

Verehrte Leserin, verehrter Leser.

Die nachfolgenden Bilder gehören inhaltlich zum Vortrag

W. Send

**Auftrieb und Wirbeldichte beim Fliegen**

Erscheint auf der CD

NORDMEIER, V. (Red.): Didaktik der Physik- Leipzig 2002.

Vorträge der Frühjahrstagung der DPG. Berlin: Lehmanns-Verlag, 2002.

Bereits die Vorträge der Frühjahrstagungen 2000 und 2001 sind auf CD erschienen.

Erhältlich sind die CDs unter folgender Adresse: <http://lob.de> - Dort bitte wählen:

Fachgebiet Naturwissenschaft/Technik -> Physik/Astronomie

Innerhalb der Physik die Auswahl -> Physik - Allgemeines -> Nordmeier, V.

Dieser Vortrag ist thematisch eine Fortführung des Artikels

W. Send

**Physik des Fliegens**

Physikalische Blätter 57 (2001), Nr. 6, 51-58

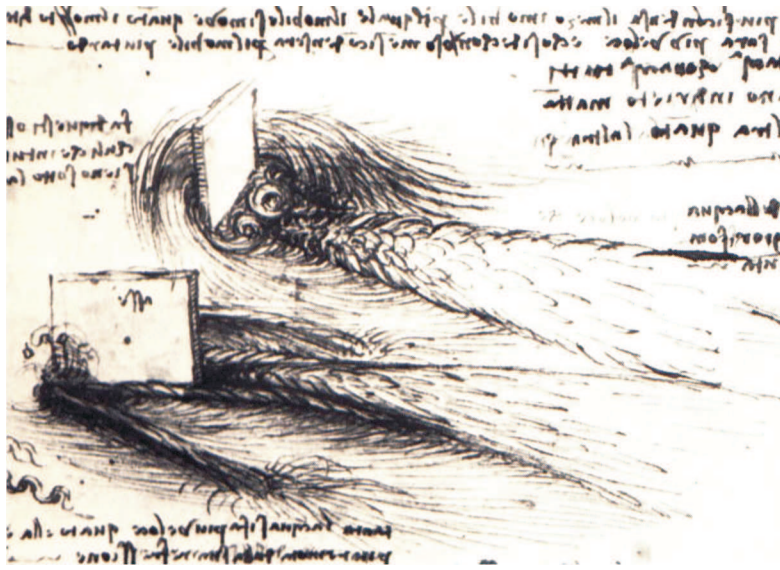
Bitte nutzen Sie die Möglichkeit, die Ergebnisse der Frühjahrstagungen auf CD zu bekommen.

Diese moderne, effektive und zitierbare Verbreitung braucht Kunden.

Das Erscheinen dieser Serie ist keineswegs auf Dauer gesichert.

Ihr Wolfgang Send.

Internet: <http://www.aniprop.de> - e-Mail: [wsend@aniprop.de](mailto:wsend@aniprop.de)



Wirbelströmungen, Leonardo da Vinci

## Thesen zur Unterrichtung der Physik des Fliegens

Fliegen ist ein räumlicher Vorgang,  
die Erscheinung der Randwirbel  
ist es auch.

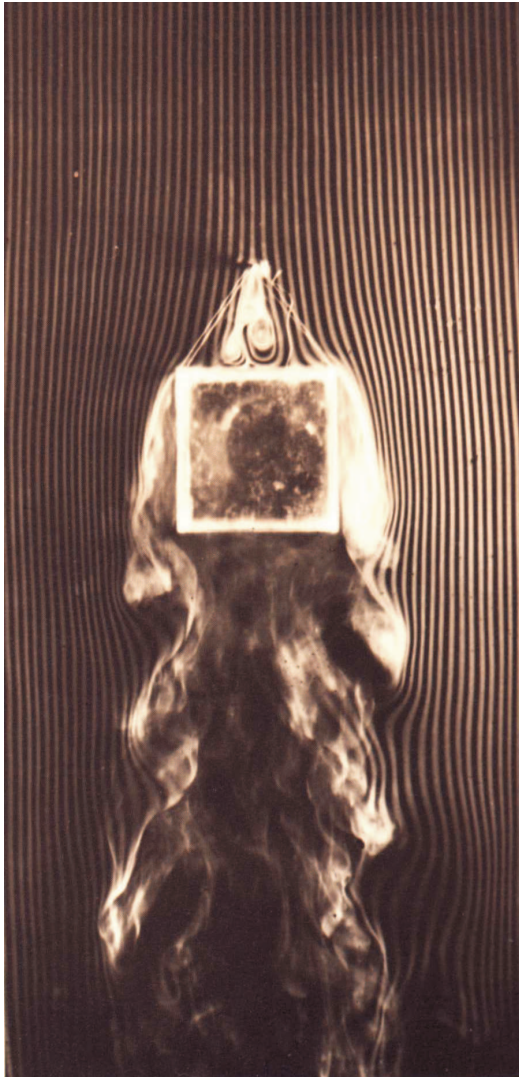
Tragflächen sind immer endlich lang.  
Der 2D Schnitt ist ein schwieriger  
Grenzfall, kein Einstieg.

Die Entstehung des Auftriebs in  
der Aerodynamik ist Folge  
gezielter Formgebung.

Die Anströmung einer Tragfläche  
ist keine Schrotladung von Partikeln.

## Auftrieb und Wirbeldichte beim Fliegen

### Wolfgang Send



Die Wirbel in der Aerodynamik zeichnen sich durch die Besonderheiten aus, unter denen sie entstehen. Sie entstehen sozusagen in Reinkultur.

Es gibt die große Grundgeschwindigkeit  $u_0$ , mit der sich das Fluid relativ zum umströmten Körper bewegt.

Der umströmte Körper ist aerodynamisch "günstig" geformt, so dass die vorbeiströmenden Partikel der Kontur folgen können ("stromlinienförmig").

Die umströmten Flächen haben eine möglichst große Grundrissfläche  $A$  parallel zur Richtung der Grundgeschwindigkeit und eine möglichst geringe Stirnfläche  $S$ .

Die "tragenden" Flächen, also die Flügel eines Lebewesens oder eines Flugzeugs, haben ein möglichst großes Seitenverhältnis von Spannweite  $b$  zu Flügeltiefe  $l$ .

Umströmung eines quadratischen Hindernisses.  
Stromlinien in einem Rauchkanal von É.-J. Marey.  
Die Aufnahme ist um 1900 entstanden.

Das voranstehende Bild zeigt, wie eine Strömung sich verhält, wenn der Körper nicht “günstig” geformt ist. Kräfte quer zur Anströmung und in Anströmrichtung wirken auch bei der Umströmung dieses Rechtecks oder bei jedem anderen Körper. Eine Auftriebskraft ist also praktisch immer vorhanden. Es kommt nur darauf an, sie optimal zu “züchten”.

Die Bilder von Vögeln, Insekten, flugfähigen Samen und natürlich von technischen Fluggeräten zeigen Vorlagen für eine stromlinienförmige Gestaltung der Tragflächen. An solchen Flächen baut sich eine besonders ausgeprägte Querkraft auf, die als Auftrieb für den Flug genutzt wird.

Normalerweise ruht die Luft und die Fluggeräte bewegen sich durch ein ruhendes Fluid. Mit dieser Anschauung sollte der Unterricht auch stets anfangen. Die Vorstellung einer zeitlich stationären Umströmung, wie sie viele Abhandlungen zeigen, verlangt ein hohes Maß an Abstraktionsfähigkeit.

Und noch etwas: Die Bedingungen, unter denen zentrale Aussagen der Aerodynamik in der Theorie gewonnen werden, lassen sich im Experiment nur bei großer Sorgfalt herstellen. Um die Entstehung des Auftriebs mit einem Experiment zu belegen, muss man einen hohen Aufwand betreiben. Anderenfalls bekommt man Ergebnisse, die leicht zu groben Fehldeutungen verleiten.

