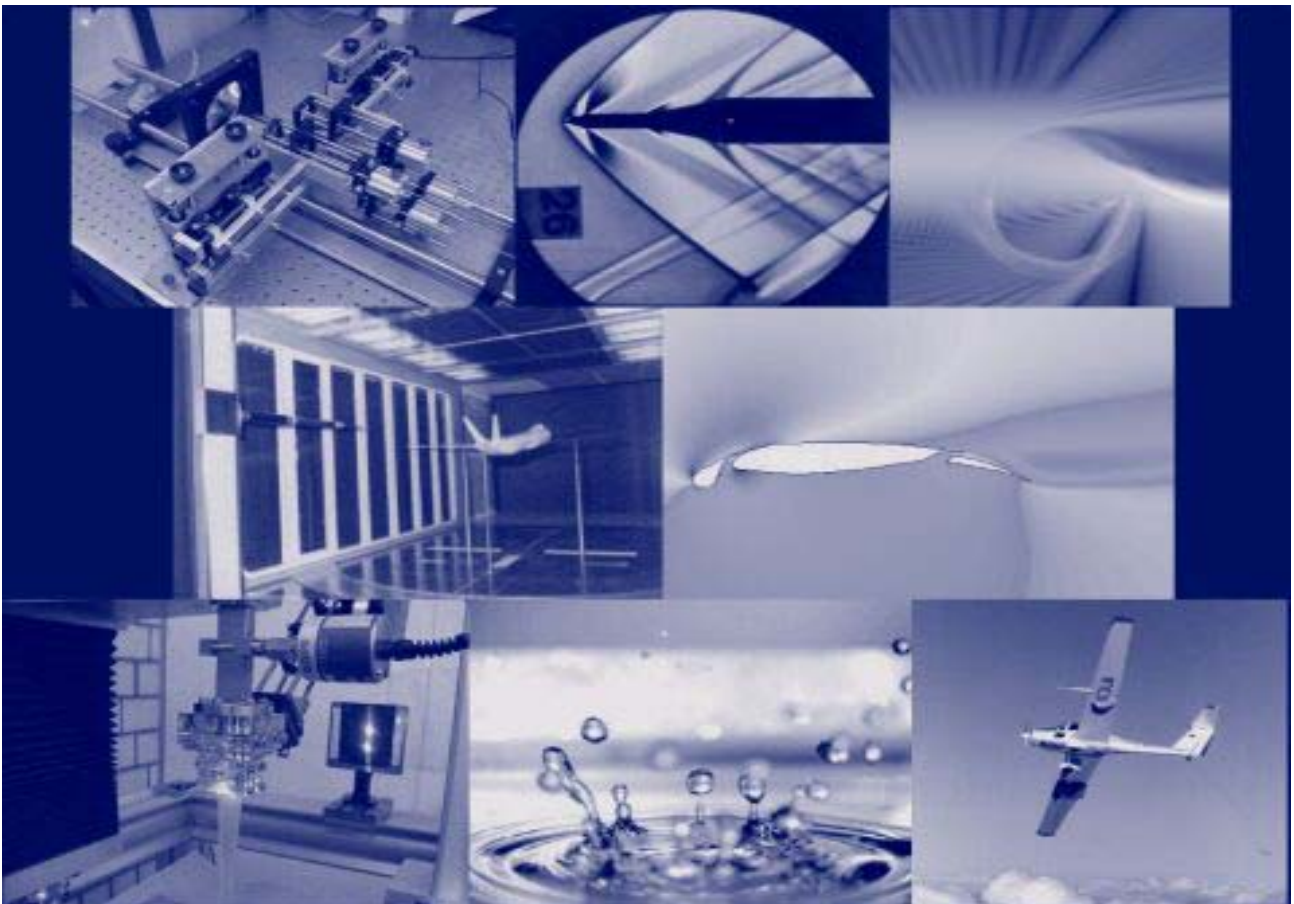


Gymnasium am Moltkeplatz

Facharbeit 2007

Matthias Thoma

Stufe: 12
Fach: Physik
Thema: Strömungslehre
Teilbereich: Aerodynamik



INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung.....	Seite 1
2. Definition „Strömungslehre“	Seite 1
2.1. Definition „Aerodynamik“	Seite 1
3. Grundlagen der Aerodynamik am Beispiel der Luftfahrt	Seite 1
3.1. Bedeutung von Schichten und Punkten am Tragflächenprofil	Seite 3
4. Bedeutung und Funktion von Windkanälen.....	Seite 4
4.1. Die Entstehung des Windkanals	Seite 5
4.2. Aufbau von Windkanälen am Beispiel des Audi Windkanal-Zentrums.....	Seite 6
4.3. Die Messstrecke in genauerer Betrachtung.....	Seite 8
5. Praktischer Teil: Versuchsbeschreibung.....	Seite 9
6. Simulationsprogramme als Ersatz von Windkanälen	Seite 12
7. Resümee	Seite 13

Literaturverzeichnis

Erklärung der Selbstständigkeit

Wie verhalten sich Körper, wie Autos und Flugzeuge, in bewegter Luft und wie wird die entstehende Strömung gemessen und beschrieben?

1. Einleitung

Im Rahmen einer Facharbeit Physik soll die Fragestellung nach dem Verhalten von Körpern und Formen untersucht und beschrieben werden. Dazu wird zuerst kurz in die Aerodynamik und dann in ihre Anwendung eingeführt. Hierbei ist auch eine kurze historische Erläuterung zu finden. Zur Verdeutlichung der beschriebenen Vorgänge habe ich eigene Experimente durchgeführt, die mit den Grundlagen der Aerodynamik nachvollziehbar sind. Für eine eigene Anwendung der Grundlagen ist auch ein Simulationsprogramm angefügt und beschrieben.

Eine Zusammenfassung am Ende der Facharbeit zeigt abschließend sowohl die Probleme, die während der Arbeit auftraten, als auch ein Fazit über die Relevanz dieses Fachgebiets.

2. Definition „Strömungslehre“

Lehre der Bewegung von Körpern in flüssigen (Hydrodynamik) oder gasförmigen (Aerodynamik) Umgebungen.

