

Bewegung im Totwasserraum

Das Gebiet der abgerissenen Strömung, meist Totwasserraum genannt, bedarf noch einer besonderen Betrachtung. Die Flüssigkeit ist hier durchaus nicht in Ruhe, sondern befindet sich meist in mehr oder weniger deutlich erkennbarer Drehbewegung. Besonders charakteristisch ist die Strömung hinter einem Zylinder bei kleinen Reynoldsschen Zahlen. Verfolgen wir einmal die Strömung vom Beginn der Bewegung an. Im ersten Augenblick ist die Flüssigkeit bestrebt, die Bewegungsform der reibungsfreien Strömung anzunehmen. Es ist eine gewisse Zeit notwendig, bis sich überhaupt eine Grenzschicht ausbilden kann. Beim Zylinder kann man sagen, daß ein Teilchen erst etwa $1/4$ Umfang durchlaufen haben muß. Nach einem solchen Weg wird ja erst das Anströmen gegen den Druck erforderlich. Nach diesem Weg kann sich infolge der Wandreibung erst ein Energieverlust eines Teilchens nachteilig bemerkbar machen. Es tritt dann Stillstand, Rückströmung und Ablösung ein.

Abbildung 4.15a—d zeigt einen typischen Gesamtüberblick von Homann. Bei ganz kleinen Re -Zahlen findet noch eine ganze Umströmung statt. Bei $Re = 32$

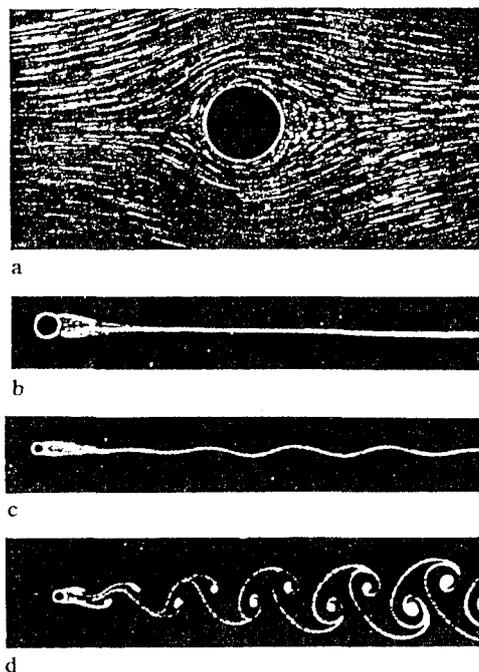


Abb. 4.15a—d Umströmung eines Zylinders im Bereiche sehr kleiner Re -Zahlen nach Homann (Ölversuche). a) $Re = 4$; b) $Re = 32$; c) $Re = 55$; d) $Re = 71$

zeigt sich ein bleibender Totwasserraum. Bleibende Strömungsspendelungen ergeben sich bereits bei $Re = 55$, während $Re = 71$ bereits die typische Wirbelstraße zeigt, für die v. Kármán das Verhältnis $\frac{\text{Abstand}}{\text{Teilung}} = 0,283$ berechnet hat.

Die Frequenzänderung der Kármánschen Wirbelstraße hängt von der dimensionslosen Strouhal-Zahl ab:

$$Sr = fd/c,$$

worin mit f die Frequenz und mit d eine lineare Körperdimension bezeichnet ist. Zwischen $200 < Re < 10^5$ hat die Strouhal-Zahl einen Wert von 0,2.

Diese Zahl ändert sich mit Re . In dem Bereich $60 < Re < 2 \cdot 10^5$ kann mit geordneten Wirbelstraßen gerechnet werden. Hierdurch können sich ganz erhebliche Störungen ergeben, die sich in Schwankungen von Konstruktionsteilen bemerkbar machen. Daß in USA hierdurch eine ganze Brücke zum Einsturz kam, ist besonders bemerkenswert. Im 2. Band wird besonders diese Störung behandelt.

zu erkennen. Das Bild zeigt, daß innerhalb eines bestimmten Bereiches der Re -Zahlen, und zwar zwischen $Re = 10^5$ bis $3 \cdot 10^5$ ein Umschlag der Kugelströmung möglich ist. In diesem Bereich gilt die erste Zahl bei ganz turbulenter Gesamtströmung während im voll laminaren Bereich der Umschlag erst bei $Re = 3 \cdot 10^5$ stattfindet. Dieses Verhalten bot nun gleichzeitig Gelegenheit, die Turbulenz der Strömung durch eine Kugel festzustellen. So hat man sich geeinigt, daß man die Re -Zahl feststellt, wenn gerade $C_w = 0,3$ ist und diese vergleicht mit dem Wert von C_w bei laminarer Gesamtströmung. Den Quotienten bezeichnet man als *Turbulenzfaktor*

$$TF = \frac{Re \text{ in ruhender Luft}}{Re \text{ im Windkanal}} = \frac{4,05 \cdot 10^5}{Re}$$

Beim Zylinder und bei der Kugel sind die Ablösungspunkte fast an der gleichen Stelle, nämlich unterkritisch bei etwa 80° , überkritisch bei etwa 110° bis 120° .

