

## Air jet (Laminator) 8404250

### Instruction sheet

08/06/DML



- 1 Pressure chamber
- 2 Single nozzle
- 3 Mounting stem
- 4 Air outlet ring

### 1. Description

The air jet is used in conjunction with a blower to generating an almost uniform flow of air, as required in experiments on fluid dynamics.

The plastic air jet consists of a hemispherical pressure chamber equipped with 50 single tubular nozzles which are arranged parallel to one another. The arrangement of the tubular nozzles has been specifically selected to ensure that the airflow generated by the blower exits the pressure chamber with a minimum of resistance and in such a way that the flow is evenly distributed among the tubes. Air blows out of the nozzles at high speed such that the moving flow is cylindrical in shape.

A ring runs around the ends of the nozzles and forms the actual outlet of the jet. As a result of the high velocity of the air flow, the static pressure around the nozzles is low. This means that surrounding air is sucked from the sides and into the high-speed flow. The combination of the air emerging directly from the nozzles and the air sucked in from the sides gives rise to a flow of air that is largely uniform and laminar. Any differences in the

velocity of the air flow which initially occur locally around the tubes do not have an adverse effect in most experiments and can hardly be detected at a distance of approximately 200 mm from the air outlet.

The air jet is equipped with a mounting stem by which it can be attached to a stand.

### 2. Technical data

Air inlet opening:	33 mm Ø
Air outlet ring:	120 mm Ø
No. of individual nozzles:	50
Individual nozzles:	4 mm Ø
Dimensions:	255 mm x 150 mm Ø
Weight:	350 g approx.

### 3. Operation

In order to conduct the experiments, a blower (8404240) is required.

The set of bodies for experiments on lift and drag (8404260) are ideally suited as test objects.

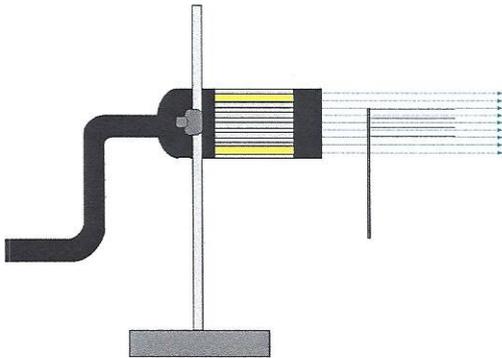
The component scale (8404261) is used to measure lift and drag.

Use simple filament probes to investigate the course of the airflow. It is very simple to construct a filament probe – take a thin wooden stick and tie one or more threads at equal distances from one another.

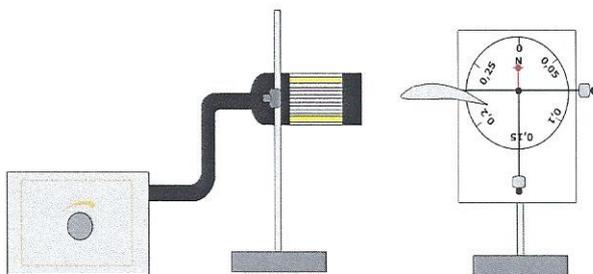
- Use the single bosshead (8613140) to fix the air jet vertically or horizontally to a stand rod (8611340).
- Use a table clamp (8612110) to set up the stand rod at the edge of the tabletop.
- Connect the air jet to the blower.

### 4. Sample experiments

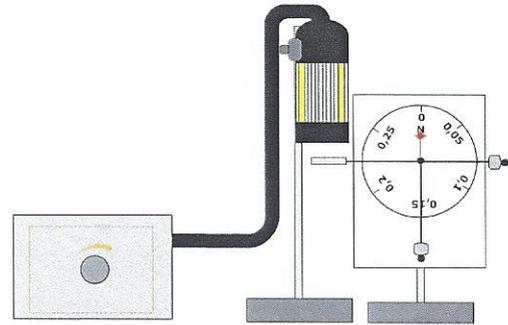
#### 4.1 Using a filament probe to investigate the course of airflow



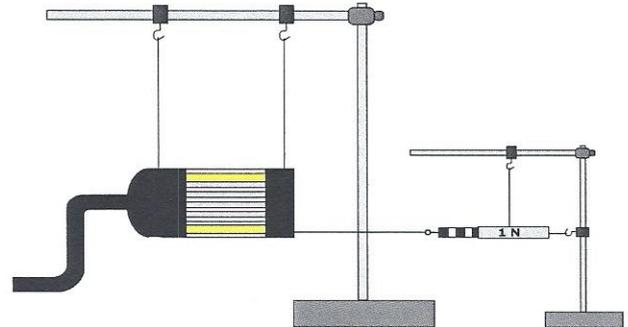
#### 4.2 Using a component scale to measure the lift on a wing surface



#### 4.3 Using the component scale to measure the drag force on a disc



#### 4.4 Determining the thrust of the air jet – experiment to model rocket and jet engines



Prof. Dr. sc. Hans - Joachim Wilke

# LUFTDÜSE ZUM GEBLÄSE

Bedien- und Experimentieranleitung

84 04 250.31

Vervielfältigung nur als Versuchsunterlagen für ELWE - Lehrgeräte gestattet.

Alle Rechte, insbesondere auch die Übersetzung, des Nachdrucks sowie jede Art der fotomechanischen Wiedergabe, auch auszugsweise, vorbehalten.

© 1997 ELWE- Lehrsysteme GmbH, Elwestraße 6, D- 38162 Cremlingen / Schandelaß  
Tel.: (0 53 06) 9 30 - 0 • Fax: (0 53 06) 9 30 - 4 04

Printed in Germany by ELWE- Lehrsysteme GmbH

## 1. AUFBAU, WIRKUNGSWEISE UND PRINZIPIELLE EINSATZMÖGLICHKEITEN DER LUFTDÜSE

### 1.1. Einleitende Bemerkungen

Strömungen sind allgegenwärtig. In der Natur treten sie vor allem als Luftströmungen in Form von Wind und als Wasserströmungen in Bächen, Flüssen und Meeren auf. In tierischen Organismen spielen Strömungen vor allem bei der Atmung und im Blutkreislauf eine große Rolle. In der Technik sind sie in erster Linie bei allen Transportvorgängen von Bedeutung, so bei Land-, Wasser- und Luftfahrzeugen und Raketen sowie bei der Bewegung von Flüssigkeiten und Gasen in Rohrleitungen z.B. in der chemischen Industrie oder bei Warmwasser- und Dampfheizungen.

Experimente zur Demonstration und Untersuchung von Strömungen sind ebenfalls in Luft und Wasser leicht durchführbar, wobei gleichzeitig der Praxisbezug stark ausgeprägt ist. Dabei haben die Luftströmungen den Vorteil des besseren Zuganges und einfacherer Meßmöglichkeiten. Außerdem lassen sich mit Luft leicht Strömungen von relativ großer räumlicher Ausdehnung erzielen, während sich in Wasser die untersuchte Strömung meist auf eine dünne Flüssigkeitsschicht beschränkt.

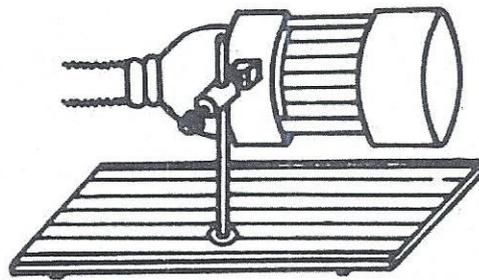


Bild 1

Zur Erzeugung von Luftströmungen fanden bisher in der Regel axial verdichtende Gebläse Verwendung. Damit lassen sich leicht

Luftströmungen unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeit erzeugen. Der wesentlichste Nachteil dieser Geräte besteht darin, daß sie keinen homogenen Luftstrom erzeugen. In der Nähe der Achse des Gerätes ist die Strömungsgeschwindigkeit gering. Sie nimmt mit größer werdendem Abstand von der Achse stark zu und erreicht in der Nähe der Gehäusewandung ein Maximum. Weiterhin besitzt die Luftströmung infolge des rotierenden Flügelrades einen Drall. Zwar werden die Geschwindigkeitsdifferenzen und der Drall durch einen Homogenisator verringert; mit einem vertretbaren Aufwand lassen sie sich jedoch nicht beseitigen.

Außerdem tritt bei einem herkömmlichen Luftstromerzeuger infolge der großen Lufteintritts- und Luftaustrittsöffnung eine erhebliche Lärmbelastigung auf. Wegen des Elektromotors ist das Gerät relativ schwer und hat wegen des erforderlichen Homogenisators eine beträchtliche Länge. Dadurch ist es unhandlich.

Die Luftdüse /Bild 1/ weist alle diese Nachteile nicht auf. Durch ein geeignetes System rohrförmiger Einzeldüsen wird ein homogener Luftstrom erzeugt. Da sie mit der Druckluft des Gebläses vom Luftkissentisch arbeitet und deshalb keinen eigenen Motor besitzt, ist der Geräuschpegel erheblich geringer als der eines Luftstromerzeugers, obwohl die Leistung des Gebläses viel größer ist. Wegen des fehlenden Motors hat die Luftdüse keine sich bewegenden Teile, wodurch auch kein Verschleiß auftritt. Ihre Masse beträgt etwa ein Zehntel der Masse eines Luftstromerzeugers. Diese viel kleinere Masse und die geringere Länge machen sie zu einem sehr handlichen Gerät, das auch an leichten Stativen befestigt werden kann.

### 1.2. Technische Daten

Abmessungen:    Länge 255 mm  
                         Durchmesser 150 mm  
Material :        Thermoplast  
Masse :            350 g

Innendurchmesser der Lufteintrittsöffnung 33 mm  
Innendurchmesser der Luftaustrittsöffnung 120 mm  
Innendurchmesser der rohrförmigen Düsen 4 mm  
Anzahl der rohrförmigen Düsen 50 mm  
Stativanschluß : Innengewinde M 8

