



Vision-Ing21-Projekt-Dokumentation – Materialien für den Unterricht

Inhaltsverzeichnis

1. Allgemeine Informationen
2. Zusammenfassung
3. Projektdokumentation
 - 3.1. Zielstellung
 - 3.2. Beschreibung der Projektarbeit
 - 3.2.1 Theoretische Grundlagen
 - 3.2.2. Projektverlauf
 - 3.2.3. Konstruktion des Windkanals
 - 3.2.4. Messgrößen
 - 3.2.5. Experimente
 - 3.2.5.1. Untersuchung der Strömungsqualität
 - 3.2.5.2. Experimente am Flügelprofil
 - 3.2.5.3. Experimente an verschiedenen Objekten
 - 3.2.5.4. Visualisierung der Strömung
 - 3.3. Aufgabenverteilung / Kommunikation
4. Zusammenarbeit mit dem Partner-Unternehmen / Praxisbezug
5. Sonstiges: Anlagen, Protokolle, andere Unterlagen
6. Quellen und Recherchen
7. Datum und Unterschrift



Thema: Bau eines Windkanals

1. Allgemeine Informationen

Thema:	Konstruktion eines Windkanals
Bearbeitet von Jahrgangsstufe:	11
Schulart:	Gymnasium
Bearbeitet im Fach:	Physik
Themengebiet:	Strömungsmechanik
Benötigte Vorkenntnisse:	Grundgesetze der Mechanik, Druck
Erforderliche technische Ausstattung:	Starkstromanschluss (16A)
Wurden Experimente durchgeführt?	ja
Wurde ein Modell / Objekt gebaut?	ja

Thema: Bau eines Windkanals

2. Zusammenfassung

Das Projekt fand im Rahmen eines P-Seminars statt. Beteiligt waren 17 Schüler und Schülerinnen der 11. Jahrgangsstufe. Das Thema „Bau eines Windkanals“ entwickelte sich aus der Fortbildungsinitiative „Technik erleben“, die für Physiklehrer an bayerischen Gymnasien angeboten wird.

Neben der Konstruktion und dem Bau eines geschlossenen Windkanals wurden zahlreiche Experimente durchgeführt. Im Vordergrund standen dabei Untersuchungen und Visualisierungen an einem Flügelprofil. Wesentlicher Aspekt war dabei die Erklärung und die Anwendung des aerodynamischen Auftriebs.

Außerdem wurde neben der Untersuchung der Qualität der Strömung eine Messreihe zur Bestimmung von Widerstandsbeiwerten durchgeführt.

Materiell und personell unterstützt wurde das Projekt durch unser Partnerunternehmen PERI, das in der Vergangenheit schon viele Projekte am NKG gefordert hat.

3. Projektdokumentation

3.1. Zielstellung

Das Phänomen, dass Gegenstände fliegen können deren Dichte größer ist als die der Luft, ist faszinierend und ist Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Untersuchungen.

Ziel des Projekts ist es, das Verhalten von Körpern in einer Luftströmung zu untersuchen und damit den aerodynamischen Auftrieb zu ergründen. Um diese Fragen wissenschaftlich untersuchen zu können, muss zuerst ein geeigneter Windkanal samt Messvorrichtungen konstruiert werden.

Im Lehrplan ist der aerodynamische Auftrieb in der 10. Jahrgangsstufe im Fach Physik am technologisch-naturwissenschaftlichen Gymnasium als eine mögliche Vertiefung zu finden.

3.2. Beschreibung der Projektarbeit

3.2.1. Theoretische Grundlagen

Zur Klärung der Frage, wie das Fliegen funktioniert, müssen die Kräfte untersucht werden, die bei der Umströmung eines Gegenstandes entstehen. In unserer Anlage wird Luft als Fluid benutzt.

Prinzipiell übt die Strömung zwei Kräfte aus: den aerodynamische Auftrieb senkrecht zur Strömungsrichtung und den Luftwiderstand in Strömungsrichtung.

Der Auftrieb wird mit Hilfe des Gesetzes von Bernoulli erklärt:

$$p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = \text{konst.}$$

Es besagt, dass an Stellen, an denen die Geschwindigkeit groß ist, der Druck klein sein muss und umgekehrt. Letztlich stellt diese Gleichung eine Form der Energieerhaltung dar.

Zur Herleitung des Gesetzes wird die Kontinuitätsgleichung benutzt:

$$A \cdot v = \text{konst.}$$

Hier wird die Strömung in einem Rohr der variablen Querschnittsfläche A beschrieben. An „engen“ Stellen ist A klein und die entsprechende Strömungsgeschwindigkeit groß. D.h. bei einer Verjüngung des Rohrquerschnitts wird die Luft beschleunigt. Nach dem Gesetz von Newton kann dies nur durch eine Kraft verursacht werden. Diese Kraft lässt sich mit

Thema: Bau eines Windkanals

Druckunterschieden erklären, folglich muss an „engen“ Stellen ein geringerer Druck herrschen.

Eine ausführliche Herleitung der Gleichungen findet man in der Handreichung „Technik erleben“ (siehe Quelle)

Der Veranschaulichung dient das Experiment am Venturirohr, bei dem an drei verschiedenen Querschnittsflächen (Abb. 1) die Drücke abgegriffen werde.

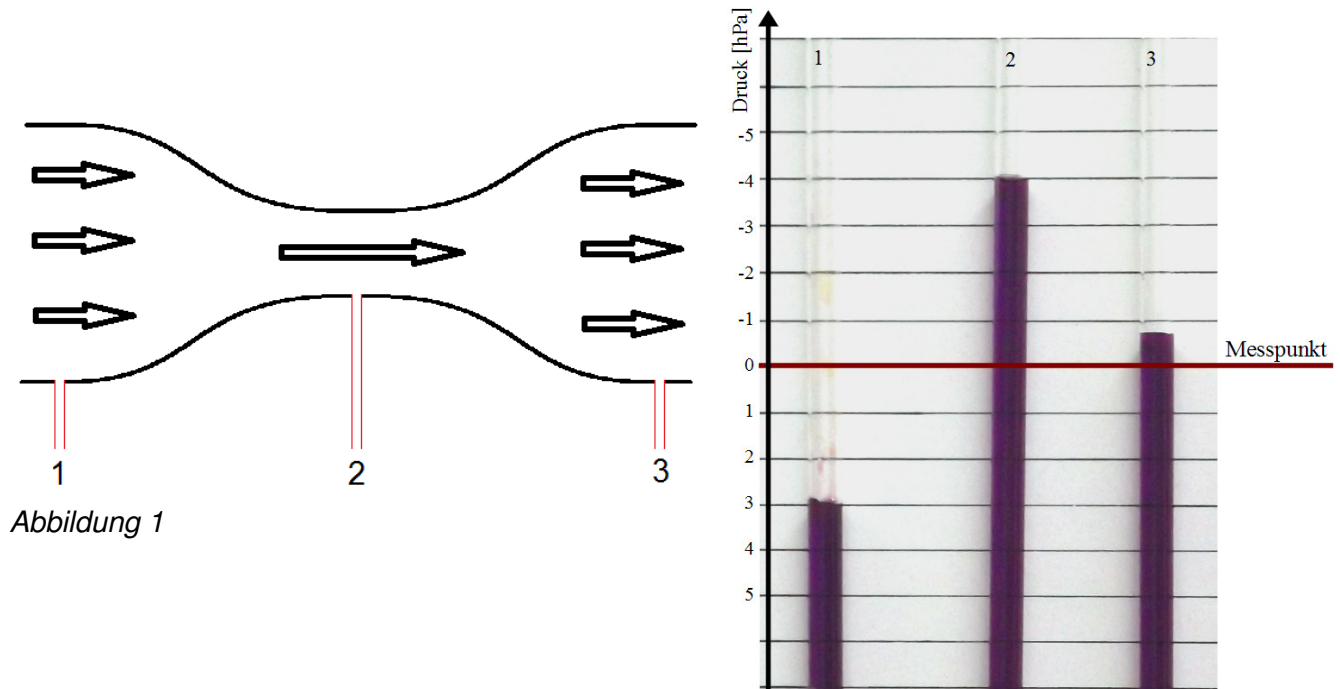


Abbildung 2

In Abb. 2 sind die Drücke dargestellt, wobei eine hohe Wassersäule einen Unterdruck gegenüber dem Umgebungsdruck bedeutet.

