

[REDACTED]

praktische Physik anhand der Bernoulli-Gleichung



Facharbeit

Marco Strootmann
Nordstraße 21a
48496 Hopsten

Abgabetermin: 15. März 2004

Fürstenberg-Gymnasium Recke
Jahrgangsstufe 12
Schuljahr 2003/ 2004
2. Halbjahr
Physik Leistungskurs
Fachlehrer: Herr Bergmann





I. Inhaltsverzeichnis

I. Inhaltsverzeichnis	Seite 2
II. Einleitung	Seite 3
III. Wer war Bernoulli?	Seite 4
IV. Wie fliegt ein Flugzeug?	Seite 5-8
V. Wie wird ein Flugzeug gesteuert?	Seite 9-10
VI. Quellenverzeichnis	Seite 11-12
VII. Anhang	
VII.I. Versuche:	Seite 13-16
VII.I.I. Messung der Windgeschwindigkeiten	
VII.I.II. Messung von Überdruck und Unterdruck am Tragflächenmodell	
VII.I.III. Messung von Auf- und Abtrieb an der Tragfläche	
VII.II. Quellenauszüge laut Quellenverzeichnis	Seite 16-37
VIII. Erklärung	Seite 38



II. Einleitung

Der Traum vom Fliegen begeisterte die Menschen schon immer. Bereits „im 15. Jahrhundert machte sich Leonardo da Vinci daran, das erste Flugzeug zu erfinden.“ [1] Doch „die wichtigste Frage, die gelöst werden musste, war: Wie bekommt man eigentlich ein Flugzeug in die Luft?“ [1]

Erst im Jahre 1914 startete das erste Passagierflugzeug in Detroit. [1] „Am 6. April 1926 starteten auch in Deutschland planmäßige Flüge bei der "Deutsche Luft Hansa AG", die später "Lufthansa" heißen wird. Ab 1932 fliegt die Junkers 52, genannt "Tante Ju" für die Lufthansa.“ [1]

Heutzutage wird der Luftraum so stark genutzt wie nie zuvor. „Mit jährlichen Wachstumszahlen von 5% - 7% ist der Luftverkehr der am schnellst wachsende Verkehrssektor. Experten der Luftsicherung erwarten bis zum Jahr 2010 eine Verdopplung des Flugaufkommens auf 3 Mrd. Passagiere weltweit [...]. Schon derzeit gehört der Luftraum über Deutschland zu den verkehrsreichsten der Welt, auf dessen Luftstrassen und Flughäfen sich täglich mehr als 8.000 Flugzeuge bewegen.“ [2]

In dieser Facharbeit werden einige Bereiche der Flugphysik behandelt. Es werden unter anderem die häufig gestellten Fragen beantwortet, warum ein Flugzeug fliegt oder auch wie ein Flugzeug gesteuert wird.

Die Aussagen dieser Facharbeit beruhen teilweise auf eigens durchgeführte Versuche (s. Anhang), aber auch auf andere Quellen (s. Quellenverzeichnis). Sie spiegeln die Erkenntnisse des Wissenschaftlers Daniel Bernoulli wieder, der sich damals mit diesem Themenbereich beschäftigte.



III. Wer war Bernoulli?

Der Schweizer Wissenschaftler Daniel Bernoulli wurde am 9. Februar 1700 in Groningen (Niederlanden) geboren. [3] „Er war der Sohn von Johann Bernoulli und der Neffe von Jakob Bernoulli, die beide wichtige Beiträge zur frühen Entwicklung der Infinitesimalrechnung geliefert hatten.“ [4] „Bereits im Alter von 13 Jahren studierte er Philosophie und Logik an der Universität Basel. 1716 machte er dort seinen Magister“. [5]

1721 erwarb Bernoulli im Alter von 21 Jahren einen medizinischen Titel und wurde vier Jahre später Professor für Mathematik an der Akademie der Wissenschaften in Sankt Petersburg. [4] Des Weiteren befasste er sich später mit experimenteller Physik, Anatomie und Botanik an den Universitäten von Groningen in den Niederlanden und Basel in der Schweiz. [5]

„Bernoulli studierte die Strömung von Flüssigkeiten und formulierte das so genannte Bernoulli-Prinzip.“ [5]

Zur damaligen Zeit gewann Bernoulli allerdings keinen großen Anklang. [5]

Er starb am 17. März 1782 als Professor der Physik in Basel. [3, 4]