1.3. Aufbau und Wirkungsweise

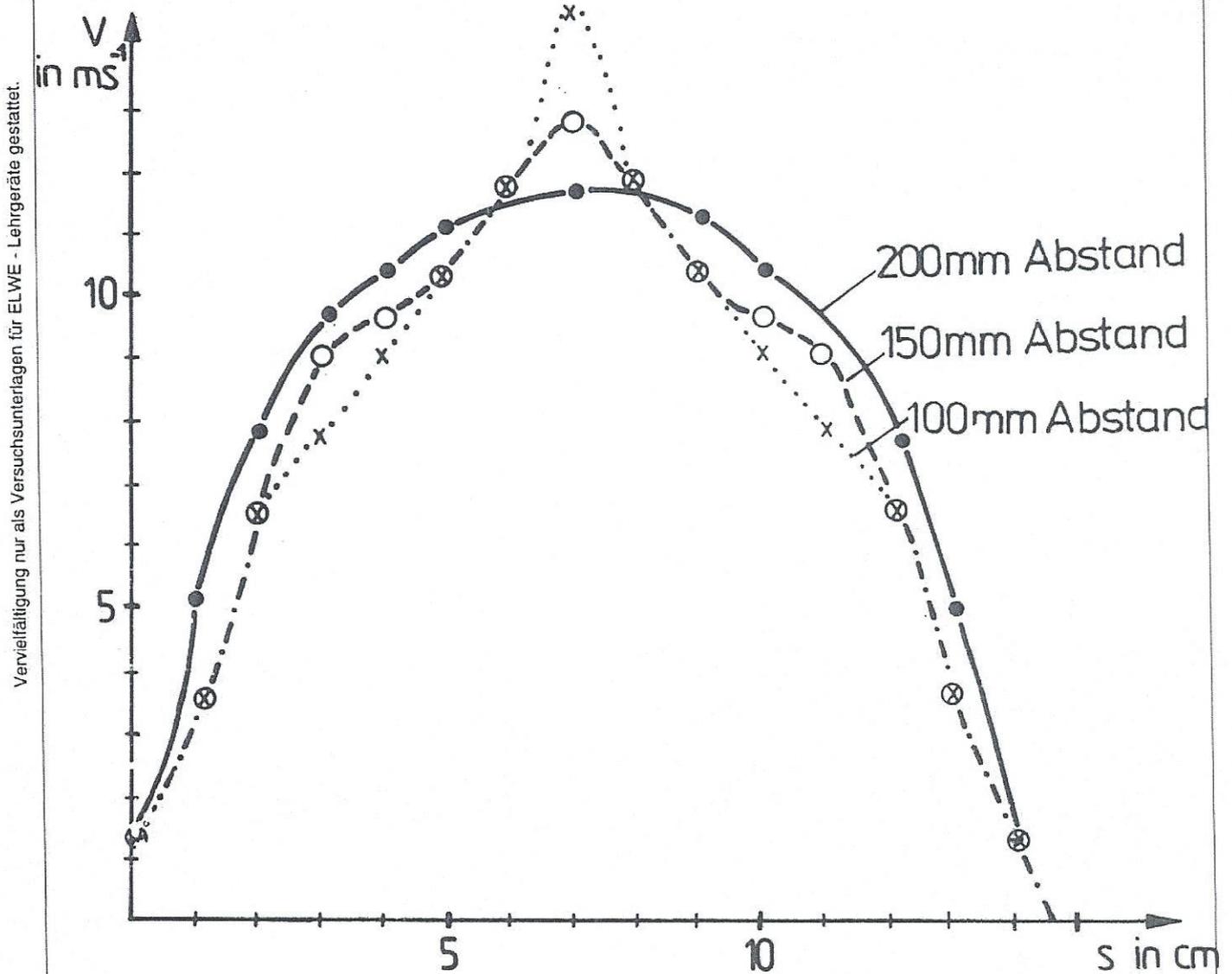


Bild 2

Die Luftdüse besteht aus einer Druckkammer von etwa 80 mm Länge. Sie besitzt eine Lufteintrittsöffnung, die mittels des Schlauches mit dem Gebläse verbunden wird. Die Lage der Lufteintrittsöffnung, der Austrittsöffnungen und der rohrförmigen Düsen ist so gewählt, daß der vom Gebläse kommende Luftstrom ohne wesentliche Behinderung durch die Druckkammer gelangt und sich auf die Düsen aufteilt. Dabei treten keine erheblichen Richtungsänderungen auf. Die Luft strömt aus einem System rohrförmiger Düsen aus, die parallel zueinander liegen. Die Öffnungen dieser Düsen liegen in einem zylinderförmigen Gebiet, das von einem Plastring umgeben ist. Dieser Plastring stellt die Luftaustrittsdüse des Gerätes dar. Er ist mit 4 Plaststäben an der Druckkammer stabil befestigt. Außerdem befindet sich an der Druckkammer ein Stutzen mit M-8-Innengewinde, in den ein Stativstab eingeschraubt werden kann. Auf diese Weise ist eine stabile Befestigung der Luftdüse an einem Stativ möglich. Im Bereich zwischen der Druckkammer und dem Plastring ist die Luftdüse nicht verkleidet.

Die Luftdüse weist deshalb eine so komplizierte Struktur auf, weil eine direkte Aufweitung des Luftstromes, der vom Gebläse kommt - etwa durch eine Düse, die sich trichterförmig im Durchmesser erweitert -, nicht möglich ist. Zwar ist die im Luftstrom gespeicherte Energie groß, die transportierte Luftmasse ist aber zu gering. Deshalb arbeitet die Luftdüse nach folgendem Prinzip.

Die Luft tritt aus 50 parallelen Rohren mit großer Geschwindigkeit aus. Infolge der großen Strömungsgeschwindigkeit ist der statische Druck in diesem Bereich klein. Deshalb wird weitere Luft angesaugt. Da die Luftdüse im Bereich zwischen Druckkammer und ringförmiger Düse nicht verkleidet ist, erfolgt das ohne nennenswerte Behinderung. Hierfür mußte jedoch eine notwendige Mindestlänge gewählt werden, die diesen Luftzutritt ermöglicht.

Am einfachsten kann die Sekundärluft in den Randbereich der Luftdüse gelangen, nicht so leicht in den axialen Bereich. Deshalb wurde die Dichte der rohrförmigen Düsen im axialen Be-

reich besonders groß gewählt. Aber auch im Randbereich ist die Anzahl der Rohre größer, da hier der Gesamtluftstrom durch die ruhende Luft der Umgebung behindert wird.

Im Bereich des Plastringes vermischt sich die aus den rohrförmigen Düsen mit großer Geschwindigkeit austretende Luft mit der Sekundärluft. Dabei wird die Bewegung der Primärluft verzögert und die Sekundärluft beschleunigt. Der Gesamtluftstrom verläßt die Luftdüse weitestgehend homogen. Die zunächst noch lokalen Geschwindigkeitsdifferenzen, die sich bei den meisten Experimenten nicht störend bemerkbar machen, verschwinden mit zunehmendem Abstand immer mehr und sind in 200 mm Entfernung kaum noch nachweisbar. Bild 2 zeigt die Strömungsgeschwindigkeit als Funktion des Ortes in 100 mm, 150 mm und 200 mm Abstand von der Austrittsöffnung der Luftdüse.

#### 1.4. Hinweise zur Arbeit mit der Luftdüse

In das Gewinde der Luftdüse wird ein kurzer Stativstab fest eingeschraubt. Sollte sich diese Verschraubung beim Experimentieren wiederholt lösen, so kann ein Einkleben eines zweckmäßigen Stativstabes mit Alleskleber erfolgen. Nun wird die Luftdüse mittels einer Kreuzmuffe an einem Stativ befestigt. Das ist in jeder beliebigen Lage möglich, wobei auch eine Schwenkbarkeit um eine Achse realisiert werden kann. Mittels des Schlauches wird die Luftdüse mit der Luftaustrittsöffnung des Gebläses verbunden. Dabei ist auf eine günstige Lage des Gebläses zur Luftdüse zu achten, so daß der etwas steife Schlauch keine zu große Kraft auf die Düse ausübt und dadurch evtl. deren Lage unkontrolliert verändert. Am Stellknopf des Gebläses kann die gewünschte Strömungsgeschwindigkeit eingestellt werden.

#### 1.5. Prinzipielle Einsatzmöglichkeiten

Die Luftdüse ist für die Durchführung fast aller Experimente zu Luftströmungen geeignet. Sie ermöglicht sowohl die Demonstration laminarer als auch turbulenter Strömungen. Hierzu sind im

einfachsten Falle Fadensonden geeignet. Dabei kann auch die Umströmung von Körpern unterschiedlicher Form untersucht werden. Die Luftdüse ermöglicht weiterhin die Untersuchung der Druckverhältnisse in Strömungen, auch in der Umgebung verschiedenen geformter Körper, vor allem von Tragflächenprofilen.

Mit der Luftdüse sind weiterhin Experimente zu den Strömungswiderständen verschieden geformter Körper möglich. Es läßt sich der Widerstandsbeiwert von verschieden geformten Körpern ermitteln. Man kann das aerodynamische Paradoxon mit verschiedenartigen experimentellen Anordnungen demonstrieren. Weiterhin läßt sich der dynamische Auftrieb zeigen und die Auftriebskraft in Abhängigkeit von dem Tragflächenprofil und dem Anstellwinkel ermitteln. Es ist möglich, das Prinzip der Steuerung eines Flugzeuges zu demonstrieren. Schließlich ermöglicht die Luftdüse, Experimente zum Rückstoß als Modellexperimente zum Raketen- und Strahlantrieb durchzuführen.

#### 1.6. Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Unterrichtsmitteln

Die Luftdüse kann nur in Kombination mit dem Gebläse betrieben werden, das die erforderliche Druckluft bereitstellt. Zur Untersuchung des Stromlinienverlaufs sind geeignete Sonden erforderlich und zur Druckmessung Drucksonden mit Manometern. Die Untersuchung des Widerstandes verschieden geformter Körper erfolgt mit Widerstandskörpern gleicher Querschnittsfläche, die Untersuchung des Auftriebs mit Tragflächenprofilen. Für Widerstands- und Auftriebsmessungen sind geeignete Meßinstrumente vom Typ einer Einkomponentenwaage erforderlich.

#### 1.7. Methodische Hinweise zum Einsatz der Luftdüse

Die Luftdüse ist ein sehr einfaches Gerät. Es genügt ein kurzer Hinweis des Lehrers, daß Luft aus der Vorderseite austritt. Diese Tatsache finden die Schüler beim Experimentieren bestätigt. Am Geräusch des Gebläses erkennen sie, ob mit einer großen oder kleinen Strömungsgeschwindigkeit gearbeitet wird. Ein näheres Eingehen auf den Aufbau und die Wirkungsweise der Luftdüse ist nicht erforderlich.

Bei allen experimentellen Anordnungen sollte die Luftdüse als wesentlicher Bestandteil einen zentralen Platz einnehmen. Demgegenüber kann das Gebläse auch verdeckt hinter dem Experimentiertisch aufgestellt werden, womit sogar eine Geräuschminderung erzielt wird. Die Düse wird in der Regel an einem kurzen Stativ so befestigt, daß der Luftstrom horizontal austritt. Für bestimmte Experimente ist eine drehbare Lagerung erforderlich. Die übrigen Experimentierteile werden in den meisten Fällen rechts neben der Düse angeordnet /aus der Blickrichtung der Schüler gesehen/ und befinden sich in 10 cm bis 20 cm Abstand von ihr. Dadurch ist ein übersichtlicher experimenteller Aufbau gewährleistet.