Vor der Verengung (Messpunkt 1) staut sich die Luft auf und erzeugt einen Überdruck. Aufgrund der hohen Geschwindigkeit an Messpunkt 2 nimmt nach Bernoulli der Druck ab. Nach der Verengung verlangsamt sich die Luft und der Druck nimmt wieder zu.

3.2.2. Projektverlauf

Im Folgenden wird das Projekt im zeitlichen Ablauf beschrieben:

Das Projekt wurde im Rahmen eines P-Seminars im Fach Physik durchgeführt. Im September und Oktober 2011 wurden die physikalischen Grundlagen in Form eines Unterrichts erarbeitet.

Im Anschluss daran wurde mit der Projektplanung begonnen.

Das Projekt gliedert sich in zwei Teilbereiche: Konstruktion eines Windkanals und Planung von Experimenten im Windkanal. Die Schüler wurden dazu in Gruppen aufgeteilt, die zu den einzelnen Fragestellungen nach Lösungen recherchieren sollten bzw. eigene Ideenskizzen fertigen sollten.

Von Oktober bis Dezember 2011 fanden dann mehrere gemeinsame Sitzungen mit Ingenieuren des Partners PERI GmbH Schalung Gerüst Engineering aus Weißenhorn statt, teilweise am Gymnasium, teilweise im Partnerunternehmen. Bei diesen Treffen wurden schrittweise aus den Ideenskizzen Konstruktionspläne. Die Protokolle der Sitzungen befinden sich in der Anlage.

Thema: Bau eines Windkanals

Dabei wurde in einem ersten Schritt ein Projektplan erstellt (siehe Anlage), der die Meilensteine definiert und den zeitlichen Verlauf der einzelnen Arbeitsschritte veranschaulicht. Hierbei werden die verantwortlichen Schüler genannt.

Im Folgenden wurden die Spezifikationen des Windkanals erörtert. Dabei wurde von den Ingenieuren immer wieder darauf hingewiesen, nach effizienten Lösungen zu suchen. So wurde bei der Entwicklung des Windkanals auf ein Röhrensystem aus dem Lüftungsbereich zurückgegriffen.

Zur Diskussion standen ein linearer (offener) oder ein kreisförmiger (geschlossener) Windkanal. Letztlich wurde der geschlossene gewählt, weil sich hier größere Windgeschwindigkeiten erzielen lassen und er sich von den geometrischen Abmessungen kompakter konstruieren lässt.

Eine weitere langwierige Entscheidung betraf die Art der Visualisierung der Strömung. Durch eine geeignete Methode sollte die Umströmung der Versuchsobjekte veranschaulicht werden. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um einen Nebel, bzw. Rauch, der vor dem Objekt austritt. Erst nach einer Reihe von Vorversuch wurde festgelegt, dass mit Hilfe einer Nebelmaschine (siehe 3.2.5.4.) und einer oben angebrachten Beleuchtung die Strömung visualisiert wird.

Von Dezember bis Februar wurden der Windkanal und die Materialien für die Experimente im Werk der Fa. PERI gefertigt. Öfters waren kleine Schülergruppen dabei, um die einzelnen Produktionsschritte zu beobachten, bzw. selbst mit Hand anzulegen.

Ende Februar 2012 wurde der fertige Windkanal an die Schule geliefert. Dann erfolgten bis zum Mai 2012 die geplanten Experimente und ihre Auswertung.

3.2.3. Konstruktion des Windkanals

Der Windkanal besteht im Wesentlichen aus einem geschlossenen Röhrensystem aus Wickelfalzrohren (300 mm Durchmesser), in dem die Luft durch einen Ventilator zirkuliert. Eingesetzt wird der Rohrventilator VRR4935 mit einem Durchmesser von 355 mm. Bei einer elektrischen Leistungsaufnahme von 0,89 kW befördert er ca. 5000 m³/h. Über einen Frequenzwandler lassen sich seine Leistung und damit die Windgeschwindigkeit regeln. Seinen ursprünglichen Einsatz findet er im Lüftungsbereich der Gastronomie.

Die Messstrecke ist ein offener Bereich im Rohrsystem von ca. 40 cm Länge. Hier können die Versuchsobjekte auf einem Stativ in der Strömung positioniert werden. Die Messstrecke lässt sich mit Hilfe zweier verschiebbarer Plexiglaszylinder verschließen. Durch Anbringen eines komprimierbaren Bands an der Nahtstelle kann die Luftströmung abgedichtet werden. Diese Vorrichtung ist für Versuche bei vermindertem Umgebungsdruck entwickelt worden. Um diese Unterdrücke zu realisieren ist an einer Stelle im Rohrsystem ein Anschlussstutzen für einen Staubsauger angebracht. Dieser evakuiert die Luft im System, bis sich durch die Undichtigkeiten ein Gleichgewicht bei geringerem Druck einstellt.

Vor und nach der Messstrecke sind Gleichrichter im Rohrsystem eingebaut. Dabei handelt es sich um längere Gitter, die sich über die ganze Querschnittsfläche erstrecken. Das Gitter vor dem Objekt macht die Strömung laminar, d.h. es entfernt Luftwirbel. Das zweite Gitter dient vor allem dem Schutz des Ventilators vor eventuell eingesaugten Objekten.

Abbildung 3 zeigt den gesamten Aufbau, Abbildung 4 die Gleichrichter.

Thema: Bau eines Windkanals



Abbildung 3



Abbildung 4

3.2.4. Messgrößen

Zur Messung des Auftriebs und des Widerstands (Abb. 5) steht das Messobjekt auf zwei Waagen (im Schema grün gekennzeichnet). Hierbei verteilt sich das Gewicht des Objekts auf zwei Waagen (zwei Auflagepunkte: gelb). Wenn hier eine Kraft horizontal auf den Körper wirkt (rot), dann wirken durch das Drehmoment zwei verschiedene Kräfte auf die beiden Waagen. Wirkt eine vertikale Kraft auf den Körper, ändern sich die Anzeigewerte der Waagen synchron.

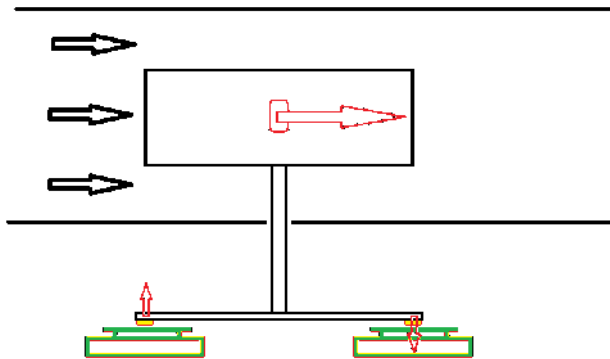


Abbildung 5

==> Summe der Waagen	ergibt	vertikale Kraft (Auftrieb)
==> Differenz der Waagen	ergibt	horizontale Kraft (Widerstand)

Die Drücke an den verschiedenen Positionen eines Flügelquerschnitts werden gleichzeitig gemessen und visualisiert.

Die Messung der verschiedenen Oberflächendrücke erfolgt über Bohrungen am Flügelprofil, die seitlich über Querbohrungen abgegriffen und über Pneumatik-Schläuche zum Messgerät weitergeleitet werden (Abb. 6). Die Messung der Drücke erfolgt über eine Wassersäule durch einen Vergleich mit dem Umgebungsdruck. Herrscht an einer Messposition ein relativer Unterdruck, so drückt der Umgebungsdruck die Flüssigkeitssäule nach oben. Entsprechend werden relative Überdrücke durch tiefere Wasserstände angezeigt. Es werden insgesamt bis zu elf Drücke parallel gemessen (Abb. 7).