**Jede** Tragfläche setzt der Strömung einen Widerstand entgegen, dessen Quelle die örtliche Schubspannung auf der Oberfläche ist. Dieser Beitrag zum Widerstand der Tragfläche ist die *Reibung* des Fluids an der Oberfläche.

Wegen der geringen Stirnfläche ist der Beitrag der Schubspannung zum Auftrieb vernachlässigbar klein.

Jede Anstellung einer symmetrischen Tragfläche gegenüber der Anströmung oder die Wölbung der Fläche unter den Bedingungen, die die Aerodynamik kennzeichnen, führt zu einer ausgeprägten Querkraft, die *dynamischer Auftrieb* oder kurz *Auftrieb* genannt wird.

Auf der Oberseite herrscht bei positiver Anstellung oder Wölbung Unterdruck, auf der Unterseite ein Überdruck.  
Dies zeigen sehr deutlich Druckmessungen, für die der Druck aus feinen Bohrlöchern in der Oberfläche abgeleitet wird.

## Bedingungen für den dynamischen Auftrieb (I)

Im Mittelbereich einer Tragfläche entsteht durch die anliegende Umströmung ein Druckunterschied zwischen der Oberseite und der Unterseite. Dieser Druckunterschied gleicht sich erst zu den beiden Flügelspitzen hin aus, da dort die Seitenkanten der Flügel umströmt werden können.

Es zeigt sich bei genauen Messungen, dass die Resultierende der Druckverteilung im Mittelschnitt einer Tragfläche praktisch senkrecht auf der Richtung der Anströmung steht.

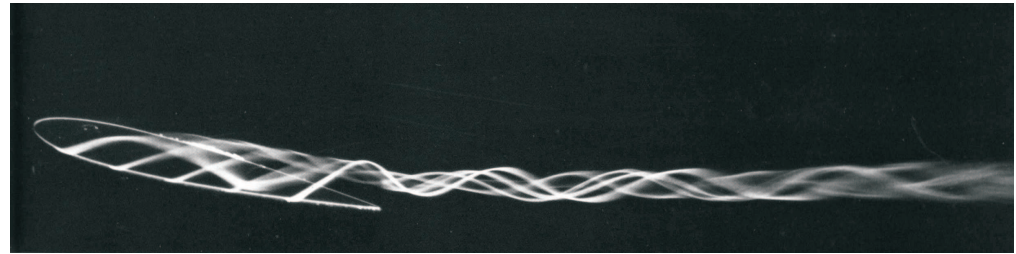
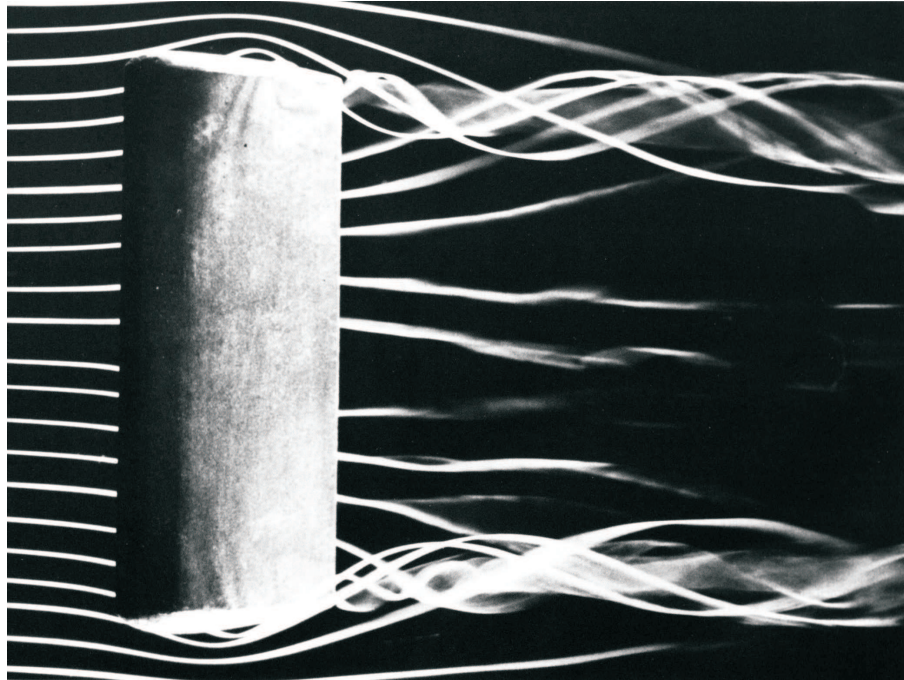
Dies bedeutet, dass die resultierende Druckkraft der Strömung keine Leistung verzehrt.

Zu den Flügelspitzen hin nimmt die Druckdifferenz zwischen Ober- und Unterseite ab und neigt sich die Richtung der resultierenden Druckkraft stromab. Der Widerstand erhält einen weiteren Beitrag: den *Druckwiderstand*.

Dies bedeutet, dass zusätzliche Leistung aufgebracht werden muss.

Der Druckausgleich an den Flügelspitzen wird begleitet von einer spektakulären Erscheinung, den Randwirbeln. Die beiden *Randwirbel* sind sehr konzentriert und können durch geeignete Maßnahmen - auch mit schulischen Mitteln - sichtbar gemacht werden.

## Bedingungen für den dynamischen Auftrieb (II)



Randwirbel einer 3D Tragfläche, Profilquerschnitt NACA0012 nach H. Werlé (oberes Bild) und M.R. Head (linkes Bild).

*Oberes Bild:* Seitenverhältnis  $b/l = 4$ , Anstellwinkel =  $12.5^\circ$ .

Reynoldszahl  $Re = 10,000$ . Laminare Strömung mit Ablösung. Farbtinte im Wasserkanal.

*Linkes Bild:* Anstellwinkel =  $24^\circ$ . Reynoldszahl  $Re = 100,000$ .

Laminare Strömung. Anliegende Strömung durch Absaugen über eine perforierte Metallfläche mit aufliegendem, luftdurchlässigem Papier erreicht. Rauchlinien im Windkanal.

Die Bedingungen, unter denen zentrale Aussagen der Aerodynamik in der Theorie gewonnen werden, lassen sich im Experiment nur bei großer Sorgfalt hinsichtlich der Strömungsqualität und der zentralen Kenngrößen näherungsweise herstellen.

Bei jeder Unterrichtung der Physik des Fliegens sollte die Erscheinung der Randwirbel zu den ersten Experimenten zählen, die die Beobachtung des Auftriebs begleiten. Der Auftrieb ist in seinem physikalischen Kern eine dreidimensionale Erscheinung. Erst müssen die räumlichen Beobachtungen zur Entstehung der Druckdifferenzen und ihres Ausgleichs stattfinden.

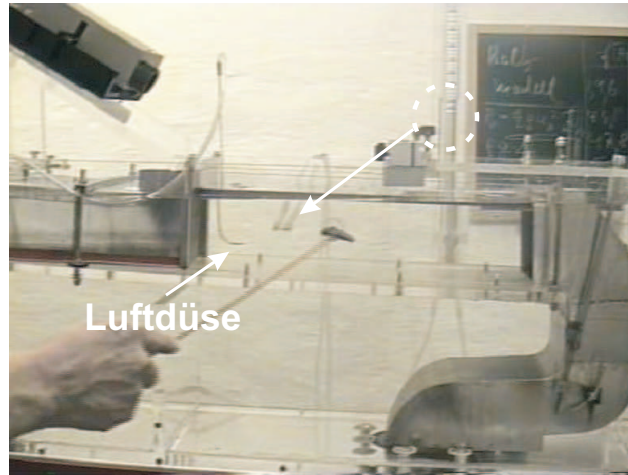
Dazu zählt in der Sekundarstufe I auch der Bau eigener kleiner Flugmodelle, für die es im Handel ausgezeichnete Vorlagen gibt.