## 2. EXPERIMENTE MIT DER LUFTDÜSE ZUM GEBLÄSE

### 2.1. Verlauf der Stromlinien

#### 2.1.1. Untersuchung des Stromlinienverlaufs an einem Widerstandskörper mit einer Fadensonde

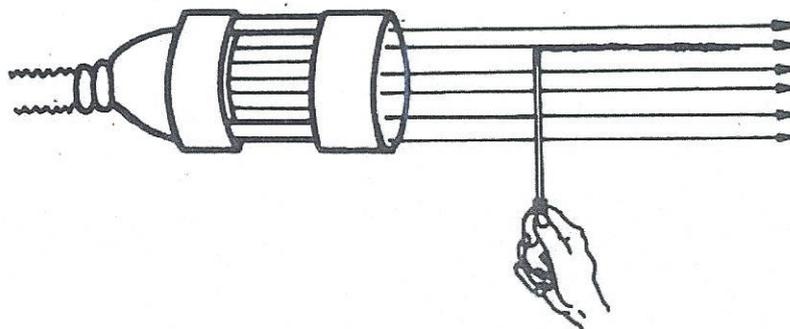


Bild 3

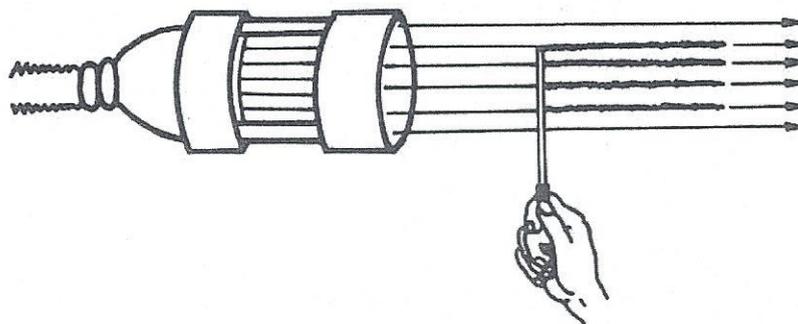


Bild 4

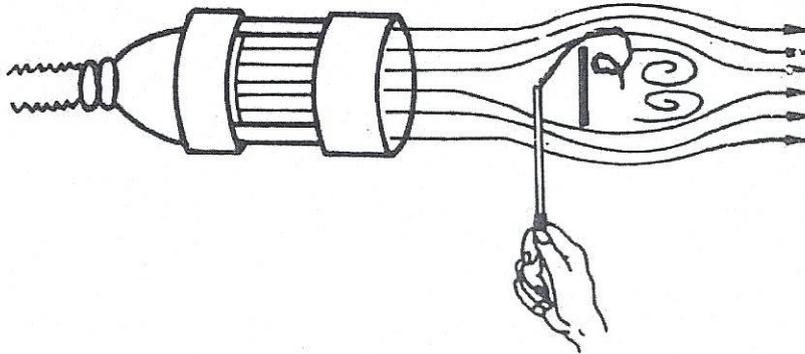


Bild 5

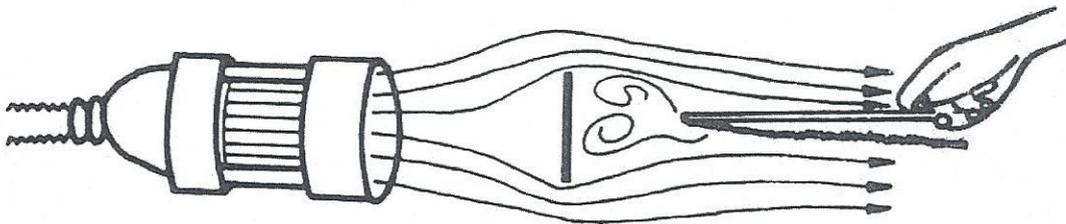


Bild 6

Unterrichtsmittel

Luftdüse

Gebläse mit Schlauch

verschiedene Widerstandskörper mit Stielen

Einfadensonde

Mehrfadensonde

### Aufbau und Durchführung der Experimente

Die Luftpüse wird horizontal an einem Stativ befestigt. Man bringt die Einfadensonde in den Luftstrom und bewegt sie langsam quer zur Strömung auf und ab /Bild 3/. Danach bringt man die Mehrfadensonde in die Luftströmung /Bild 4/.

Verschiedene Widerstandskörper werden nacheinander an einem Stativ befestigt und etwa 150 mm vor der Düsenöffnung im Luftstrom angeordnet. Nähert man dem Widerstandskörper von vorn die Einfadensonde, so weicht sie bereits vor dem Hindernis nach der Seite aus. Einem Stromlinienkörper schmiegt sich die Sonde gut an. Hinter allen anderen Körpern führt die Sonde unregelmäßige Bewegungen aus. Dabei zeigt sie teilweise entgegen der Strömungsrichtung /Bild 5/.

Schließlich nähert man die Mehrfadensonde diesen Körpern von hinten. Beim Stromlinienkörper zeigt sie nur geringfügige Verwirbelungen an. In den anderen Fällen führen die Fäden hinter den Körpern flatternde Bewegungen aus /Bild 6/, während sie in größerem Abstand in Richtung der Strömung zeigen und sich wenig bewegen.

### Ergebnis

Die Fadensonden zeigen den Verlauf der Stromlinien an. Im Luftstrom der Düse verlaufen die Stromlinien parallel. Befindet sich ein Stromlinienkörper im Luftstrom, so verlaufen die Stromlinien um ihn herum, wobei sie sich im Verlauf seiner Form anpassen. Hinter anders geformten Körpern treten bei größeren Strömungsgeschwindigkeiten Wirbel auf. Dabei bewegt sich die Luft hinter diesen Körpern teilweise auch entgegengesetzt zur Strömungsrichtung.

2.1.2. Untersuchung des Stromlinienverlaufs um einen Tragflügel mit einer Fadensonde

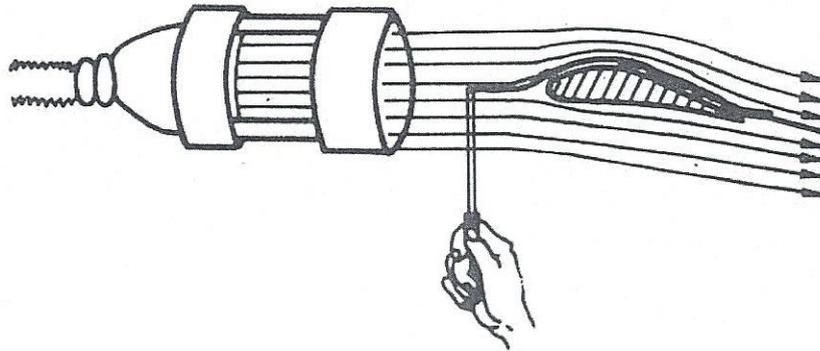


Bild 7a

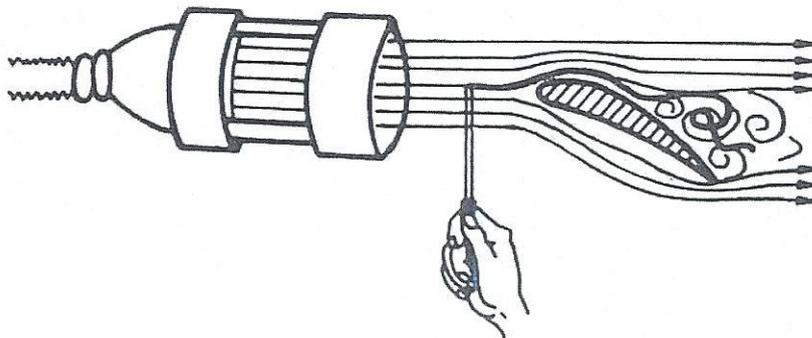


Bild 7b

Vervielfältigung nur als Versuchsunterlagen für ELWE - Lehrgeräte gestattet.

### Unterrichtsmittel

Luftdüse

Gebläse mit Schlauch

Tragflügelmodell mit Stiel

Einfadensonde

### Aufbau und Durchführung der Experimente

Die Luftdüse wird so an einem Stativ befestigt, daß sie einen horizontalen Luftstrom mittlerer Strömungsgeschwindigkeit erzeugt. An einem zweiten Stativ befestigt man das Tragflügelmodell so, daß es sich im Zentrum dieses Luftstromes befindet. Der Abstand zwischen Düse und Tragflügel soll etwa 200 mm betragen. In den Zwischenraum bringt man zunächst von oben her, nachfolgend von unten den Haltestab der Fadensonde. Dieses Experiment führt man zunächst bei einem Anstellwinkel von  $0^\circ$  durch, den man nachfolgend schrittweise vergrößert. Der Faden läßt den Verlauf der Stromlinien erkennen. Beim Anstellwinkel  $0^\circ$  schmiegt er sich dem Profil gut an /Bild 7a/. Bei größerem Anstellwinkel vollführt das Fadenende im Wirbelgebiet oberhalb des Tragflügels bzw. hinter ihm unregelmäßige flatternde Bewegungen /Bild 7b/.

### Ergebnis

Bei geringem Anstellwinkel verlaufen die Stromlinien entsprechend dem Profil der Tragfläche. Bei großem Anstellwinkel tritt am oberen hinteren Ende ein ausgedehntes Wirbelgebiet auf.

