

## Strömungswiderstand und Wirbelbildung

Aus der Art und Weise, wie wir den Luftwiderstand bisher diskutiert haben, könnte man schließen, dass man den Luftwiderstand recht einfach berechnen kann. Der Luftwiderstand ist jedoch ein Phänomen, das mit Strömungen zu tun hat. Und Strömungsphänomene sind nur selten einfach. In diesem Abschnitt wollen wir ein bisschen tiefer in die Physik der Strömungen einsteigen.

Bisher haben wir nur vom Luftwiderstand geredet. Selbstverständlich erfährt aber ein Fisch im Wasser ebenso einen Widerstand wie ein Löffel, den man durch Honig zieht. Allgemein spricht man in diesen Fällen vom **Strömungswiderstand**.

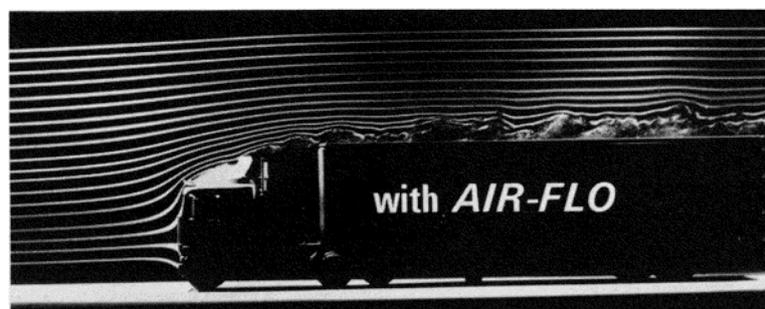
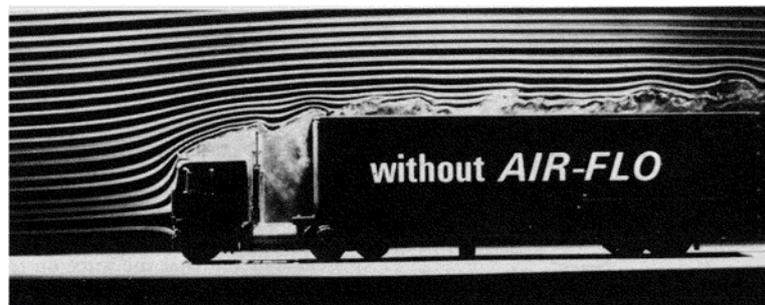
Bewegt sich ein Körper in einem flüssigen oder gasförmigen Medium, dann erfährt er entgegen der Bewegungsrichtung eine Kraft, die man als Strömungswiderstand(skraft) bezeichnet.

Um ein besseres Gefühl für Strömungen und Strömungswiderstände zu bekommen, wollen wir uns einige Strömungsbilder genauer ansehen.

Wenn eine Strömung im Stromlinienbild glatte Stromlinien zeigt, spricht man von **laminarer** Strömung. Sind die Stromlinien unruhig oder verwirbelt, spricht man von **turbulenter** Strömung.

### Deflektoren

Die nachfolgenden Bilder zeigen Strömungsbilder eines LKW mit und ohne sogenannten Deflektor. Ein Deflektor ist eine Platte, die über dem Führerhäuschen eines LKW angebracht ist und den Fahrwind umlenkt.

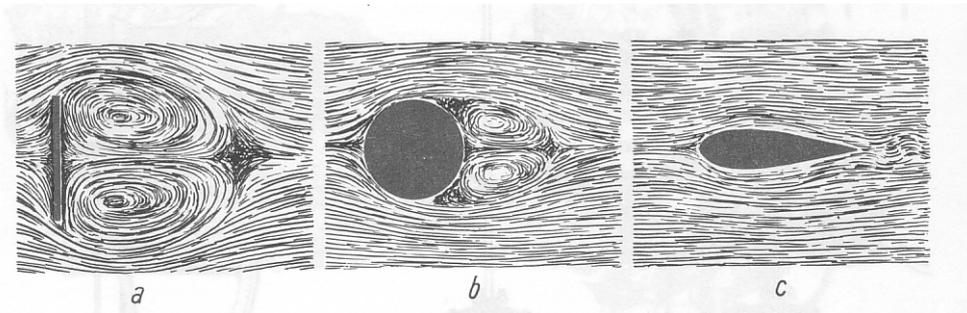


Die Strömungsbilder zeigen, dass beim LKW ohne Deflektor ein großer Bereich einer stark verwirbelten Strömung entsteht, der von der restlichen laminaren Strömung abgekoppelt ist. Ein solcher Bereich heißt **Totwassergebiet**. Bereiche stark verwirbelter Luft ziehen viel Energie ab und sind deshalb ein Hinweis auf die Größe des Strömungswiderstandes. Beim LKW mit Deflektor sind im gleichen Bereich keine Verwirbelungen mehr vorhanden. Hier ist