Dann kann man in einem zweiten oder dritten Schritt die Erscheinung des Auftriebs im Flügelschnitt isolieren und gegebenenfalls auf eine theoretische Beschreibung zugehen.

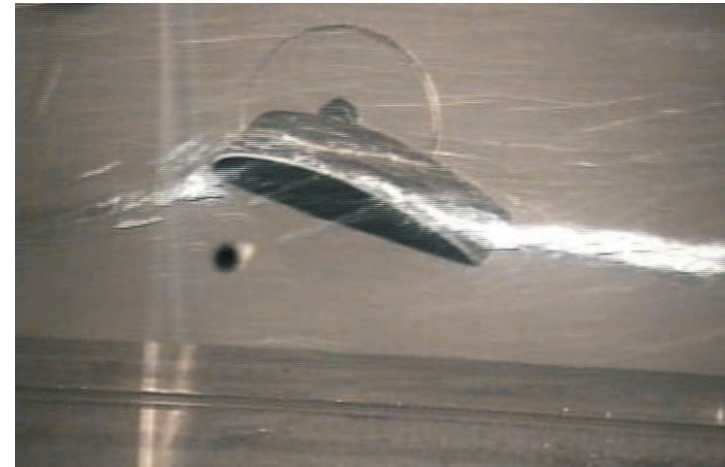
Die derzeitigen didaktischen Konzepte gehen genau den entgegengesetzten Weg. Nur der zweidimensionale Schnitt steht im Vordergrund. Man verstrickt sich in unzulänglichen und oft falschen Erklärungen, bevor die wesentlichen Phänomene überhaupt gezeigt worden sind (genau deswegen ein neuer Einstieg).

Wenn man das richtige Ziel der räumlichen Tragfläche vor Augen hat, lassen sich Experimente schon mit vergleichsweise einfachen Mitteln realisieren.

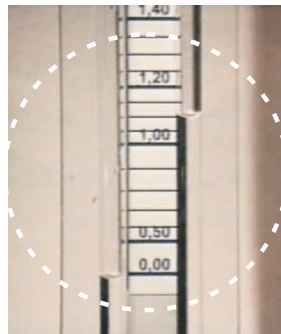
## **Empfehlenswerter Zugang zur Physik des Fliegens**



Versuchsaufbau



Randwirbel an der linken Flügelspitze

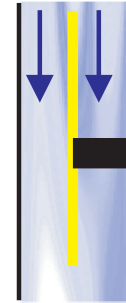


Messung Differenzdruck

Privater Wasserkanal mit  $Q_{\max} = 3 \text{ m}^3/\text{min}$   
Kanalquerschnitt:  $0.2 \text{ m} \times 0.12 \text{ m}$   
Anströmung im Versuch:  $1.1 \text{ m/s}$   
Profilabmessungen:  
Spannweite  $0.1 \text{ m}$   
Flügeltiefe  $0.05 \text{ m}$   
Reynoldszahl im Versuch:  $0.6 \times 10^5$

## Experiment zur Sichtbarmachung des Randwirbels

Bei dem voranstehenden Experiment reicht das Modell einer Tragfläche nur vom Rand bis zur Mitte der Strömung. Der Diaprojektor beleuchtet durch einen Spalt in einem ansonsten durch Aluminiumfolie abgedeckten Dia genau den Bereich des Randwirbels. Dadurch entsteht der plastische Eindruck vom Randwirbel.



Die Strömung wird stromauf mit eingeblasener Luft “geimpft”, die hinter der Kanüle von  $d=0,4$  mm zu kleinen Bläschen zerreißt. Zwar werden durch den hydrostatischen Auftrieb die Bläschen nach oben gedrückt, aber viele werden auch von der einsetzenden Drallströmung am Tragflchenrand eingefangen und markieren auf diese Weise die Lage des Randwirbels.

Der Wasserkanal ist prinzipiell auch für eine Schule verfügbar, da er kommerziell erworben werden kann. Der Aufwand dafür ist aber in der Regel nicht sinnvoll. Wir arbeiten derzeit an Möglichkeiten, die Randwirbel mit Schulexperimenten preisgünstig und zuverlässig sichtbar zu machen. Denn diese Sichtbarmachung ist ein entscheidendes Experiment für das in diesem Vortrag vorgestellte Konzept eines neuen Einstiegs in die Physik des Fliegens.

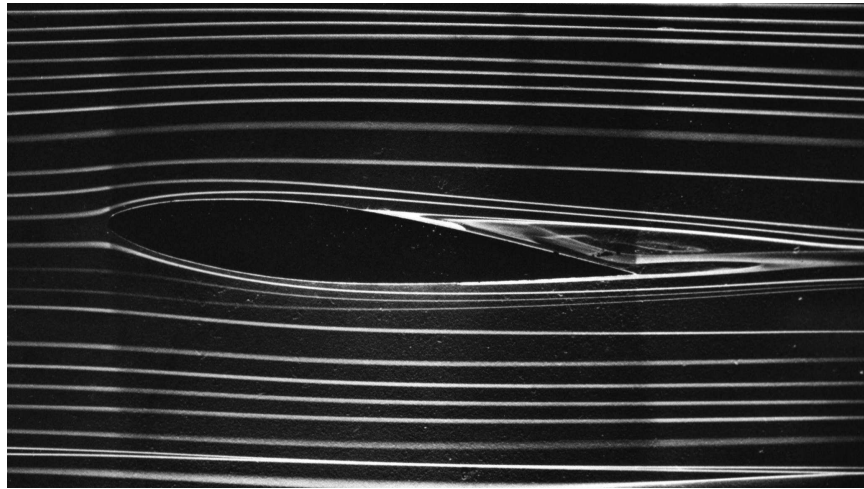
Der “neue” Einstieg ist eigentlich ein altes Konzept, das nur den natürlichen Vorstellungen und Beobachtungen beim Fliegen nachgeht. Der übliche Einstieg über die Betrachtung des Querschnitts einer Tragfläche ist nach Ansicht des Autors für die Sekundarstufe I viel zu weit gehend und unanschaulich

In den folgenden Bildern sollen die mit der Anschauung gewonnenen Einsichten theoretisch noch etwas vertieft werden. Insbesondere erweckt eine Frage immer wieder intensive Diskussionen:

## **Wo kommt denn eigentlich der Auftrieb her?**

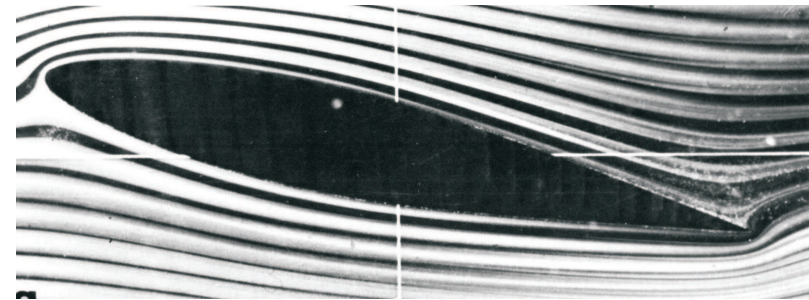
Wir geben darauf eine Antwort in drei Schritten:

- 1.** Der Auftrieb ist definitionsgemäß die Summe der lokalen Tangential- und Normalkräfte (Druck und Schubspannung) quer zur Richtung der stationären Flugbewegung. Eine solche Querkraft stellt sich bei jedem umströmten Körper ein. Bei aerodynamisch günstig geformten Körpern, eben den Tragflächen, ist diese Querkraft sehr ausgeprägt. Sowohl die Anstellung einer Tragfläche wie die Wölbung einer Tragfläche führen zum gleichen Ziel einer solchen starken Querkraft.
- 2.** Betrachtet man bei positivem Auftrieb die Partikelbahnen im Mittelschnitt einer Tragfläche, dann beobachtet man bei wohlgeschichteter (laminarer) Strömung eine Teilung der Strömung sehr dicht an der Vorderkante im so genannten Staupunkt. Der Staupunkt liegt auf der Unterseite. Die teilende Stromlinie verschiebt sich mit zunehmendem Auftrieb immer mehr unter die Linie des auftriebslosen Falls, wodurch mehr Fluidmasse auf der Oberseite um den Querschnitt der Tragfläche herum geführt wird. Entsprechend weniger Fluid fließt nun auf der Unterseite des Querschnitts. Obwohl Unterdruck auf der Oberseite herrscht, strömen die Partikel auf der Unterseite wegen der Zähigkeit des Fluids aber glatt an der Hinterkante ab und versuchen nicht, auf die Oberseite zurück zu strömen .
- 3.** Die größere Menge an Fluid im gleichen Querschnitt führt wegen des konstanten Zuflusses auf der Oberseite zur größerer, auf der Unterseite zu entsprechend geringerer Fließgeschwindigkeit. Die Bernoullische Gleichung liefert zu diesen Geschwindigkeiten den zugehörigen Druck, der auf der Oberseite geringer ist als auf der Unterseite. Der Druckunterschied äußert sich als Auftriebskraft.