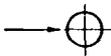
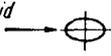
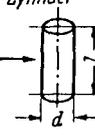
Körperform	Re	C_w	
Kugel 	$Re > 1,7 \cdot 10^5 \dots 4,05 \cdot 10^5$	0,09 ... 0,18	
	$Re < 1,7 \cdot 10^5 \dots 4,05 \cdot 10^5$	0,47	
	Überschall	0,95	
Ellipsoid 1: 0,75 	$Re < 5 \cdot 10^5$	0,55	
	$Re > 5 \cdot 10^5$	0,362	
Ellipsoid 1: 1,80 	$Re > 10^5$ unter 10^5 stetiger Übergang zu größeren C_w -Werten	0,055	
Streben  l/d	2	$Re > 10^5$	0,2
	3		0,7
	5		0,06
	10		0,083
	20		0,094
Zylinder  l/d	1	unterkritischer Wert $Re \approx 9 \cdot 10^4$	0,63
	2		0,68
	5		0,74
	10		0,82
	40	0,98	$Re > 5 \cdot 10^5$ Überschall
	∞	1,2	
	∞	0,35	
∞	1,65		
Schräg angeblasener Zylinder			
Neigung gegen senkrechte Richtung			
	0°	1,0 C_w	
	30°	0,7 C_w	
	60°	0,2 C_w	

Abb. 4.25 Widerstandsziffern für kennzahl-empfindliche Körperformen

Widerstand von Kugel und Zylinder

Grundsätzliche physikalische Eigenschaften zwingen zu einer Sonderbehandlung von Kugel und Zylinder. Zunächst ergaben sich bei der Kugel unerwartete neue Erkenntnisse. Von zwei Stellen, Eiffel und Prandtl, wurden ganz verschiedene Widerstandsziffern 0,176 und 0,44 ermittelt. Die Sichtbarmachung mit Rauch ergab Aufschluß. Nach Abb. 4.17 reißt die Strömung an der Meridianstelle ab. Wenn man nun bei der gleichen Geschwindigkeit einen Drahtreif vor dem Meridian auflegt, ergibt sich das Bild der Abb. 4.18. Die Strömung legt sich somit wieder an und reißt erst später ab, womit ein erheblich kleinerer Widerstand entsteht. Dieses Geschehen ergab nun Einblick in ein ganz bedeutendes Merkmal. Man fand, daß bei umströmten Körpern mit stetiger Umrandung eine gewisse Verzögerung der Grenzschicht, d.h. eine ablösungsfreie Strömung möglich ist, wenn die Grenzschicht turbulent ist und bestimmte Re-Zahlen vorhanden sind. Bei der Kugel ist der c_x -Verlauf in Abhängigkeit von den Re-Zahlen aus Abb. 4.19

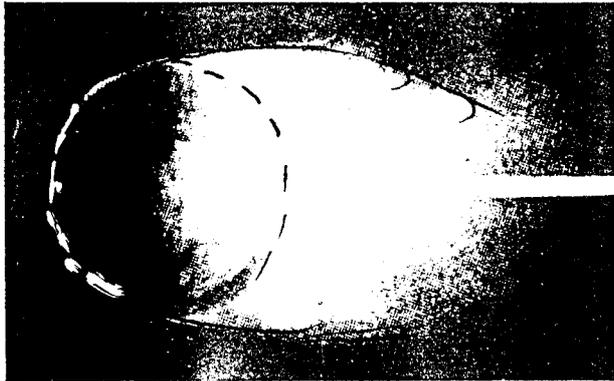


Abb. 4.17 Kugelströmung unterkritisch nach Prandtl

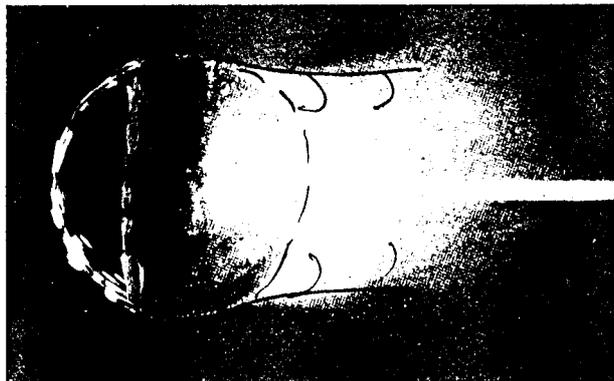


Abb. 4.18 Kugelströmung überkritisch nach Prandtl. Vorzeitiger Umschlag ist durch Drahtreif erzwungen