der Luftwiderstand entsprechend geringer. Unmittelbar über dem Laderaum sieht man in beiden Fällen turbulente Strömungsbereiche.

### **Strömungsbilder von typischen Strömungsprofilen**

Die nachfolgenden Bilder zeigen das Strömungsverhalten hinter einer Platte, einem Zylinder und einem tropfenförmigen Profil. Man erkennt auch hier unterschiedlich ausgeprägte Bereiche, in denen Wirbel auftreten. Die Größe der Wirbelgebiete entspricht der Größe des  $c_w$ -Wertes der verschiedenen Körper.



Du kannst diese Strömungsbilder in folgenden Versuchen auch selbst beobachten.

#### Versuch a): Beobachtung der Wirbelbildung hinter Strömungskörpern in Wasser

Du brauchst dazu:

- eine längliche flache Wanne
- Sägemehl
- Strömungskörper wie in der obigen Abbildung

Füll die Wanne mit Wasser. Die Füllhöhe muss geringer sein als die Strömungskörper hoch sind. Streu Sägemehl auf die Wasseroberfläche und zieh die Körper durch das Wasser. Vergleiche deine Beobachtung mit den obigen Abbildungen.

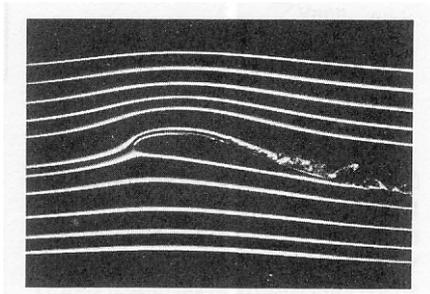
#### Versuch b): Beobachtung der Wirbelbildung hinter Strömungskörpern in Luft

Du brauchst dazu:

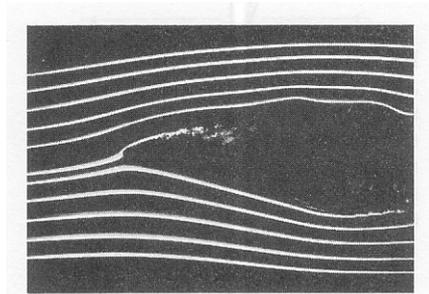
- einen Fön
- eine Kerze
- Strömungskörper (z.B. Kaffeedose, Brett, Kugel, ...)

Blas die Strömungskörper mit dem Fön an und erkunde den Bereich hinter den Körpern mit einer brennenden Kerze.

## Strömungsabriss bei Tragflügelprofilen



Umströmung bei flachem Anstellwinkel



Strömungsabriss wegen zu großem Anstellwinkel

Die Bilder zeigen Realaufnahmen von der Umströmung einer Tragfläche bei unterschiedlich großem Anstellwinkel (d.h. die Tragfläche ist gegenüber der Strömung unterschiedlich stark geneigt). Im ersten Fall erkennt man nur einen kleinen Bereich turbulenter Strömung im hinteren Bereich der Tragflächenoberseite. Dies entspricht etwa den Verhältnissen im Flug. Beim zweiten Bild ist ein sehr großes Totwassergebiet zu erkennen. In diesem Fall würde der Tragflügel einen sehr großen Strömungswiderstand erfahren und abstürzen. Man spricht in diesem Fall auch von einem Strömungsabriss. Piloten fürchten solche Verhältnisse sehr, da sie schlagartig eintreten und kaum zu korrigieren sind.

Zusammenfassend kann man sagen:

Der Strömungswiderstand eines Körpers ist umso größer, je größer der Bereich verwirbelter Strömung ist.