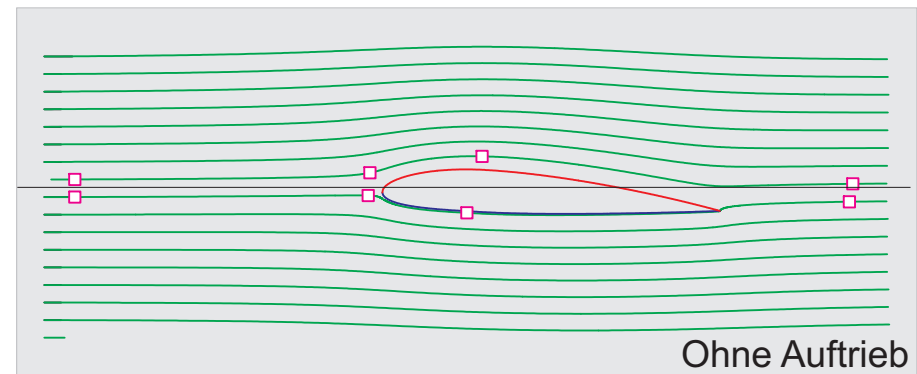
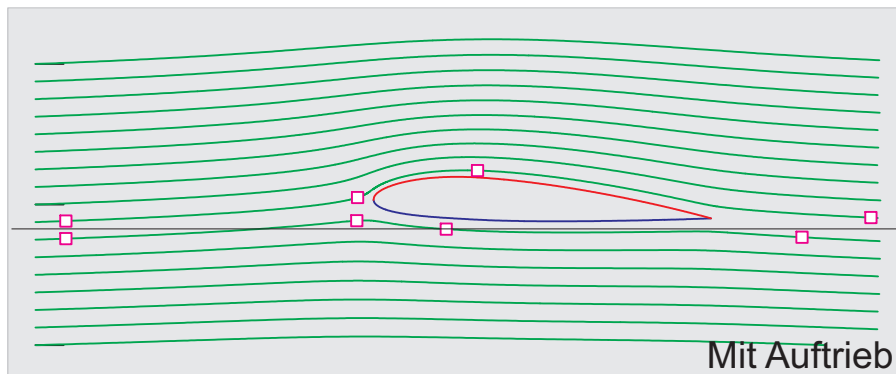


**Strömung mit Auftrieb (auf der Oberseite zeigt sich eine Ablösung vor der Hinterkante)**

Van Dyke, M. (Ed.), An Album of Fluid Motion, The Parabolic Press, Stanford, California, 1982



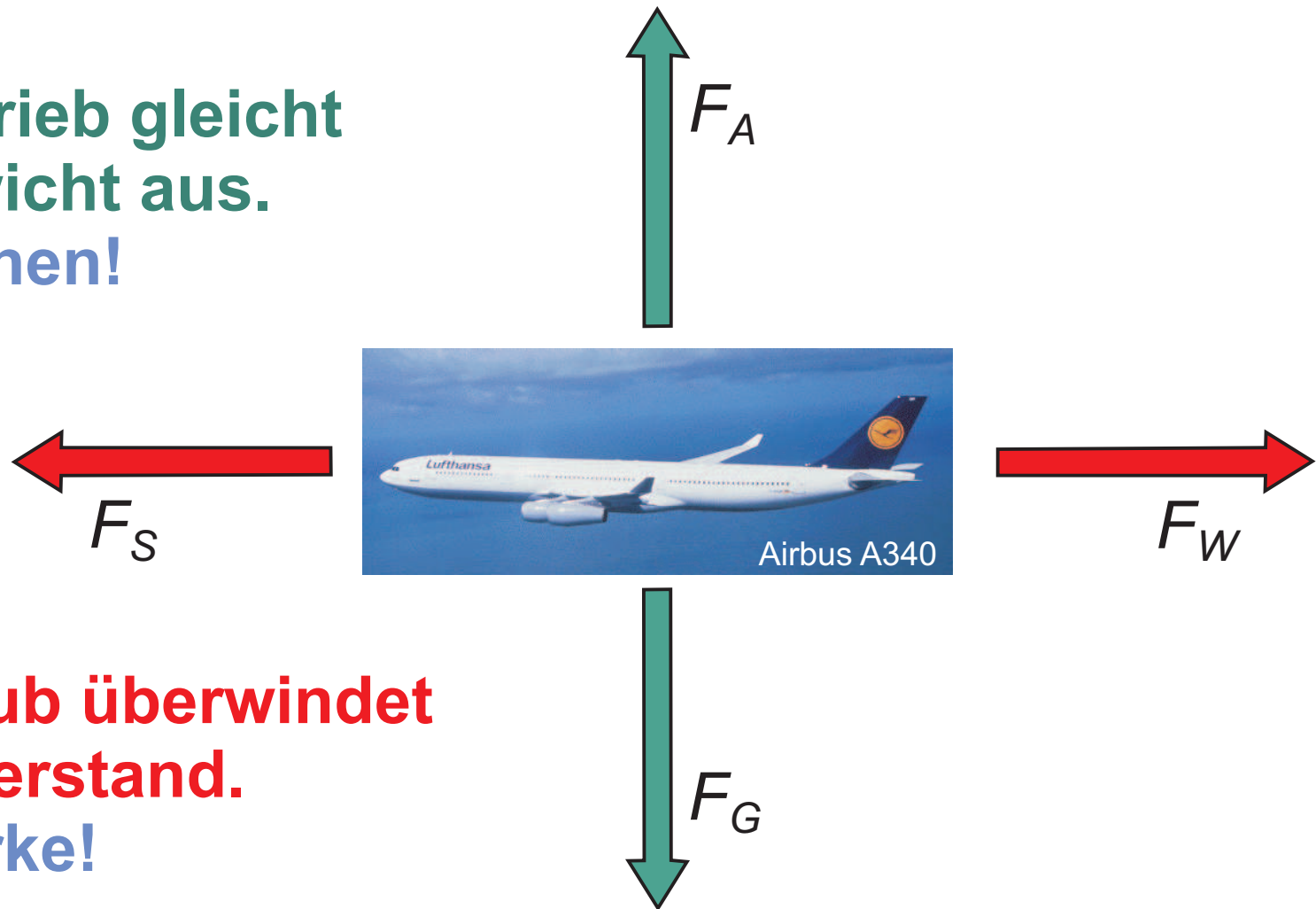
**Strömung ohne Auftrieb (die Hinterkante wird von den Partikeln umströmt)**