2.1. Definition „Aerodynamik“

Lehre der physikalischen Gesetzmäßigkeiten, die bei strömenden Gasen und bei Körpern, die von Gasen umströmt werden, auftreten (wie z.B. Luftwiderstand oder Auftrieb).

Ihre Verwendung findet sich hauptsächlich in der Luft- und Raumfahrt sowie der Automobilindustrie.

3. Grundlagen der Aerodynamik am Beispiel der Luftfahrt

Jeder Körper bietet einen Strömungswiderstand auf bewegte Luft, wobei es unwichtig ist, ob sich der Körper selbst oder die Luftmasse bewegt. Aus diesem Grund wird bei dem Luftwiderstand von der sogenannten Relativbewegung und somit von der resultierenden Relativgeschwindigkeit von Luft zum Körper gesprochen. Je nach der Orientierung ergänzen sich die beiden Bewegungen oder heben sich sogar auf.

Um diese Vorgänge zeichnerisch darzustellen, werden Stromlinien eingesetzt. Diese weichen dem Körper aus und laufen dabei enger zusammen, was einer Geschwindigkeitszunahme entspricht. Dadurch, dass die Luft nicht in der Lage ist, rechtwinklig um einen Körper zu strömen, kommt es bei Körpern, die abrupt enden, zu einem sogenannten Wirbelfeld. Dies ist z.B. bei einer flachen Platte

sehr stark ausgeprägt. Da man aber diese Verwirbelungen vermeiden möchte, weil sie zu einem höheren Widerstand führen und gefährlich für folgende Luftfahrzeuge sind, kann man auf sogenannte Tropfenformen oder Stromlinienformen zurückgreifen, die diese Wirbel durch ihre langsame Querschnittsverminderung verhindern, da die Luft stetig, ohne große Sprünge angeglichen wird.

Der Widerstand, den ein Körper erzeugt, wird Strömungswiderstand genannt. Dieser unterteilt sich in die zwei Faktoren des Druckwiderstandes und Reibungswiderstandes:

$$\mathbf{W=W_d+W_r}$$

Der Druckwiderstand, auf den ich zuerst eingehen möchte, ist abhängig von vier weiteren Faktoren.

1. So wächst der Druckwiderstand linear zur Größe der angeblasenen Fläche (bei einer Kugel wird die größte kreisförmige Querschnittsfläche gewählt).

2. Ein weiterer Faktor ist die Geschwindigkeit, die zwischen Körper und Luft herrscht. Hierbei sprechen wir von einer quadratischen Abhängigkeit, da sich der Druckwiderstand bei einer Verdoppelung der Relativgeschwindigkeit vervierfacht.

3. Besonders in der Fliegerei spielt als nächster Faktor die Luftdichte eine große Rolle, da sie neben der Temperatur (Tages- oder Jahreszeit) auch von der Luftdichte und somit auch von der Höhe abhängig ist. Die Luftdichte verhält sich wieder linear zum Druckwiderstand.

4. Zuletzt ist auch die Form des Körpers sehr wichtig, da jeder Körper einen sogenannten Widerstandsbeiwert besitzt, der mit C_w abgekürzt wird. Um diesen Widerstandsbeiwert zu ermitteln, muss der Körper in einen Windkanal gebracht und dort gemessen werden, was ich in meinem praktischen Teil versucht habe, in vereinfachter Form darzustellen.

Abschließend lässt sich für den Druckwiderstand folgende Formel aufstellen:

$$\mathbf{W_d=1/2*C_w*A*\rho*v^2}$$

Der Einfluss des Reibungswiderstandes (W_r) ist leichter erkennbar und zu beeinflussen. Dieser hängt zum einen von der Grenzschichtausbildung der Luft ab. Hierbei muss man die unterschiedlichen Strömungsformen, die mit laminar und turbulent bezeichnet werden, unterscheiden.

Die laminare Strömung tritt bei verhältnismäßig geringen Geschwindigkeiten auf, da hier die Luftteilchen entlang ihrer Stromlinien fließen und sich so nicht behindern. Bei der turbulenten Strömung dagegen, die bei höheren Geschwindigkeiten auftritt, bewegen sich die Luftteilchen untereinander so stark, dass es zu einer Vermischung von Luftteilchen aus verschiedenen Stromlinien kommt.

Der Übergang dieser beiden Strömungsformen geschieht schlagartig und ist kein schleichender Pro-

zess. Der Punkt, an dem dies geschieht, wird Umschlagpunkt genannt. Von den Flugzeugkonstruktoren wird versucht, diesen Punkt so weit wie möglich nach hinten zu legen, da eine laminare Grenzschicht, die durch die Geschwindigkeitszunahme der Luft von 0 m/s auf die maximale Luftgeschwindigkeit gekennzeichnet ist, einen geringeren Widerstand bildet als eine turbulente Grenzschicht.

Des Weiteren ist noch sehr wichtig zwischen Wirbeln und Turbulenzen zu unterscheiden, da Wirbel eine spiralförmige Krümmung der Stromlinien sind, wohingegen Turbulenzen ein unregelmäßiges Überspringen von Luftteilchen zwischen mehreren Stromlinien beschreiben. So herrschen in einem Wirbel zwar meist Turbulenzen, aber Turbulenzen sind auch ohne Verwirbelungen möglich.

Zum Anderen hängt der Reibungswiderstand von der Oberflächenbeschaffenheit des Körpers, wie z.B. des Tragflügels, ab. Sie wird definiert als der Höhenunterschied zwischen „Talsohle“ und „Bergspitze“ einer Fläche, was unter dem Mikroskop bestimmt werden muss. Bis zu einem Unterschied von 0,02 mm wirkt sie sich nicht zusätzlich auf den Widerstandsbeiwert und den Umschlagpunkt aus. Dabei bieten die direkt angeströmten Flächen eine Ausnahme, da hier durch den erhöhten Druck, den die Luft auf den Körper ausübt, die Grenzschicht dünner ist. Dies führt dazu, dass eine raue Oberfläche die Luft durch das geringere Polster abbremst und verwirbelt, was zu mehr Widerstand führt.