## Warum hat der Golfball Dellen? - Die Grenzschicht

Ob eine Strömung am Körper anliegt oder große von Wirbeln durchsetzte Bereiche sich ausbilden, wird wesentlich durch die Form des Körpers bestimmt. Aber auch die Beschaffenheit der Oberfläche spielt dabei eine entscheidende Rolle. (Dies ist der Grund, warum z.B. Schwimmsportler immer neue Schwimmanzüge ausprobieren um ihre Zeiten weiter zu verbessern.)

Man könnte meinen, eine möglichst glatte Oberfläche wäre optimal für einen geringen Luftwiderstand. Dies ist in vielen Fällen auch richtig. Nicht richtig ist dieser Zusammenhang aber z.B. für Golfbälle. Natürlich müssen Golfbälle einen möglichst kleinen Luftwiderstand haben, um möglichst weit fliegen zu können. Golfbälle erreichen diesen geringen Luftwiderstand aber keineswegs durch eine glatte Oberfläche, sondern durch kleine Dellen, die über die gesamte Oberfläche verteilt sind.



Das Geheimnis der Dellen im Golfball ist, dass sie eine kleine Schicht in unmittelbarer Umgebung der Golfballoberfläche beeinflussen. Man nennt diese Schicht auch **Grenzschicht**. Bei der hohen Geschwindigkeit des Golfballs sorgen die Dellen dafür, dass sich in der Grenzschicht viele kleine Wirbel ausbilden. Man spricht in diesem Fall auch von einer **turbulenten Grenzschicht**. Eine solche turbulente Grenzschicht hat den Vorteil, dass die restliche Luft von der Grenzschicht kaum beeinflusst wird. Die restliche Luft strömt an der turbulenten Grenzschicht ungestört vorbei, und zwar noch ungestörter, als an einem wirklich glatten Golfball.

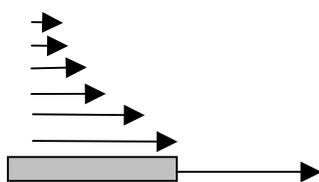
Wie kann man das verstehen? Wodurch kann eine glatte Oberfläche überhaupt die Umströmung beeinflussen?

### Die laminare Grenzschicht am Beispiel von Honig

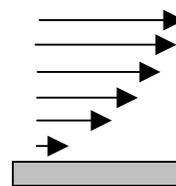
Im Prinzip verhält sich eine glatte Oberfläche in Luft ganz ähnlich wie ein Messer, das man durch Honig zieht. Unmittelbar am Messer bleibt der Honig kleben und wird mit dem Messer mitgezogen. In einiger Entfernung vom Messer dagegen wird der Honig von der Bewegung des Messers gar nicht beeinflusst. Dazwischen wird der Honig unterschiedlich stark mitgezogen, je nachdem, wie groß die Entfernung zum Messer ist. Die Honigschicht, die bei der Bewegung des Messers mitgeschleppt wird, entspricht der Grenzschicht.

Betrachten wir den Fall aus der Perspektive, dass das Messer ruht und der Honig um das Messer herumströmt, müsste die Beschreibung folgendermaßen lauten: Direkt am Messer hat der Honig die Geschwindigkeit null. In weiter entfernten Honigschichten nimmt die Geschwindigkeit langsam zu. In größerer Entfernung ist der Einfluss des Messers auf die Strömungsgeschwindigkeit vernachlässigbar. Hier endet die Grenzschicht.

Die nachfolgende Skizze zeigt, wie das Geschwindigkeitsprofil in der Grenzschicht für eine glatte Oberfläche aussieht, die sich mit der Geschwindigkeit  $v$  durch ein Medium (Honig, Luft, Wasser) bewegt, bzw. von dem Medium mit der Geschwindigkeit  $v$  angeströmt wird.