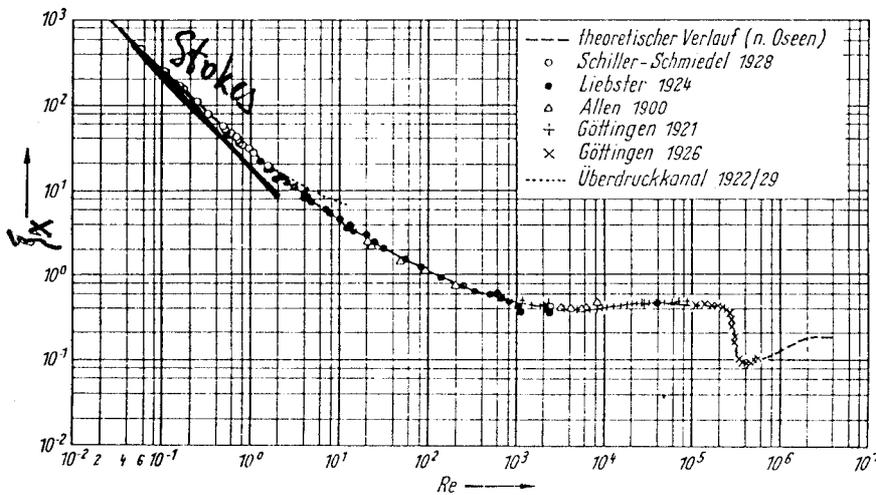


Abb. 4.19 Kugelwiderstandsbeiwert in Abhängigkeit von der Reynoldsschen Zahl, $Re = \frac{c_{\infty} d}{\nu}$. Gesamter durch Messungen erreichter Bereich der Reynoldsschen Zahlen (nach Muttray)

f_x kann Umströmung
nach Stokes:
 $f_x = 24/Re$

/

Unterschied in den Druckverteilungen beim aerodynamisch guten Fahrzeug und beim schlechten Fahrzeug mit weiten Ablösungspartien, der offensichtlich vorhanden ist, schädliche Folgen haben kann. Im letzteren Fall besteht die Möglichkeit, daß Abgase von hinten zurückströmen und so ins Wageninnere gelangen können¹. Dies kommt daher, daß bei den heutigen viel zu kantigen Formen nur am Wagenbug, an den Aufbauten sowie an der Windschutzscheibe Überdruck auftritt, während alle anderen Teile des Wagens und damit auch das Wageninnere unter Unterdruck stehen. Beim aerodynamisch guten Wagen ist das Druckminimum bedeutend geringer.

Abb. 283 zeigt anschaulich, was durch zweckentsprechende Formgebung erreicht werden kann.

Beeinflussung des Wagenwiderstandes durch gegenseitige Beeinflussung und Tunnelfahrten. Dicht hintereinander fahrende Fahrzeuge beeinflussen sich gegenseitig, indem eventuell der hintere Wagen im Nachlauf einen erheblich geringeren Widerstand erfährt. Genaue diesbezügliche Züricher Untersuchungen¹ haben ergeben, daß von einer fühlbaren Beeinflussung erst bei einer Annäherung von drei Wagenlängen gesprochen werden kann, indem bei etwa einer Wagenlänge Abstand bereits eine Widerstandsverringerung bis zu 50% eintreten kann. Diese gefährliche Nähe sollte indes davon abhalten, solche Fahrprofile zu suchen.

Auslaufverfahren zur Bestimmung des Widerstandes von Fahrzeugen

Durchweg wird der Widerstand von Fahrzeugen durch Modellversuche im Windkanal festgestellt. Bei diesen Versuchen ist es sehr schwer, den Bodeneinfluß zu berücksichtigen, da bei Nachahmung der richtigen Verhältnisse unter dem Modell ein mit der Windgeschwindigkeit sich bewegendes Band angeordnet werden müßte. Zudem ist die genaue Modellähnlichkeit, wenn auf alle Einzelheiten, z. B. Armaturen usw. der notwendige Wert gelegt wird, sehr schwer zu erreichen; in großen amerikanischen Windkanälen können allerdings schon Wagen mit voller Ausrüstung und Größe untersucht werden.

Unter Umständen muß bei Modellmessungen in Windkanälen mit Abweichungen bis zu 30% gerechnet werden. Beim *Auslaufverfahren*² fallen die vorerwähnten Schwierigkeiten weg. Bei Windstille bringt man den Wagen in der Ebene auf Höchstgeschwindigkeit und schaltet dann den Motor ab. Dann stellt man die Geschwindigkeit oder auch (z. B. durch Beobachtung der Kilometersteine) den Weg in Abhängigkeit von der Zeit fest. Durch einmaliges, bzw. zweimaliges Differenzieren ergibt sich dann mit großer Genauigkeit die jeweilige Beschleunigung, woraus dann der gesamte Widerstand leicht zu berechnen ist. Der bei der Geschwindigkeit Null entstehende Widerstand ist der Rollwiderstand, der nach bekannten Untersuchungen von der Geschwindigkeit in erster Näherung unabhängig ist. Er beträgt bei normalem Reifendruck ca. 0,01...0,02 des Wagen Gewichtes. Zieht man diesen Rollwiderstand vom Gesamtwiderstand ab, so ergibt sich der Luftwiderstand in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Bei quadratischem Widerstandsgesetz, eine Beziehung, die um so genauer stimmt, je schlechter der Wagen aerodynamisch ist, ist diese Kurve eine Parabel. Durch Gefällmessungen kann das Verfahren noch ergänzt werden.

Das Auslaufverfahren spielt auch bei der Widerstandsbestimmung von Schiffen und Luftschiffen eine Rolle.

