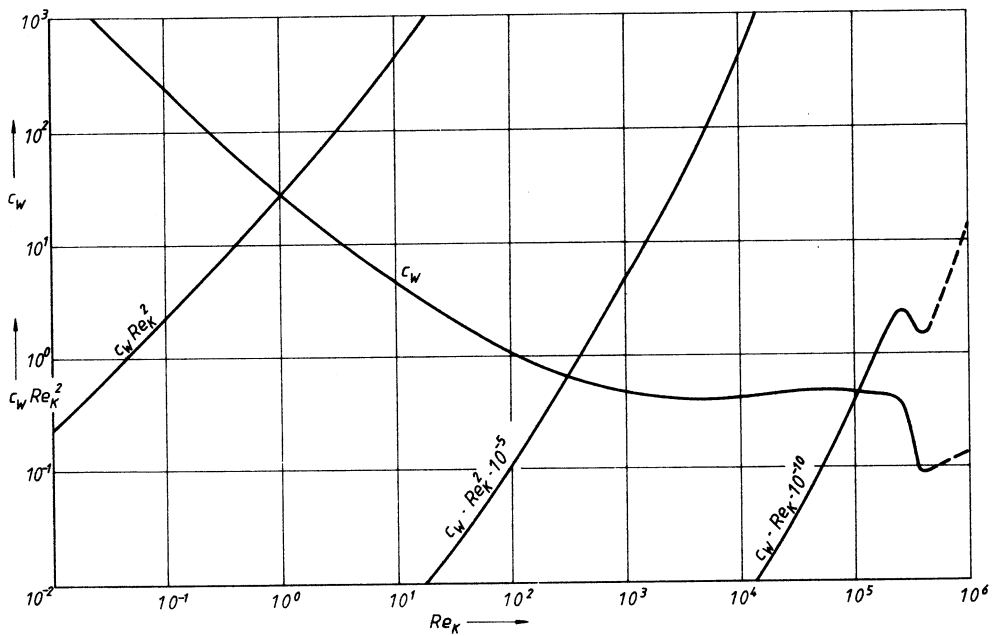


Bild VII - 4: Widerstandsbeiwert c_w und $(c_w Re_K^2)$ von Kugeln nach [12]

Sinkgeschwindigkeit:
$$w_s = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot \frac{g \cdot d_K \cdot \rho_M - \rho_F}{c_W \cdot \rho_F}}$$