## **Profil mit und ohne Umströmung der Hinterkante**

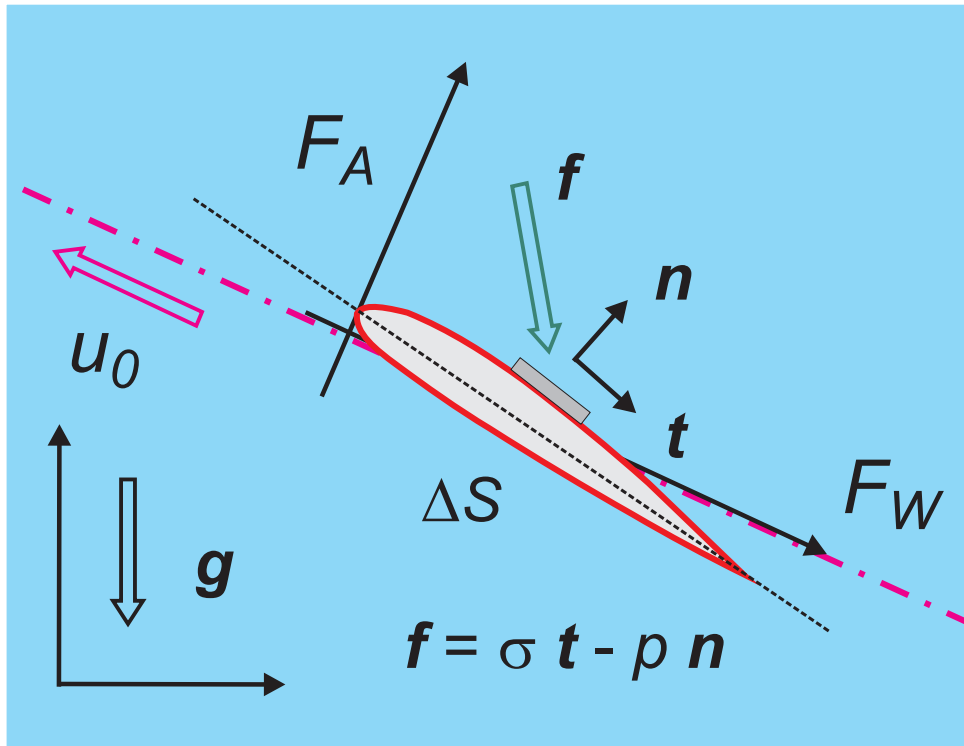
**Partikelbahnen um Ober- und Unterseite, NACA2312 mit 3° Anstellung**

**Der Auftrieb gleicht  
das Gewicht aus.  
Tragflächen!**



**Der Schub überwindet  
den Widerstand.  
Triebwerke!**

**Das zentrale Gleichgewicht beim Fliegen**



Die Auftriebskraft zeigt definitionsgemäß quer zur Bahnrichtung und verrichtet deshalb bei gleichförmiger Geschwindigkeit keine Leistung.

Leistung wird nur in Bahnrichtung aufgebracht durch die zu überwindende Widerstandskraft.

Alles Fliegen beruht auf Erzeugung von Luftwiderstand, alle Flugarbeit besteht in Überwindung von Luftwiderstand."

*Otto Lilienthal  
Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst, Berlin 1889*

## Kräfte an der Tragfläche

“Alles Fliegen beruht auf Erzeugung von Luftwiderstand, alle Flugarbeit besteht in Überwindung von Luftwiderstand.“

Otto Lilienthal, Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst. Berlin 1889

„Wenn ein Körper sich durch die Luft bewegt, so werden die Luftteile vor dem Körper gezwungen, auszuweichen und selbst gewisse Wege einzuschlagen. Auch hinter dem Körper wird die Luft in Bewegung geraten.

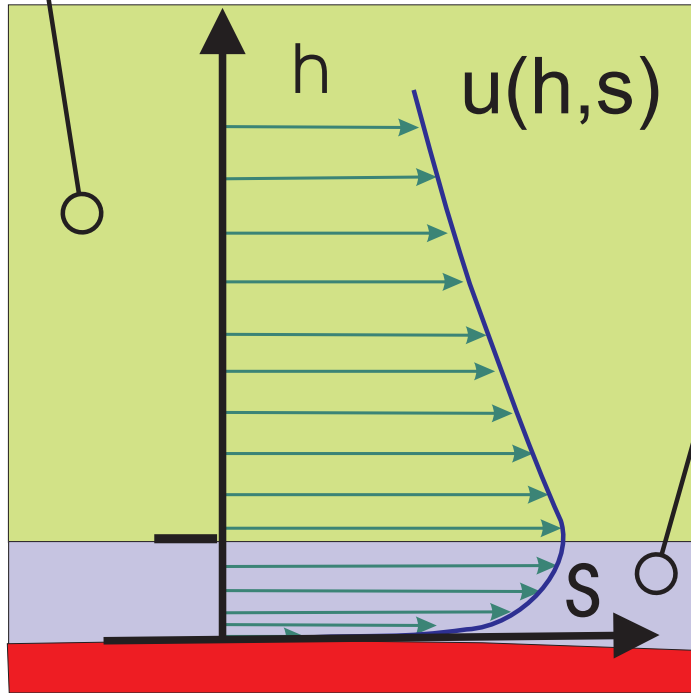
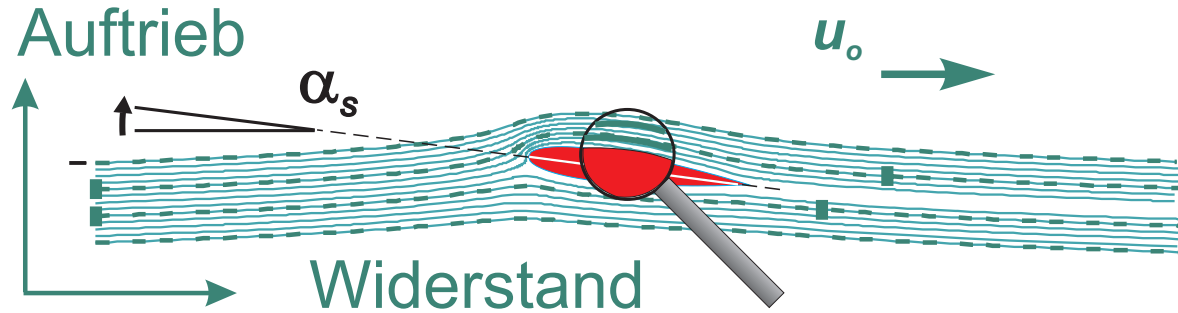
Die hinter dem Körper befindliche Luft wird teilweise die Bewegungen des Körpers mitmachen, und außerdem werden gewisse regelmäßige Wirbelbewegungen in der Luft entstehen, welche sich noch eine Zeit lang auf dem von dem Körper in der Luft beschriebenen Wege vorfinden werden und erst allmählich durch die gegenseitige Reibung aneinander zur Ruhe kommen.

**Der vorher in Ruhe befindlichen Luft müssen alle diese Bewegungen, die für das Hindurchlassen des Körpers durch die Luft nötig sind, erst erteilt werden; und deshalb setzt die Luft dem in ihr bewegten Körper einen gewissen meßbaren Widerstand entgegen, zu dessen Überwindung eine gleich große Kraft gehört.“**

Aus Kapitel 5, Allgemeines über den Luftwiderstand

## **Entdeckung der Bedeutung des Luftwiderstands durch Otto Lilienthal**

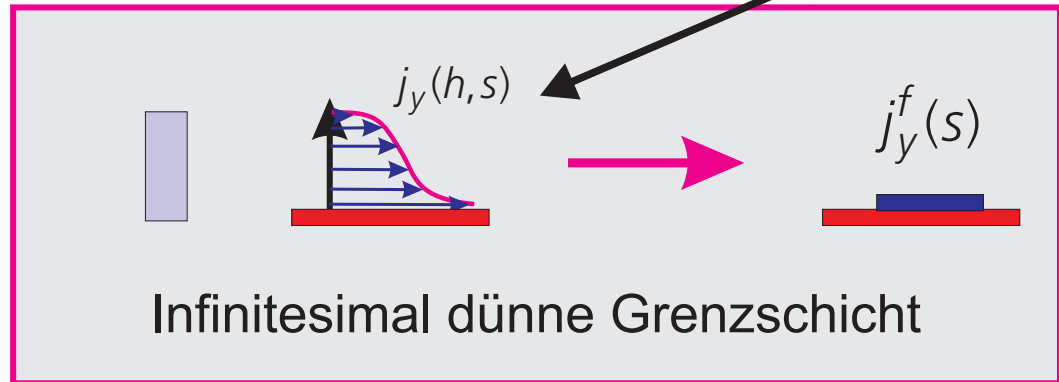
Außenströmung  
Partikel werden verdrängt