Beispiel. Ein Wagen nach (Abb. 283/3) fährt mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h. Die Schattenfläche, hier meist mit „Spantfläche“ bezeichnet,

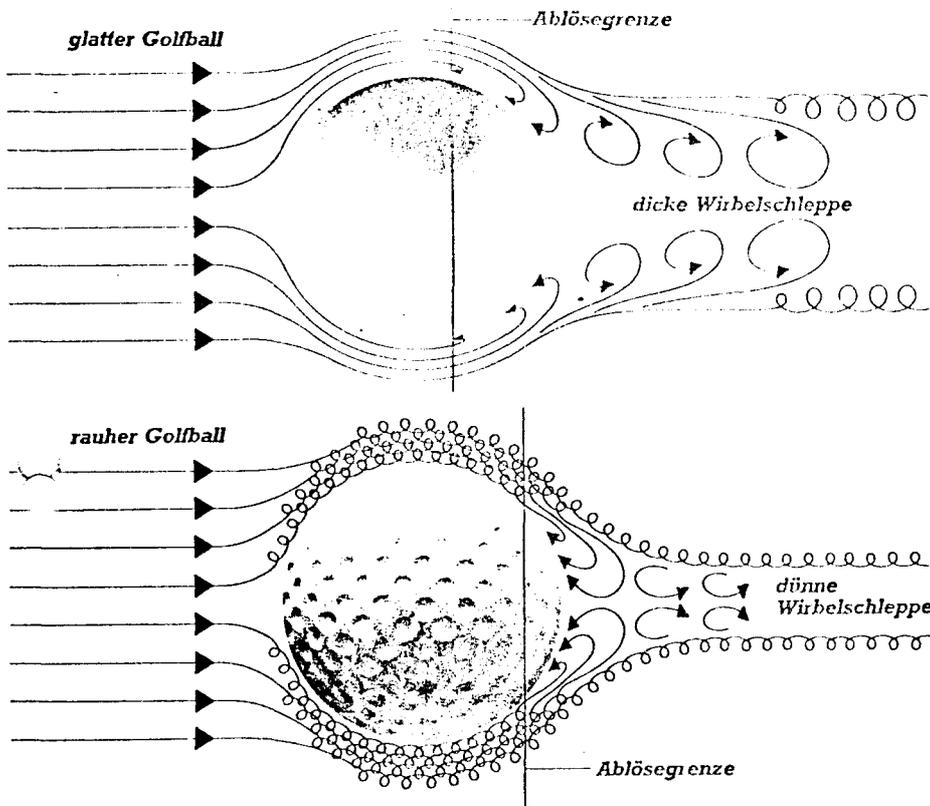
betrage 2 m². Es ist $f_x = 0,42$. Die Motorleistung in kW ist zu berechnen.

$$g \approx 9,8 \text{ kg/m}^3 \quad c_w = 100/3,6 = 27,8 \text{ m/s};$$

$$F_x = f_x \frac{\rho}{2} c_w^2 A = 0,42 \cdot 27,8^2 \frac{9,8}{2} \cdot 2 = 389,5 \text{ N}$$

$$P = F_x \cdot c_w = 389,5 \cdot 27,8 = 10828 \text{ W} \approx 10,8 \text{ kW}$$

Verblüffend: Glatte Golfbälle werden stärker abgebremst als rauhe



Glatter Golfball (ganz oben): Auf seiner Rückseite bilden sich starke Wirbel. Der dicke Wirbelzopf bremst so stark, daß der Ball schon nach 50 Meter zu Boden fällt. **Rauher Golfball mit vielen kleinen Dellen (darunter):** Die Wirbelschlepe ist viel dünner und erzeugt erheblich weniger Bremskraft. Im Bericht wird dieses verblüffende Phänomen erklärt.

glatte Ball. Erst nach einer Strecke von über 200 Metern berührt der Ball wieder den Rasen.

Was ist hier passiert? Beide Bälle wurden mit der gleichen Wucht geschlagen. Beide Bälle wiegen 46 Gramm und haben einen Durchmesser von 4,27 Zentimeter. Und doch weichen ihre Flugbahnen so stark voneinander ab. Des Rätsels Lösung: ihre unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit.

Es mag verblüffend sein, daß dieser kleine Unterschied die Flugeigenschaften so stark verändern kann. Immerhin ist der zweite Ball viermal so weit geflogen wie der erste. Aber etwas ganz anderes an dieser Sache scheint noch verblüffender, denn es widerspricht allen unseren bisherigen Erkenntnissen: Der rauhe Ball

hat die größere Strecke zurückgelegt und müßte demnach einen geringeren Luftwiderstand haben als der glatte.

Warum Autos und Flugzeuge glatt sein müssen

Wissenschaftler und Automobilkonstrukteure erklären immer wieder, daß glatte Formen viel besser durch die Luft gleiten und weniger Widerstand erzeugen. Neue Sportautos und Superrenner werden in Strömungskanälen getestet, um sie besonders windschlüpfrig zu machen. Alle Ecken und Kanten, alles, was Luftwirbel und damit Widerstand erzeugt, wird geglättet. Bei modernen Hochleistungsflugzeugen ist man erst zufrieden, wenn alle Oberflächen fast Spiegelglätte erreicht haben.

Werden all diese Erkenntnis nun von einem kleinen Golfball an den Kopf gestellt? Nein. Auch für diesen Golfball gelten die Gesetze der Aerodynamik. Nur ist hier neben seiner Oberfläche auch seine Kugelform von ganz entscheidender Bedeutung.

Verfolgen wir zunächst einmal den Flug des glatten Golfballs. Er wird von Luft umströmt. Direkt an seiner Oberfläche aber wird eine Schicht von Luftmolekülen durch die Reibung sehr stark abgebremst. Diese Schicht bleibt quasi am Ball »kleben«. Außen herum legen sich weitere dünne Luftschichten herum, wie die Schalen einer Zwiebel.