Entsprechend dem Widerstand existiert auch der, nach oben orientierte, Auftrieb, der vorwiegend bei Luftfahrzeugen ausgenutzt wird, bei Autos aber schädlich ist, da die Bodenhaftung verloren geht. Daher sind z.B. Heckspoiler, die negative Tragflächenprofile haben, an Automobilen installiert, um für Abtrieb und so für bessere Straßenhaftung zu sorgen.

Wie der Widerstand ist auch der Auftrieb von einem sogenannten Auftriebsbeiwert abhängig, der mit C_a bezeichnet wird. Dieser muss, wie auch schon der Widerstandsbeiwert, experimentell im Windkanal bestimmt werden, wobei er von dem Winkel der auftreffenden Luft abhängig ist. Aus diesem Grund wurde eine Bezugsfläche eingeführt, die mit F abgekürzt wird und sich aus der Spannweite (t) und ihrer Breite, die die mittlere Profiltiefe (b) angibt, definiert. Mit Hilfe dieser Bezugsfläche lassen sich nun auch für den Auftrieb Formeln aufstellen, mit denen dieser zu berechnen ist:

$$A = q \cdot F \cdot C_a \quad \text{mit} \quad F = b \cdot t$$

3.1. Bedeutung von Schichten und Punkten am Tragflächenprofil

Wenn nun der Luftstrom auf die Tragfläche trifft, entstehen hier einige Schichten und Zusammenhänge, die für den zweiten Teil meines Experimentes von Bedeutung sind. Zuerst entsteht der Stau-

punkt an der Stelle, an der der Luftstrom auf den Flügel trifft. Hier wird die Luftmasse dazu gezwungen, sich aufzuteilen und nach oben oder unten zu strömen. Dabei ist es wichtig, die Zusammenhänge zwischen der Geschwindigkeit der Luft und dem Staudruck zu kennen. Da die Luft hier auf den Körper trifft, ist die Luftgeschwindigkeit gleich Null, was darauf zurückzuführen ist, dass sie vor der Aufteilung abgebremst wird. Aus diesem Grund finden wir hier einen sehr hohen Druck. Zunächst bilden sich die laminaren Grenzschichten aus, in denen die Luft auf der Tragfläche bis zur maximalen Geschwindigkeit der umströmenden Luft beschleunigt wird, bis sie am Umschlagpunkt durch die hohe Geschwindigkeit turbulent werden und sich schließlich am Ende des Körpers mit dem Luftstrom der anderen Seite vermischen und einen Ausgleich schaffen, der die gering zu haltenden Wirbel nach sich zieht.

Die Geschwindigkeiten auf der Flügeloberseite und Flügelunterseite sind unterschiedlich, da die Oberseite eine größere Wölbung aufweist. Dadurch ist die Luft hier gezwungen, schneller zu fließen als auf der Unterseite, wo diese Wölbung nicht herrscht, was aufgrund einer solchen Geometrie zu dem Sog- und Druckverhältnis von $2/3$ zu $1/3$ führt. Diese Verteilung ist dafür verantwortlich, dass ein Flugzeug in der Luft gehalten wird und durch eine gewisse Eigenbeschleunigung in der Lage ist zu fliegen.

4. Bedeutung und Funktion von Windkanälen

Wie schon zuvor angesprochen benötigt die Industrie Windkanäle, um die aerodynamischen Eigenschaften ihrer Produkte (hauptsächlich Autos und Luftfahrzeuge) zu untersuchen. Hierbei möchte ich aber nur auf die Untersuchungen im Unterschallbereich eingehen, da dieser Bereich für die Automobilentwicklung und die der Luftfahrzeuge, ausgenommen der militärischen Verwendung, der entscheidende und gebräuchliche ist.

Im Überschallbereich müssen dagegen besonders für Luftfahrzeuge andere Arten der Profilformen und Steuerungen entwickelt werden, da sie sonst nicht kontrollierbar sind, was schon bald nach dem zweiten Weltkrieg von der amerikanischen Luftwaffe unter Mitarbeit der Firma „Bell-Air“ mit Hilfe des Flugzeugmodells X1 während eines Praxisversuchs gezeigt wurde.

Auch im Unterschallbereich spielen unterschiedliche Kriterien eine Rolle. So ist bei Automobilen der wichtigste Faktor der Widerstand, während beim Luftfahrzeug auch andere Kriterien, wie der Auftrieb und die Steuerbarkeit, von Bedeutung sind. Die moderne Technik ist sogar in der Lage, dass ein Airbus A330-200 eine Gleitzahl von $1:20$ hat, was bedeutet, dass es mit abgeschalteten Triebwerken bei einem Kilometer Höhendifferenz 20 km weit gleiten kann, was dem Wert eines alten Segelflugzeuges, wie z.B. einem Röhnadler, entspricht.

Bei der Untersuchung in einem Windkanal, die in der Regel sehr kostspielig ist, kommt es noch zu einem weiteren Problem, da Luftfahrzeuge nur als Modelle in den Windkanal gebracht werden können und sich die Luft an diesen anders verhält, als an den großen Originalen.

Die Übertragbarkeit des Verhältnis vom Modell zum Original wird mit Hilfe der Reynoldszahl angegeben, die Aussagen in Bezug auf Trägheits- und Zähflüssigkeitskräfte erlaubt, worauf ich hier aber wegen der Komplexität des Themas nicht eingehen möchte. Die Eigenschaften des umströmenden Gases können darüber hinaus so angepasst werden, dass dieses wieder den Luftigenschaften bei großen Körpern entspricht. Hierzu wird der Druck und die Temperatur variiert. Dies kann in Extremfällen dazu führen, dass anstelle der „normalen“ Luft, die nach der Standardatmosphäre eine Temperatur von 15°C hat, z.B. Stickstoff mit -160°C um das Modell geströmt wird (sie werden Kryowindkanäle genannt und einer ist z.B. bei der DLR in Köln-Porz in Benutzung).