$$c_W Re = \frac{4}{3} \cdot Ar$$

$$Ar = \frac{g \cdot d_K^3 \cdot \rho_M - \rho_F}{\nu_F^2 \cdot \rho_F}$$

$$w_s = \frac{g \cdot d_K^2 \cdot \rho_M - \rho_F}{18 \nu_F \cdot \rho_F}$$

für: $Re < 1$

$$w_s = 1,74 \sqrt{\rho \cdot d_K \frac{\rho_M - \rho_F}{\rho_F}}$$

für: $500 < Re < Re_{krit}$

3 Sinkgeschwindigkeit nicht kugelförmiger Teilchen:

$$w_s = k \cdot w_{s,Kugel}$$

d_K gemäß Siebdurchgang

$$k = f(f_0; Re)$$

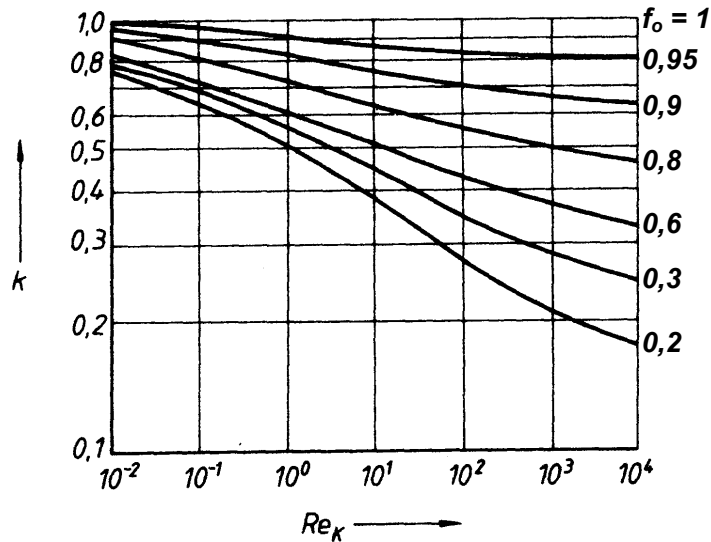


Bild VII - 5: Sphäritätseinfluß auf die Sinkgeschwindigkeit nach [12]

Sphärität von Körnerkollektiven nach [12]:

$$f_0 = \frac{\text{Oberfläche der volumengleichen Kugel}}{\text{reale Oberfläche des Teilchens}}$$

Stoff	Formfaktor f_0
Zement	0,57
Kohlenstaub	0,61
Tetraeder	0,670
Sand (rundlich)	0,70
Kali	0,70
Würfel	0,806
Flugstaub (rundlich)	0,82
Zylinder (h = 2d)	0,832
Zylinder (h = d)	0,874
Kugel	1

Weitere Korrekturfaktoren:

Korrekturfaktoren k zur Sinkgeschwindigkeit (Bezugnahme auf volumengleiche Kugel) nach [12]

$c_W Re_K^2$	Teilchenform			
	abgerundet	eckig	länglich	flach
20400	0,805	0,680	0,610	0,450
25500	0,800	0,678	0,595	0,441
51000	0,790	0,672	0,590	0,437
127000	0,755	0,650	0,564	0,420
255000	0,753	0,647	0,562	0,408
510000	0,740	0,635	0,560	0,392

Korrekturfaktoren k zur Sinkgeschwindigkeit nach [12]

k_{f1} im Bereich $Re_K < 0,25$; k_{f2} im Bereich $10^3 < Re_K < 10^5$

Teilchenform	d	k_{f1}	k_{f2}
Kugel	d	1	1
Würfel	1,241a	0,92	0,56
Parallelepiped			
$a \times a \times 2a$	1,563a	0,90	0,52
$a \times 2a \times 2a$	1,970a	0,89	0,51
$a \times 2a \times 3a$	2,253a	0,88	0,48
Zylinder			
$h = 0,5d$	0,909d	0,93	0,58
$h = d$	1,145d	0,95	0,64
$h = 2d$	1,442d	0,93	0,58