Thema: Bau eines Windkanals



Abbildung 6:
Flügelprofil im Windkanal

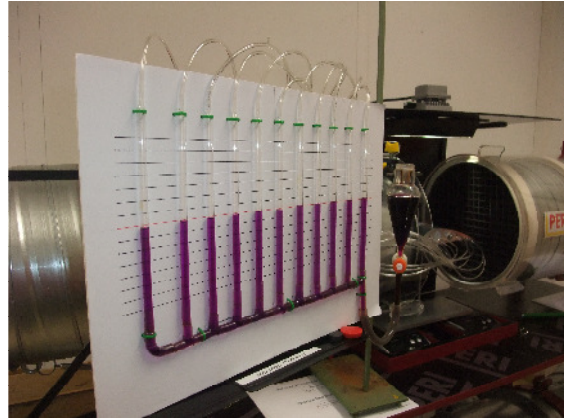


Abbildung 7:
Druckmessgerät mit Wassersäulen

Zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit stehen zwei Geräte zur Verfügung. Ein Staurohr steht mit seiner Öffnung senkrecht in der Strömung. Dieser Druck wird auf ein Wasserreservoir geleitet und verschiebt dort die Wassersäule nach oben. Die Anzeige erfolgt direkt in der Einheit der Geschwindigkeit (Abb. 8)
 Nachteilig ist, dass das Staurohr absolut senkrecht zur Strömung stehen muss, da sonst bereits Komponenten des aerodynamischen Auftriebs mit gemessen werden.

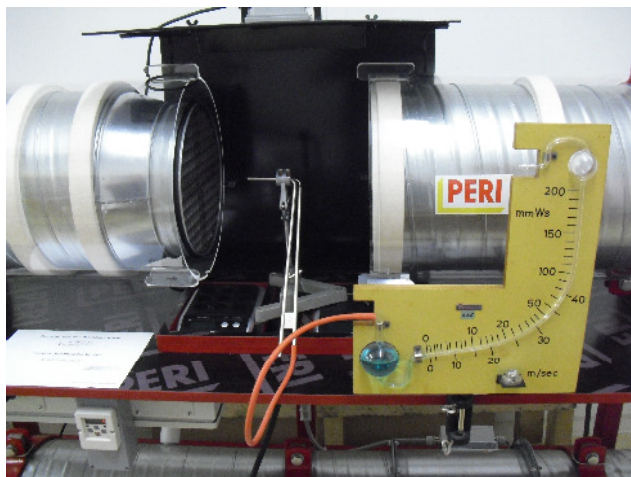


Abbildung 8



Abbildung 9

Alternativ lässt sich die Windgeschwindigkeit sehr komfortabel mit folgendem Gerät messen (Abb. 9). Hier wird ein kleines Windrad angetrieben. Die dabei erzeugte elektrische Spannung wird intern in Windgeschwindigkeit umgewandelt und angezeigt. Da hier die maximale Geschwindigkeit gespeichert wird, ist das Gerät unempfindlich gegen gelegentliche „Schrägstellungen“.

3.2.5. Experimente

Die Experimente lassen sich in zwei Rubriken gliedern: Zuerst werden Untersuchungen durchgeführt, die die Qualität der Strömung im Windkanal untersucht und die der Justierung

Thema: Bau eines Windkanals

der Messgeräte dient. Erst danach erfolgen die eigentlichen Experimente mit den Versuchsobjekten. Hierbei stellen die Experimente am Flügelprofil den Hauptteil dar.

3.2.5.1. Untersuchung der Strömungsqualität

Zuerst wird die Verteilung der Windgeschwindigkeit längs des Querschnitts der Messstrecke untersucht. Ziel dabei ist es, einen Bereich mit nahezu konstanter Windgeschwindigkeit zu finden, in dem dann die Experimente stattfinden müssen.

Dabei werden alle 5 cm, ausgehend von der Mitte, die Windgeschwindigkeiten gemessen (Abb. 10). Diese Messung erfolgt bei drei verschiedenen Einstellungen der Ventilatorleistung. Die Ergebnisse werden graphisch veranschaulicht (Abb. 11) und am Windkanal angebracht, so dass folgende Gruppen auf die Ergebnisse zugreifen können.



Abbildung 10



Abbildung 11

Eine weitere Messung dient wieder als Grundlage für die folgenden Experimente. Hier wird eine Tabelle erstellt, die den Einstellungen am Frequenzregler die entsprechende Strömungsgeschwindigkeit in der Mitte der Messstrecke zuordnet.

Dabei wird das Messgerät exakt mittig von der Teststrecke mit einer Halterung ausgerichtet und fixiert, die Frequenz wird dann für Geschwindigkeiten in 2m/s-Intervallen notiert.

Das Ergebnis wird in einer Tabelle am Windkanal angebracht.

Die Messungen ergaben, dass der Luftstrom nicht konstant ist, er schwankt um $\pm 0,4$ m/s.

Die Strömungsgeschwindigkeit nimmt von der Düse aus ab, die Werte gelten für die exakte Mitte der Messstrecke.

Die Tabelle wurde sowohl für die geöffnete, als auch für die geschlossene Messstrecke durchgeführt.

Ein weiteres Kriterium der Strömung ist die Laminarität, die durch die Gleichrichter in der Versuchsanordnung hergestellt wird.

Die Messung erfolgt qualitativ mit einem an einem Stab befestigten dünnen Faden (Abb. 12). Beobachtet wird dabei die Bewegung des Fadens: je kleiner diese ist, desto geringer sind die Turbulenzen.

Thema: Bau eines Windkanals

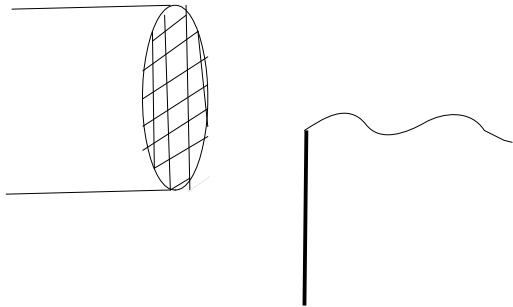


Abbildung 12

Zur genaueren Analyse wurde die Bewegung des Fadens auf einem Video aufgenommen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Strömung in der Mitte die geringsten Turbulenzen zeigt. Zum oberen Rand hin nehmen die Turbulenzen stärker zu als zum unteren Rand hin.

Die Messung des Luftwiderstands eines umströmten Objekts erfolgt über die Differenz der Anzeigen der Waagen. Da dabei die Kraft über einen Hebel (die Stativstange, an der das Objekt befestigt ist) verstärkt wird, muss der Drehpunkt des Stativs bestimmt werden. Dieser wurde experimentell bestimmt, indem mit einem Kraftmesser auf dem Angriffspunkt eine bestimmte Kraft ausgeübt wurde. Die dabei auftretenden Gewichtskräfte auf die Waagen wurden ermittelt. Mithilfe des Hebelgesetzes lässt sich aus diesen Kräften und der Kraft, die mit dem Kraftmesser ausgeübt wurde, der Drehpunkt des Stativs bestimmen. Es ergab sich mit großer Genauigkeit ein Verhältnis von 2:1 von der Länge des oberen Hebelarms zu der Länge des unteren Hebelarms.

Dieses Ergebnis wird zur Herleitung einer Formel benutzt, mit der sich die Anzeigen der Waagen direkt in Widerstandskräfte umwandeln lassen. Diese Formel wird am Windkanal für die weiteren Messungen angebracht.

3.2.5.2. Experimente am Flügelprofil

Auftrieb und Widerstand

Bei diesen Experimenten wird der Auftrieb F_A und der Widerstand F_R an einem Flügelprofil in Abhängigkeit des Anstellwinkels β und der Strömungsgeschwindigkeit v untersucht.

Dazu wurde im Partnerbetrieb ein Flügelprofil aus Aluminium (Abb. 13) mit einem CAD-Fräse-Programm (Abb. 14) gefertigt. Die Flügelform wurde zuvor mithilfe eines Simulations-Programms (siehe Quelle) entworfen, welches sich auf der DVD1 „Technik erleben“ befindet.