4.1. Die Entstehung des Windkanals

Im Zusammenhang mit der Erfindung von Windkanälen sind zwei Männer besonders zu benennen. Zum Ersten ist es Gustave Eiffel, der in den Jahren 1905 und 1906 die ersten Untersuchungen von Strömungswiderständen auf dem Eiffelturm in Paris durchführte, wozu er auf der zweiten Plattform Platten aufhängte, und später ebenfalls auf dem Marsfeld eine Messeinrichtung erbaute. Hier ließ er die Luft von außen in die Messkabine strömen und dahinter wieder entweichen. Dieser Aufbau wird seitdem auch „Eiffel-Kanal“ genannt. Er hat aber durch die Tatsache, dass es sich um einen offenen Windkanal handelt, den entscheidenden Nachteil, dass äußere Faktoren, wie Temperatur oder Luftdruck, die Messungen laufend beeinflussen.

Im Gegensatz hierzu war Ludwig Prandtl bereits 1908 in der Lage, in Göttingen einen Windkanal zu bauen, bei dem hinter der Messstrecke die Luft wieder durch eine Art Trichter aufgefangen und somit zurück in einen Kreislauf geführt wird, der die Luft immer wieder neu beschleunigt. Das ermöglicht, die physikalischen Eigenschaften in einem hohen Maße zu beeinflussen. Diese Art des geschlossenen Kanals ist nach seinem Standort als „Göttinger Typ“ bezeichnet. Unter anderem aus diesem Grund wird Prandtl heutzutage als eine Art „Vater der modernen Aerodynamik“ bezeichnet. Einen solchen Kanal moderner Ausführung nutzt z.B. Audi für deren Automobilentwicklungen. Das von mir in meinem Versuch benutzte Prandtl'sche-Staurohr zählt zu einer seiner zukunftsweisesten Erfindungen seiner Zeit, da man damit erstmals die Geschwindigkeiten von Gasen oder Körpern in Gasen im Verhältnis zu seiner Umgebung bestimmen konnte, und es so den Weg für weitere aerodynamische Forschungen eröffnete.

4.2. Aufbau von Windkanälen am Beispiel des Audi Windkanal-Zentrums

Beim Aufbau eines Windkanals unterscheidet man die schon bekannten, eben erwähnten, Formen eines offenen Systems, bei dem die Luft von Außen angesaugt wird, und eines geschlossenen Systems, bei dem die Luft in einem ovalen Bereich von Kanälen bleibt.

Der große Vorteil des geschlossenen Systems liegt darin, dass es hier möglich ist, die äußeren physikalischen Faktoren gleich zu halten und sie bei Bedarf sogar stark zu verändern. Aus diesen Gründen ist das geschlossene System das gebräuchliche in der Forschung, wobei es auch hier wieder Unterschiede gibt. Das als Beispiel dargestellte System, welches bei Audi in Betrieb ist, hat eine offene Messstrecke, an deren Ende die Luft wieder von einer Art Trichter (dem sogenannten Kollektor) eingefangen wird, um sie wieder in den Kreislauf zu bringen. Dies ist ein gängiger Aufbau für den Unterschallbereich, der aber im Überschallbereich nicht verwendet werden kann, da hier die erzeugte Geschwindigkeit nicht ausreicht um in den Überschallbereich zu gelangen.

Möchte man aber seine Modelle in diesem Bereich testen, muss sich die Messstrecke in einem abgeschlossenen Rohr im Kreislauf des Systems befinden, da die hohen Überschallgeschwindigkeiten nur in Rohren von geringen Querschnittsflächen erzeugt werden können. Dies basiert wiederum auf dem Zusammenhang von statischem Druck und Staudruck, was von Prandtl in seinem, nach ihm benannten, Staurohr ausgenutzt wurde, um die Geschwindigkeit von Gasbewegungen und im Segelflug die Eigengeschwindigkeit im Verhältnis zur umgebenden Luftmasse zu bestimmen.

Die Gesetzmäßigkeit lautet:

$$\text{Gesamtdruck} = \text{Staudruck} + \text{statischem Druck}$$

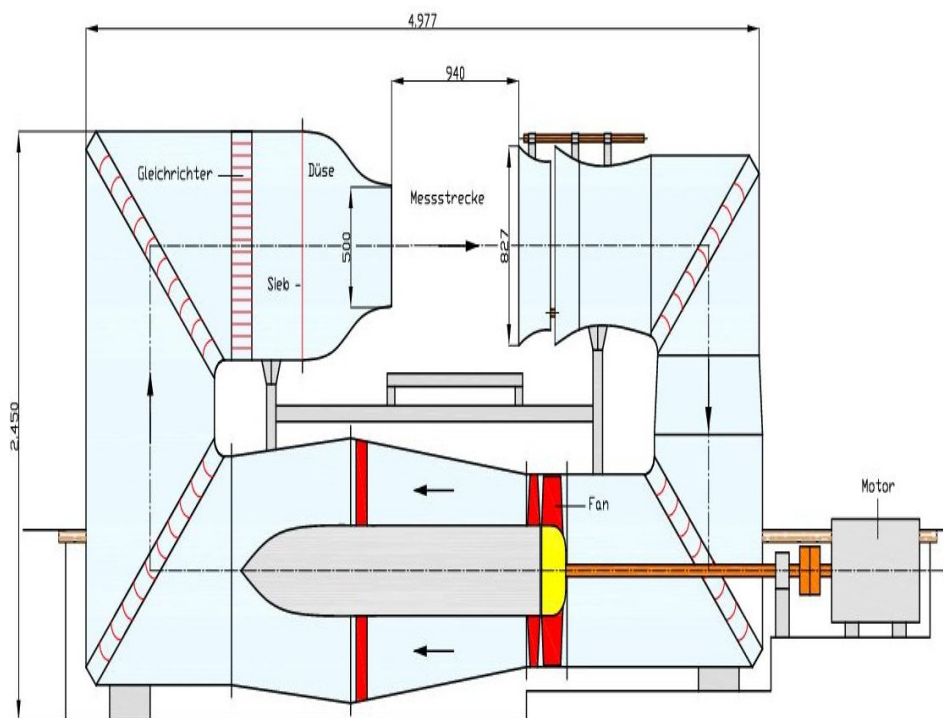
Das heißt, wenn das Gas zuvor in einer Röhre mit breitem Querschnitt beschleunigt wird und dann in ein Rohrsystem mit geringerem Querschnitt gelangt, muss sich seine Geschwindigkeit erhöhen, um die gleiche Anzahl von Gasteilchen in der gleichen Zeit auf einer bestimmten Strecke zu bewegen. Dieses Phänomen wird sowohl im Unter- als auch im Überschallbereich ausgenutzt. Doch da die Geschwindigkeit im Unterschallbereich nicht so hoch ist und damit auch keine so große Notwendigkeit besteht, den Druck während der Messstrecke aufrecht zu erhalten, kann das beschleunigte Gas ohne große Probleme, wie plötzlichem, rapidem Geschwindigkeitsabfall, in eine offene Messstrecke gelassen werden, was die Experimente einsichtiger und zugänglicher macht.