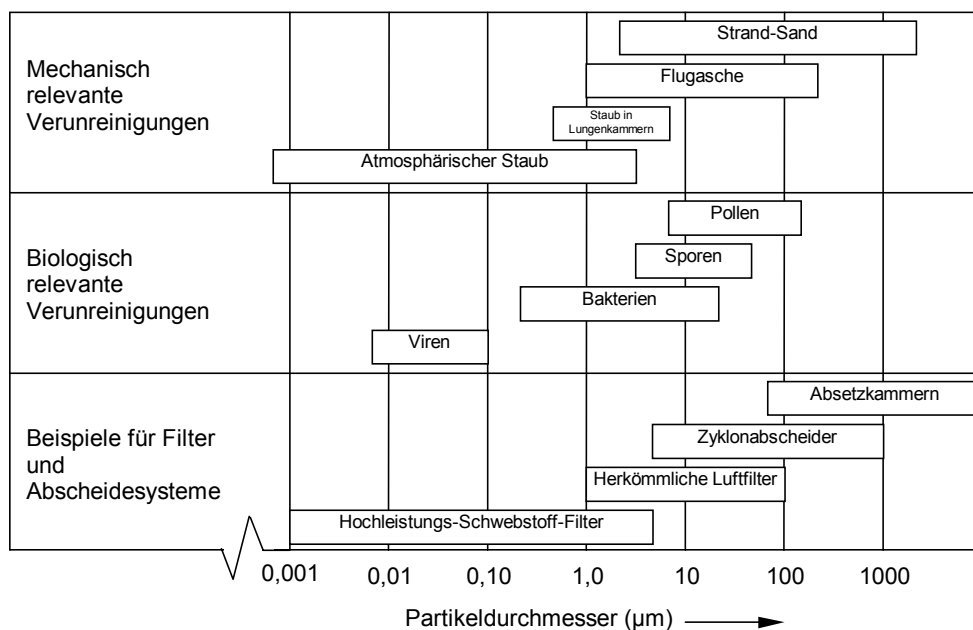
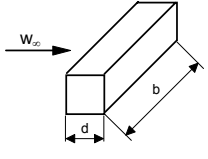
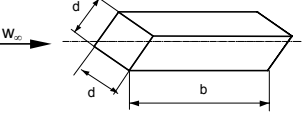
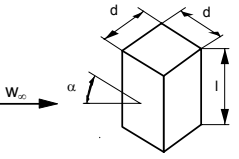
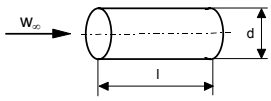
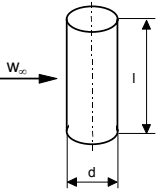
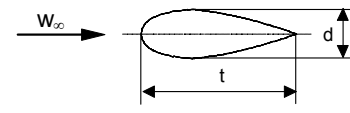

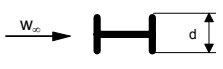


Bild VII - 6: Größenbereiche luftgetragener Verunreinigungen sowie vorhandene Filter- und Abscheidesysteme:

4 Widerstandsbeiwerte c_w :

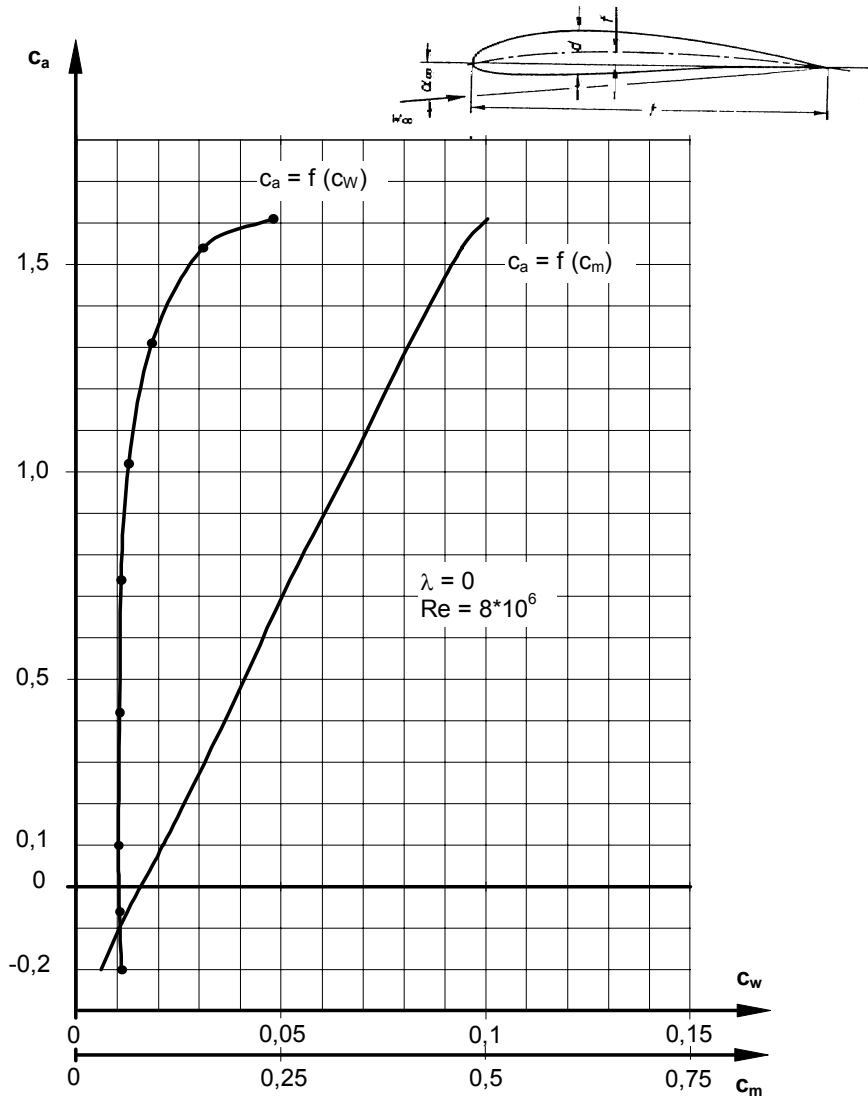
Widerstandsbeiwerte c_w für Körperformen nach [9, 10, 17]