Abbildung 13

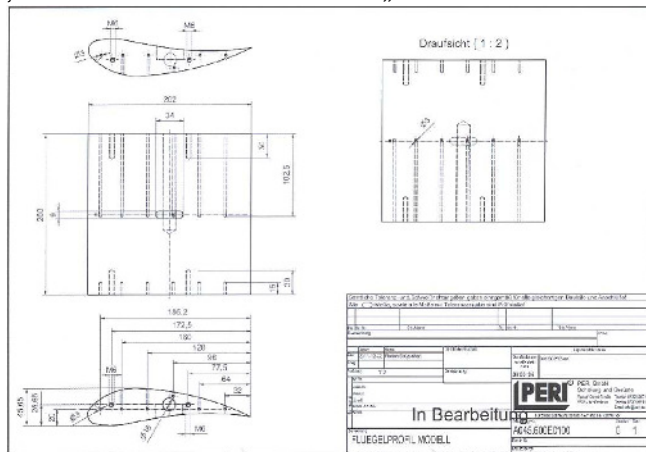


Abbildung 14

Thema: Bau eines Windkanals

In der ersten Versuchsreihe werden zunächst die Widerstands- und Auftriebskraft in Abhängigkeit des Anstellwinkels β ermittelt.

Bei gleich bleibender Geschwindigkeit v wird jeweils nur der Winkel verändert und die Werte notiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 15 dargestellt.

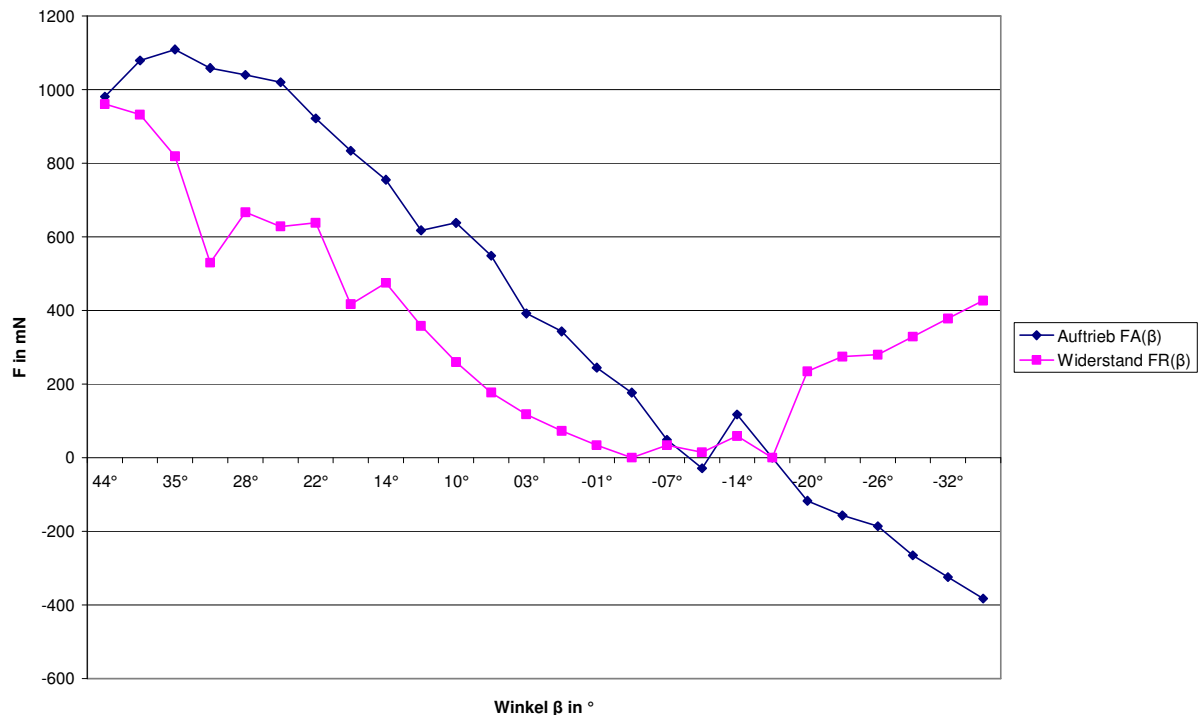


Abbildung 15

Der Auftrieb zeigt den erwarteten Verlauf. Tendenziell fällt der Graph mit abnehmenden Winkeln. Bei negativen Anstellwinkeln wird der Auftrieb sogar negativ, was einer nach unten gerichteten Kraft entspricht. Solche Anstellwinkel bzw. Profilformen findet man z.B. bei Spoilern, die die Anpressung des Fahrzeugs auf die Straße verstärken.

Bei ca. 35° Anstellung lässt sich der größte Auftrieb feststellen. Werden die Anstellungen größer, so „reißt“ die Strömung ab, d.h. es entstehen Turbulenzen am Flügel, die den Auftrieb verringern. Bei -18° Anstellung ist der Auftrieb Null.

Betrachtet man die Widerstandskraft bemerkt man, dass die Kurve zunächst von sehr hohen Werten bei einem hohen Anstellwinkel fallend verläuft. Dieser Trend endet bei ca. 0° Neigungswinkel, und steigt wieder für negative Anstellwinkel.

Die Ergebnisse zeigen, dass es keinen optimalen Anstellwinkel gibt. Für den Auftrieb wären Anstellwinkel von ca. 35° am besten, jedoch ist dort der Widerstand des Flügels sehr groß, was einen entsprechend großen Antrieb erfordern würde. In der Praxis wird durch Ausfahren von Klappen am Flügel der Anstellwinkel der jeweiligen Flugsituation angepasst.

Im Folgenden werden die Kräfte bei gleich bleibendem Winkel $\beta=30^\circ$ in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit v ermittelt (Abb. 16).

Thema: Bau eines Windkanals

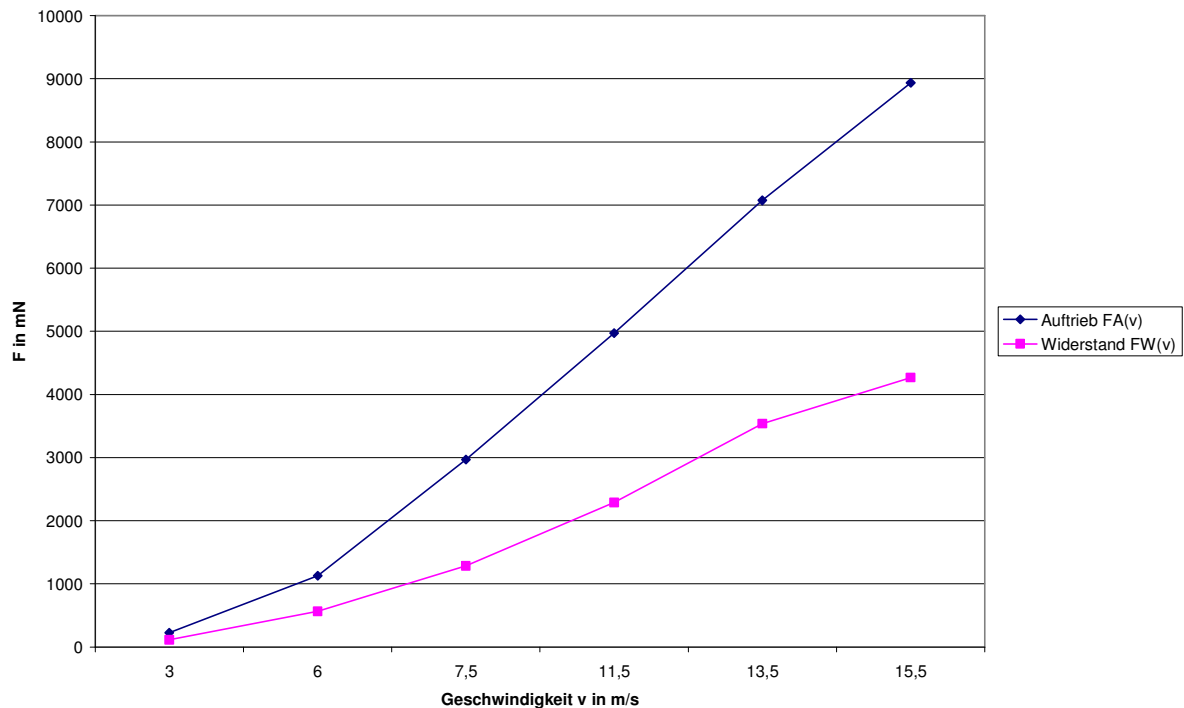


Abbildung 16

Beide Kräfte steigen mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit an. Die Auftriebskurve steigt hingegen zur Widerstandskurve deutlich steiler an. Ihr Betrag ist immer annähernd doppelt so groß wie die des Widerstandes. Auch dieser Verlauf entspricht den Erwartungen.