„Daniel Bernoulli formulierte folgende hydrodynamische Grundgleichung für stationäre, reibungsfreie, inkompressible Flüssigkeiten und Gase [...] (ohne Berücksichtigung der Schwerkraft)“ [4]:

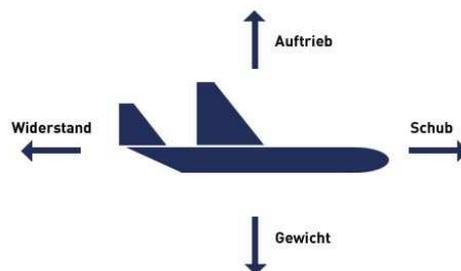
p	+	$\frac{1}{2} \rho u^2$	=	p_0
<i>statischer Druck</i>	+	<i>Staudruck</i>	=	<i>Gesamtdruck</i>



IV. Wie fliegt ein Flugzeug?

Es gibt im wesentlichen vier Kräfte, die auf ein Flugzeug wirken: „Der Auftrieb hebt es in die Luft, die Schwerkraft drückt es nach unten, hervorgerufen durch die Reibung der Luft drückt es nach rückwärts, und der Schub [(gewöhnlich erzeugt durch Propeller oder Düsen) [6]] schiebt oder zieht das Flugzeug nach vorwärts.“ [7] So ergibt sich folgendes Schema [Fig. 1]:

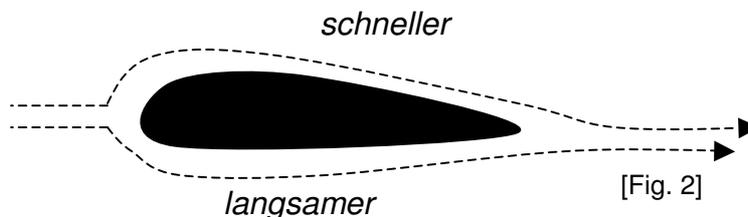
Damit ein Flugzeug kann fliegen braucht es natürlich „ihre Form und vor allem leichte Neigung nach oben sorgen für den Auftrieb.“ Der Auftrieb „muss mindestens so groß sein



fliegen Flügel. ihre oben [8]

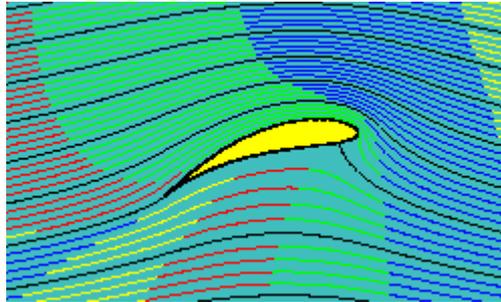
Gewichtskraft, mit der die Masse jedes Objektes zur Erde gezogen wird.“ [6] Ansonsten würde es nicht in die Höhe steigen.

„Die Luft fließt nach oben um den Flügel schneller als unten.“ [9] Dies liegt an der besonderen Form der Flügel und ihrer leichten Neigung nach oben. [9] Entsprechend dem sogenannten *Bernoulli-Effekt* führt die höhere Geschwindigkeit zu einem geringeren Druck oberhalb des Flügels. Dieser wird dann sozusagen nach oben gesaugt. Auf diese Weise entsteht der Auftrieb, der die Flugzeuge in der Luft hält.“ [9]



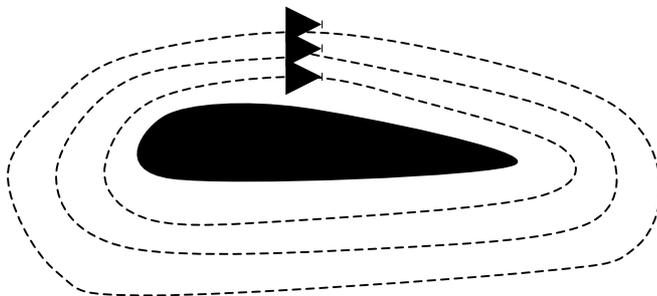


Die Geschwindigkeitsunterschiede können durch folgende Darstellung veranschaulicht werden:



[Fig. 3]