Körperform	Abmessungen / Anströmrichtung	Widerstandsbeiwert c_w												
Kreisscheibe quer angeströmt $Re > 10^3$		1,11 (1,1 bis 1,5)												
Kreisringplatte		$d/D = 0,5 : 1,22$												
2 Kreisplatten hin- tereinander		<table border="1"> <tr> <td>l/d</td> <td>1</td> <td>1,5</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>c_w</td> <td>0,93</td> <td>0,78</td> <td>1,04</td> <td>1,52</td> </tr> </table>	l/d	1	1,5	2	3	c_w	0,93	0,78	1,04	1,52		
l/d	1	1,5	2	3										
c_w	0,93	0,78	1,04	1,52										
Rechteckplatte quer angeströmt		<table border="1"> <tr> <td>h/b</td> <td>1</td> <td>4</td> <td>10</td> <td>20</td> <td>∞</td> </tr> <tr> <td>c_w</td> <td>0,91</td> <td>0,85</td> <td>0,87</td> <td>0,99</td> <td>2,0</td> </tr> </table>	h/b	1	4	10	20	∞	c_w	0,91	0,85	0,87	0,99	2,0
h/b	1	4	10	20	∞									
c_w	0,91	0,85	0,87	0,99	2,0									
Rotationsellipsoid		$Re < 5 \cdot 10^5 : 0,6$ $Re > 5 \cdot 10^5 : 0,21$												
		$Re > 5 \cdot 10^5 : 0,05 \text{ bis } 0,1$												
Halbkugel Kugelseite angestr.		mit Boden: 0,42 ohne Boden: 0,34												
Halbkugel Flachseite ange- strömt		mit Boden: 1,17 ohne Boden: 1,34												
Kegel Spitze angeströmt (ohne Boden)		$\alpha = 30^\circ : 0,35$ $\alpha = 60^\circ : 0,52$												
Kegel Flachseite ange- strömt		$\alpha = 15^\circ : 0,58$												
Würfel		0,9 bis 1,0												