Messung der Oberflächendrücke am Flügelprofil

Die Oberflächendrücke werden wie in Kapitel 3.2.4. beschrieben gemessen und visualisiert. Dabei werden an elf Positionen (Abb. 17) die Drücke abgegriffen. Ziel der Messung ist es, die auftretenden Drücke am Flügelprofil in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit und des Anstellwinkels zu bestimmen.

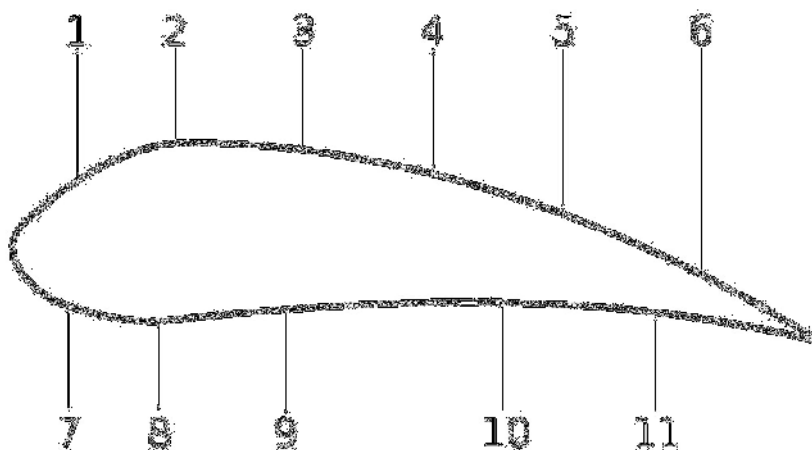


Abbildung 17

Thema: Bau eines Windkanals

1. Druck in Abhängigkeit der Geschwindigkeit

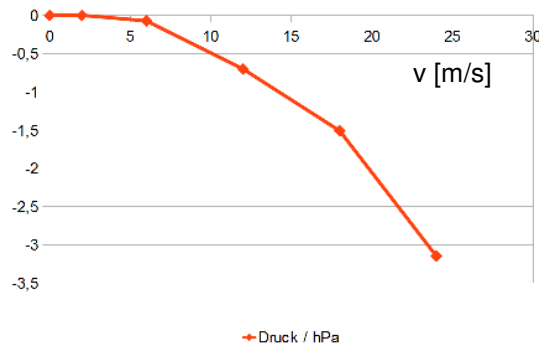


Abbildung 18:
 Druck an Messpunkt 2 bei Anstellwinkel 0°

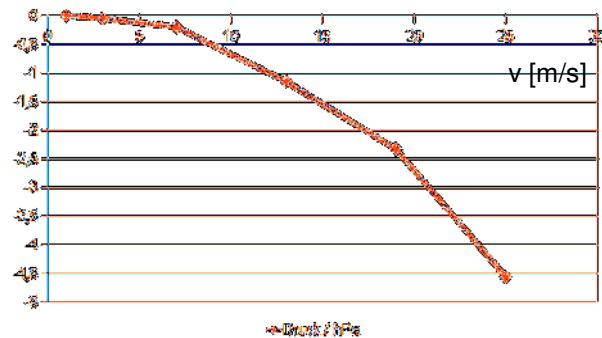


Abbildung 19:
 Druck an Messpunkt 1 bei Anstellwinkel 35°

Bei Auswertung der Druckwerte lässt sich vermuten, dass der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Druck einer quadratischen Funktion folgt. Dies entspricht dem Gesetz von Bernoulli:

$$p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = \text{const.}$$

2. Druck in Abhängigkeit des Anstellwinkels

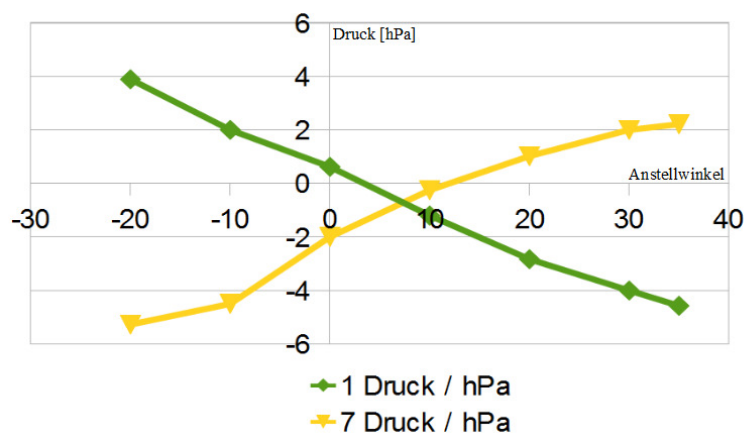


Abbildung 20:
 Druck in Abhängigkeit des Anstellwinkels an den Messpunkten 1 und 7

Der Druckpunkt, an dem der maximale Staudruck vorherrscht, wandert mit steigendem Anstellwinkel von Messpunkt 1 zu Messpunkt 7, da sich durch den veränderten Anstellwinkel auch der jeweilige Winkel verändert, mit dem die Messpunkte direkt angestrahlt werden.

Thema: Bau eines Windkanals

In Abbildung 21 sind die Oberflächendrücke der Ober- und Unterseite des Flügelprofils bei den verschiedenen Anstellwinkel und 24 m/s Windgeschwindigkeit dargestellt. Hierbei repräsentiert die "X-Achse" die Lage der Druckabnahmepunkte an Flügelober- bzw. Unterseite. Die Y-Achse zeigt den Druck relativ zur Messumgebung.

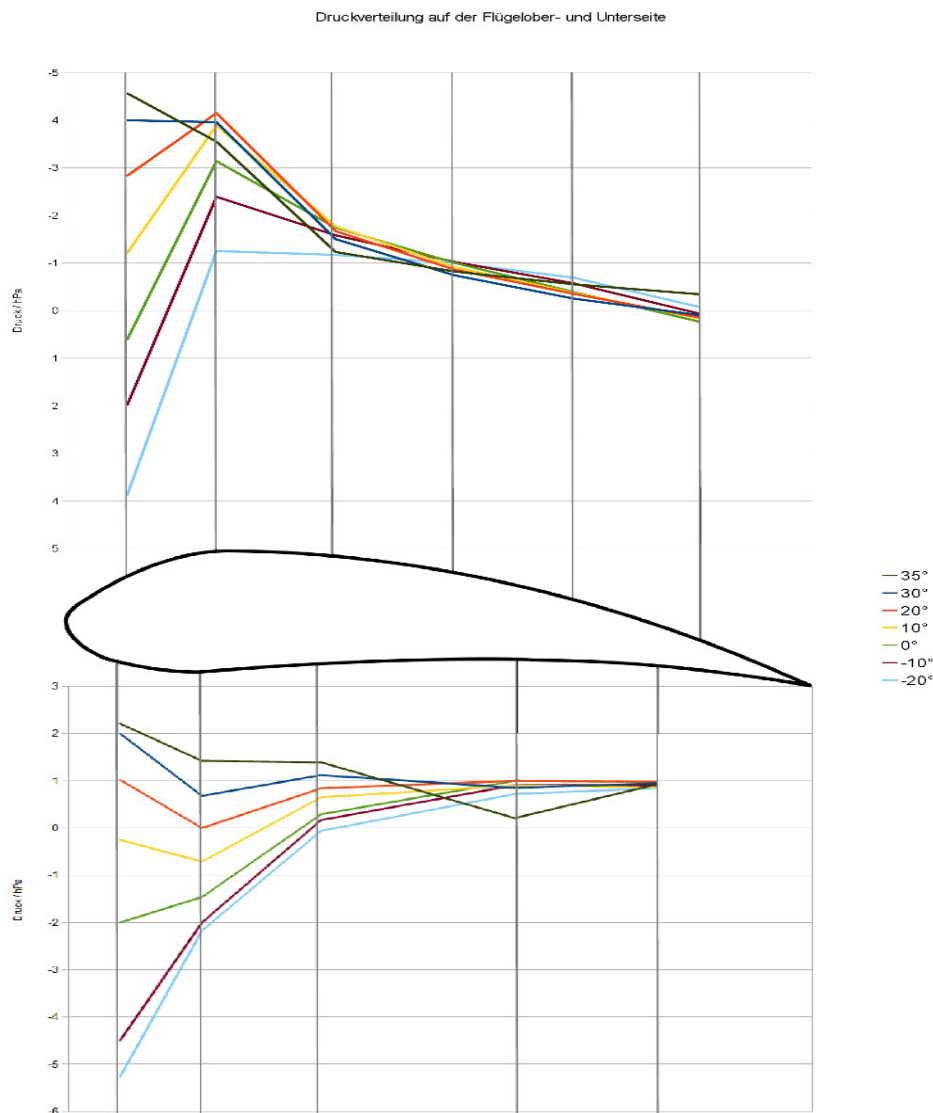


Abbildung 21

Es fällt auf, dass nur der Druck am vorderen Teil des Flügels signifikant vom Anstellwinkel beeinflusst wird, während in unseren Messungen an den hinteren Messpunkten kaum ein Zusammenhang mit dem Anstellwinkel zu sehen ist.