Außerdem ist die Zirkulationsströmung um den Flügel zu beachten. „Diese zirkuliert um den Flügel herum, wobei sie an der Flügeloberfläche schneller strömt als unten - nach der Formel von Bernoulli entsteht also wieder Auftrieb und das Flugzeug fliegt.“ [10] Bei höheren Geschwindigkeiten bildet sich ein Wirbel um den ganzen Flügel herum [10], wie in folgender Grafik:



[Fig 4]

Die Strömungen aus [Fig. 2] und [Fig. 4] zeigen, dass oberhalb des Flügels die Luft schneller strömt und unterhalb des Flügels die Geschwindigkeit sinkt. [10] „Nach Bernoulli entsteht durch die verschiedenen Geschwindigkeiten ein Druckunterschied, der wiederum den Auftrieb verursacht.“ [10]

Werden die Anstellwinkel der Flügel verändert hat dies Auswirkungen auf den Auftrieb, da sich die Strömungsverhältnisse verändern. [11]

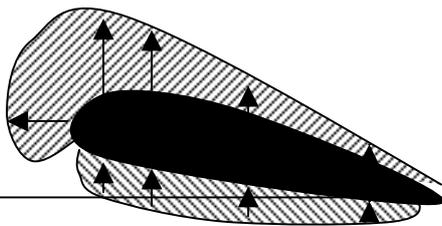


„Dreht man einen typischen Flügel so, dass seine vordere Kante weiter nach oben zeigt, nimmt der Auftrieb zu. Die Angriffsfläche des Flügels ist größer, die Luft strömt noch schneller über die Oberseite, der Unterdruck steigt und die Zirkulationsströmung wird schneller - das Flugzeug gewinnt an Höhe.“
[11]

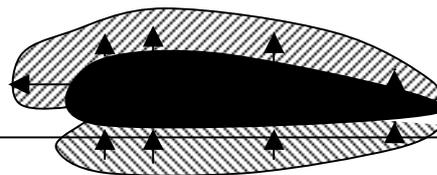
Der Versuch VII.I.II (s. Anhang) misst den Überdruck bzw. Unterdruck am Tragflächenmodell in Abhängigkeit des Anstellwinkels.

Aus den einzelnen Messreihen ergeben sich folgende Schemen:

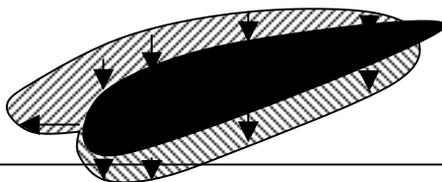
1) Anstellwinkel: +20°



2) Anstellwinkel 0°



3) Anstellwinkel: -20°



In den Schemen ist klar zu erkennen, dass die Größe des Auf- oder Abtriebs abhängig von dem Steigungs- bzw. Neigungswinkel, dem so genannten Anstellwinkel ist. Andere Versuche belegen außerdem, dass neben den Winkeln die Luftgeschwindigkeit genauso dazu beiträgt, wie groß der Auf- oder Abtrieb ist.

„Ohne Luft kann es [jedoch] keinen Auftrieb an einem Flugzeugflügel geben. Weil mit zunehmender Höhe die Luft immer dünner wird, schwinden dort die Auftriebskräfte. Das ist der Grund, warum Flugzeuge nur bis zu einer begrenzten Höhe aufsteigen können. Ein Flugzeug würde im Vakuum trotz laufender Motoren einfach nach unten fallen.“ [6]