Was beim Golfball gilt, beim Fußball aber nicht

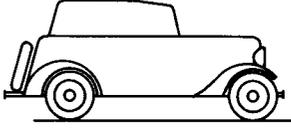
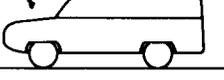
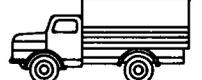
Dabei hat jeweils die äußere Schicht eine etwas höhere Geschwindigkeit als die nächstinnere. Diese anliegenden Luftschichten (der Aerodynamiker nennt sie »laminare Grenzschicht«) haben aber eine ganz besondere Eigenschaft: Wenn sie an einer glatten Oberfläche entlangfließen, rutschen sie übereinander weg, ohne sich gegenseitig zu stören. Trotz der verschiedenen Geschwindigkeiten entsteht nur ein geringer Reibungswiderstand.

Ganz anders bei einer rauhen Oberfläche: Die verschiedenen schnell strömenden Luftschichten werden verwirbelt und vermischen sich. Der Strömungswiderstand wird groß. Man spricht dann von einer »turbulenten Grenzschicht«.

Dieses Phänomen kann man täglich am Waschbecken beobachten, wenn ein Wasserstrahl aus dem Hahn auf den Boden des Waschbeckens trifft. Das Wasser zerteilt sich und schießt glatt und schnell nach außen weg, bis sich plötzlich Wirbel bilden, die wie ein kreisförmiger Wall aussehen.

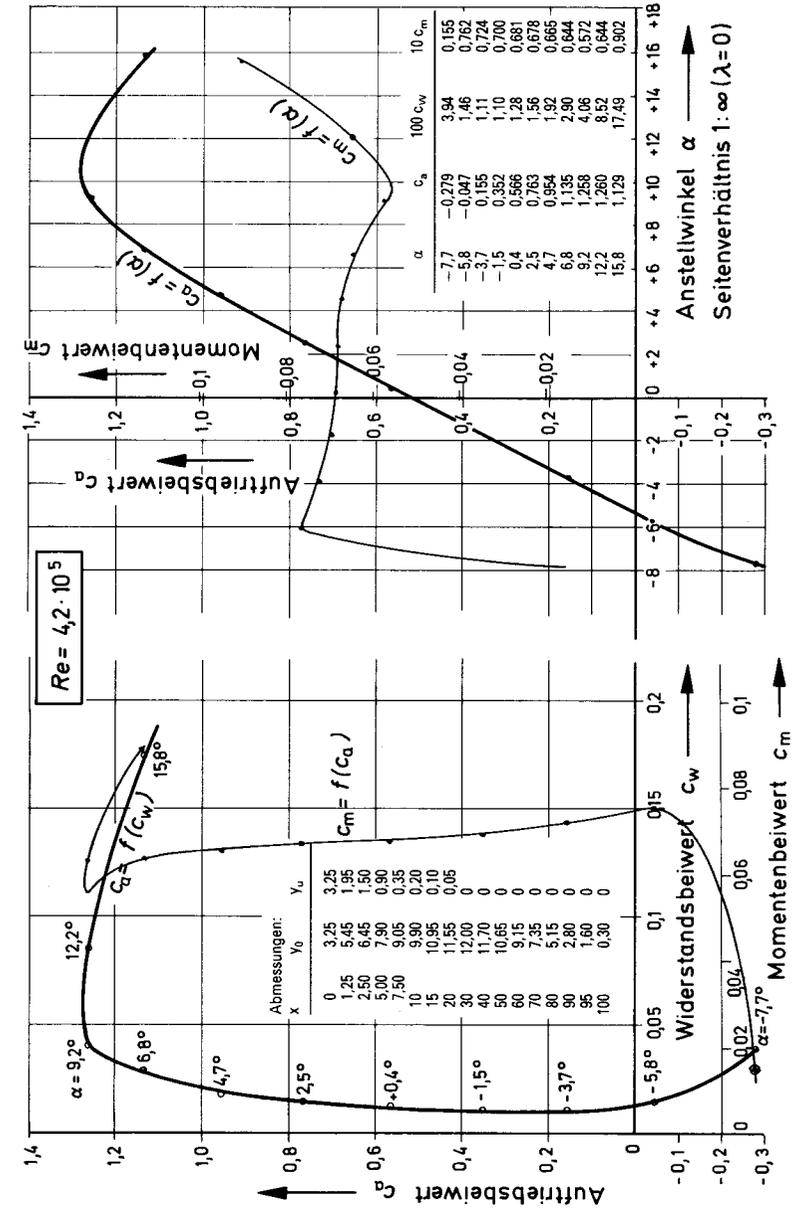
Doch zurück zum Golfball. Die Luftschicht schmiegt sich an der Vorderseite eng an und umströmt seine Kontur. Aber sobald sie die dickste Stelle überschritten hat, ändert sich das. Im Windschatten wollen plötzlich die Luftteilchen nicht mehr der Wadung folgen. Sie kehren um und strömen zurück. Denn dort, wo die Kugel am dicksten ist, erreicht die Luft die höchste Geschwindigkeit und den niedrigsten Druck. Daher die Saugwirkung. Die zurückgesaugte Luft schiebt sich wie ein Keil zwischen die Kugeloberfläche und die äußere schnelle Luftströmung und spaltet