## 2.2. Widerstand eines Körpers in strömender Luft

### 2.2.1. Messung der Widerstandskraft mit einer Briefwaage

### Unterrichtsmittel

Luftdüse

Gebläse mit Schlauch

verschiedene Widerstandskörper mit Stielen

Briefwaage

dünner Holzstab oder zwei zusammengesteckte Trinkröhrchen

/Länge etwa 300 mm/

Vertikalmaßstab

Wägesatz

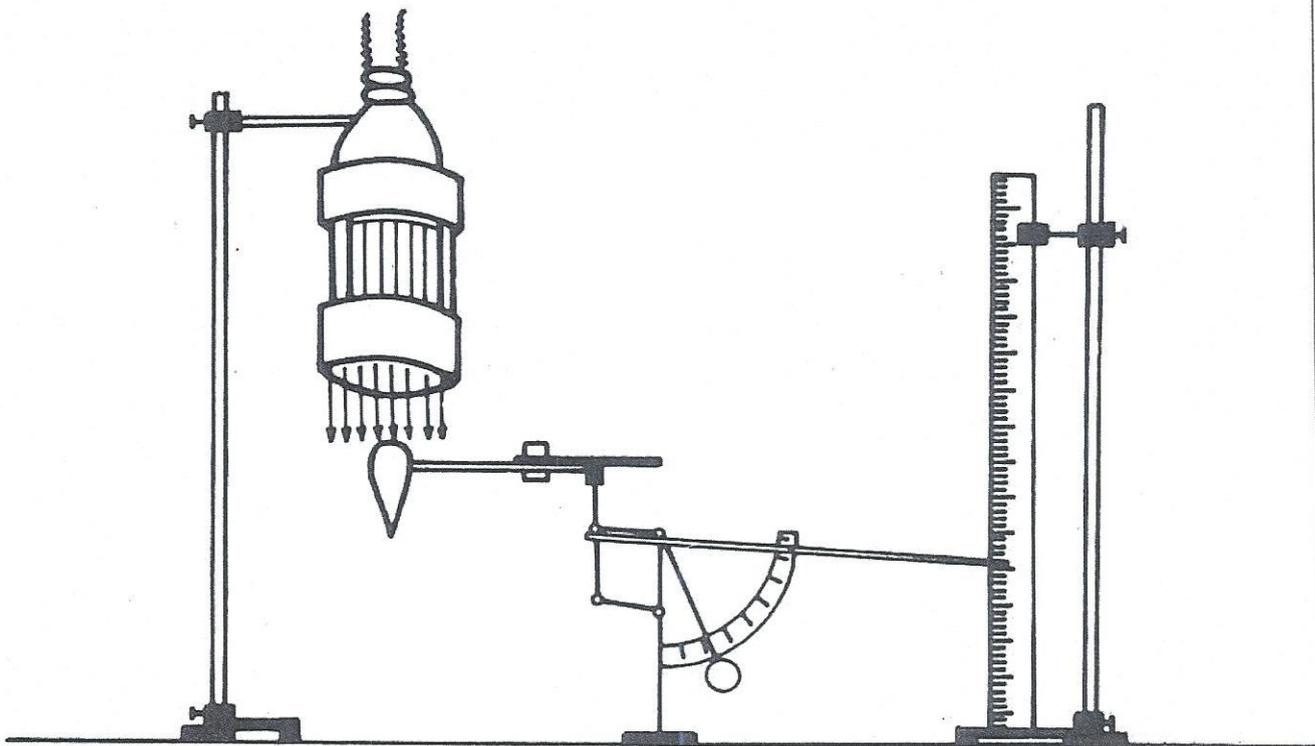
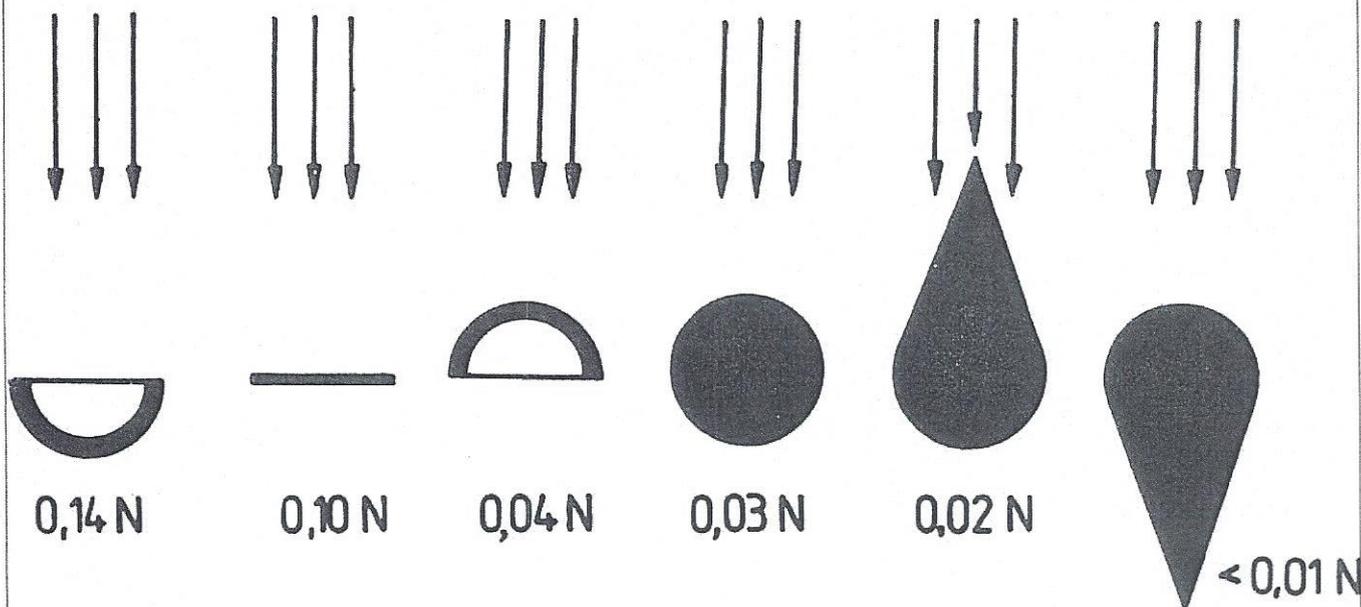


Bild 8

Vervielfältigung nur als Versuchunterlagen für ELWE - Lehrgeräte gestattet.



Vervielfältigung nur als Versuchsunterlagen für ELWE - Lehrgeräte gestattet.

Bild 9

Aufbau und Durchführung der Experimente

Die Luftdüse wird vertikal an einem Stativ befestigt, so daß der Luftstrom nach unten austritt. Am kurzen Hebelarm der Briefwaage wird der Holzstab mit einem dünnen Draht befestigt. Am anderen Ende des Stabes wird der Vertikalmaßstab aufgestellt. Die Briefwaage wird ohne Waagschale benutzt. Die einzelnen Widerstandskörper werden nacheinander mit einer Federklammer oder einer Muffe an der Platte der Waage befestigt. Jeder Widerstandskörper soll sich etwa 100 mm unterhalb der Düsenöffnung befinden /Bild 8/. Bei größter Strömungsgeschwindigkeit wird jeweils die Widerstandskraft für den einzelnen Widerstandskörper gemessen.

### Ergebnis

Trotz der gleichen Querschnittsfläche treten bei den verschiedenen Strömungskörpern unterschiedliche Widerstandskräfte auf. Bild 9 zeigt das Verhältnis der Widerstandskräfte bezogen auf eine Widerstandskraft 0,1 N bei einer Platte.

### Hinweis

Da die einzelnen Widerstandskörper unterschiedliche Masse besitzen, empfiehlt es sich, das Experiment mit dem Körper größter Masse zu beginnen. Bei den folgenden Widerstandskörpern erreicht man dann durch das Auflegen von Wägestücken auf die Briefwaage, daß der Holzstab auf dem Vertikalmaßstab immer wieder den gleichen Ausgangswert anzeigt.

### 2.2.2. Messung der Widerstandskraft mit einer Tafelwaage

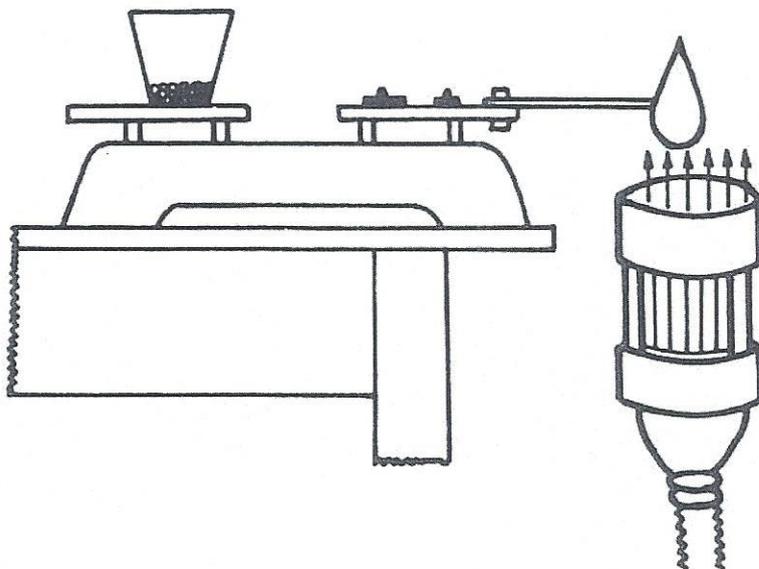


Bild 10

### Unterrichtsmittel

Luftdüse

Gebläse mit Schlauch

verschiedene Widerstandskörper mit Stielen

Tafelwaage

Tarierbecher mit Schrot

Wägesatz

### Aufbau und Durchführung der Experimente

Die Tafelwaage wird bis an die Kante des Experimentier-  
tisches herangerückt. An der einen Waagschale wird mittels  
einer Muffe oder Federklammer ein Widerstandskörper befe-  
stigt, so daß er möglichst weit über die Tischkante hinausragt.  
Die Waage tariert man mittels Schrot aus. Die Lu-  
düse befestigt man so an einem Stativ, das auf dem Fußboden steht, daß  
der vertikal nach oben gerichtete Luftstrom auf den Wider-  
standskörper trifft. Der Abstand Luftdüse - Widerstandskörper  
soll etwa 200 mm betragen /Bild 10/.

Nach dem Einstellen des stärksten Luftstromes am Gebläse  
wird die Waage durch Auflegen von Wägestücken wieder ins Gleich-  
gewicht gebracht. Die Gewichtskraft der aufgelegten Wägestücke  
ist dabei gleich der Widerstandskraft des Widerstandskörpers.  
Nacheinander wird auf diese Weise die Widerstandskraft jedes  
Körpers gemessen.

### Ergebnis

Siehe Ergebnis Experiment 2.2.1.!

### Hinweis

Das Stativ mit der Luftdüse kann auch auf dem Tisch  
aufgestellt und der Luftstrom nach unten gerichtet werden.

2.2.3. Widerstandsmessung mit einer Einkomponentenwaage

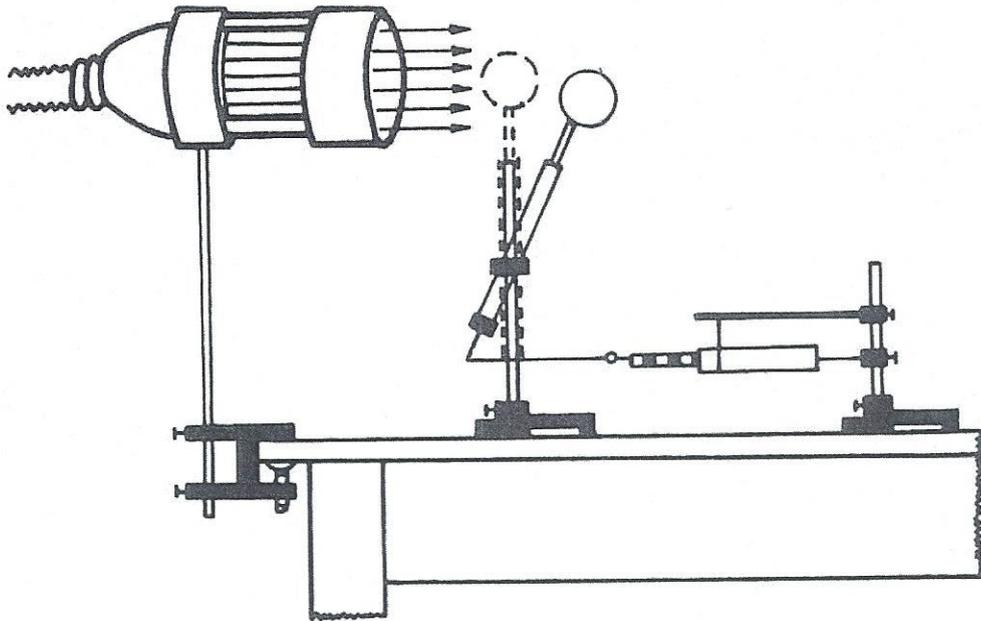


Bild 11

Unterrichtsmittel

Luftdüse

Gebälse mit Schlauch

verschiedene Widerstandskörper mit Stielen

Federkraftmesser /1N/

Holzleiste /ca. 300 mm x 20 mm x 10 mm/ mit 4-mm-Bohrung

### Aufbau und Durchführung der Experimente

Ein Lagerzapfen wird horizontal an einem Stativ angebracht. Auf diesen steckt man die durchbohrte Holzleiste auf. An ihrem oberen Ende befestigt man mit einer Muffe oder Federklammer einen der Widerstandskörper. Am unteren Teil der Leiste wird eine Kreuzmuffe befestigt. Man verschiebt sie in der Höhe so lange, bis die Holzleiste in jeder Lage im Gleichgewicht ist. Das untere Ende der Holzleiste verbindet man mittels eines Fadens mit dem Federkraftmesser, der horizontal an einem zweiten Stativ angebracht ist. Vor dem Widerstandskörper stellt man in etwa 200 mm Entfernung die Luftdüse auf, die in entsprechender Höhe horizontal an einem weiteren Stativ befestigt ist /Bild 11/.

Bei vertikaler Stellung der Leiste wird am Gebläse die größte Strömungsgeschwindigkeit eingestellt. Der Widerstandskörper wird durch die strömende Luft zur Seite gedrückt. Man bewegt das Stativ mit dem Federkraftmesser so weit zurück, daß sich der Widerstandskörper wieder in seiner Ausgangslage befindet. Am Federkraftmesser wird die Widerstandskraft abgelesen.