Grenzschicht  
Partikel werden mitgerissen

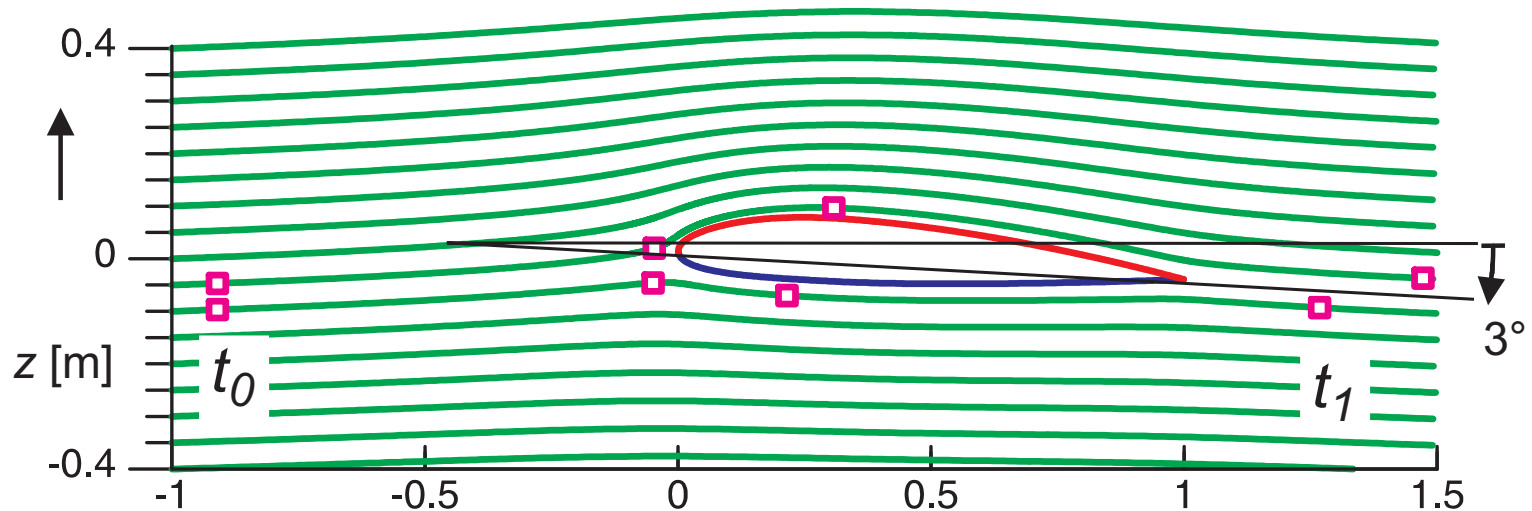
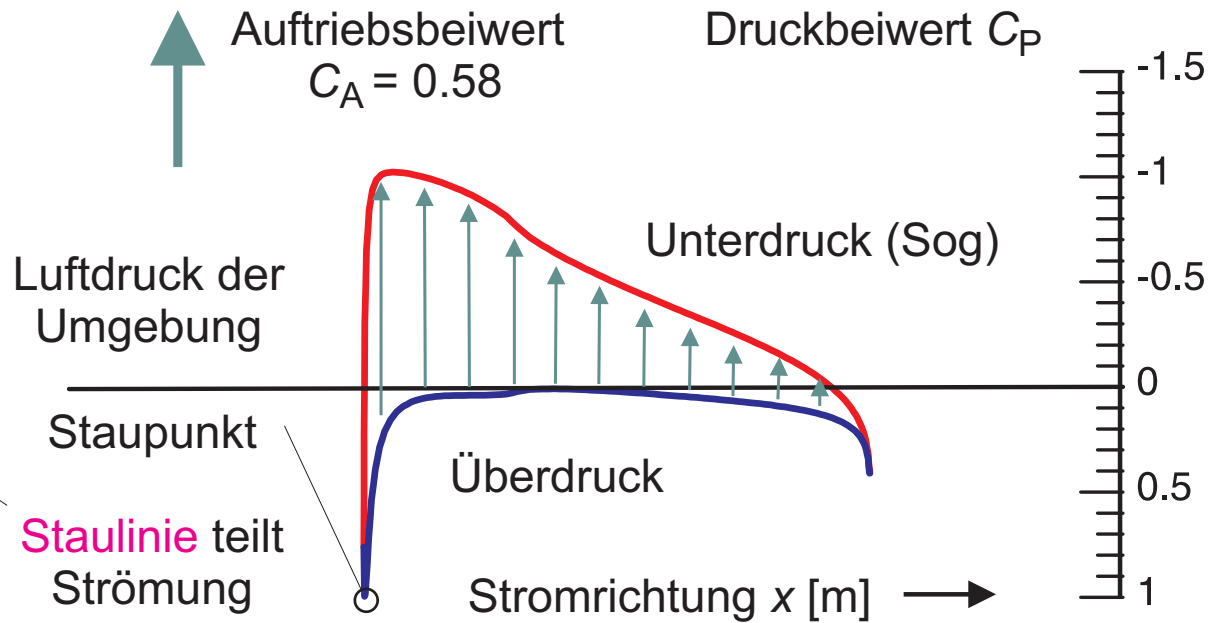
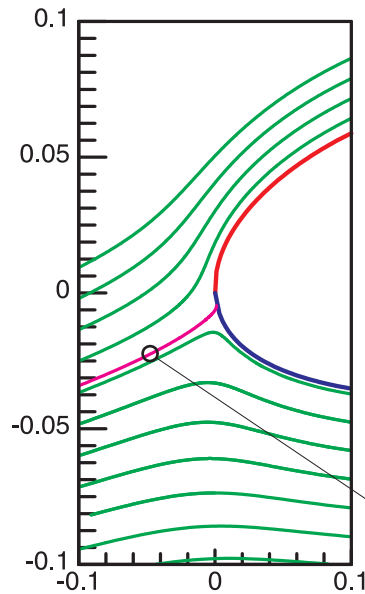
$\eta$  Zähigkeit des Fluids

$$\sigma_0(s) = \eta \cdot \left[ \frac{\partial u(h,s)}{\partial h} \right]_{h=0}$$