Tafel 39 Widerstandsbeiwerte von Fahrzeugen

Fahrzeugart	Widerstandsbeiwert c_w
 Pkw ältere Form	0,48 bis 0,56
 Pkw Pontonform	0,38 bis 0,48
 Pkw Stromlinien- form	0,35 bis 0,45
 Kombiform	0,42 bis 0,45
 Bus	0,3 bis 0,7
 Lkw	0,7 bis 0,85
 Lkw mit Anhängen	0,9 bis 1,5
 Diesel- lokomotive	0,45 bis 0,6

offenes Kabriolett: $c_w = 0,6$ bis $0,7$
 Motorrad: $c_w = 0,6$ bis $0,7$

Tafel 40 Polaren des Tragflügels Gö 623



Aerodynamik

dynamik mit einer teuren und energieverzehrenden Klimaanlage bezahlt werden.

Außerdem sind die Sichtverhältnisse bei solchen Autos unter manchen Voraussetzungen eindeutig schlechter. Und die bewußte Verkleinerung des Aufbaus geht zwangsläufig auch zu Lasten des nutzbaren Raumes. Meist gestaltet sich auch der Einstieg weniger komfortabel.

Die Techniker beschäftigt heute nicht nur die Luftströmung an den sichtbaren Außenflächen des Autos. Als Zone größter Gewinnspannen gilt für die Zukunft der Wagenboden. Eine glatte Verkleidung kann hier eine Verbesserung um zehn Prozent bewirken.

Eine weitere verlustreiche Angelegenheit ist die Durchströmung des Motorraums mit Kühlluft. Die Tendenz geht hier zu immer kleineren Öffnungen, aber auch zu Kühlergrillformen, welche die Luftmenge bei zunehmender Geschwindigkeit begrenzen.

Die Durchströmung des Motorraums ist bei einigermaßen vorteilhaft gestalteten Autos am gesamten c_w -Wert mit einem Teil- c_w von 0,02 bis 0,03 beteiligt.

Aerodynamische Übeltäter, die durch einen unvorteilhaften Gesamt- c_w -Wert auffallen, schneiden auch auf diesem Gebiet meist schlecht ab. Honda Quintett $c_w = 0,54$, Kühler $c_w = 0,06$. Der BMW 316 mit $c_w = 0,47$ schon leicht hinter der Zeit, leistet sich ebenfalls einen Kühlwiderstand von $c_w = 0,06$.

Autos ohne eine im Windkanal meßbare Kühlerdurchströmung — VW Käfer ($c_w = 0,48$), Porsche 911 ($c_w = 0,38$ bis $0,41$) — schneiden insgesamt vorteilhafter ab, als dies von der äußeren Form her gegeben wäre.

Selbst die Lüftung des Innenraums bleibt nicht ohne Auswirkung auf den Luftwiderstand. Die Techniker haben auch hier die Aufgabe, verlustarme Systeme zu entwickeln. Das aber muß ihnen immer dann schwerfallen, wenn der Innenraum auf Grund aerodynamisch vorteilhafter Karosseriegestaltung stark zum Aufheizen neigt und ein erträgliches Betriebsklima nur durch Zufuhr großer Frisch-

luftmengen aufrechterhalten werden kann.

Die guten Ergebnisse aerodynamischer Entwicklungen in den dreißiger Jahren beruhen nicht zuletzt darauf, daß die Konstruktionen ausschließlich auf geringen Luftwiderstand gezüchtet waren. Auftrieb der Karosserie bei zunehmender Geschwindigkeit kümmerte die Techniker noch ziemlich wenig.

Der Unfall von Bernd R Meyer 1938 bei Rekordfahrten mit einem Auto U auf der Autobahn Frankfurt Darmstadt geht wahrscheinlich auf das Konto dieses hebeeffekts.

Beispiele beträchtlichen triebes sind aber auch aus gerer Zeit bekannt. Der Capri ursprünglicher Motor verringerte die Belastung der Vorderachse um den Faktor 0,34.

Die Entwicklung des Porsche 911 gibt ein Beispiel für Bewältigung des Auftriebs bei der frühen B-Serie: 83 kg vorn und 115 kg hinten bei 230 km/h gemessen. Im Laufe der Entwicklung zum Turbo konnte der Auftrieb vorn auf fünf kg hinten auf zehn kg ge werden.

Die Entwicklung im Motorsport hat die Null in Sachen Auftrieb längst überschritten. Moderne Rennwagen fahren mit deutlichem Abtrieb, der die Bodenhaftung verbessert. Serienwagen folgen dieser Entwicklung züchtigem Abstand. Auftriebwerte nahe Null sind Seltenheit mehr, und in engen Fällen ist auch schon der Abtrieb zu verzeichnen.

Guter Bodenhaftung kommt ohnehin immer größere Bedeutung zu, je weit der Luftwiderstand des Autos sinkt. Schon 1922 stellt Aerodynamiker W. Klenz fest, daß strömungsgünstige Formen seitenwindempfindlich sind. Er schrieb wie folgt: „Der Körper des Fahrers wirkt dann wie ein Segel hart am Winde fahrenden Schiffes.“

Diese Gesetzmäßigkeit auch heute noch. U ist einer der Gründe dafür, daß die großen Fortschritte der Aerodynamik nicht heute auf morgen kommen. Das Auto würde sonst zu einer windigen Sache werden.