Das Experiment wird mit den verschiedenen Widerstandskörpern wiederholt.

### Ergebnis

Siehe Ergebnis Experiment 2.2.1. !

### Hinweise

1. Wegen der unterschiedlichen Masse der Widerstandskörper ist es erforderlich, die Lage der Kreuzmuffe von Telexperiment zu Telexperiment zu verändern.
2. Die Anordnung ist um so empfindlicher, je größer der obere und je kleiner der untere Hebelarm ist. Deshalb empfiehlt es sich, die Bohrung nicht in der Mitte der Leiste anzubringen. Bei der Ermittlung der Widerstandskraft muß dann das Verhältnis der Längen der Hebelarme berücksichtigt werden.

3. Anstelle der vertikalen Anordnung ist es auch möglich, die Teile so anzuordnen, daß sich die Holzleiste in der horizontalen Ebene dreht.

2.2.4. Widerstandsmessung mit dem Kraftmomentmesser

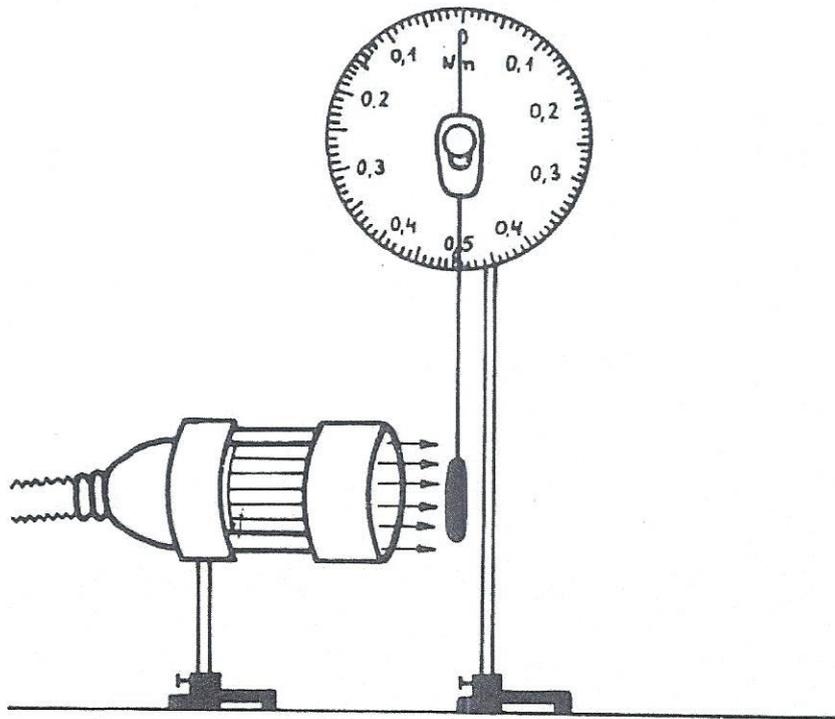


Bild 12

### Unterrichtsmittel

Luftdüse

Gebläse mit Schlauch

Kraftmomentmesser

verschiedene Widerstandskörper mit Stielen

### Aufbau und Durchführung der Experimente

Der Kraftmomentmesser wird vertikal an einem Stativ befestigt. In das Gerät wird die Meßfeder mit der kleineren Federkonstante /ohne Markierung/ eingebaut. Das freie Ende der Meßfeder wird am Stellzeiger festgeklemmt. Die Klemmschraube wird gut festgedreht, so daß der Stellzeiger vertikal steht. Dann wird der bewegliche Zeiger auf den Flansch geklemmt und auf Null gedreht. Schließlich wird der vertikale Hebelstab mit den Rändelschrauben festgeklemmt. Am unteren Ende dieses Stabes wird ein Widerstandskörper in die Klemmhülse gesteckt /Bild 12/. Man befestigt die Luftdüse so an einem Stativ, daß der horizontale Luftstrom auf den Widerstandskörper trifft. Bei stärkstem Luftstrom wird die Widerstandskraft gemessen. Das erfolgt so, daß zunächst der Widerstandskörper ausgelenkt wird. Man macht die Auslenkung rückgängig, indem man den Stellzeiger mit der Hand in entgegengesetztem Drehsinn dreht. Der bewegliche Zeiger folgt dieser Drehung und geht zurück bis in die Nullage. Die Widerstandskraft ist die Differenz zwischen Stellzeiger und beweglichem Zeiger. Die Messung wird nacheinander für alle Widerstandskörper durchgeführt.

### Ergebnis

Siehe Ergebnis Experiment 2.2.1.!

2.3. Druck- und Geschwindigkeitsmessungen in strömender Luft

2.3.1. Staudruckmessung mit Hilfe eines Pitotrohres

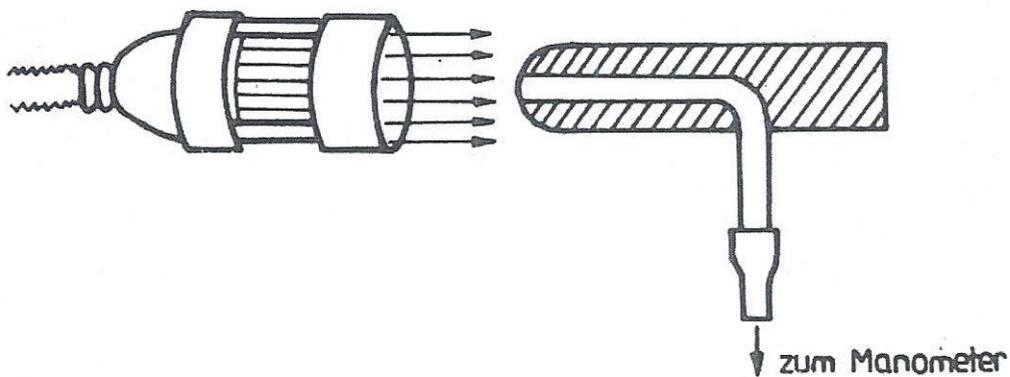


Bild 13

Unterrichtsmittel

- Luftdüse
- Gebläse mit Schlauch
- Pitotrohr
- Mikromanometer
- Verbindungsschlauch

### Aufbau und Durchführung des Experiments

Die Luftdüse wird an einem Stativ befestigt, so daß der Luftstrom etwa 200 mm über dem Experimentiertisch horizontal verläuft. Das Pitotrohr wird ebenfalls an einem Stativ befestigt und in etwa 200 mm Abstand von der Luftdüse in die Mitte des Luftstromes gebracht, so daß die Luft senkrecht auf die Öffnung auftrifft. Der Schlauchanschluß des Pitotrohres wird mittels des Verbindungsschlauches mit dem Mikromanometer verbunden /Bild 13/. Da auf den zweiten Schenkel des Manometers der Luftdruck wirkt und dieser etwa gleich dem statischen Druck ist, zeigt das Manometer die Differenz aus dem Gesamtdruck und dem statischen Druck an, die gleich dem Staudruck ist. Der Stellknopf des Gebläses wird nacheinander auf die Stellungen 2, 4, 6, usw. gebracht und der Staudruck am Manometer abgelesen.

### Ergebnis

Je größer die Strömungsgeschwindigkeit ist, um so größer ist auch der Staudruck.

### 2.3.2. Messung des statischen Drucks mit Hilfe einer Drucksonde

#### Unterrichtsmittel

Luftdüse  
Gebläse mit Schlauch  
Drucksonde  
Mikromanometer  
Verbindungsschlauch

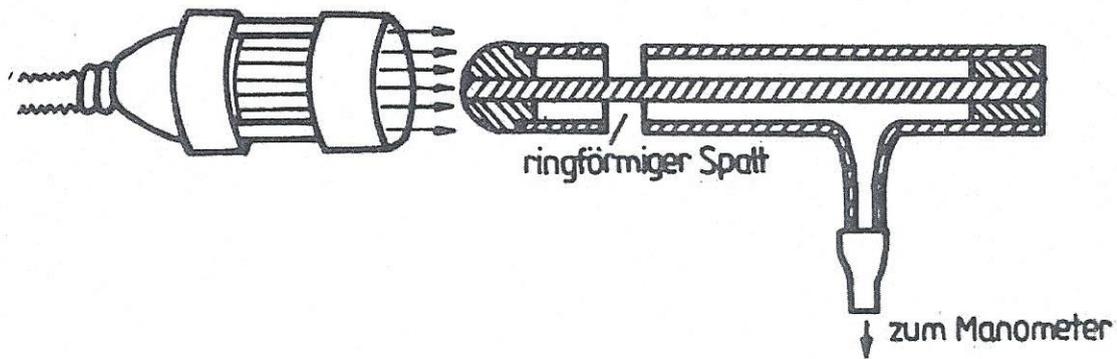


Bild 14

#### Aufbau und Durchführung des Experiments

Die Luftdüse wird an einem Stativ befestigt, so daß etwa 200 mm über dem Experimentiertisch ein horizontaler Luftstrom auftritt. An einem zweiten Stativ befestigt man die Drucksonde und bringt sie in einem Abstand von etwa 200 mm von der Luftdüse in die Mitte der Luftströmung. Ihr Schlauchanschluß wird mittels des Verbindungsschlauches mit dem Mikromanometer verbunden /Bild 14/. Das Gebläse wird auf die größte Leistung gestellt. Der vom Mikromanometer angezeigte Druck verringert sich geringfügig.

#### Ergebnis

Infolge der großen Strömungsgeschwindigkeit ist der statische Druck in der Luftströmung kleiner als der atmosphärische Luftdruck.

2.3.3. Messung der Strömungsgeschwindigkeit mit einem Prandtl'schen Staurohr

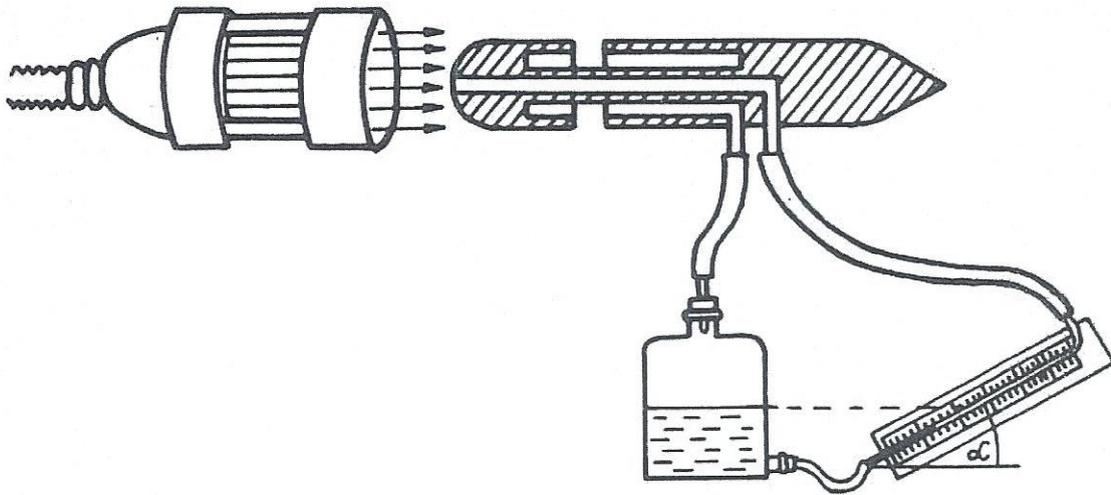


Bild 15

Unterrichtsmittel

- Luftdüse
- Gebälse mit Schlauch
- Prandtl'sches Staurohr
- Mikromanometer
- 2 Verbindungsschläuche

Vervielfältigung nur als Versuchsunterlagen für ELWE - Lehrgeräte gestattet.