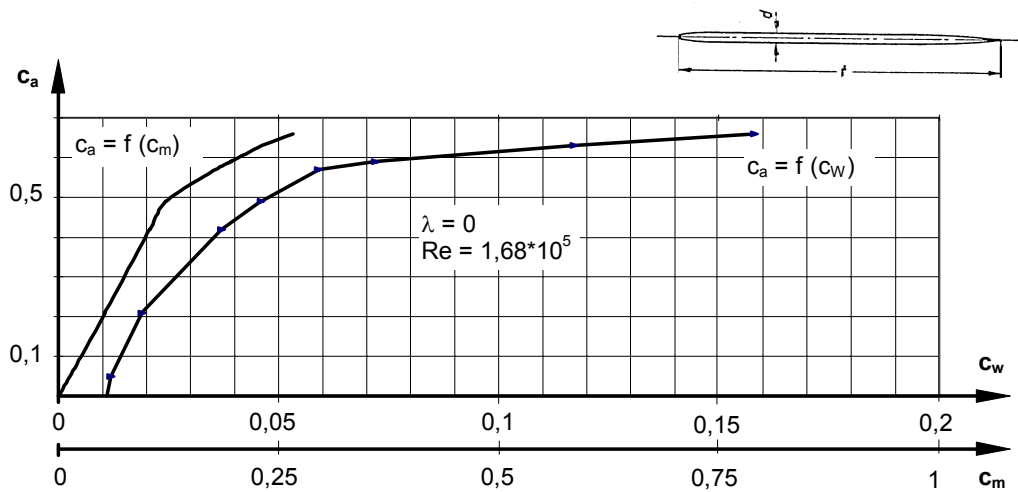
Körperform	Abmessungen / Anströmrichtung	Widerstandsbeiwert c_w														
Prisma, quadratisch		$d/b = 1/5: 1,56$ $d/b = 1/\infty: 2,0 \text{ bis } 2,03$														
Prisma längs angeströmt		$d/b = 1/2,5: 0,81$														
Prisma schräg angeströmt		$\alpha = 90^\circ: l/d = 5: 1,65$ $\infty: 2,03$ $\alpha = 45^\circ: l/d = 5: 0,92$ $\infty: 1,54$														
Walze längs angeströmt		<table border="1" data-bbox="973 828 1252 907"> <tr> <td>l/d</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>4</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>c_w</td> <td>0,91</td> <td>0,85</td> <td>0,87</td> <td>0,99</td> </tr> </table>	l/d	1	2	4	7	c_w	0,91	0,85	0,87	0,99				
l/d	1	2	4	7												
c_w	0,91	0,85	0,87	0,99												
Walze quer angeströmt		$Re < 9 \cdot 10^4:$ <table border="1" data-bbox="973 1008 1348 1086"> <tr> <td>l/d</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>5</td> <td>10</td> <td>40</td> <td>∞</td> </tr> <tr> <td>c_w</td> <td>0,63</td> <td>0,68</td> <td>0,74</td> <td>0,82</td> <td>0,98</td> <td>1,20</td> </tr> </table> $Re > 5 \cdot 10^5: l/d = \infty: c_w = 0,35$	l/d	1	2	5	10	40	∞	c_w	0,63	0,68	0,74	0,82	0,98	1,20
l/d	1	2	5	10	40	∞										
c_w	0,63	0,68	0,74	0,82	0,98	1,20										
Profilstab		<table border="1" data-bbox="973 1209 1396 1299"> <tr> <td>t/d</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>5</td> <td>10</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>c_w</td> <td>0,2</td> <td>0,1</td> <td>0,06</td> <td>0,083</td> <td>0,094</td> </tr> </table>	t/d	2	3	5	10	20	c_w	0,2	0,1	0,06	0,083	0,094		
t/d	2	3	5	10	20											
c_w	0,2	0,1	0,06	0,083	0,094											
Doppel - T - Profil		2,05														
		0,87														