bewegter Körper in ruhendem Medium



ruhender Körper in strömendem Medium

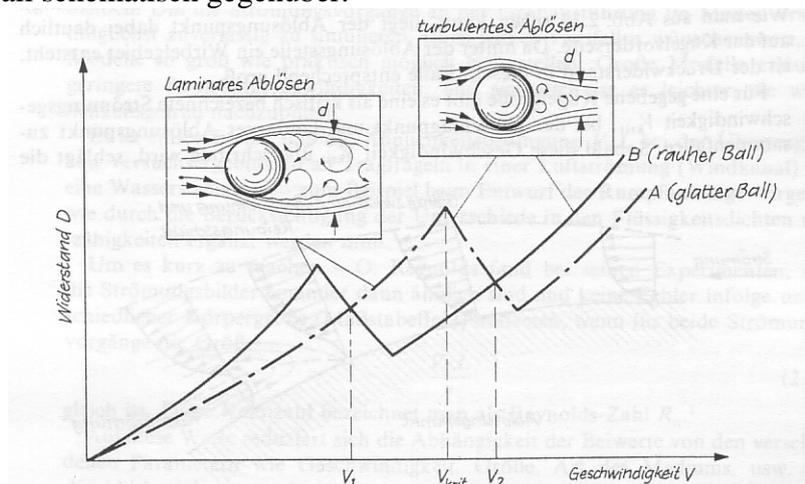
Es gibt es keine echte Grenze, wo die Grenzschicht aufhört. Man definiert deshalb als Höhe der Grenzschicht z.B. die Stelle, wo der Einfluss der Reibung auf die Strömungsgeschwindigkeit nur noch 1% beträgt.

### Zurück zu den Dellen im Golfball

Die geschilderten Effekte treten auch auf, wenn z.B. ein glatter Ball durch die Luft fliegt. Aufgrund der Reibung zwischen der Luft und der Balloberfläche haftet ein hauchdünne Luftschicht an der Oberfläche. (Deshalb bleiben z.B. Staubkörner auch bei hoher Geschwindigkeit am Auto kleben.) In einer etwas darüber liegenden Luftschicht nimmt der Einfluss der Reibung immer mehr ab. Erst in einiger Entfernung vom Ball kann man den Einfluss der Reibung vernachlässigen. Hier endet die Grenzschicht.

Beim Golfball sorgen die Dellen dafür, dass sich in der Grenzschicht viele kleine Wirbel ausbilden. Eine solche turbulente Grenzschicht beeinflusst die restlichen Strömung viel weniger, als eine laminare Grenzschicht, wie sie eben beschrieben wurde. Ob die Strömung in der Grenzschicht laminar oder turbulent ist, hängt auch davon ab, wie groß die Strömungsgeschwindigkeit ist. Bei sehr hoher Geschwindigkeit kann auch bei einer glatten Oberfläche die Grenzschicht turbulent werden. Dies führt dazu, dass die Strömung sich wieder stärker an den Körper anschmiegt und der Strömungswiderstand abnimmt.

Die nachfolgende Grafik stellt noch einmal das Widerstandsverhalten für einen rauen und einen glatten Ball schematisch gegenüber.



- Wie ist in beiden Kurven der Anstieg, der Abfall und der Wiederaufstieg des Widerstands zu erklären?
- Warum erfolgt beim rauen Ball der Abfall des Widerstands bei geringerer Geschwindigkeit?
- In welchem Geschwindigkeitsbereich ist ein glatter Ball günstiger als ein rauer Ball?
- Warum hat bei kleinen Geschwindigkeiten der rauer Ball einen höheren Strömungswiderstand?

# Anwendungen in Natur und Technik

## Strömungsgünstige Formen und Oberflächen in der Natur

Für die energiearme Fortbewegung in Luft und Wasser geben die Tiere den Technikern ein exzellentes Vorbild. Eine ökonomische Fortbewegung wird einerseits durch die Körperform und andererseits durch die Oberflächenbeschaffenheit bestimmt. Beide Faktoren müssen vor allem dafür sorgen, dass die Strömung überall anliegt und nach Möglichkeit nicht abreißt. Der Körperform kommt dabei die Hauptaufgabe zu. Die Oberflächenbeschaffenheit kann dann zu weiterer Reibungsverminderung beitragen.

### Körperform

Heinrich Hertel, einer der Pioniere der Bionik, hat nach eingehenden Untersuchung der Körperformen von Forellen, Thunfischen, Delphinen, und Blauwalen bereits in den 60er Jahren vorgeschlagen, die sogenannte Spindelform der Fische auch im Flugzeugbau anzuwenden. Technisch-wirtschaftliche Gründe bei der Herstellung aber auch generelle Zweifel an der Praxistauglichkeit dieser Rumpfform haben es bisher verhindert, dass solche Modelle wirklich gebaut wurden.