### Aufbau und Durchführung des Experiments

Die Luftdüse wird horizontal an einem Stativ befestigt. An einem zweiten Stativ bringt man das Prandtl'sche Staurohr horizontal an, so daß es sich mitten im Luftstrom der Luftdüse befindet. Durch die beiden Verbindungsschläuche wird der Gesamtdruck auf den feststehenden Schenkel des Mikromanometers /Vorratsgefäß/ übertragen, der statische Druck auf den geneigten Schenkel /Bild 15/. Es wird die größte Gebläseleistung eingestellt und der Staudruck als Differenz zwischen Gesamtdruck und statischem Druck gemessen.

### Ergebnis

Nach der Bernoullischen Gleichung errechnet sich die Strömungsgeschwindigkeit nach der Gleichung

$$v = \sqrt{\frac{2 (p_0 - p)}{\rho_L}}$$

Dabei sind  $p_0$  der Gesamtdruck,  $p$  der statische Druck und  $\rho_L$  die Dichte der Luft. Bei der Berechnung der Druckdifferenz  $p_0 - p$  muß der Winkel  $\alpha$  Beachtung finden, mit dem der Manometerschenkel gegenüber der Horizontalen geneigt ist. Die Druckdifferenz berechnet sich nach der Gleichung  $p_0 - p = \rho_w \cdot g \cdot x \cdot \sin \alpha$ , wobei  $\rho_w$  die Dichte der Manometerflüssigkeit,  $g$  die Fallbeschleunigung und  $x$  die Manometerauslenkung ist.

### Beispiel

$$\begin{aligned} x &= 2,5 \text{ cm} \\ \rho_L &= 0,0013 \text{ g/cm}^3 \text{ /Dichte der Luft/} \\ \rho_w &= 1 \text{ g/cm}^3 \text{ /Dichte von Wasser/} \\ \alpha &= 30^\circ \\ v &= \sqrt{\frac{2 \cdot 1 \text{ g/cm}^3 \cdot 981 \text{ cm/s}^2 \cdot 2,5 \text{ cm} \cdot 0,5}{0,0013 \text{ g/cm}^3}} \end{aligned}$$

$$\sqrt{v} = 1730000 \text{ cm}^2/\text{s}^2$$

$$v = 1320 \text{ cm/s}$$

Die Strömungsgeschwindigkeit beträgt bei höchster Gebläseleistung  $13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

2.3.4. Messung der Strömungsgeschwindigkeit mit einer Venturidüse

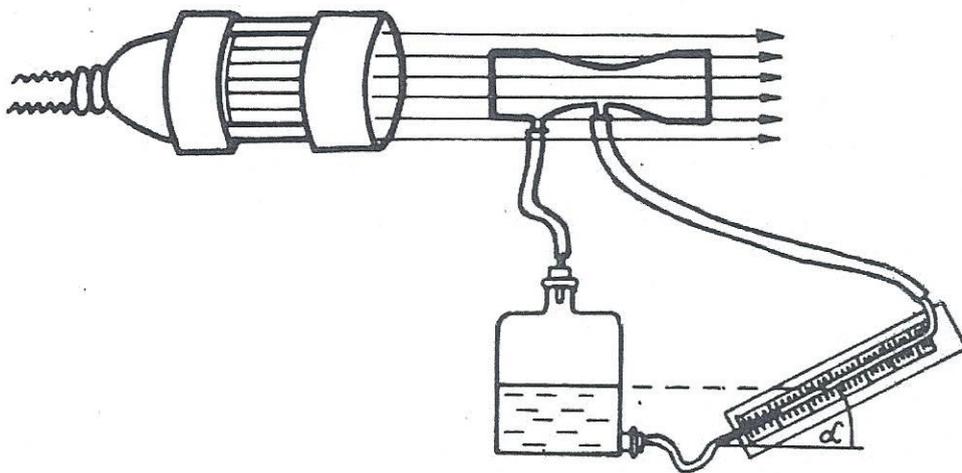


Bild 10

Luftdüse

Gebläse mit Schlauch

Venturidüse

Mikromanometer

2 Verbindungsschläuche

### Aufbau und Durchführung des Experiments

Die Luftdüse wird horizontal an einem Stativ befestigt. In gleicher Höhe bringt man an einem zweiten Stativ die Venturidüse an, so daß sie sich in der Mitte des Luftstromes befindet. Die beiden Schlauchanschlüsse der Venturidüse werden mittels der Verbindungsschläuche mit dem Mikromanometer verbunden /Bild 16/.

Am Gebläse wird die größte Leistung eingestellt und der vom Mikromanometer angezeigte Druck abgelesen.

### Ergebnis

Die Strömungsgeschwindigkeit berechnet sich nach der Gleichung

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_L \left( \frac{A_1^2}{A_2^2} - 1 \right)}}$$

Dabei bedeuten  $A_1$  und  $A_2$  die größte und die kleinste Querschnittsfläche der Venturidüse,  $\Delta p$  die gemessene Druckdifferenz und  $\rho_L$  die Dichte der Luft. Die Druckdifferenz berechnet sich nach der Gleichung

$$\Delta p = \rho_w \cdot g \cdot x \cdot \sin \alpha \quad /vgl. 2.3.3./$$

In Übereinstimmung mit dem Beispiel in 2.3.3. beträgt die Strömungsgeschwindigkeit bei größter Gebläseleistung

$$v = 13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

2.3.5. Messung der Druckverteilung an einem Tragflügel-  
profil

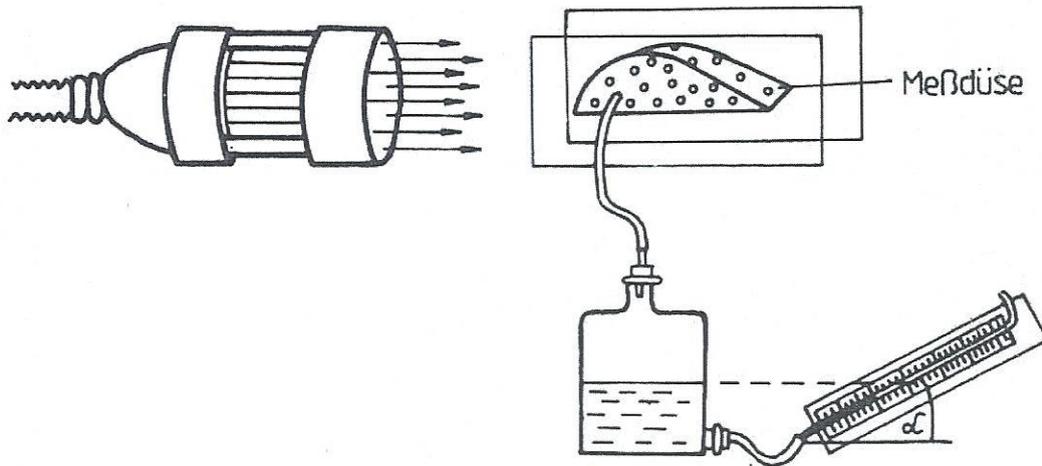


Bild 17

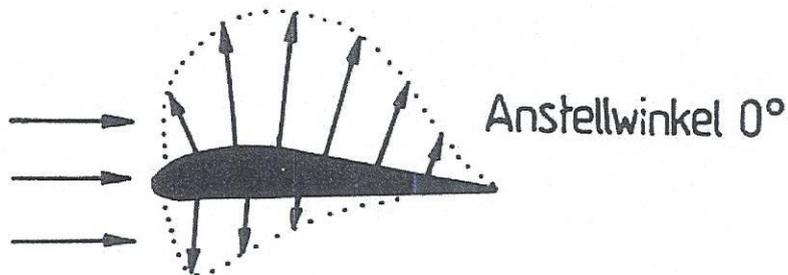


Bild 18

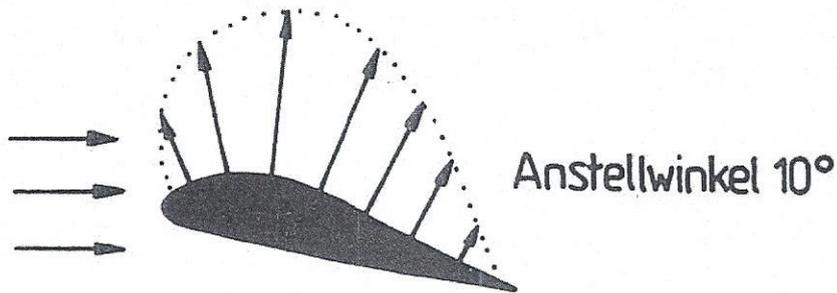


Bild 19

Unterrichtsmittel

- Luftdüse
- Gebläse mit Schlauch
- Tragflügelmodell mit Meßdüsen
- Mikromanometer
- Verbindungsschlauch
- Winkelmesser mit Lot

Aufbau und Durchführung des Experiments

Die Luftdüse wird so an einem Stativ befestigt, daß der Luftstrom horizontal austritt. Das Tragflügelmodell befestigt man an einem zweiten Stativ, so daß es sich in etwa 200 mm Entfernung von der Luftdüse im Zentrum des Luftstroms befindet. Mit dem Winkelmesser mit Lot wählt man zunächst einen Anstellwinkel des Tragflügels von  $-10^\circ$ . Am Gebläse wird der stärkste Luftstrom eingestellt. Nachfolgend verbindet man nacheinander die einzelnen Meßdüsen mittels des Schlauches mit dem Mikromanometer /Bild 17/ und ermittelt den Über- bzw. Unterdruck. Das Experiment

wird mit einem Anstellwinkel von  $0^\circ$  und  $10^\circ$  wiederholt. Die Bilder 18 und 19 zeigen grafisch die dargestellten Meßergebnisse. Da die Druckkräfte senkrecht zur Oberfläche des Tragflügels wirken, sind die Vektoren senkrecht zum Umriß des Tragflügelmodells gezeichnet.

### Ergebnis

Die Sog- und Druckgebiete, die durch die Umhüllenden veranschaulicht werden, zeigen, daß bei wachsendem positiven Anstellwinkel das Soggebiet an der Tragflügeloberseite allmählich zunimmt, während sich das Soggebiet an der Unterseite allmählich in ein Druckgebiet umwandelt. Der aerodynamische Gesamtauftrieb nimmt dabei zu.

## 2.4. AERODYNAMISCHES PARADOXON

### 2.4.1. Nachweis des aerodynamischen Pradoxons mit 2 gebogenen Metallblechen



Bild 20

### Unterrichtsmittel

Luftdüse

Gebläse mit Schlauch

2 gebogene Metallbleche, drehbar gelagert

### Aufbau und Durchführung des Experiments

Die Luftdüse wird an einem Stativ befestigt, so daß der Luftstrom vertikal nach unten austritt. Unter der Austrittsöffnung werden die beiden drehbar gelagerten, aufeinander zu gerichteten Metallbleche hängend nebeneinander angebracht, so daß der geringste Abstand etwa 30 mm beträgt /Bild 20/. Das Gebläse wird eingeschaltet und die Leistung allmählich erhöht.

Mit wachsender Strömungsgeschwindigkeit nähern sich die Bleche einander immer weiter.