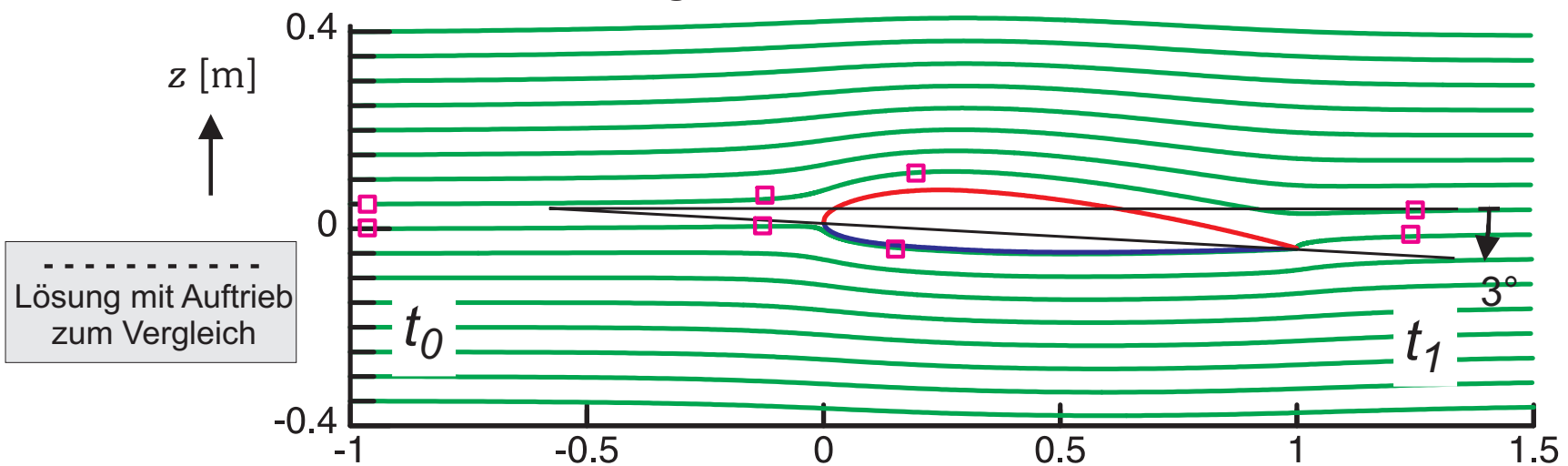
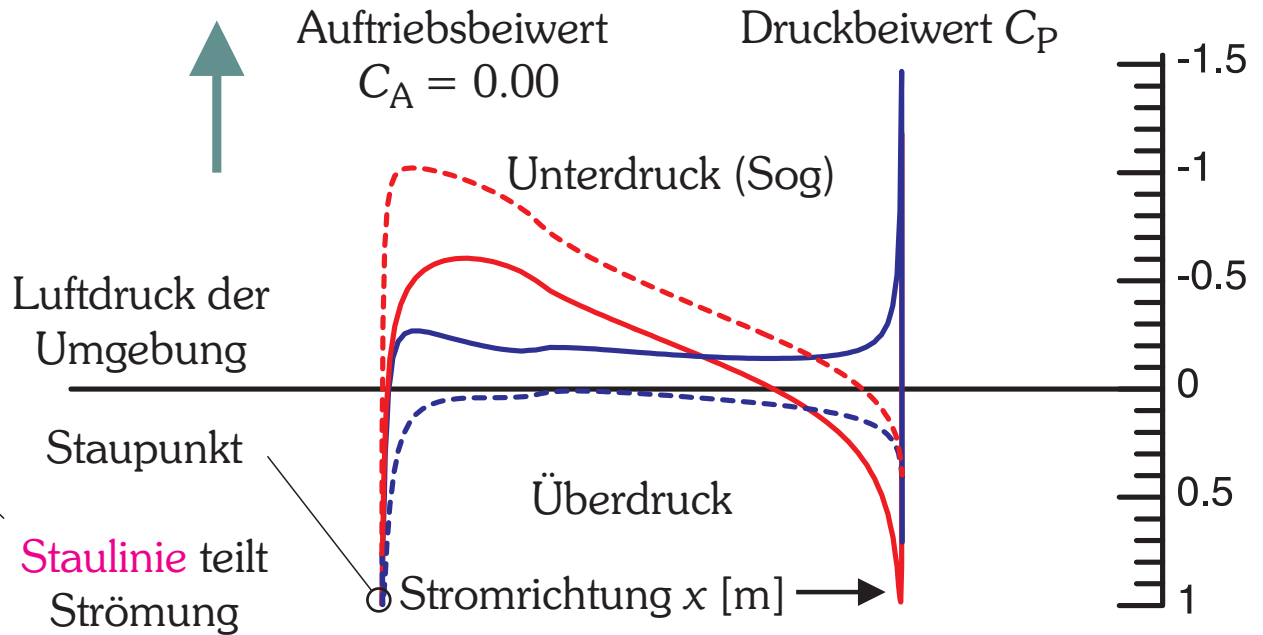
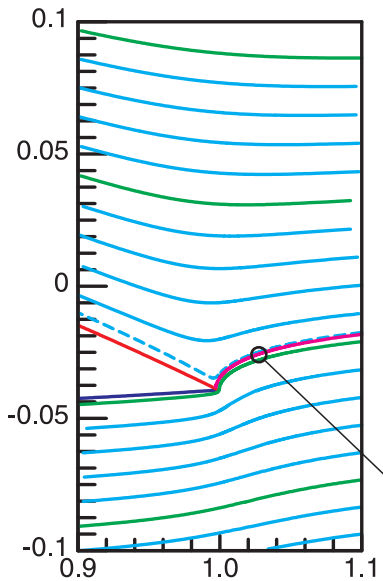
## Die Prandtlische Grenzschicht

### Räumliche und flächenhafte Wirbeldichte $j_y$



## 2D Tragfläche mit Auftrieb

### Querschnitt NACA2312, Anstellwinkel 3°

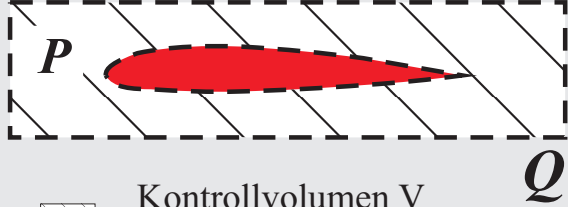


**Auftriebslose 2D Tragfläche**  
**Querschnitt NACA2312, Anstellwinkel 3°**

Die voranstehenden Bilder bedürfen sicherlich der Vertiefung, wozu auch auf die eingangs erwähnte Arbeit *Physik des Fliegens* und auf die Internetseite <http://www.aniprop.de> verwiesen sei. Folgende Tatsachen seien auch hier noch einmal festgehalten:

- Jede lokale Betrachtung mit dem Impulssatz führt nur zu Aussagen, die für die Entstehung des Auftriebs bestenfalls unerheblich sind. Nur die Impulsbilanz als Integral über ein Volumen, das die Tragfläche ganz umschließt, gibt die Antwort auf Auftrieb und Widerstand. Im 2D Fall des Querschnitts durch eine Tragfläche ist der Integrationsbereich eine den ganzen Querschnitt umschließende Fläche. In stationärer Strömung bleibt der Impuls eines Kontrollvolumens zeitlich unverändert. Der innere Rand ist stets die Oberfläche des Tragflügels. Da auf der Oberfläche die Partikelbahnen tangential verlaufen, ergeben sich am Innenrand des Integrals bei stationärer Strömung unmittelbar die Komponenten des Kraftvektors: Aus den Werten längs der Kurve Q folgen die Werte auf P.
- **Auftrieb folgt aus globalen Eigenschaften der Strömung, die durch lokale Betrachtungen nicht ermittelt werden können.**
- Die Bernoullische Gleichung ist keine Lösung für die Umströmung einer Tragfläche. Diese Lösung ist nur über die Erfüllung einer Randwertaufgabe zu beschaffen, aus der das Geschwindigkeitsfeld folgt. Die Bernoullische Gleichung liefert nur zu einem vorhandenen Geschwindigkeitsfeld das Druckfeld.
- Die Zähigkeit des Fluids ist wesentlich für das Entstehen von Auftrieb. Wird die Hinterkante umströmt, dann kann sich keine Querkraft ausbilden. Über die Abflussbedingung wird die Auswirkung der Zähigkeit berücksichtigt, ohne dass diese in Rechnungen, z.B. in der Bernoullischen Gleichung, dann noch ausdrücklich aufgeführt sein muss.