Auch neuere Untersuchungen haben die außerordentlich günstige Spindelform - diesmal am Beispiel der Pinguine - bestätigt. Die  $c_w$ -Werte von nachgebildeten Formen liegen bei 0,02 und sind damit mehr als 10 mal besser als die von PKWs, die mit einem  $c_w$ -Wert von 0,3 bereits als strömungsgünstig gelten. Dabei ist der Einfluss der strömungsgünstigen Oberfläche des Gefieders noch nicht mitberechnet.

Das Geheimnis der Spindelform liegt in der gleichmäßigen Abstufung von Strömungsbeschleunigung und Verzögerung am Anfang und Ende des Körpers.

### Oberfläche

Bei der Oberflächenbeschaffenheit sind in der Natur vier Mechanismen bekannt, die den Strömungswiderstand minimieren.

#### a) Schleimabsonderung

Einige Raubfischarten sind in der Lage, eine schleimige Substanz auszusondern, die es ihnen erlaubt, bei Angriff oder Flucht ihren Reibungswiderstand kurzfristig um bis zu 80% zu verringern.

#### b) Dämpfungshaut

Delphine haben eine spezielle Hautstruktur, die dafür sorgt, dass die Strömung in der Grenzschicht um den Körper über einen weiten Bereich laminar bleibt. Technisch wird dies nachgeahmt in einer sogenannten Gummi-Doppelhaut, die man bei U-Booten verwendet.

#### c) Behaarung

Die Behaarung von Meeressäugtieren kann ebenfalls der Widerstandsverminderung dienen.

#### d) Schuppenstruktur

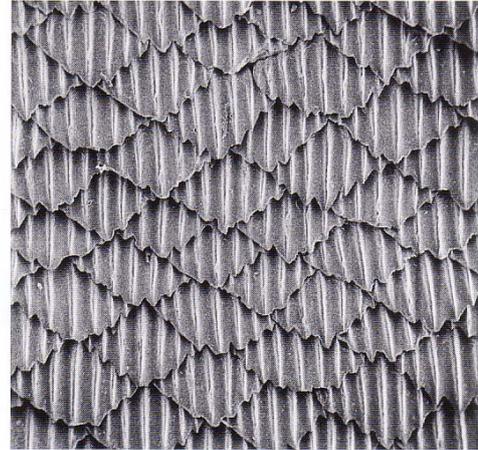
Beispiel für die Schuppenstruktur ist der Hai. Diese Technik wurde erst Ende der 70er Jahre in USA und Deutschland entdeckt.

Die Oberfläche des Hais ist mit kleinen Schuppen von 0,15 bis 0,5 mm Größe bedeckt, die in Strömungsrichtung gewellt sind (siehe Abbildung).

Die Rippen sorgen dafür, dass verwirbelte Strömung in der Nähe der Körperoberfläche durch die Rippen entlang der Strömungsrichtung geführt wird, wodurch sich die Reibung vermindert. Mit der technischen Umsetzung dieses Prinzips konnten bisher Reibungsreduzierungen von ca. 10% erreicht werden.

Auch bei Flugzeugen wurde dieses Prinzip bereits getestet. Anfang der 90er Jahre wurde ein Airbus probeweise mit einer solchen Oberfläche ausgestattet. Die Reibungsverminderung betrug hier 6%. Eine

Reibungsverminderung bei Flugzeugen würde zu erheblichen Treibstoffeinsparungen führen, so dass entsprechende Weiterentwicklungen in naher Zukunft zu erwarten sind.



(nach: Ausstellungskatalog zur Bionik-Ausstellung „Zukunfts-Technik lernt von der Natur“)

## Jetzt schwimmen die Haie - Speedo stellt neuen "Wunder-Anzug" vor



Athen (schwimmwelt-news)17.3. Fastskin – ist das in Zukunft das Maß aller Dinge wenn es um Wettkampfbekleidung im Schwimmen geht?



Marcel Wouda im neuen Fastskin

Während der Kurzbahn-Weltmeisterschaften stellte die Firma Speedo den "Nachfolger" ihres Aquablade vor. Der Aquablade galt bisher als das "schnellste Schwimm-Material der Welt". Er wurde immerhin von 77% der Medaillengewinner bei den Olympischen Spielen 1996 in Atlanta getragen. Joe Fields, Geschäftsführer von Speedo International und sein Team präsentierten der eingeladenen "Schwimm-Community" eindrucksvoll, wie sie sich die Zukunft der Schwimmbekleidung vorstellen: schwarz und futuristisch.