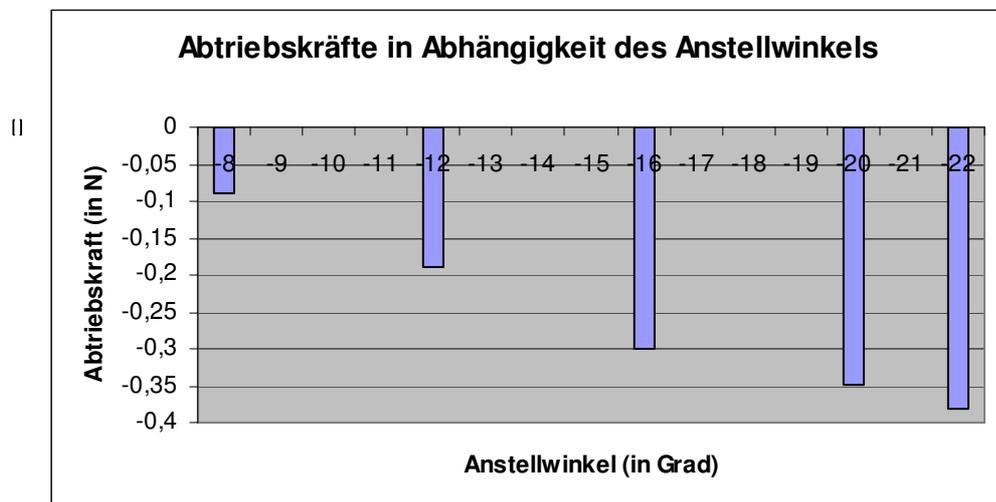
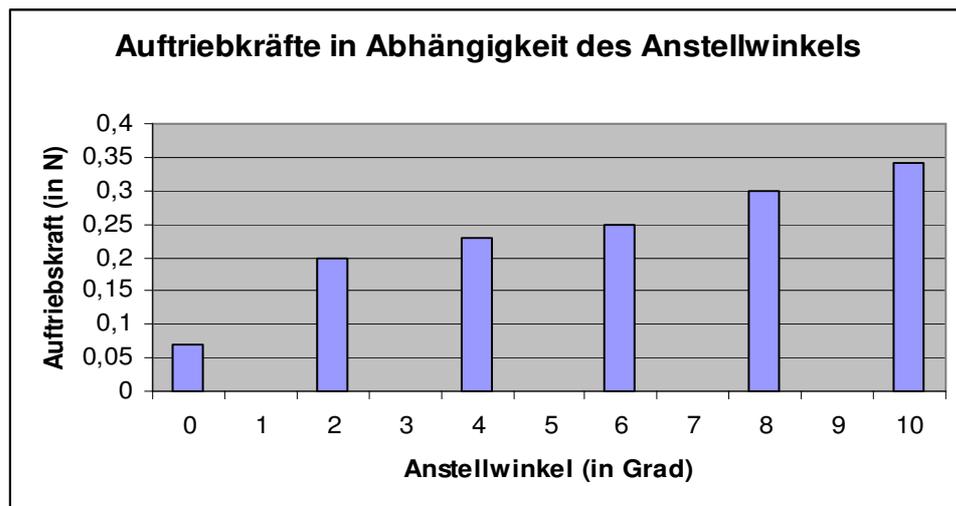


Wie groß die Auf- und Abtriebskräfte sind wird im Versuch VII.I.III. (s. Anhang) gemessen.

Genau wie in Versuch VII.I.II. (s. Anhang) wird auch hier deutlich, dass die Auf- bzw. Abtriebskräfte von dem Steigungs- bzw. Neigungswinkel und der Windgeschwindigkeit abhängig sind.

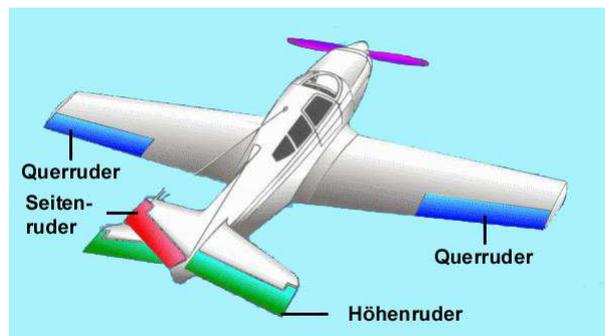
Dieser Versuch kann hervorragend auf den Internetseiten des SWR (Adresse s. [11]) in einem virtuellen Windkanal nachgestellt werden.

Aus dem oben genannten Versuch VII.I.III. ergeben sich folgende Diagramme:



V. Wie wird ein Flugzeug gesteuert?

„Der Pilot steuert sein Flugzeug im Wesentlichen mit drei Vorrichtungen: dem Höhenruder, dem Querruder und dem Seitenruder.“ [12] (siehe Fig. 5)



[Fig. 5]

Im folgenden Abschnitt werden die einzelnen Vorrichtungen genauer erläutert.