5 Tragflügelpolaren - Aerodynamische Beiwerte von Profilen nach [16]

a) Profil N 60: $d/t = 0,12$; $f/t = 0,04$



b) Ebene Platte: $d/t = 0,03$



6 Widerstandsbeiwerte c_w von Fahrzeugen (Richtwerte) nach [9]

Fahrzeugart	Stirnfläche [m ²]	Widerstandsbeiwert	
1. PKW:			
1.1. Ältere Form:		0,45 bis 0,6	
VW Käfer	1,80	0,48	
1.2. Ponton - Form (Mittelklasse):		0,40 bis 0,48	
1.3. Stromlinien - Form:		0,24 bis 0,35	
VW	Polo	1,90	0,32
	Golf	1,98	0,32
	Passat	1,89	0,29
OPEL	Corsa	1,88	0,35
	Astra	1,97	0,32
	Vectra	2,01	0,28
	Calibra	1,90	0,26
AUDI	A 4	2,03	0,29
	A 6	2,05	0,30
MERCEDES	C-Klasse	2,05	0,31
	E-Klasse	2,17	0,27
	S-Klasse	2,40	0,31
FORD	Fiesta	1,70	0,35
	Scorpio	2,04	0,32
BMW	316	1,88	0,32
	525	2,12	0,28
	740	2,21	0,30
SAAB	9000 E	2,05	0,34
1.4. Offene Form (Cabriolet):		0,6 bis 0,3	
OPEL-Astra	geschlossen	1,94	0,33
	offen	1,86	0,42
VW-Golf	geschlossen	2,06	0,36
	offen	2,01	0,42
1.5. Sport - Form:		0,22 bis 0,35	
Porsche	959	1,92	0,31
	968	1,88	0,34
Ferrari	F 40	1,90	0,34
1.6. Kombi - Form (ca. 10 bis 15 % höher):		1,8 bis 2,2	0,30 bis 0,40
2. Motarräder:			
Ohne Fahrer		0,35 bis 0,45	
Mit Fahrer		bis ca. 2,5 mal größer	
3. LKW und Bus:			
LKW ohne Anhänger	ohne Luftleitbleche	0,6 bis 0,8	
	mit Luftleitblechen	0,45 bis 0,65	
LKW mit Anhänger		0,7 bis 1,0	
Sattelzug		0,65 bis 0,9	
Omnibus		0,5 bis 0,6	
4. Lokomotiven:			
Diesel		0,5 bis 0,6	
Elektro		0,4 bis 0,5	
Zug ICE	(Triebkopf)	0,23	
5. Stromlinienkörper (zum Vergleich)		0,05 bis 0,08	

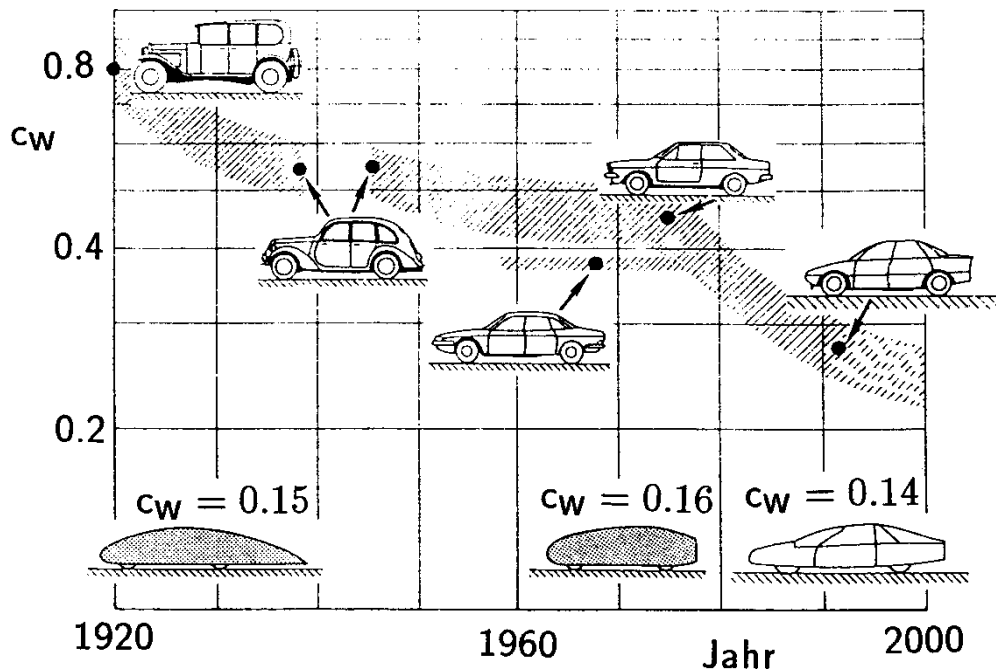


Bild VII - 7: Entwicklung des Widerstandsbeiwertes c_w bei Kraftfahrzeugen im Laufe der Jahre nach [15].