**2D Profil mit Kontrollflächen**



Kontrollvolumen V  
 mit innerem Rand P und  
 äußerem Rand Q

Mit

Geschwindigkeitsfeld  $\mathbf{v}$

Dichte  $\rho$

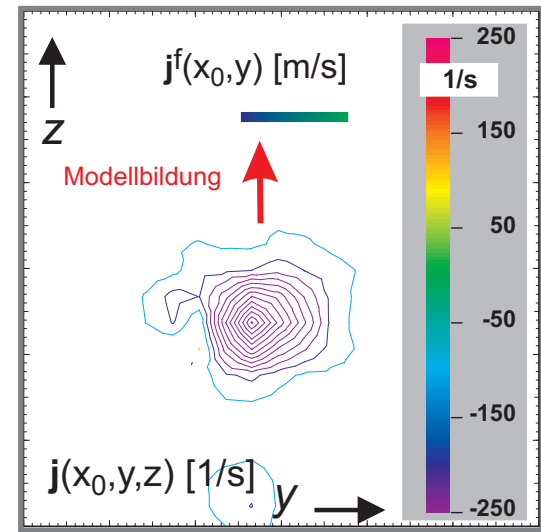
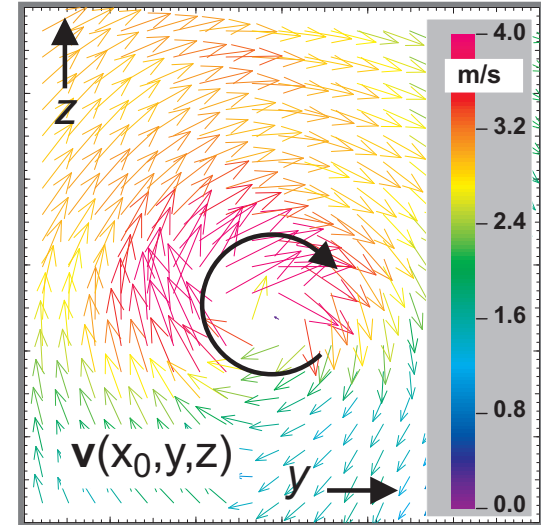
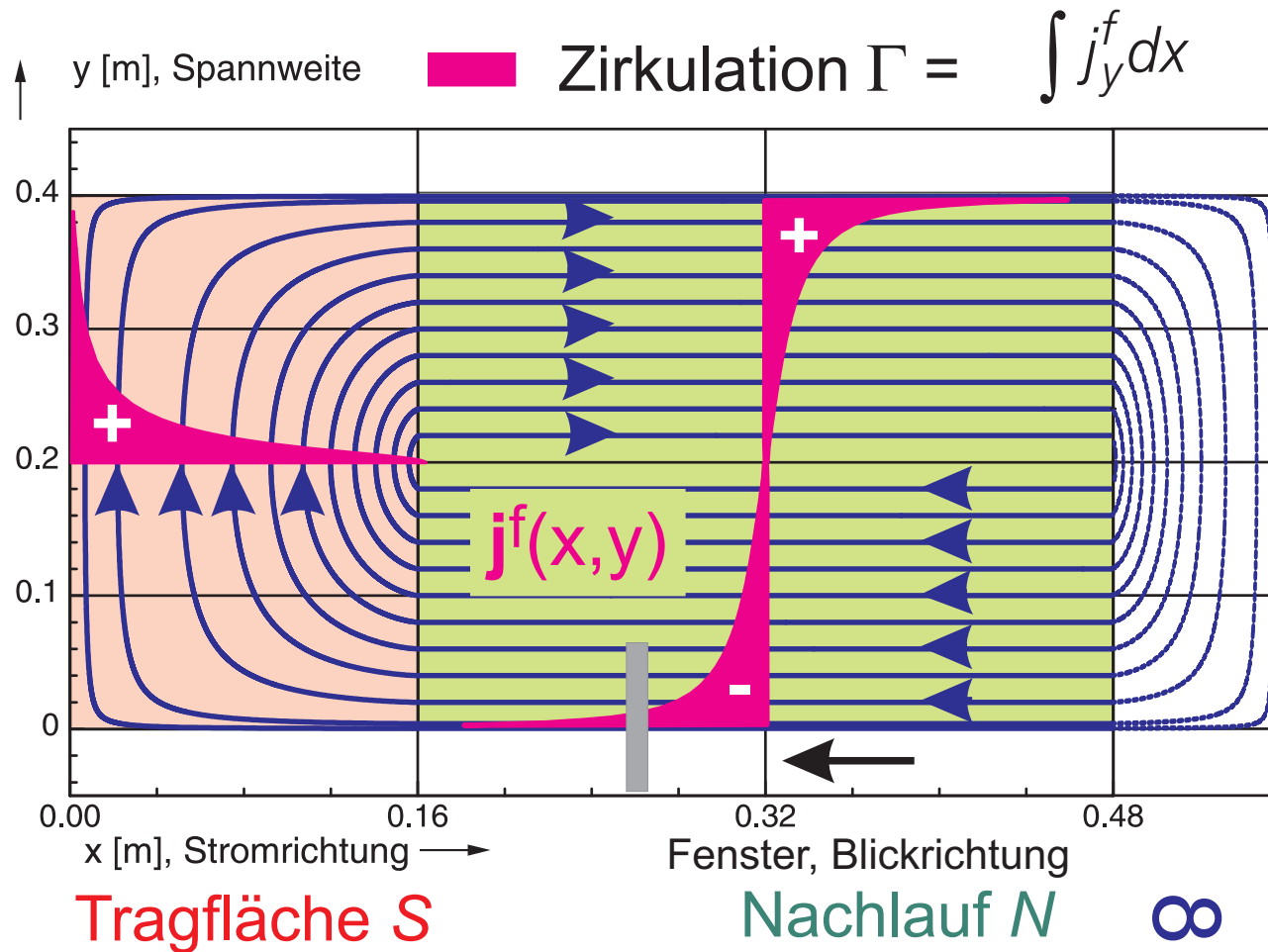
Impulsdichte  $\rho \mathbf{v}$

Normalenvektor  $\mathbf{n}$

Impulsstromdichte  $p \mathbf{n} + \rho \mathbf{v}(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n})$

lautet der Impulssatz im 2D Fall:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iint_V \rho \mathbf{v} dv = - \oint_{P+Q} (p \mathbf{n} + \rho \mathbf{v}(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n})) ds$$



Particle Image Velocimetry (PIV)

**Stationäre Anströmung der ebenen Platte**  
 Modell der flächenhaften Wirbeldichte  $j^f$  und Randwirbel (exp.)  
 (Messung am Rundlauf ANIPROP RL3)

Das voranstehende Bild gibt einen Eindruck davon, wie Theorie und Experiment zur Erklärung des Auftriebs zusammen passen.

Ob endlich dicke Tragfläche oder dünne ebene Platte: Die Lösung des Problems der Umströmung einer Tragfläche liefert eine zentrale Größe, die Wirbeldichte  $j$ . Diese Wirbeldichte hüllt die umströmte Fläche ein, denn in  $j$  drückt sich aus, dass Energie vom bewegten Körper auf das zuvor ruhende Fluid übertragen worden ist. In jeder Zeiteinheit fließt diese Wirbeldichte von der Tragfläche ab und bleibt hinter ihr als "Quelle" für die großräumige Bewegung der Partikel in den Randwirbeln zurück.

Bei großen Geschwindigkeiten kann diese Hülle mit Wirbeldichte als sehr dünn, ja mathematisch infinitesimal dünn, angesehen werden: Es ergibt sich eine flächenhafte Belegung der Oberfläche des umströmten Körpers. Bei einer dünnen Platte kann die Schicht von Ober- und Unterseite zusammengefasst werden. Die lokale Stärke der Schicht ist Ausdruck des lokalen Druckunterschieds zwischen Ober- und Unterseite.

Die Integralkurven der flächenhaften Wirbeldichte haben die Form eines Hufeisens, da der schließende Teil als bereits unendlich weit entfernt hinter dem Profil angesehen wird.

Im Experiment ist diese Wirbelschicht hinter der Tragfläche nicht flächenhaft dünn, sondern ein dünner Kern, dessen Stärke, die Zirkulation, man mit der Theorie vergleichen kann.

\* \* \* \* \*