Die stärksten Unterdrücke auf der Oberseite bilden sich bei einem Anstellwinkel von ca. 20°. Bei höherem Anstellwinkel werden die Unterdrücke schwächer, was auf einen Strömungsabriss zwischen 20° und 30° Anstellwinkel schließen lässt.

Im unteren Diagramm fällt auf, dass im hinteren Bereich der Druck bei einem Anstellwinkel von über 20° plötzlich stark abfällt, obwohl die Staudruckkomponente steigt.

Thema: Bau eines Windkanals

Insgesamt zeigt sich, dass der maximale Auftrieb zwischen 20° und 30° entsteht und beim Strömungsabriss einbricht.

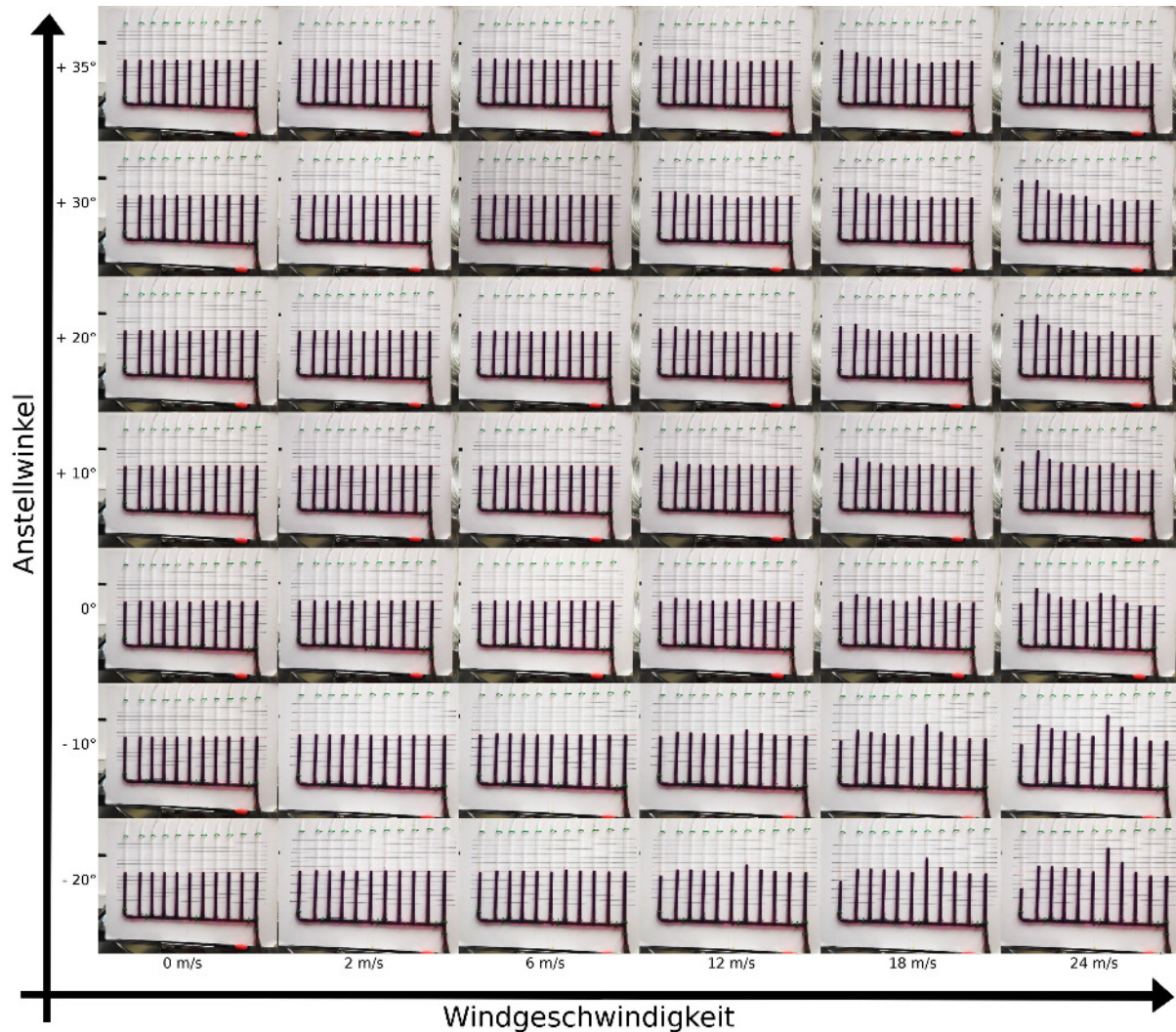


Abbildung 22

Während den Messungen wurde anstatt die Wassersäulen direkt auszumessen der jeweilige Zustand fotografiert, um die zeitaufwändige Auswertung aus dem eigentlichen Experiment heraus zu verlagern. Außerdem ermöglicht diese Vorgehensweise eine anschaulichere Auswertung. In Abbildung 22 sind die Ergebnisse der Druckmessung bei allen eingestellten Anstellwinkeln und Geschwindigkeiten in einem Diagramm zusammengestellt.

Vergleich der Messwerte mit der Simulation

Da das Flügelprofil mit Hilfe der Ergebnisse der Simulationssoftware "FoilSim_II_5a" bestimmt wurde, werden die Ergebnisse der Auftriebsmessungen mit den Ergebnissen der Simulation verglichen. Dabei fällt auf, dass die gemessenen Auftriebswerte wesentlich geringer ausfallen.