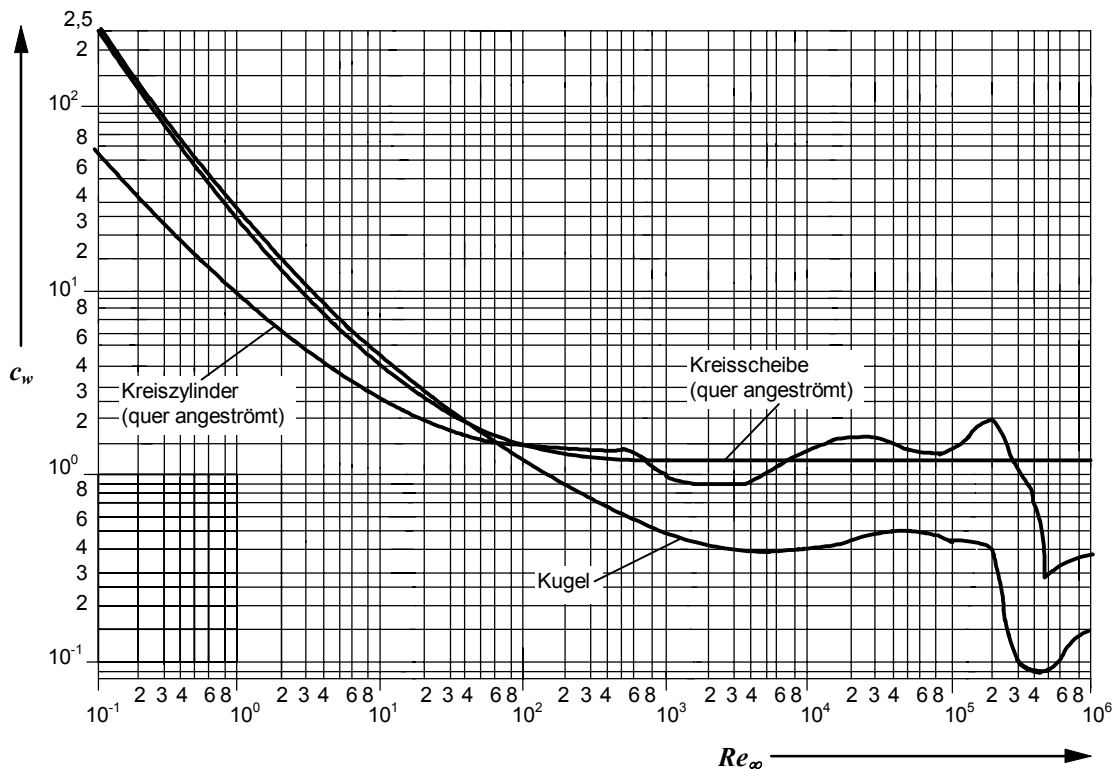
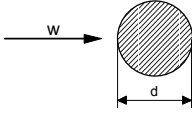
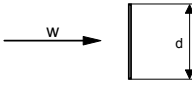
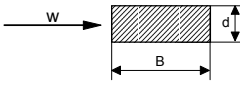
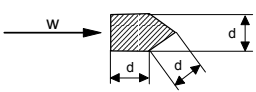
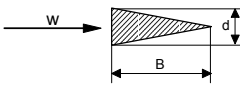

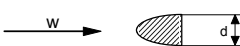
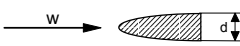

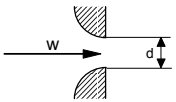


Bild VII - 8: Widerstandsbeiwert c_w von Kugel, Kreiszyylinder und Kreisscheibe (quer angeströmt), abhängig von der auf den Durchmesser d und die ungestörte Anströmgeschwindigkeit w_∞ bezogene Re -Zahl nach [9].