Dies ist auch der Aufbau, der bei Audi in deren Windkanal-Zentrum in Ingoldstadt verwendet wird, um hier Automobile und andere Körper, wie z.B. sogar Skifahrer, auf ihre aerodynamischen (und dabei gegebenenfalls auch akustischen) Eigenschaften zu überprüfen.

Anhand dieses Aufbaus möchte ich nun das genauere Funktionsprinzip des Audi-Windkanals beschreiben und verdeutlichen. Es handelt sich hier um einen Windkanal mit geschlossenem System und einer offenen Messstrecke.

Wie die Abbildung zeigt, wird ein Gebläse (in der Zeichnung als „Fan“ bezeichnet) mittels eines Motors angetrieben. Dieses wiederum beschleunigt das im System befindliche Gas kontinuierlich auf eine jeweils konstante Geschwindigkeit. Diese kann in den einzelnen Bereichen unterschiedlich sein. Um das bewegte Gas nun aber mit möglichst wenig Verwirbelungen und Störungen im Kreis zu leiten, werden sogenannte Umlenkecken eingebaut, die zusätzlich noch als Schalldämpfer fungieren. Kurz vor dem Einströmen in die Düse muss das nun langsame, da in breitem Querschnitt fließende, Gas zuerst durch drei Siebe, die für eine turbulenzfreie und gleichförmige sowie auch gleichgerichtete Strömung sorgen. Direkt nach den Sieben gelangt das Gas in die Düse, die es auf dem Weg zur direkt dahinter befindlichen Messstrecke um das 5,5 fache (auf ca. 300 km/h) beschleunigt, was nach dem oben dargestellten Prinzip der Querschnittsverengung funktioniert. Nun befindet sich das sehr schnelle Gas auf der Messstrecke, die den Hauptteil der Anlage bildet, worauf ich nach der Beschreibung des gesamten Aufbaus noch einmal genauer eingehen möchte. Zunächst wird das Gas wieder von einem Kollektor gesammelt und über breite Leitungen, die das Gas verlangsamen, vorbei an der Anti-Schall-Anlage, die auf der Skizze nicht dargestellt ist, zum Gebläse geleitet, das es wiederum beschleunigt und so den Kreislauf weiterführt.

Da eine solche Anlage sehr laut ist, wird sie zum Einen durch schalldämmende Materialien in den Wänden abgeschirmt. Zum Anderen hat Audi das sogenannte Anti-Schall-System entwickelt, welches durch akustische Schwingungen, die denen der Strömungsgeräusche entgegen gerichtet sind (sie werden Gegenfrequenzen genannt), diese eliminiert.



4.3. Die Messstrecke in genauerer Betrachtung

Um die von Audi entwickelten Automobile unter realistischen Bedingungen testen und diese Tests auswerten zu können, haben die Konstrukteure der Messstrecke ein fein ausgeklügeltes System von verschiedenen Anlagen geplant und umgesetzt. Hierbei wird das Fahrzeug in der Messstrecke auf einer Drehscheibe positioniert. Dies erlaubt den Ingenieuren über eine stufenlose Drehung, jede Seitenwindkomponente, die auf das Fahrzeug während der Fahrt wirken kann, zu simulieren. In dieser Drehscheibe ist auch eine Hebebühne integriert, was sehr praktisch ist, da die Ingenieure zwischen den Messungen Veränderungen am Unterboden vornehmen und ihre Auswirkungen direkt untersuchen können, weil durch die genaue Konstruktion der Hebebühne das Fahrzeug wieder millimetergenau in die Messstrecke eingepasst werden kann, sodass sich nur die aktiven Veränderungen am Unterboden auf die Tests auswirken und nicht noch eine andere Position das Ergebnis beeinflusst. Mit Hilfe solcher Systeme ist es möglich, das Fahrzeug in jede gewünschte Position zu bringen. Allerdings ist noch keine Apparatur darauf ausgelegt, die aerodynamischen Eigenschaften, wie Luftwiderstand sowie Auf- oder Abtrieb, zu messen. Dazu sind die Elemente der Hebebühne mit einer extrem genauen Waage gekoppelt, dessen Abweichung unter 2,25 Newton liegt. Somit lassen sich die auftretenden vertikalen und horizontalen Kräfte sehr genau bestimmen, was für eine aussagekräftige Auswertung erforderlich ist.

Neben den rein am Fahrzeug auftretenden Kräften spielen aber noch andere Faktoren eine wichtige Rolle, ohne deren Berücksichtigung die Messergebnisse nicht mit den tatsächlichen aerodynamischen Eigenschaften übereinstimmen würden. Innerhalb der Messstrecke liegt das Problem darin, dass sich nur die Luft bewegt, aber nicht das Fahrzeug über dem Boden wie in der Realität, oder die Reifen selbst, die sowohl Reibung als auch eigene Strömung erzeugen. Dadurch, dass sich nun weder Straße noch Fahrzeug bewegen, bildet sich eine, zu Anfang schon erläuterte, Grenzschicht aus, in der der Luftstrom zwischen Boden und Fahrzeug nicht auf seine volle Geschwindigkeit kommt und somit auch zu wenig Reibung simuliert wird.