FINA-Offizielle, nationale Teams und die Schwimm-Presse wurden über die Detail der Entwicklung und den wissenschaftlichen Background informiert. Danach haben Tests ergeben, dass Fastskin Ganzkörperanzüge 7,5% schneller sind, wenn man den passiven Widerstand bei einer Wassergeschwindigkeit von 2m/s zugrunde legt. Das bedeutet konkret, dass messbare Verbesserungen der Schwimmleistung alleine durch den Anzug begründet sind. Und auch wenn "in einen schnellen Anzug immer ein schneller Schwimmer gehört" wie Gennadi Touretski, der Trainer von Michael Klim und Alexander Popov anmerkte, so bedeutet dies doch eine Revolution im Schwimmsport. Grund für die Eigenschaften des Fastskin-Anzuges sind einmal die Materialbeschaffenheit, eine biomimetische Haifischhaut.



Lenny Krazelburg mit neuen Fastskin



Lenny mit Joe Fields (L.), dem Geschäftsführer von Speedo International

Sie bewirkt, dass das umgebende Wasser schneller um den Körper fließt, weil der Oberflächenwiderstand minimiert worden ist. Weiterer Grund ist die optimale Anpassung des Anzuges. Durch ein dreidimensionales Scanverfahren wird der Athlet ganz genau vermessen. Dies wird in verschiedenen schwimmrelevanten Positionen gemacht, so dass der Anzug sozusagen dynamisch designt werden kann. Auch ein weiteres Problem der Ganzkörperanzüge ist gelöst worden: An der Innenseite der Unterarme befindet sich ein sogenanntes "Grpper-Gewebe", das den Schwimmern die nötige sensorische Wahrnehmung ermöglicht.

"Der Anzug wird in verschiedenen Modellen auf den Markt kommen und zwar sowohl in einem Männer-, wie auch in einem Frauen-Schnitt. Der Preis wird um die 600 DM liegen" so Wolf Strobel, Geschäftsführer von Speedo Deutschland.

Der Anzug wurde durchaus unterschiedlich aufgenommen. Einige befürchten, dass eine Zwei-Klassen-Gesellschaft im Schwimmsport entsteht, andere sehen in dem Anzug sogar ein nicht regelgerechtes Hilfsmittel. Mit einer Pressemitteilung am gleichen Tag hat die FINA klargestellt, dass der Anzug keinen Regelverstoß darstellt und dass es allen Nationen freisteht ihre Athleten mit dem Anzug auszurüsten. Ab April wird der Anzug zur Verfügung stehen und auch die Deutsche Mannschaft wird ihn testen. "Ich finde das erst einmal interessant, aber was der Anzug bringt muss man wirklich ausprobieren" sagte Mark Warnecke nach dem Studium der Unterlagen.

## ***Dank Folie viel Kerosin sparen***

**Wissenschaftler haben eine der Haifischhaut nachgebildete Folie entwickelt, die den Luftwiderstand von Flugzeugen massiv senkt.**

Von Bernhard Matuschak

Dass der Haifisch ein effizienter Raubfisch ist, verdankt er vor allem seiner Schnelligkeit. Dazu befähigt ihn nicht nur die Muskelkraft, sondern auch seine Schuppenhaut: Winzige, in Strömungsrichtung ausgerichtete Rippen verringern den Reibungswiderstand im Vergleich zu glatter Haut beträchtlich.

Versuche im Windkanal zeigten, dass sich die Eigenschaften der Haifischhaut auch dazu eignen, Turbulenzen bei der Fortbewegung in der Luft zu mindern. Die dort auftretende Wandreibung macht 30 bis 50 Prozent des gesamten Luftwiderstandes aus. Seither arbeiten Wissenschaftler an einer Flugzeugbeschichtung, die hinsichtlich ihrer Struktur haifischähnliche Merkmale aufweist.