Die Höhenruder:

„Mit den Höhenrudern kann der Pilot die Nase des Flugzeuges heben oder senken.“ [13] „Zieht der Pilot in Geradeausflug am Höhenruder [...], dreht sich das Flugzeug um die Querachse, ohne seine Flugrichtung [...] zu ändern [...]. Dadurch erhöht sich der Anstellwinkel am Tragflügel (d.i., er wird stärker von „unten“ angeströmt), wodurch sich der Auftrieb erhöht und das Flugzeug nach oben steigt [...].“ [14] Durch den erhöhten Anstellwinkel entsteht jedoch wiederum größerer Widerstand. Dieser muss durch höhere Motorleistung ausgeglichen werden. Ansonsten reduziert sich die Fluggeschwindigkeit. [14]

Die Querruder:

„Die Querruder befinden sich an den äußeren Enden der Tragflächen und steuern die Maschine in eine rechte oder linke Schräglage.“ [13]

Die Querruder bewegen sich immer in entgegengesetzter Richtung. Wenn der Steuerhebel also zum Beispiel nach links gedrückt wird, bewegt sich somit das Querruder an der rechten Tragfläche nach unten und das an der linken Tragfläche nach oben. Folglich bewegt sich die rechte Tragfläche nach oben und die linke nach unten und das Flugzeug fliegt eine Linkskurve. [13]

Die Seitenrunder:

„Die Seitenrunder ermöglichen ebenfalls einen korrekten Kurvenflug, sie werden mit Fußpedalen bedient. Die Seitenrunder steuern die so genannte Gier des Flugzeuges.“ [15]

„Schiebt der Pilot das Seitenrunder z.B. nach links so dreht sich das Heck des Flugzeuges nach rechts und die Nase nach links, ohne dass die Maschine ihre Schräglage verändert.“ [13]

Neben diesen drei wichtigen Vorrichtungen werden jedoch viele weitere benötigt.

Beim Airbus A330 ist die Größe der Tragflächen zum Beispiel für eine Reisegeschwindigkeit von über 800 km/h ausgelegt und erreicht dort ausreichend Auftrieb. In der Start- und Landephase wird jedoch nur mit einer Geschwindigkeit von rund 300 km/h geflogen. Um dort auch ausreichend Auftrieb zu erreichen sind ausfahrbare (Lande-) Klappen an den hinteren Enden der Tragflächen angebracht. Diese gleichen die niedrige Geschwindigkeit aus. [15]

Abschließend ist festzustellen, dass der Auftrieb abhängig von der Geschwindigkeit, der Tragflächenform und des Anstellwinkels der Tragflächen ist.



VI. Quellenverzeichnis

1. Birgit Bachmann und Stefan R. Müller: Flugzeuge – Die Blinde Kuh: Der Traum vom Fliegen 1997-2002.
<http://www.blinde-kuh.de/flugzeuge/> 11.03.2004
2. Christoph Haugk: Luftraumstruktur in Deutschland und deren Nutzung
<http://www.fh-niederrhein.de/~agyviers/europa/deutschland.htm> 02.03.2004
3. aus Wikipedia, der freien Enzyklopädie: Daniel Bernoulli [online] 08.02.2004.
http://de.wikipedia.org/wiki/Daniel_Bernoulli 03.03.2004
4. Herfried Exl: Bernoulli-Gleichung [online] 2004.
<http://www.exl.at/helicopter/aerodynamik/bernoulli.htm> 03.03.2004
5. Sepp Kressierer & Markus Paizoni: Daniel Bernoulli [online] 2000.
<http://www1.physik.tu-muenchen.de/~kressier/Bios/Bernoulli.html> 03.03.2004
6. SWR Wissen: Warum fliegen Flugzeuge?
<http://www.wissen.swr.de/warum/fliegen/themenseiten/t4/s1.html> 05.03.2004
7. J. Lewellen und I. Shapiro: Das grosse bunte Buch vom Fliegen. Aus der Geschichte der Luftfahrt von den Anfängen bis zur Gegenwart. Seite 21 Ravensburg im Herbst 1959
8. Gert Steidle : Wie fliegt ein Flugzeug [online] 1999.
<http://www.luffahrtgeschichte.com/flugtech.htm> 05.03.2004.
9. Ulrich Grünwald: Wie fliegen Flugzeuge? [online] 08.06.1999
<http://www.quarks.de/fliegen2/02.htm> 05.03.2004
10. SWR Wissen: SWR Warum? Fliegen 4 / 4 [online]
<http://www.wissen.swr.de/warum/fliegen/themenseiten/t4/s4.html> 05.03.2004
11. SWR Wissen: SWR Warum? Fliegen 5 / 5 [online]
<http://www.wissen.swr.de/warum/fliegen/themenseiten/t5/s5.html> 05.03.2004
12. SWR Wissen: SWR Warum? Fliegen 5 / 1 [online]
<http://www.wissen.swr.de/warum/fliegen/themenseiten/t5/s1.html> 10.03.2004
13. Warum fliegt ein Flugzeug? [online]
<http://www.erklaert.de/warum/flugzeuge.htm> 10.03.2004