Thema: Bau eines Windkanals

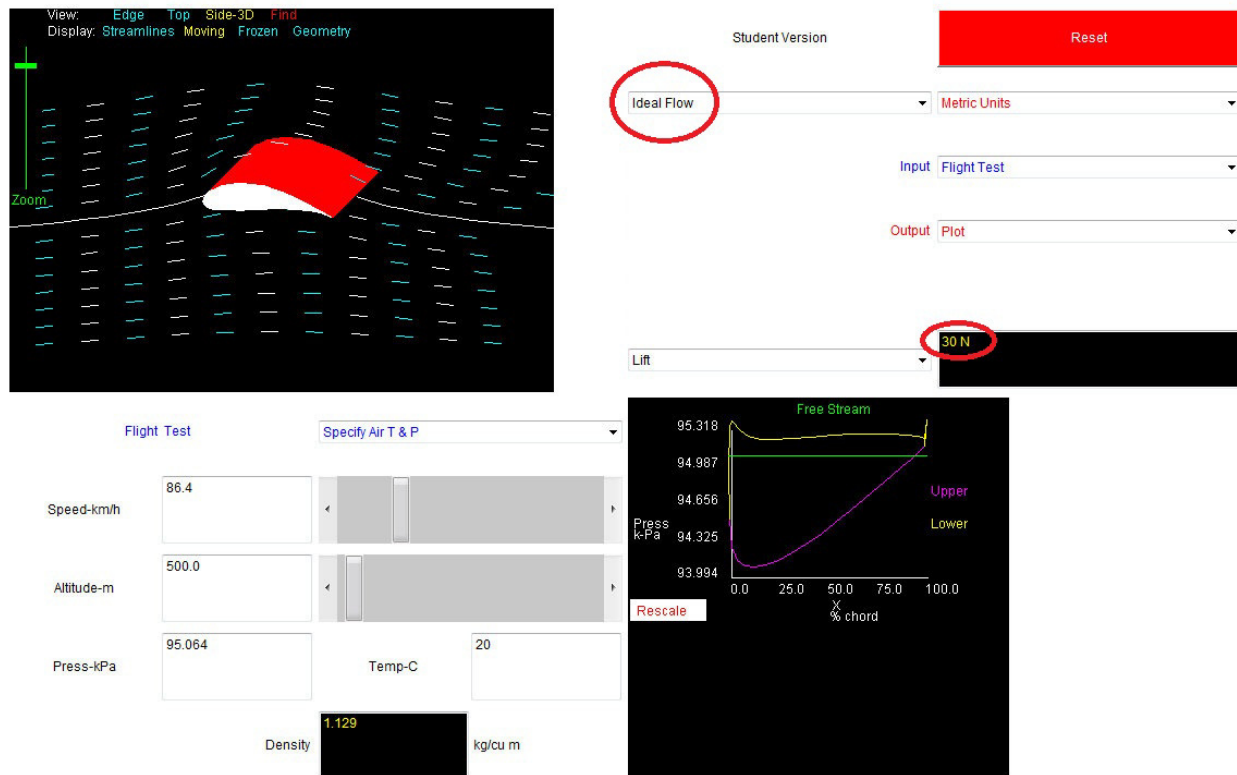


Abbildung 23

In Abbildung 23 lässt sich bei den gleichen Bedingungen wie in den Experimenten eine Auftriebskraft von ca. 30 N ablesen, im Experiment werden bei selbem Anstellwinkel jedoch nie Werte über 7 N erreicht.

Mögliche Gründe für die geringere Auftriebskraft sind die in der Simulation ideal anliegende Strömung und die Betrachtung eines unendlich langen Flügels, an dem keine Randwirbel entstehen.

In unserem Windkanal ist die Strömung nicht vollkommen laminar und das Flügelprofil ist lediglich 20 cm breit, wodurch die Randwirbel einen großen Einfluss auf den Auftrieb haben.

Um die Randwirbel zu minimieren, werden am Flügelprofil Winglets angebracht (Abb. 24). Dadurch wird zwar eine größere Auftriebskraft erreicht (Abb. 25), jedoch sind die gemessenen Werte trotzdem deutlich kleiner als die in der Simulation erzielten.

Auch bei größeren Anstellwinkeln bleibt die Differenz deutlich bestehen. Beispielsweise erreichten wir in der Simulation Auftriebswerte von bis zu 50 N, wohingegen in der Realität nie Werte von über 15 N gemessen wurden.

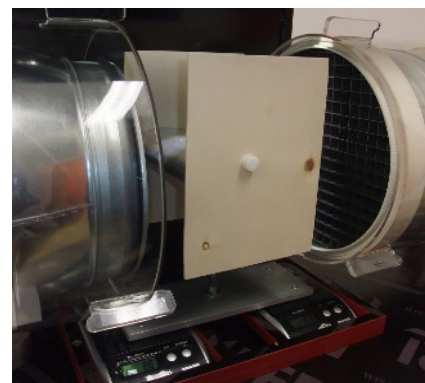


Abbildung 24

Thema: Bau eines Windkanals

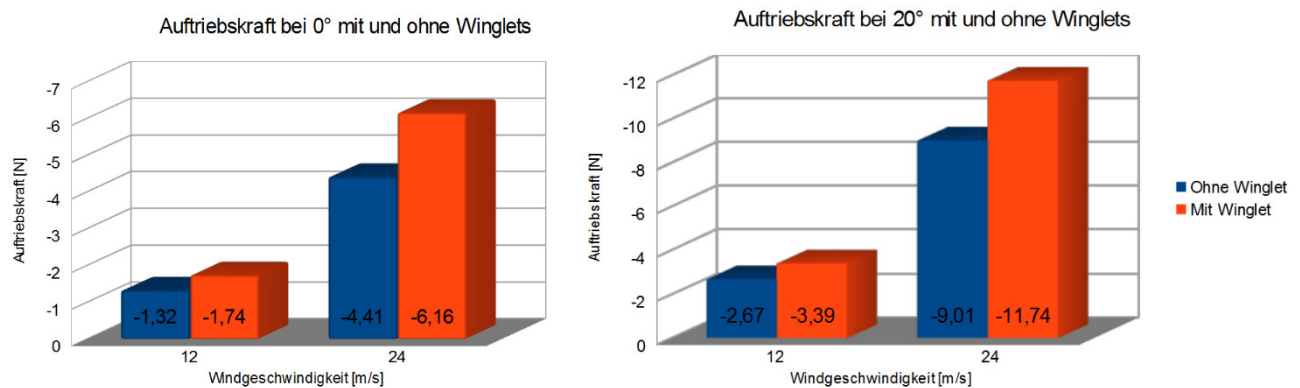


Abbildung 25

3.2.5.3. Experimente an verschiedenen Objekten

In den folgenden Experimenten werden Widerstandskräfte verschiedener geometrischer Körper und eines Modellautos im Windkanal ermittelt. Daraus werden die Strömungswiderstandskoeffizienten (c_w -Werte) abgeschätzt und mit Literaturwerten verglichen.

Der c_w -Wert ist ein Maß für die „Windschlüpfrigkeit“ eines Körpers und ist abhängig von der Form, der Oberflächenbeschaffenheit, der Strömungsgeschwindigkeit und des strömenden Mediums. Er berechnet sich folgendermaßen:

$$c_w = \frac{2 \cdot F_W}{\rho \cdot v^2 \cdot A}$$

Dabei ist $\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$ die Dichte der Luft, F_W der gemessene Widerstand, v die Strömungsgeschwindigkeit und A die Querschnittsfläche des Objekts.

Der c_w -Wert ist nur in einem bestimmten Geschwindigkeitsbereich annähernd konstant. Die Abschätzung dieses Bereichs erfolgt mit Hilfe der Reynold-Zahl Re :

$$Re = \frac{L \cdot \rho \cdot v}{\eta_{\text{Luft}}}$$

Hier ist L eine charakteristische Größe der Objekte. Die untersuchten Objekte sind alle von ähnlicher Größenordnung 0,1m. η_{Luft} beträgt 10^{-5} Pa . Die Reynoldzahl beträgt somit bereits bei $v = 5 \text{ m/s}$ 65000. Da nach einer Recherche Re zwischen 10^3 und 10^5 liegen soll, werden zur Berechnung des c_w -Werts nur kleine Windgeschwindigkeiten herangezogen.

Würfel



Gemessene Werte:	$F_W = 0,130 \text{ N}$ bei $v = 5 \text{ m/s}$ $A = 0,006 \text{ m}^2$
Berechneter c_w -Wert:	1,3
Literaturwert:	1,1

Abbildung 26

Thema: Bau eines Windkanals

Zylinder (kreisförmige Scheibe)



Gemessene Werte:	$F_W = 0,14 \text{ N}$ bei $v = 5 \text{ m/s}$ $A = 0,008 \text{ m}^2$
Berechneter c_w -Wert:	1,1
Literaturwert:	1,1 – 1,2

Abbildung 27

Kugel



Gemessene Werte:	$F_W = 0,02 \text{ N}$ bei $v = 5 \text{ m/s}$ $A = 0,01 \text{ m}^2$
Berechneter c_w -Wert:	0,12
Literaturwert:	0,09 – 0,45

Abbildung 28

Modellauto



Gemessene Werte:	$F_W = 0,07 \text{ N}$ bei $v = 5 \text{ m/s}$ $A = 0,005 \text{ m}^2$
Berechneter c_w -Wert:	0,9
Literaturwert:	0,4 (Porsche Carrera)

Abbildung 29

Die gemessenen Werte liegen qualitativ im Bereich der Literaturwerte. Größere Abweichungen sind durch Turbulenzen in der Luftströmung erklärbar. Außerdem wurden die Widerstände bei kleinen Windgeschwindigkeiten gemessen. Bei kleinen Messgrößen ist der relative Fehler auch größer.