### Erstaunliches Testergebnis

Amerikanische Forscher entwickelten eine Kunststoff-Folie, die den Luftwiderstand bei Flugzeugen um fünf Prozent verringern kann. Schätzungen zufolge liesse sich damit der Treibstoffverbrauch pro Jahr und Flugzeug um 60 bis 200 Tonnen Kerosin vermindern. Erst vor kurzem wurde die künstliche Haifischhaut auf einem Langstrecken-Linienflugzeug vom Typ Airbus A340 der Cathay Pacific Airways getestet. Das Ergebnis war noch besser als die Fachleute angenommen hatten.

Wissenschaftlern der Technischen Universität Berlin und der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR) ist nun eine erhebliche Verbesserung der Folientechnik gelungen. Anstatt dreieckiger Rillen wie im amerikanischen Modell wählten die Berliner eine Trapezform, welche die Wandreibung weiter reduziert und sicherheitstechnische Vorteile bringt.

### Weniger Treibstoff - mehr Personen

Die dreieckigen Rippen, die die Amerikaner verwenden, haben nämlich eine Prismenwirkung. Das durchscheinende Licht wird gebrochen, so dass es nicht möglich ist, durch die beklebten Flächen auf die Metallhaut des Flugzeuges zu sehen. "Bei unserer Trapezfolie hingegen können selbst feine Risse auf dem Rumpf entdeckt werden", sagt Projektleiter Dietrich Wolfgang Bechert von der DLR. Der Wissenschaftler schätzt, dass der Kerosinverbrauch pro Passagierkilometer um acht Prozent reduziert werden kann. "Am Beispiel eines Airbus A340 haben wir berechnet, dass durch die eingesparte Treibstoffmenge ausserdem 15 Personen mehr befördert werden können."

Dank der neuen Oberflächenstruktur stellte sich zudem ein unerwarteter Effekt ein. Die Trapezrillen haben im Gegensatz zu den dreieckigen Rippen den Vorteil, dass sie weniger schnell verdrecken. Wassertropfen perlen von der Folie ab wie von einer Wachsschicht. "Wir nennen das den Lotuseffekt. Die Lotusblume wächst im grössten Dreck und bleibt wegen der Beschichtung ihrer Blütenblätter dennoch sauber", erklärt Bechert. Die Folie lasse sich so gemeinsam mit der Lackierung ersetzen, die alle vier Jahre erneuert werde. Die neue Beschichtung soll zur Jahrtausendwende serienmässig zum Einsatz kommen, schätzen die deutschen Forscher.

Quelle: Tages-Anzeiger, Zürich, 5.11.97

## Der Ball ist rund,oder?

Eigentlich ist eine solche Frage eine Platitude, bei der (vermeintliche) Experten mit dem Kopf schütteln, wie "dumm" sie eigentlich ist; eine Kinderfrage eben. Aber gerade die dummen und simplen Fragen treiben - wenn man es im Nachhinein betrachtet - die Erkenntnis voran. Also einmal ernsthaft, mit physikalisch-technischem Sachverstand gefragt: Warum ist der Fußball eigentlich so, wie er ist? Was sind die Gründe für seine Form, Größe, Gewicht, sein Aussehen? Alles Zufall?

*"Form follows function"* - so heißt es: Die Funktion, der Zweck bestimmt die Form, das Aussehen.

Das Erste, was erfüllt sein muss, ist sicher das Rollen-Können. Das "Spielgerät" soll einfach und sicher nach einem Antreten mit dem Fuß rollen können, über den Rasen, möglichst weit, und möglichst gut kontrollierbar. Nun gibt es genügend Körperformen aus der Geometrie,