14. Wolfgang Kouker: DRMM Flugphysik [online] März 2003
<http://www-imk.fzk.de/asf/kasima/aktuelles/modellbau/flugphysik/#steuern>
10.03.2004
15. VIE AKTUELL – Ihr Flughafen informiert Sie September 2002
http://www.viennaairport.com/pdf/VIE_aktuell_2002_09.pdf 11.03.2004
16. Leybold-Heraeus – Gerätekarte 373 69: Prandtl'sches Staurohr
17. Leybold – Gerätekarte 373 66: Universalmanometer
18. Leybold – Gerätekarte 373 19: Winderzeuger, 220 V
19. Leybold – Gerätekarte 373 70: Tragflächenmodell
20. Leybold – Gerätekarte 373 30: Einfache Zweikomponentenwaage

Figuren:

1. SWR Wissen: SWR Warum? Fliegen 4 / 1
http://www.wissen.swr.de/warum/fliegen/themenseiten/t4/images_content/7.jpg
05.03.2004
3. SWR Wissen: SWR Warum? Fliegen 4 / 3
http://www.wissen.swr.de/warum/fliegen/themenseiten/t4/images_content/stromungsgeschwindigkeit.gif 05.03.2004
4. Warum fliegt ein Flugzeug? [online] 03.12.2004
http://www.erklaert.de/warum/pic/flt_ctl.jpg 10.03.2004



VII. Anhang

VII.I. Versuche

VII.I.I. Messung der Windgeschwindigkeiten:

Zur Bestimmung der Windgeschwindigkeiten kann folgender Versuch durchgeführt werden:

a) Versuchsaufbau:

Verwendet wird ein Prandtl'sche Staurohr [16], ein Universalmanometer [17], sowie ein Winderzeuger [18].

„Das Prandtl'sche Staurohr besteht aus zwei konzentrisch ineinandersitzenden Metallrohren; Längsschnitt siehe Fig. 1. Das enge Innenrohr ist vorn offen. Das weite Außenrohr ist vorn verschlossen und abgerundet, es besitzt jedoch seitlich einige kleine Öffnungen.“ [16]

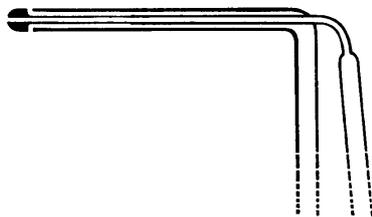


Fig. 1

Fig. 2

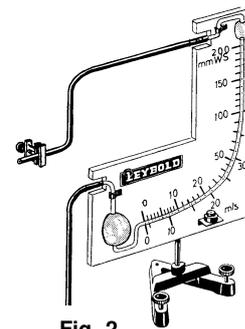


Fig. 2

Das Universalmanometer ist ein genau ablesbares Flüssigkeitsmanometer, welches zusammen mit dem oben beschriebenen Prandtl'schen Staurohr neben Druckmessungen zur Messung von Windgeschwindigkeiten bis zu 40 m/s verwendet werden kann. Hierzu werden das äußere Rohr des Prandtl'schen Staurohrs mit der Unterdruckseite (oben) und das innere Rohr mit der Überdruckseite (unten) verbunden. Wenn man nun das Staurohr gerade in den Luftstrom des Winderzeugers hält, kann man die Windgeschwindigkeit am Manometer in m/s ablesen. Diese sind abhängig von dem Querschnitt der auf den Winderzeuger aufgesetzten Düsen.



b) Messungen:

18 cm Querschnitt	-	8 m/s
10 cm Querschnitt	-	12 m/s

VII.I.II. Messung von Überdruck und Unterdruck am Tragflächenmodell

Im Zweiten Versuch werden mit Hilfe des Tragflächenmodells [19], des Universalmanometers [17] und des Winderzeugers [18] (18 cm Querschnitt) die Über- und Unterdrücke an einer Tragfläche bestimmt.