3.2.5.4. Visualisierung der Strömung

Um die Strömung sichtbar zu machen wird mit einer Lanze ein Nebel vor dem Versuchskörper eingeblasen. Mit Hilfe von Vorversuchen entschied man sich für folgende Ausstattung: Zur Nebelerzeugung dient ein „Fire Fogger 1500“ der Firma Stairville. Dabei handelt es sich um ein Gerät, das in Discos eingesetzt wird. Es besitzt eine Nebelproduktionsrate von $560 \text{ m}^3/\text{min}$. Die Flüssigkeit, die zu Nebel zerstäubt wird, ist das Fluid „E-HD“, ebenfalls von der Firma „Stairville“.

Zur Beleuchtung der Messstrecke ist über dem Versuchsobjekt ein 10 Watt LED-Scheinwerfer eingebaut, dessen Licht durch eine schlitzförmige Blende begrenzt wird.

Thema: Bau eines Windkanals

Im Folgenden werden einige Visualisierungen abgebildet:



Abbildung 30:

Deutlich sichtbar sind die größere Nebeldichte über der Windschutzscheibe und das glatte Abströmen an der oberen Kante. Der Fahrer sitzt somit im Windschatten, während das Fahrzeug laminar umströmt wird.

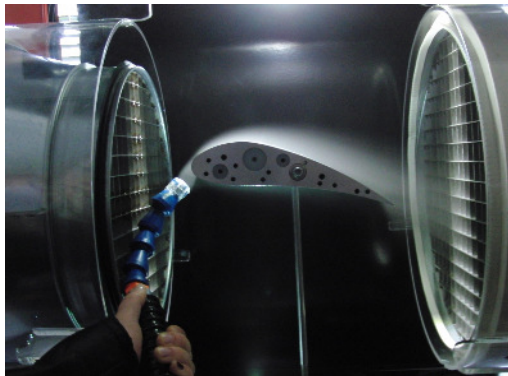


Abbildung 31:

Hier wird deutlich, dass die Strömung durch den Flügel nach unten abgelenkt wird. Der Auftrieb lässt sich somit auch als Gegenimpuls auf den Flügel nach oben erklären.



Abbildung 32:

Die Detailaufnahme zeigt deutlich, dass die Luft scharf an der Hinterkante abströmt. Das ist eine wesentliche Voraussetzung für den aerodynamischen Auftrieb. (Siehe Quelle „Wie erklärt man das Fliegen in der Schule?“)

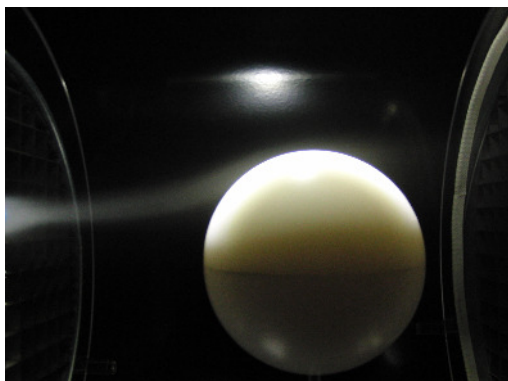


Abbildung 33:

Der dünne Nebelfaden kann annähernd als Stromlinie gesehen werden.



Thema: Bau eines Windkanals

3.3. Aufgabenverteilung/Kommunikation

Die Schüler teilten sich nach der theoretischen Einführung in Kleingruppen von 2-4 Schülern auf. Die Aufgabe der Gruppen bestand in der Recherche und der Erarbeitung von Ideenskizzen (siehe Anlage) der einzelnen Komponenten des Projekts.

Dabei wurde folgende thematische Einteilung vorgenommen:

- Entwurf des Windkanals
- Entwurf einer Visualisierung der Strömung
- Messgrößen und Messtechnik
- Steuerung des Windkanals
- Planung von Experimenten

Die zahlreichen Schnittstellen wurden in mehreren Sitzungen im Plenum besprochen. Dabei waren meist auch Mitarbeiter des Partnerunternehmens anwesend. Die Sitzungen wurden protokolliert (siehe Anlage).

Zur Durchführung der Experimente wurde ein Messplan erstellt. Dabei wurden zuerst die Experimente durchgeführt, deren Ergebnisse im weiteren Verlauf von anderen Gruppen benötigt wurden. Die Ergebnisse wurden in Tabellenform am Windkanal angebracht.

Jede Gruppe war für die sorgfältige Erledigung der Aufgaben verantwortlich. Die ausgearbeiteten Dokumentationen der einzelnen Gruppen wurden zentral von einer dreiköpfigen Schülergruppe gesammelt, die in der Phase der Erstellung der Dokumentation die Funktion der Projektleitung übernahm.

Die Zeit, die in das Projekt investiert wurde, lässt sich nur schwer angeben. Sie liegt aber bei einigen Schülern deutlich über den zwei Stunden pro Woche, die für ein P-Seminar angesetzt sind.

4. Zusammenarbeit mit dem Partner-Unternehmen / Praxisbezug

Das Partnerunternehmen engagierte sich wieder mit größtem Einsatz in materieller und vor allem in personeller Form. Die Durchführung des Projekts wurde in vielen gemeinsamen Sitzungen, sowohl an der Schule, wie im Betrieb, geplant.

Bei der Produktion der einzelnen Komponenten im Werk konnten alle Schüler mindestens einmal anwesend sein. Diese fand in der Lehrwerkstatt des Partners statt. Somit waren an der Produktion auch Auszubildende und Studenten des „Ulmer Modells“ beteiligt.

Besonders erfreulich ist, dass sich unter den Studenten auch ein ehemaliger „Vision-Ing21“-Teilnehmer befand.

In der Praxis sind Experimente im Strömungskanal für viele Anwendungen und Entwicklungen von Bedeutung. Die klassischen Anwendungen sind die Optimierung der Widerstandswerte im Fahrzeugbau oder der Luftfahrttechnik oder der Maximierung der Auftriebskräfte an Flügelprofilen (Luftfahrt, Nutzung der Windenergie).

Aber selbst bei unserem Partnerunternehmen gibt es Fragestellungen, die mit Hilfe von Strömungsexperimenten geklärt werden. So wird z.B. untersucht, welche Kräfte auf Schalungselemente im Hochbau bzw. auf die Gebäude selbst durch Windströmungen wirken.

5. Sonstiges: Anlagen, Protokolle, Arbeitsblätter, andere Unterlagen

Als Anlagen werden die Sitzungsprotokolle (als Word-Dokumente bzw. pdf-Dateien), der Projektplan, die Konstruktionspläne als pdf-Dateien, die Ideenskizzen und die Unterschriften beigelegt.



Thema: Bau eines Windkanals

6. Quellen und Recherchen

Recherchen zum aerodynamischen Auftrieb:

- Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus, Technik erleben, München, 2007, Seiten 31-37
- Wodzinski Rita, Wie erklärt man das Fliegen in der Schule?, Technik erleben DVD1 „Erklärung_des_Fliegens“

Recherche zu Windkanälen:

- <http://de.wikipedia.org/wiki/Windkanal>
- Dr.-Ing. Klaus Hufnagel, Windkanal, <http://www.sla.tu-darmstadt.de/windkanal/indx.de.jsp>, letzte Änderung 21. April 2012
- Uwe Schönlebe, Windkanal Dresden-Klotzsche, <http://www.wkk-dd.de/>

Bezug des Rohrsystems:

- [http:// www.der-luftshop.de/](http://www.der-luftshop.de/)

Berechnung des Flügelprofils:

- Simulationssoftware FoilSim_II_1.5a, Technik erleben DVD1

Berechnung der c_w -Werte:

- <http://de.wikipedia.org/wiki/CW-Wert> letzte Änderung 31.März 2012-05-21
- Martin Abel & Andreas Büscher, Laborversuche zur Physik I, Versuche zur Strömungslehre, <http://ftp.first-tale.de/Uni/SS08/Labor%201/Str%C3%B6mungsversuche/tex/Versuch4.pdf> Seiten 2 und 7, letzte Änderung 19.05.2008



Thema: Bau eines Windkanals

7. Datum und Unterschrift

- Hier unterschreiben alle an der Erstellung des Dokuments beteiligten Schülerinnen und Schüler.
- Bitte drucken Sie diese Unterschriftenliste einmal aus und schicken die unterschriebene Liste dem Projektbüro per Post, Fax oder als Scan!

Datum

Unterschrift(en):

Für die sachliche Richtigkeit:

Unterschrift des Lehrers