die alle rollen können (denken Sie an den Kubus, mit dem man würfelt), aber eben nicht unterschiedlich gut. Klar ist: Je mehr Ecken ein solcher Körper hat und je "runder" (also kugelförmiger er ist), um so leichter wird er rollen können. In der Lehre der Bewegung, der klassischen Mechanik, lassen sich solche Forderungen dadurch ausdrücken, dass der gesuchte Körper seine Masse - und damit seine Trägheit - möglichst kugelförmig verteilt haben müsste. Körper wie ein Oktaeder (also zusammengesetzt aus acht Dreiecken) oder der Würfel (zusammengesetzt aus sechs Quadraten) oder das Ikosaeder, das Dodekaeder usw., haben alle solche Eigenschaften. Aber die Zahl der Ecken bei solchen Körpern lässt sie beim Auftreffen auf den Boden unkontrolliert hüpfen. Je weiter diese Ecken voneinander entfernt sind, umso mehr wird der Körper hüpfen. Und umgekehrt: Je mehr Ecken der Körper hat, umso näher sind alle beieinander gelegen, und umso weniger wird der Körper hüpfen. Eine Kugel, bei der es (bildlich gesprochen) unendlich viele Ecken gibt, die unendlich dicht nebeneinander liegen, bei dieser Kugel zeigt sich solch unkontrolliertes Hüpfen am wenigsten. Also sollte der Körper tatsächlich eine Kugel sein. Zu schwer (als dass die Sehnen und Muskeln die Trägheit nicht mehr in Bewegung setzen können) und zu groß oder zu klein (größer oder kleiner als ein Fußrist) sollte er auch nicht sein. Beim leidigen "Fußballknie" sieht man die orthopädischen Folgen bei falschem Treten des Balles. Bänderriss oder Meniskusschaden passieren dem Spieler immer dann, wenn sich der Unterschenkel des Spielers so ruckartig drehen muss, dass der Oberschenkel dieser Bewegung nicht mehr folgen kann. Im richtigen Moment, dem Abschuss, müssen sich also gut koordiniert, möglichst viele Muskelfasern gleichzeitig kontrahieren. Ein Trainierter schafft das mit etwa 80 Prozent seiner Fasern (sagen Orthopäden), der Untrainierte kann nur 20 Prozent seiner Muskelfasern einsetzen.



Dieser Ball rollt schlecht: Er hat zu wenig Ecken

Zusammengenommen ergibt sich als Ideal ein hohler Ball von 20 bis 30 cm Durchmesser (tatsächlich: 22 cm) und einem Gewicht von knapp einem halben Kilogramm (tatsächlich 0,453 kg).

Schießen muss man den Ball also können, über Weiten des Spielfeldes, also zwischen 10 und 100 Metern. Die Geschwindigkeiten, die ein solcher Ball dann hat, liegen dann, wie man nachrechnen kann, zwischen 10 und 30 Metern pro Sekunde oder 36 bis 110 Stundenkilometern (!!). Bei solchen Geschwindigkeiten spielt der Einfluss der Luft eine große Rolle, denken Sie an ihr Auto... Sein Luftwiderstand, ausgedrückt durch den  $C_w$ -Wert, läge bei 100 Stundenkilometern etwa 10mal niedriger als bei einem total glatten (aerodynamisch gesehen) Ball. So die Gesetze der Aerodynamik.



Ein Fußball im Windkanal

Glatter wird ein solcher Ball, so verrückt es klingt, dadurch, dass man ihn rauer macht. An leichten Dellen (so wie beim Golfball etwa), oder besser noch an den Nähten des Fußballes, setzen sich kleinste Luftwirbel fest, statt wie beim glatten Ball erst sehr viel später, dann aber in großen Wirbeln hinter dem Ball herzuziehen. Die Aerodynamik diktiert also einen Ball, der Nähte hat und leicht aufgeraut ist - gerade so, wie es der Fußball eben ist.

Einen wichtigen Aspekt zeigen diese Bälle dann in besonderer Weise: Bälle, die sich mit hoher Geschwindigkeit um sich selber drehen (einen hohen Drall haben), die laufen auf anderen Bahnen als Bälle ohne Drall. Aber nur bei Luft. Denn beim Rotieren werden Luftteilchen mitgerissen. Sind die Geschwindigkeiten (Flugrichtung, Drehrichtung) gleichgerichtet, dann wird auf dieser Ballseite die Geschwindigkeit erhöht, auf der gegenüberliegenden Seite erniedrigt. Eine Druckdifferenz ist die Folge (Bernoulli-Effekt). Wie bei einer Tragfläche des Flugzeuges entsteht ein Auf- oder Abtrieb, der den Ball von seiner üblichen Bahn ablenkt. Ballartisten nutzen diese gekrümmten Kurven, indem sie den Ball "anschneiden". Das Ganze heißt nach seinem deutschen Entdecker Gustav Magnus: Magnus-Effekt. Wie man sieht, so einfach ist die anfängliche Frage nicht. Form follows function...

*Heinz Greuling*