Um hier Abhilfe zu schaffen, ist im Boden der Messstrecke ein Laufband integriert, das auf die gleiche Geschwindigkeit wie das umströmende Gas gebracht wird, was die Ausbildung einer zu großen Grenzschicht verhindert. Doch an dem Übergang von nicht bewegtem zum bewegten Boden würden wieder turbulente Luftwirbel erzeugt, die wiederum eine negative Beeinflussung auf die Ergebnisse hätten. Um auch diesen Faktor zu eliminieren, ist unmittelbar vor dem Laufband eine sogenannte Grenzschichtabsaugung (GSA) installiert. Dieses System darf aber nur die direkt am Boden befindliche Grenzschicht absaugen, ohne dass die darüber liegende Luftströmung beeinflusst wird, was dieses System sehr störanfällig macht und einer sehr genauen Einstellung bedarf. Dieses

System ist bei höher gelegenen Fahrzeugen, wie z.B. dem Geländewagen Audi Q7, überflüssig und der Störfaktor gering. Doch bei sehr tiefen, nah am Boden liegenden Fahrzeugen, wie Sport- oder sogar Rennwagen (für beides ist der Audi R8 in seiner jeweiligen Sport- oder Rennvariante ein gutes Beispiel), ist dieser Faktor sehr entscheidend und muss in jedem Fall bei der Entwicklung berücksichtigt werden.

Nachdem schon der Faktor der nicht bewegten Straße ausgeräumt wurde, bleibt immer noch der gravierende Unterschied, dass sich die Reifen während der Testvorgänge nicht bewegen, was durch eine Kombination von kleineren Laufbändern an den Reifen und Halterungen, die in ihren Windschatten angebracht sind, behoben wird. Nun ist auch möglich, die Selbstrotation der Räder realistisch darzustellen, um Aussagen über ihre eigenen Strömungsverhältnisse am Fahrzeug zu ermöglichen.

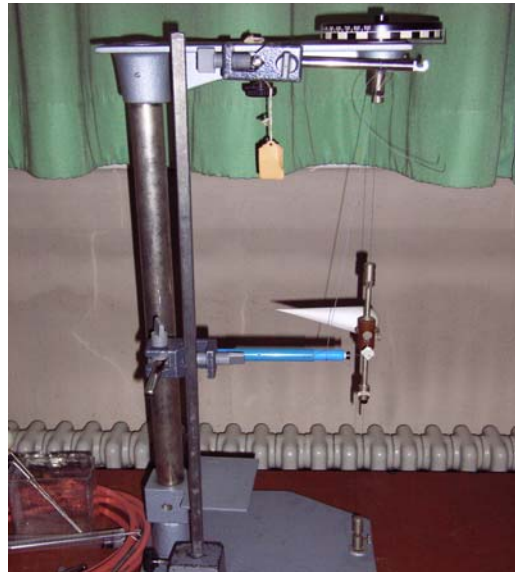
Bei einer solch ausgeklügelten und möglichst alles berücksichtigenden Anlage werden sogar Kunstköpfe zu Verfügung gestellt, um bei verdeckten Fahrzeugen die Strömungsbeeinflussung durch im Fahrzeug befindliche Personen zu simulieren. Sie werden außerdem in allen Fahrzeugtypen eingesetzt, um eine realitätsnahe Simulation von Geräuscheindrücken zu gewährleisten. Abschließend ist zu sagen, dass solche Anlagen auf einem sehr hohen technischen Niveau arbeiten, was die hohen Kosten von Tests verständlich macht.

Um diese Anlage aber auch kritisch zu beurteilen, lässt sich noch sagen, dass sie nicht in der Lage ist, die Reibung der unterschiedlichen Straßenverhältnisse auf den Reifen zu simulieren und auszuwerten. Dazu müssen weitere praktische Versuche in Zusammenarbeit mit den jeweiligen Reifenherstellern erfolgen. Im Unterschied dazu werden bei Unterschallmessstrecken, die für Luftfahrzeuge entwickelt sind, Einrichtungen benötigt, die auf die schon erwähnten physikalischen Eigenschaften der Umgebung eingehen, um den Modellfaktor zu eliminieren.

5. Praktischer Teil: Versuchsbeschreibung

Der praktische, experimentelle Teil dieser Arbeit setzt sich zusammen aus dem Aufbau und der Auswertung von zwei Versuchen, wobei der Erste aus einem relativ einfach strukturierten, offenen Windkanal besteht, um die Widerstandsbeiwerte einer Kugel, einer geöffneten Hohlkugel und einer Platte zu bestimmen. Der zweite Versuch soll die Geschwindigkeitsunterschiede an den verschiedenen Bereichen der Tragfläche verdeutlichen. Hierbei habe ich die Strömungsgeschwindigkeiten am Staupunkt, an der Profiloberseite (am höchsten Punkt) und an der Profilunterseite gemessen.

1. Versuch: Als Hilfsmittel standen mir beim ersten Versuch ein Draht zur Verfügung, der senkrecht in einem Stativ gespannt war und mit einer Halterung in der Mitte als Achse für die Kraftübertragung vom angeströmten Körper auf der einen und einem Kraftmesser auf der anderen Seite diente. Darüber hinaus verwendete ich ein gewöhnliches Gebläse aus der Fachschaft Physik zur Erzeugung der Luftströmung, einen Tischtennisball als kugelförmigen Testkörper, einen halbierten Tischtennisball als Testkörper für eine geöffnete Hohlkugel und eine aus Pappe gefertigte Scheibe als plattenförmigen Testkörper.



Als nächstes benötigte ich eine Apparatur, um die Geschwindigkeit der erzeugten Strömung zu messen.

Hierzu verwendete ich ein Steigrohr, das an beiden Seiten geöffnet und mit einer Flüssigkeit (rot gefärbtes Petroleum) gefüllt war, durch deren Position die Geschwindigkeitswerte auf einer geeichten Skala in der Mitte abgelesen werden konnten.