So errechnet sich der Luftwiderstand

Die Formel für die Luftwiderstandskraft lautet:

$$F_w = 0,5 \cdot c_w \cdot A \cdot \rho \cdot v^2$$

Der Luftwiderstand nimmt also mit dem Quadrat der Geschwindigkeit zu.

Die Formel für die Luftwiderstandsleistung lautet:

$$P_L = 0,5 \cdot c_w \cdot A \cdot \rho \cdot v^3$$

Luftwiderstandsleistungen wachsen mit der dritten Geschwindigkeitspotenz.

F_w = Luftwiderstandskraft

P_L = Luftwiderstandsleistung

c_w = Luftwiderstandsbeiwert

A = Stirnfläche

ρ = Luftdichte

v = Geschwindigkeit

Einfache Körper im Vergleich

Körper	Anströmung	c_w
Kreisplatte		1,17
Kugel		0,47
Halbkugel		0,42
60° -Kegel		0,50
Würfel		1,05
Würfel		0,80
Kreiszylinder $L/D = 2$		0,82
Kreiszylinder $L/D = 1$		1,15
Stromlinienkörper $L/D = 2,5$		0,04
Halbkreisplatte am Boden		1,19
Halber Stromlinienkörper am Boden ($L/D = 2,5$)		0,09



Widerstand von Fahrzeugen

Bei den ständig steigenden Geschwindigkeiten der Fahrzeuge spielt der Luftwiderstand eine immer größere Rolle. Bis zu Geschwindigkeiten von rd. 70 km/h ist der Anteil des Luftwiderstandes im Verhältnis zu den anderen Widerständen gering. Bei Geschwindigkeiten über 100 km/h ist der Einfluß so groß, daß die Formgebung dieser Wagen durch die Forderung nach kleinstem Luftwiderstand entscheidend beeinflußt wird. Der Leistungsaufwand wächst mit der dritten Potenz der Geschwindigkeit, während der Widerstand mit dem Quadrat der Geschwindigkeit steigt.

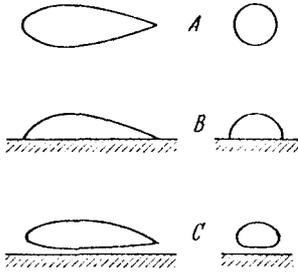


Abb. 282. Bestform von Stromlinienkörpern in Bodennähe.

$$L = W w; \quad W = c_w \frac{\rho}{2g} w^2 F. \quad (155)$$

F ist die sog. „Spantfläche“ des Wagens, worunter man das projizierte Umrißprofil des Wagens in Fahrtrichtung versteht.

Der Widerstand des Fahrzeuges hängt von verschiedenen Größen ab, nämlich a) gut abgerundeten Übergängen mit längerem Auslauf nach hinten, b) dem Schlankheitsgrad des Fahrzeuges, c) der Oberflächenrauigkeit, d) dem Kühlsystem. Der Widerstand selbst besteht aus a) Formwiderstand, b) Oberflächenwiderstand, c) induziertem Widerstand, den einzelne Teile in der Nähe anderer Teile erfahren, d) innerem Widerstand für die Kühlung und die Lüftung.

Die Formgebung ist zunächst in Bodennähe anders als in der freien Strömung. Abb. 282 zeigt für drei typische Lagen die Bestformen. Die Unterschiede, die sich bei den verschiedenen Bauarten ergeben, sind in Abb. 283 zusammengestellt¹. Für die heute sehr oft verwendete Pontonform (283₃) ergibt sich folgende Aufteilung der Einzelwiderstände.

Kühlluftwiderstand	0,053
Einfluß von zerklüfteter Unterseite, Leisten, Fenstern	0,064
Oberflächenwiderstand	0,04
induzierter Widerstand	0,031
Formwiderstand	0,262
$c_w =$	0,45

¹ BARTH, R.: Einfluß der Form und der Umströmung von Kraftfahrzeugen auf Widerstand, Bodenhaftigkeit und Fahrtrichtungshaltung. Z. VDI, 1956, S. 1265.

Beim Anblick der heutigen Fahrzeuge kann man sich des Eindrucks nicht erwehren, daß den aerodynamischen Gesichtspunkten nicht immer die gebührende Beachtung geschenkt wird. Die Belastung des Straßennetzes in Europa ist tatsächlich so groß, daß die Spitzengeschwindigkeiten der großen Fahrzeuge nur selten längere Zeit gehalten werden können. So mag es kommen, daß bei der Gestaltung andere Gesichtspunkte oft überwiegen. Nun wurde allerdings festgestellt, daß der

1	Scheibe in Bodennähe $c_w = 1,27$
2	Offener Wagen $c_w = 0,9$
3	Pontonform $c_w = 0,42$
4	Fahrzeuge mit abfallendem windschlüpfigem Heck $c_w = 0,231$
5	Renn- und Sportfahrzeuge $c_w = 0,28$
6	Kastenform $c_w = 0,52$
7	Zweckform $c_w = 0,63$
8	BMW Motorrad $c_w = 0,67$ (mit Fahrer ist der Widerstand 2,7mal größer)
9	Lastwagen $c_w = 0,75$ bis $0,87$

Abb. 283.