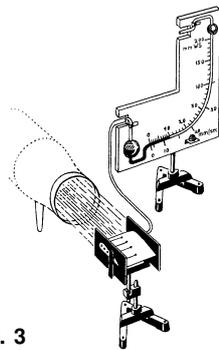


Fig. 3

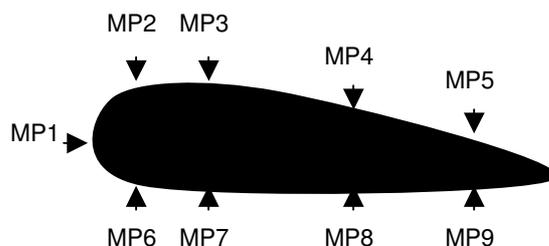


Fig. 4

a) Versuchsaufbau:

Die Windgeschwindigkeit beträgt laut Versuch VII.I.I. (s. oben) 8 m/s.

Das Tragflächenmodell hat 9 Bohrungen auf der Ober- und Unterfläche, welche durch Kanäle mit Messöffnungen verbunden sind. An diesen Messöffnungen wird das Manometer angeschlossen und die Über- oder Unterdrücke können abgelesen werden. Die Messpunkte (MP) sind wie folgt vergeben:



Das Tragflächenmodell besitzt einen drehbaren Halter, an dem Anstellwinkel zwischen -50° und $+50^\circ$ eingestellt werden können.



In diesem Versuch werden Messungen für drei verschiedene Anstellwinkel vorgenommen:

- 1) +20° 2) 0° 3) -20°

b) Messungen:

1) Anstellwinkel: +20°

MP1	MP2	MP3	MP4	MP5
+8 mmWs ¹	-11 mmWs	-8 mmWs	-4 mmWs	-2 mmWs
	MP6	MP7	MP8	MP9
	+ 4 mmWs	+5 mmWs	+4 mmWs	+2 mmWs

2) Anstellwinkel: 0°

MP1	MP2	MP3	MP4	MP5
+9 mmWs	-3 mmWs	-4 mmWs	-3,5 mmWs	-2 mmWs
	MP6	MP7	MP8	MP9
	+ 4 mmWs	+5 mmWs	+4 mmWs	+2 mmWs

3) Anstellwinkel: -20°

MP1	MP2	MP3	MP4	MP5
+ 3 mmWs	+4 mmWs	+5 mmWs	+4 mmWs	+2 mmWs
	MP6	MP7	MP8	MP9
	-2 mmWs	-3 mmWs	-3,5 mmWs	-1 mmWs

$$\begin{aligned}
 1 \text{ mmWs} &= 1 \text{ kp} / \text{m}^2 \\
 &= 10^{-4} \text{ at} \quad (\text{at} = \text{technische Atmosphäre}) \\
 &= 9,81 \text{ N} / \text{m}^2
 \end{aligned}$$

VII.I.III. Messung von Auf- und Abtriebskräften an der Tragfläche

Der dritte Versuch wird mit der Einfachen Zweikomponentenwaage [20] durchgeführt. Diese „dient zur Demonstration und zur quantitativen Bestimmung von Auftrieb [...] im Luftstrom des Winderzeugers [18] (18 cm Querschnitt).“ Die Kraftmessung erfolgt über einen Kraftmesser.

a) Versuchsaufbau (s. Fig. 5 unten)

Die Windgeschwindigkeit des Winderzeugers wird um 1/3 auf ~5 m/s reduziert. An der Skalenseite des Waagebalkens wird eine Tragfläche befestigt.

¹ Millimeter Wasserskala (mmWs)



Dieser wird mit einem Gegengewicht austariert, der sich auf der anderen Seite des Waagebalkens befindet. Der Kraftmesser wird an einer kleinen Öse am Ende des Waagebalkens eingehängt.



Fig. 5

b) Messungen

Es ergeben sich folgende Messwerte in Abhängigkeit der Anstellwinkel des Tragflügels:

-22°	-20°	-16°	-12°	-8°	0°	+2°	+4°	+6°	+8°	+10°
-0,38 N	-0,35 N	-0,3 N	-0,19 N	-0,09 N	+0,07N	+0,20 N	+0,23 N	+0,25 N	+0,3 N	+0,34 N

VII.I.II. Quellenauszüge laut Quellenverzeichnis

Auf den folgenden Seiten 17-32 befinden sich Auszüge der verwendeten Quellen laut Quellenverzeichnis.



VIII. Erklärung

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe und keine anderen als die im Literaturverzeichnis angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht habe.

Ort, Datum

Unterschrift