Die Zugänge des Rohres wurden über Schläuche mit dem bereits erwähnten Prandtlischen-Staurohr verbunden, wobei in den unteren Zugang der Staudruck und in den oberen der statische Druck geleitet wurde. Dies führte dazu, dass die Flüssigkeit um den von der strömenden Luft erzeugten zusätzlichen Druck steigt, der durch den oberen Zugang im Verhältnis zum Umgebungsdruck steht.



Um den Versuch nun durchzuführen, wurde der Testkörper gegenüber dem Gebläse, das darauf gerichtet war, angebracht. Nach einer anfänglichen Messung der Strömungsgeschwindigkeit traf die Luftströmung ungehindert auf den Körper. Der Versuch wurde so lange fortgeführt, bis der horizontal angebrachte Kraftmesser auf der anderen Seite des Drahtes einen konstanten Wert angezeigt hat.

Hierbei traten einige Probleme auf, die ich später im Resümee näher erläutern möchte. Zum Teil kamen die gemessenen Ergebnisse den in der Literatur genannten Werten sehr nah. Bei den Abweichungen dürfte dies zum größten Teil an äußeren Faktoren gelegen haben, da hier zu viele unbeeinflusste Faktoren eine Rolle spielten. Den Wert der Dichte habe ich z.B. aus der Wertetabelle der Standardatmosphäre übernommen.

Die in der folgenden Tabelle genannten Angaben sind Mittelwerte aus den Messreihen. Die Ergebnisse der Messungen an dem kugelförmigen Körper und der Platte waren nahezu identisch mit den in der Literatur genannten Werten. Bei der geöffneten Hohlkugel trat allerdings eine Abweichung von ca. 38% auf, was die folgende Tabelle und die Rechnung noch einmal anschaulich darlegt.

Form	Kugel	Hohlkugel, geöffnet	Platte
Gemessener Wert	0,46	1,85	1,98
Wert aus der Literatur	0,45	1,33	1,98

Formel: $W_d = 1/2 C_w \cdot A \cdot \rho \cdot v^2$
 $\Leftrightarrow C_w = (2 \cdot W_d) / (A \cdot \rho \cdot v^2)$

Einheitenrechnung: $[C_w] = (N) / (m^2 \cdot kg/m^3 \cdot m^2/s^2) = N/N \rightarrow \text{Einheitslos}$

Rechnung:

1. Kugel:

$$C_w = (2 \cdot 7 \text{ mN}) / (10,8 \text{ cm}^2 \cdot 1,1225 \text{ kg/m}^3 \cdot (5 \text{ m/s})^2) = \mathbf{0,46}$$

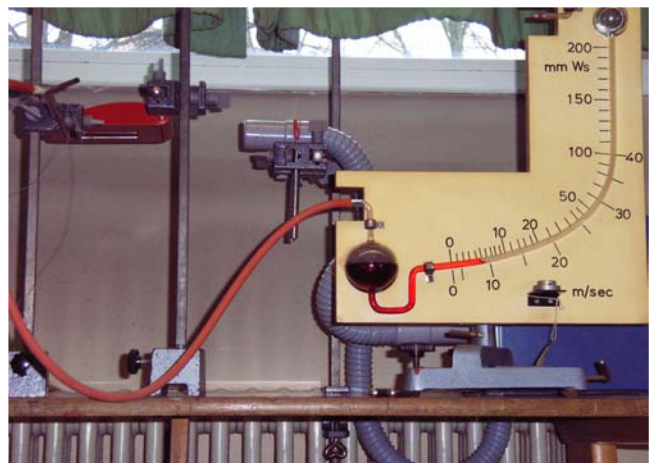
2. Hohlkugel:

$$C_w = (2 \cdot 28 \text{ mN}) / (10,8 \text{ cm}^2 \cdot 1,1225 \text{ kg/m}^3 \cdot (5 \text{ m/s})^2) = \mathbf{1,85}$$

3. Platte:

$$C_w = (2 \cdot 30 \text{ mN}) / (10,8 \text{ cm}^2 \cdot 1,1225 \text{ kg/m}^3 \cdot (5 \text{ m/s})^2) = \mathbf{1,98}$$

2. Versuch: Der zweite Versuch war einfacher strukturiert und ist durch das Simulationsprogramm der NASA, das im digitalen Anhang auf CD beigefügt ist, für jeden anschaulich nachzuvollziehen. In diesem Versuch sind die Geschwindigkeiten an verschiedenen Stellen eines Tragflächenprofils dargestellt, um die Sog-Druckkräfte, die das Luftfahrzeug in der Luft halten, deutlich zu machen. Dazu benötigte ich ein Tragflächenprofil, das mir zur Verfügung gestellt wurde, die schon erwähnte Apparatur, die über ein Steigrohr, das mit einem Prandtl'schen Staurohr verbunden ist, die Messung von Strömungsgeschwindigkeiten erlaubt, und das Gebläse. Hierbei kam ich zu dem Ergebnis, dass am Staupunkt die Strömung stark abgebremst wird, so wie wenn sie auf eine Mauer treffen würde. Am obersten Profilpunkt, an dem ich die Strömung als



zweites bestimmte, betrug sie mit 10 m/s ca. 2 m/s mehr als an der Unterseite, an der die Luft mit 8 m/s strömte. Dieser Geschwindigkeitsunterschied ist der Grund für die Sog-Druck-Kräfte, da die oben fließenden Teilchen durch ihre höhere Geschwindigkeit die Fläche ansaugen und sie von unten durch die höhere Anzahl der Luftteilchen, die dort wegen der geringeren Geschwindigkeit vorhanden sind, hoch gedrückt wird.