7 Wirbelablösefrequenz unsymmetrischer Wirbelstraßen: STROUHAL - Zahl:

STROUHAL - Zahlen für Wirbelstraßen hinter verschiedenen Körpern in ebener Strömung nach [6]. Mit steigendem Re wird $Sr = Sr_\infty = \text{const.}$

Körper	Abmessungen	Experimenteller Befund
Zylinder		$Sr_\infty = 0,180 \dots 0,207$ $Re_1 = 30 \dots 48$ (Beginn der Wirbelablösung) $Sr = 0,198 [1 - (19,7/Re)]$ von Re_1 bis $Re = 5 \cdot 10^5$
Platte		$Sr_\infty = 0,144 \dots 0,180$ für Anströmwinkel von 0° bis 60°
Quader		$Sr_\infty = 0,156$ für $B/d = 3$ $Sr_\infty = 0,130$ für $B/d = 1$
Quader mit Prisma		$Sr_\infty = 0,235$
Prisma		$Sr_\infty = 0,255$ für $B/d = 3$
Keil		$Sr_\infty \approx 0,238$
Kurzgeschöß		$Sr_\infty \approx 0,271$
Langgeschöß		$Sr_\infty \approx 0,254$
Tragflügel, symmetrisch		$Sr_\infty = 0,15 \dots 0,21$
Düsenschlitz		$Sr_\infty = 0,32$ $Sr = \frac{1}{2\sqrt{1,50 + 2000/Re}}$ für $50 \leq Re \leq 2000$

Strouhal (Sr) hängt von der Körperform und von der Reynolds-Zahl ab. Für Kreiszyylinder kann die Funktion $Sr = f(Re)$ aus folgender Abbildung nach [7] entnommen werden. Für den in der Praxis oft vorkommenden Bereich $10^2 < Re < 2 \cdot 10^5$ kann näherungsweise $Sr = 0,2$ gesetzt werden.

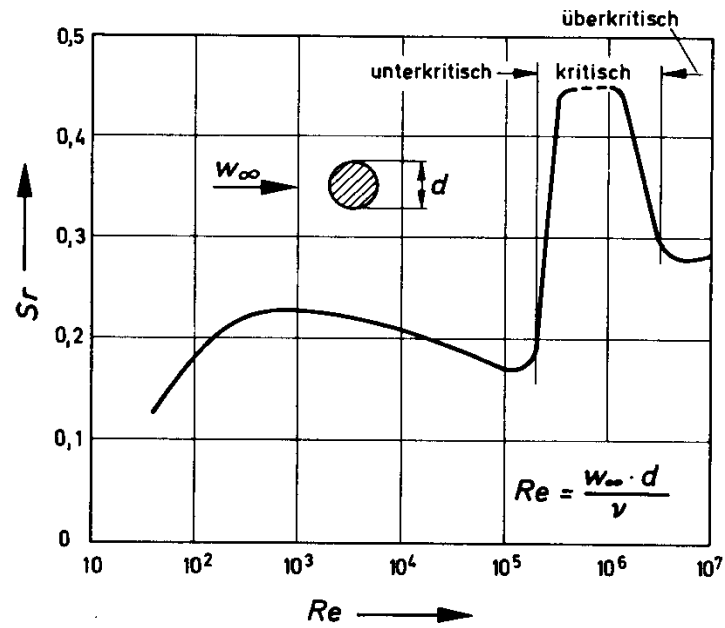


Bild VII - 9: STROUHAL - Zahl eines Kreiszyinders als Funktion von Reynolds nach [7].