### Ergebnis

Die große Strömungsgeschwindigkeit zwischen den beiden Blechen bewirkt einen geringen statischen Druck. Dadurch bewegen sich die Bleche aufeinander zu.

### 2.4.2. Nachweis des aerodynamischen Paradoxons mit Luftballons

### Unterrichtsmittel

Luftdüse

Gebläse mit Schlauch

2 runde Luftballons

### Aufbau und Durchführung der Experimente

Die Luftdüse wird an einem Stativ drehbar befestigt, so daß ihr Luftstrom zunächst vertikal nach oben gerichtet ist. Die Luftballons bläst man schwach auf, so daß der Durchmesser des einen ca. 100 mm, der des anderen 150 mm

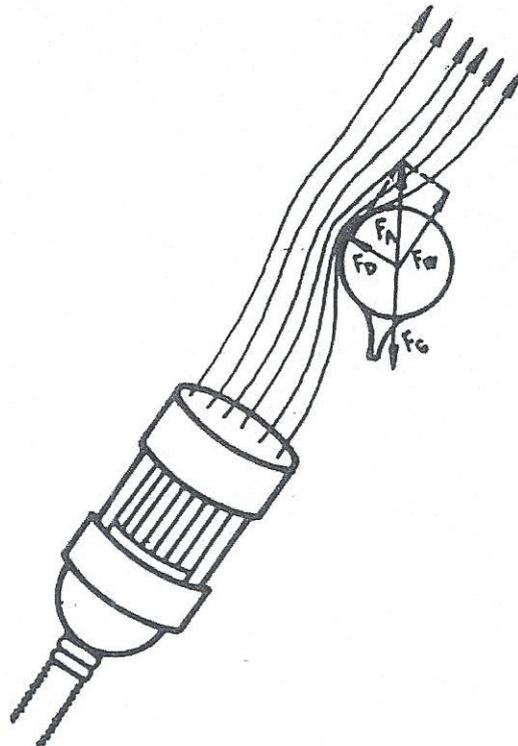


Bild 21

beträgt und verschließt sie z.B. durch Verknoten der Öffnung. Zunächst legt man einen Luftballon auf die Austrittsöffnung der Luftpüse und verstärkt den Luftstrom allmählich, bis sich der Luftballon ca. 1 m über der Düse befindet. Dann verringert man den Luftstrom wieder, daß der Abstand nur etwa 200 mm beträgt und neigt die Luftpüse allmählich bis etwa  $60^\circ$  gegen die Horizontale /Bild 21/. Nachfolgend wiederholt man das Experiment mit beiden Luftballons.

#### Ergebnis

Der Luftballon gleitet auch bei schwach geneigtem Luftstrom nicht aus diesem heraus. Ebenso verbleiben mehrere Ballons im Luftstrom. Immer dann, wenn sich ein Ballon teilweise aus dem Zentrum des Luftstromes herausbewegt, ist die Strömungsgeschwindigkeit im Außenraum geringer als im mittleren Teil. Deshalb ist der statische Druck im Zentrum geringer, wodurch der Ballon wieder in den Luftstrom zurückgezogen wird.

2.5. AERODYNAMISCHER AUFTRIEB

2.5.1. Messung des aerodynamischen Auftriebs eines Tragflügelmodells mit einer Briefwaage

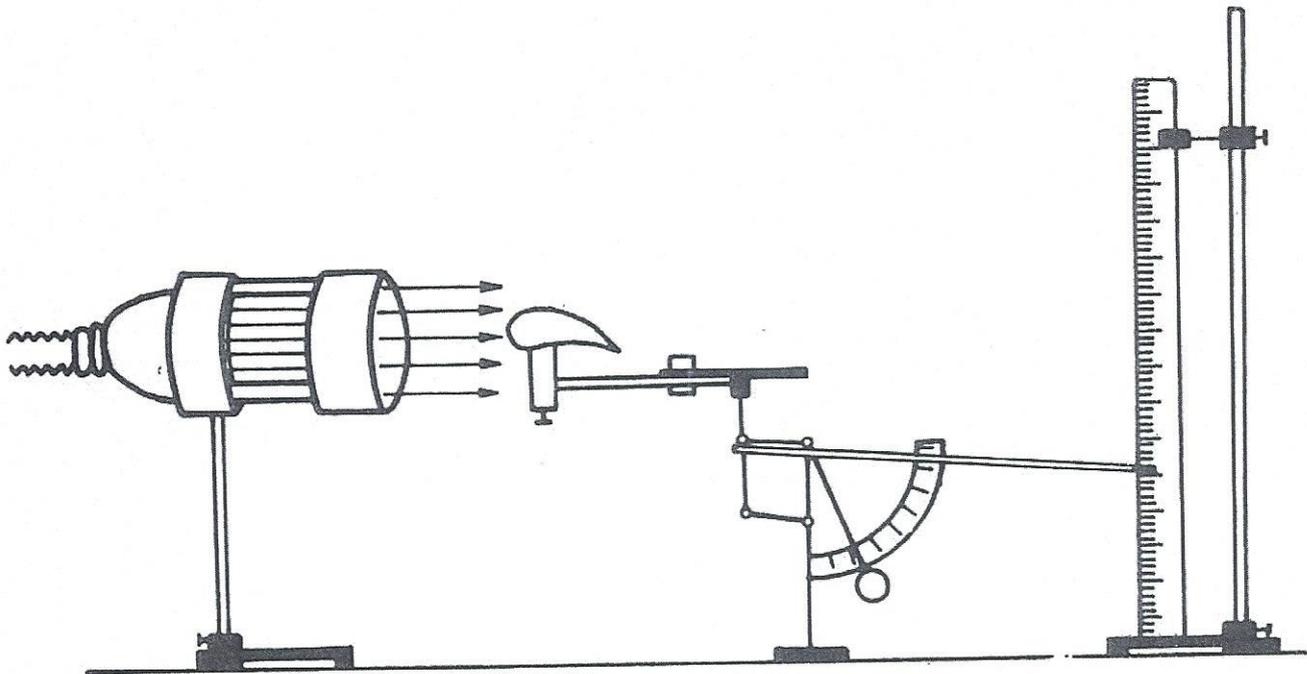


Bild 22

Unterrichtsmittel

Luftdüse

Gebläse mit Schlauch

Tragflügelmodell mit Stiel

Briefwaage

Vervielfältigung nur als Versuchsunterlagen für ELWE - Lehrgeräte gestattet.

dünner Holzstab oder 2 zusammengesteckte Trinkröhrchen  
/Länge etwa 300 mm/  
Vertikalmaßstab  
Winkelmesser mit Lot

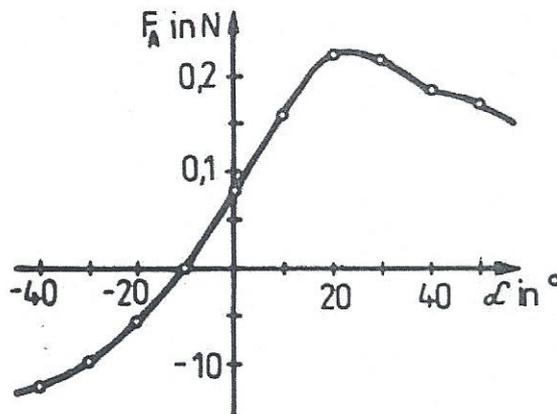


Bild 23

#### Aufbau und Durchführung des Experiments

Die Luftdüse wird so an einem Stativ befestigt, daß ein horizontaler Luftstrom auftritt. Am oberen kurzen Hebelstab der Briefwaage befestigt man mit einem dünnen Draht den Holzstab. Am anderen Ende des Stabes wird der Vertikalmaßstab aufgestellt.

Das Tragflügelmodell befestigt man mit einer Muffe oder Federklammer an der Platte der Waage. Der Abstand Luftdüse - Tragflügel soll etwa 200 mm betragen /Bild 22/. Bei größter Strömungsgeschwindigkeit mißt man die Auftriebskraft, wobei der Anstellwinkel in Schritten von etwa  $10^\circ$  im Bereich von  $-30^\circ$  bis  $+30^\circ$  verändert wird.

Bereits bei geringem negativen Anstellwinkel tritt eine nach oben gerichtete Kraft auf. Diese Auftriebskraft erreicht bei etwa  $20^\circ$  ihren größten Betrag /Abb. 23/.

### Ergebnis

Bei einem Tragflügel tritt ein aerodynamischer Auftrieb auf. Die Auftriebskraft hängt vom Anstellwinkel ab. Im Bereich von  $-10^\circ$  bis  $+20^\circ$  nimmt sie etwa linear zu.

### Hinweis

1. Zur Messung der Auftriebskraft kann anstelle der Briefwaage auch eine Tafelwaage Verwendung finden. Der experimentelle Aufbau erfolgt dann analog wie im Experiment 2.2.2.
2. Bei Vergrößerung des Anstellwinkels beginnend bei  $0^\circ$  nimmt auch die Widerstandskraft zunächst schwach, dann stärker zu. Die Messung der Widerstandskraft des Tragflügels kann mit den experimentellen Anordnungen 2.2.1. bis 2.2.4. erfolgen.

### 2.5.2. Messung des aerodynamischen Auftriebs eines Tragflügelmodells mit einer Einkomponentenwaage

### Unterrichtsmittel

Luftdüse

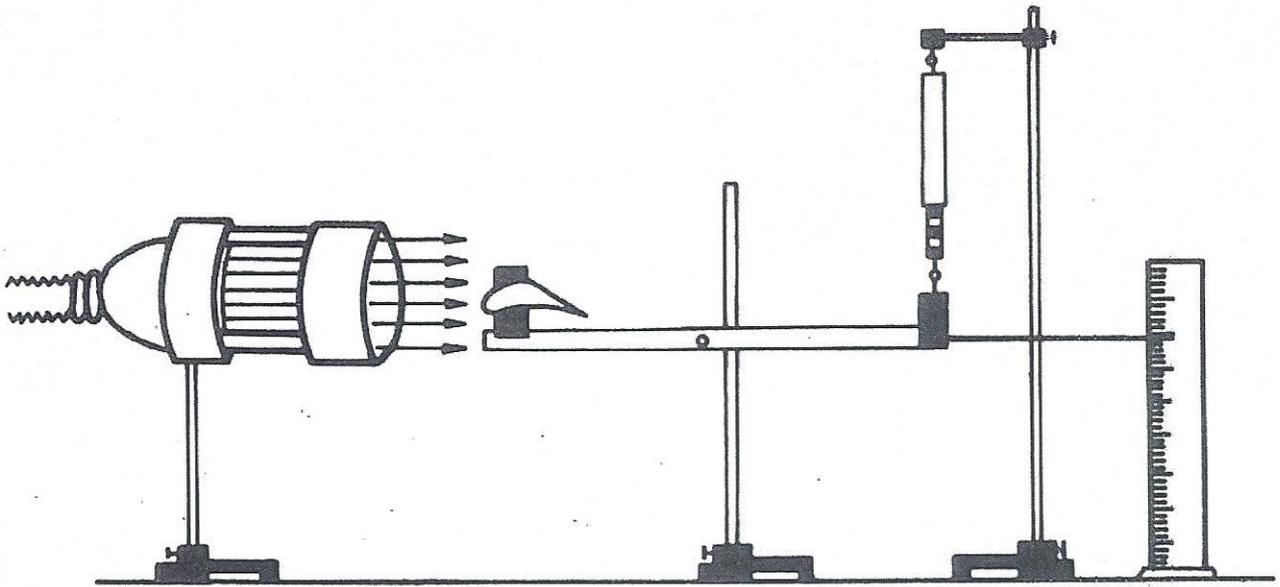
Gebälse mit Schlauch

Tragflügelmodell mit Stiel

Federkraftmesser /1 N/

Holzleiste /ca. 300 mm x 20 mm x 10 mm/ mit 4-mm-Bohrung

Winkelmesser mit Lot



Vervielfältigung nur als Versuchsunterlagen für ELWE - Lehrgeräte gestattet.