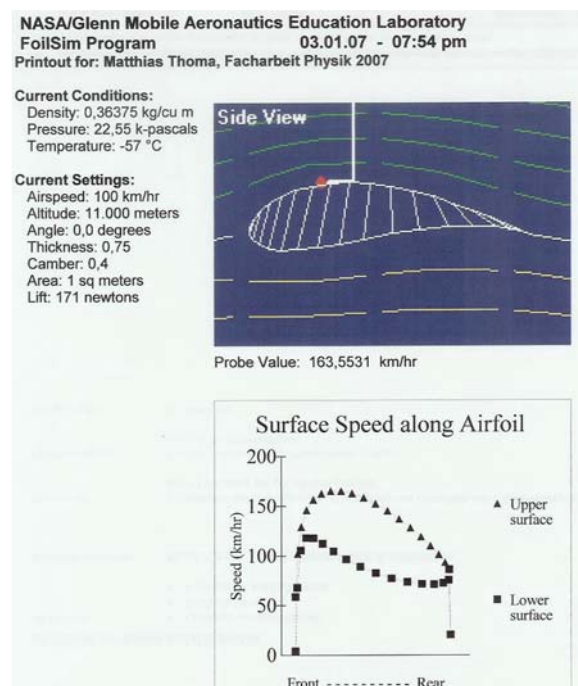
6. Simulationsprogramme als Ersatz von Windkanälen

Die stetige Weiterentwicklung der Technik erlaubt es mittlerweile, einfache und bekannte Formen in Computeranimationen zu simulieren.

Als Beispiel ist das von der NASA programmierte Computerprogramm „FoilSim“ angefügt, in dem ein Tragflächenprofil oder ein Baseball (wahlweise mit oder ohne Eigenrotation) als Testkörper in einen digitalen Windkanal gebracht werden können und die Messergebnisse in dem daneben liegenden Fenster, in verschiedenen Diagrammen, dargestellt werden. Neben dieser Anzeigeform ist es auch möglich, mit einer Testsonde frei durch das simulierte Feld zu fahren, um sich die einzelnen Strömungsgeschwindigkeiten anzeigen zu lassen. Das Programm ist trotz der rein englischen Oberfläche relativ leicht zu verstehen und ist meiner Meinung nach eine gute Möglichkeit Unterrichtsstoff zu verdeutlichen, da es viele frei wählbare Faktoren gibt, die visuell gut erkennbar dargestellt werden.

Dem Benutzer bleibt es selbst überlassen, über die Strömungsgeschwindigkeit, die simulierte Höhe, den Winkel, in dem die Strömung auf die Fläche trifft (dem sogenannten Anstellwinkel), die Profildicke und die Wölbung frei zu wählen, was viele Variationsmöglichkeiten erlaubt. Eine weitere, sehr positive Eigenschaft ist, dass das Programm eine Umstellung auf das metrische System erlaubt, so dass außer der englischen Sprache keinerlei Verständnisprobleme vorhanden sein dürften.

Bei Profilen mit unterschiedlichen Werten auf Profi-ober- und Unterseite werden in dem Diagramm Graphen in verschiedenen Farben oder mit unterschiedlichen Formen gezeichnet. Bei besonders gelungenen Profileinstellungen ist es möglich, die Werte zu speichern oder zu drucken.



Der Inhalt dieses Programms entspricht zum Teil meinen beiden Experimenten, wobei hier nur kurze Vorbereitungszeiten erforderlich sind und keine Fehler durch äußere Faktoren auftreten, die im Unterricht an der Eingliederung dieses Themas hinderlich wären. Es macht die Strömungslehre zu einem leicht verständlichen Fachgebiet, mit dem jeder von uns tagtäglich konfrontiert ist.

7. Resümee

Abschließend lässt sich über das Thema der Strömungslehre sagen, dass es eines großen Aufwandes bedarf, um Messungen und allgemeine Untersuchungen, frei von äußeren Einflüssen, durchzuführen. Wie schon bei meinem einfachen „Windkanal“ ohne Umlaufstrecke erwähnt, müssen alle Faktoren, die auf die Beschaffenheit der Luft einwirken, konstant gehalten werden, damit die Ergebnisse nicht verfälschen.

Das erste Problem bestand für mich darin, eine gerade Anströmrichtung und eine reibungsfreie Messung zu erhalten, da es sehr lange dauerte den Aufbau gerade und untereinander parallel auszurichten. Der größte Störfaktor dürfte aber in der Strömung selbst gelegen haben, da das Gebläse die Luft verwirbelt und keine Gleichrichter zur Verfügung standen. Ein anderes Problem ergab sich aus dem Aufbau selbst, da sich an den Testkörpern während der Tests durch ihren Widerstand die Anströmrichtung änderte, was einen großen Einfluss auf die Ergebnisse hat.

Doch im Ganzen gesehen bin ich mit dem Verlauf der Experimente zufrieden, da ich es geschafft habe, mit einfachen Mitteln die Grundlagen einer aerodynamischen Strömungsmessung darzulegen, wobei ich leider nicht über Rauch oder Dampf zur Visualisierung verfügte.

Über das gesamte Fachgebiet der Strömungslehre bin ich am Ende allerdings noch erstaunter als zu Beginn, da sich an vielen Stellen gezeigt hat, wie viel Potential und welche Möglichkeiten sich hier noch ergeben können. Um z.B. beim Umweltschutz weiter zu kommen, gibt es in der Zukunft sicherlich wieder neue Erkenntnisse, die beim Luft- und Straßenverkehr angewandt werden können, um weiteren Treibstoff einzusparen, wobei Forschung meines Erachtens nach sinnvoller ist als ein Verbot von Flugreisen oder hohen Reisegeschwindigkeiten mit dem Auto.

Bei dieser Entwicklung wird ein großes Potential immer mehr in Simulationsprogrammen, wie dem der NASA liegen, da die Untersuchungen im Windkanal kostspielig sind und man immer mehr in der Lage sein wird, die Eigenschaften von Formen zu berechnen.

Für die Zukunft sehe ich in dem Bereich der Strömungslehre also sowohl Chancen für Durchbrüche in der Forschung, als auch einen ständigen Bedarf an gut ausgebildeten Ingenieuren.

Literaturverzeichnis

Bücher:

Der Segelflugzeugführer Band 7

Internet:

www.audi.de

www.dlr.de

www.gustave-eiffel-os.cidsnet.de

www.nasa.gov

www.tu-braunschweig.de

www.tu-darmstadt.de

Erklärung der Selbstständigkeit

Ich erkläre, dass ich die Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.