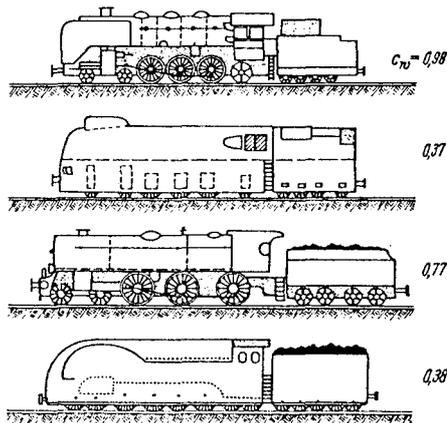


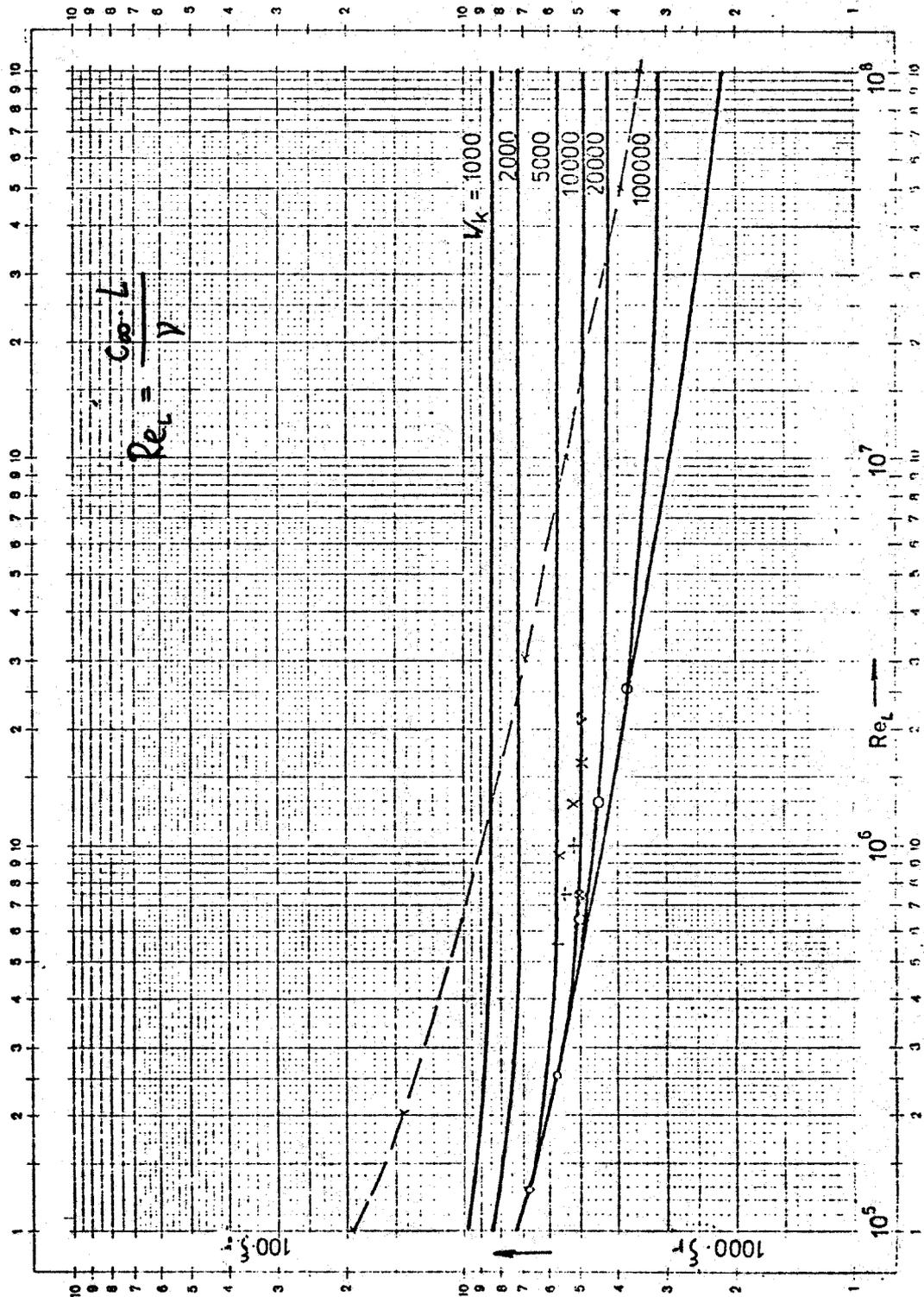
Abb. 284. Widerstandsziffern verschiedener Lokomotivformen.

Körperform	c_w
Halbkugel	0,34
	0,4
Halbkugel	1,33
	1,17
Kreisplatte	1,11

Abb. 4.24 Widerstandsziffern für kennzahlunempfindliche Körperformen

Raube Platten

analog wie bei den Rohrleitungen wurden die Kurven $l/k = konst.$ gezeichnet



Widerstandsbeiwert- ζ_r der technisch rauhen Platten