Bild 24

Aufbau und Durchführung des Experiments

Man befestigt einen Lagerzapfen horizontal an einem Stativ und steckt auf diesen die durchbohrte Holzleiste. An den beiden Enden bringt man je eine Kreuzmuffe an. In der vorderen Muffe befestigt man das Tragflügelmodell, so daß es seitlich herausragt und ungehindert vom Luftstrom getroffen werden kann. Die hintere Muffe hängt man an den Federkraftmesser, der an einem zweiten Stativ angebracht ist. Schließlich befestigt man die Luftdüse an einem dritten Stativ so, daß ihr horizontaler

Luftstrom in etwa 200 mm Entfernung auf den Tragflügel trifft /Bild 24/.

Der Anstieg des Tragflügels wird in Schritten von  $10^{\circ}$  im Bereich von  $-30^{\circ}$  bis  $+30^{\circ}$  verändert. Alle Messungen werden bei voller Gebläseleistung durchgeführt. Durch die unterschiedliche Kraft, die vom Federkraftmesser angezeigt wird, ändert sich auch die Lage des Tragflügels im Luftstrom. Durch Aufwärts- bzw. Abwärtsverschieben des Kraftmessers am Stativ wird erreicht, daß die ursprüngliche Lage wieder hergestellt wird.

Bei einem Winkel größer als  $-10^{\circ}$  wird der Tragflügel angehoben, bei kleinerem Winkel nach unten gedrückt.

### Ergebnis

Siehe Ergebnis Experiment 2.5.1.

### Hinweise

1. Die Empfindlichkeit der Anordnung nimmt in dem Maße zu, wie das Verhältnis des vorderen Hebelarms zum hinteren wächst. Deshalb sollte die Bohrung so angebracht werden, daß der vordere Hebelarm länger ist. Bei der Ermittlung der Auftriebskraft muß dann das Verhältnis der Längen beider Hebelarme berücksichtigt werden.
2. Mit der Vergrößerung des Anstellwinkels beginnend bei  $0^{\circ}$  nimmt auch die Widerstandskraft zunächst schwach, dann stärker zu. Ihre Messung kann mit den experimentellen Anordnungen 2.2.1. bis 2.2.4. erfolgen.

### 2.5.3. Messung des aerodynamischen Auftriebs eines Tragflügelmodells mit dem Kraftmomentmesser

#### Unterrichtsmittel

Luftdüse

Gebläse mit Schlauch

Kraftmomentmesser

Tragflügelmodell mit Stiel

Winkelmesser mit Lot

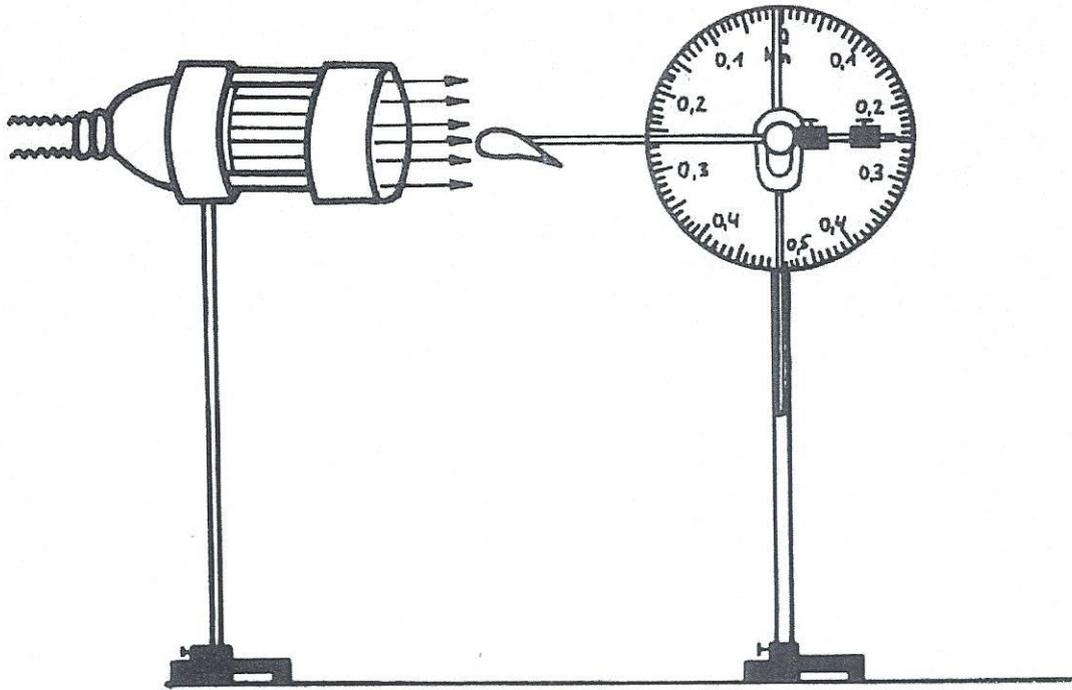


Bild 25

Aufbau und Durchführung des Experiments

Der Kraftmomentmesser wird vertikal an einem Stativ befestigt. Es findet die Meßfeder mit der kleinen Federkonstante /ohne Markierung/ Verwendung. Man klemmt das freie Ende der Meßfeder am Stellzeiger fest. Die Klemmschraube wird gut angezogen, so daß Stellzeiger und beweglicher Zeiger vertikal stehen. Dann wird der senkrechte Hebelstab mit den Rändelschrauben festgeklemmt und der Hebelstab mit Ausgleichsmasse bis zum Anschlag in die Bohrung des senkrechten Hebelstabes geschoben. In die Bohrung am Ende des horizontalen Hebelstabes wird das Tragflügelmodell eingespannt. Durch Verschieben der Ausgleichsmasse stellt man die horizontale Lage des Hebelstabes ein. Die

Luftdüse wird so an einem Stativ befestigt, daß der horizontale Luftstrom den Tragflügel trifft /Bild 25/.

Bei größter Gebläseleistung wird die Auftriebskraft bei  $-30^\circ$ ,  $-20^\circ$  usw. bis  $+30^\circ$  gemessen. Dazu muß jeweils die Auslenkung des beweglichen Zeigers durch Verschieben des Stellzeigers mit der Hand in entgegengesetzte Richtung rückgängig gemacht werden.

Bei einem Anstellwinkel, der größer als  $-10^\circ$  ist, tritt eine positive Auftriebskraft auf.

### Ergebnis

Siehe Ergebnis Experiment 2.5.1.

## 2.6. SCHUBKRAFT STRÖMENDER LUFT

### 2.6.1. Bestimmung der Schubkraft der Luftdüse - Modellexperiment zum Raketen- und Strahltriebwerk

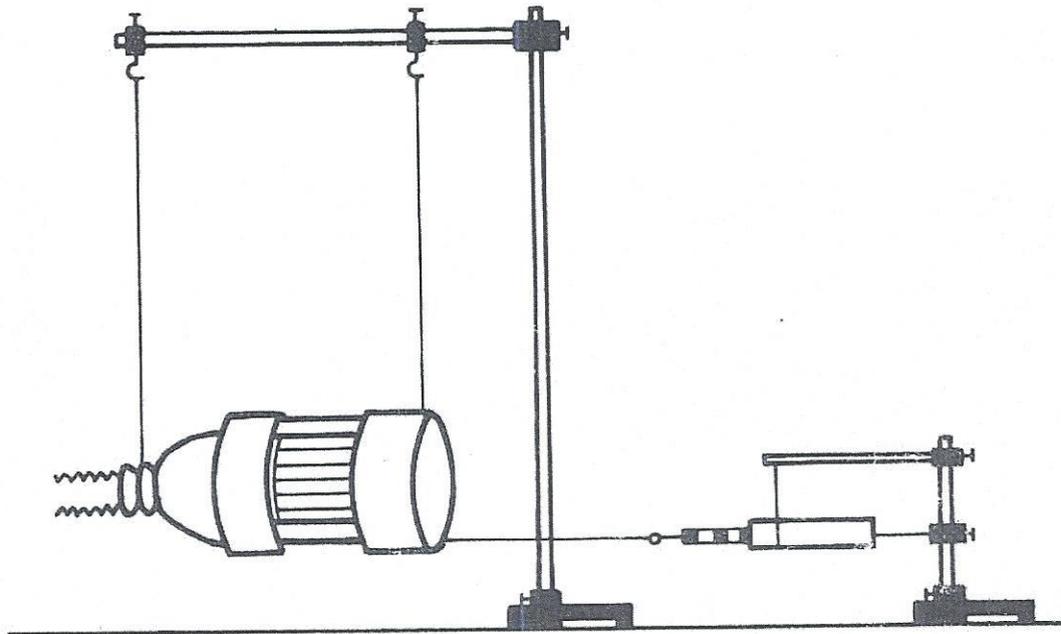


Bild 26

### Unterrichtsmittel

Luftdüse

Gebälse mit Schlauch

Federkraftmesser /1 N/

### Aufbau und Durchführung der Experimente

Die Luftdüse wird an zwei etwa 1 m langen Fäden so an einem Stativ befestigt, daß sie dicht über der Tischfläche horizontal hängt /Bild 26/. Die Stellung des Gebläses wird so gewählt, daß der Schlauch eine möglichst geringe Kraft auf die hängende Düse ausübt. Das ist z.B. bei einem rechtwinkligen Verlauf gegeben. An einem zweiten Stativ befestigt man horizontal den Federkraftmesser und verbindet ihn durch einen dünnen Faden mit dem vorderen Teil der Düse, wobei der Abstand ca. 500 mm betragen soll.

Zunächst wird der Mantel der Luftdüse mit Papier umwickelt. Das kann behelfsmäßig z.B. mit 2 Gummiringen befestigt werden. Das Gebläse wird auf höchste Leistung gestellt.

Die Luftdüse wird durch den Rückstoß aus ihrer Lage ausgelenkt. Durch Verschieben des Stativs mit dem Federkraftmesser bringt man sie in die Ausgangslage zurück. Der Federkraftmesser zeigt die dafür erforderliche Kraft an, deren Betrag gleich der Rückstoßkraft ist.

Das Experiment wird nach dem Entfernen der Papierhülle wiederholt. Jetzt tritt eine deutlich größere Kraft auf.

### Ergebnis

Durch die ausströmende Luft tritt eine Schubkraft auf. Durch Beschleunigen weiterer Luft wird die Schubkraft vergrößert.

### Hinweis

Im ersten Teilexperiment entsprechen die Verhältnisse denen beim Raketenantrieb. Aus dem Triebwerk treten Gase aus. Im zweiten Teilexperiment liegen analoge Verhältnisse wie beim Strahlantrieb vor. Es wird Luft angesaugt und beschleunigt.