

# „Das Geheimnis des Fliegens“

Seminararbeit im Fach Physik von Anna Schütz



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Grundlegende Annahmen und Größen</b> .....	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Kräfte bei einem Flugzeug</b> .....	<b>5</b>
	<b>3.1 Auftriebskraft</b> .....	<b>6</b>
	<b>3.3.1 Bernoulli-Effekt</b> .....	<b>6</b>
	<b>3.3.2 Newtonsche Axiome und Coandaeffekt</b> .....	<b>9</b>
	<b>3.2 Widerstandskraft</b> .....	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>Einfluss der Tragflächenprofile auf die Flugeigenschaften</b> .....	<b>15</b>
	<b>4.1 Ziele der Konstruktion</b> .....	<b>15</b>
	<b>4.2 Theoretische Überlegungen zur Umsetzung der Ziele</b> .....	<b>15</b>
	<b>4.3 Praktische Übereinstimmung der zuvor ausgewählten Ziele</b> .....	<b>15</b>
<b>5</b>	<b>Schluss</b> .....	<b>15</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>16</b>

# 1 Einleitung

Schon seit Kindertagen bin ich eine leidenschaftliche Modellflugpilotin und mich fasziniert das Fliegen. Wenn ich mir vorstelle, dass der Airbus A380 bis zu 560t wiegt, dann ist es sehr beeindruckend, wie dieses Gewicht fliegen kann. Umgerechnet wären es über 380 Mittelklasse PKWs, die sich in der Luft bewegen. Aber es funktioniert dank einigen mutigen Flugpionieren und langer Entwicklung. Alles begann mit der Beobachtung der Vögel. Mit derselben Art und Weise sollten wohl auch die Menschen fliegen können, dachten die flugbegeisterten Erfinder. Zu Beginn ist die Fliegerei ein wagemutiges Abenteuer. Leidenschaft, einmalige Entdeckungen und überwältigende Erfindungen treffen zusammen, doch viele Flugversuche scheiterten. Als erster Mensch flog Otto Lilienthal 1891 mit selbst gebauten Flügeln etwa 25m weit. Darauf folgte 1903 der erste Motorflug über 250m von den Brüdern Wright. Das einfache Doppeldecker-Einmann-Flugzeug, angetrieben von einem 12 PS-Motor, hatte bereits Ruder, um das Flugzeug zu steuern.<sup>1</sup>

Nach jahrelangem Tüfteln und Experimentieren gelang es den Forschern die Funktionsweise des Fliegens zu verstehen und so umzusetzen, dass Flugzeuge personentragend fliegen konnten. Heute nun sind die Menschen in der Lage mit einem Abfluggewicht von bis zu 560t zu fliegen und viele Experten, wie z. B. Dr. Helmut Quabeck oder Philip Kolb, haben sich ausgiebig mit der Aerodynamik beschäftigt. Aber was haben die damaligen Flugpioniere und die heutigen Wissenschaftler über die Funktion des Fliegens herausgefunden? Welches Geheimnis steckt dahinter? Diese Frage werde ich im Laufe dieser Arbeit beantworten. Bei der Erklärung des Fliegens werden die wirkenden Kräfte genauer betrachtet. Mit diesem Vorwissen möchte ich sogar noch einen Schritt weiter gehen und überlegen, ob und wie bestimmte Flugeigenschaften durch unterschiedliche Konstruktionen zustande kommen können. Wenn dies gelingt, könnten die Flugzeuge noch effektiver in ihrer individuellen Aufgabe eingesetzt werden. Abschließend wird ein ausgewähltes Modellflugzeug auf die Praxisübereinstimmung untersucht und somit der Nutzen der theoretischen Überlegungen abgeleitet. Dabei fließen sowohl meine eigenen Erfahrungen als auch die eines Experten mit ein.

---

<sup>1</sup> BR, Die Flugpioniere Wright. Planet Wissen, 14. Oktober 2019, [https://www.planet-wissen.de/technik/luftfahrt/fliegen\\_nach\\_dem\\_vorbild\\_der\\_natur/flugpioniere-wright-100.html](https://www.planet-wissen.de/technik/luftfahrt/fliegen_nach_dem_vorbild_der_natur/flugpioniere-wright-100.html)

## 2 Grundlegende Annahmen und Größen

Da diese Arbeit von bestimmten Bedingungen ausgeht und die Re-Zahl für sehr viele Abschnitte bedeutend ist, werden diese Annahmen zuerst erläutert. Auf dieser Grundlage werden alle folgenden Erklärungen betrachtet.

Folglich wird angenommen, dass sich der Flugkörper in dem Medium Luft befindet und diese eine gewisse Viskosität besitzt. Da für Strömungen in Luft und Wasser die gleichen Gesetzmäßigkeiten gelten, wird oft der vereinende Begriff Fluid verwendet.<sup>2</sup> Begründet durch die geringen Machzahlen von Segelmodellflugzeugen, auf die ich mich im Kapitel 4 hauptsächlich beziehe, und zur Vereinfachung werden keine Kompressionseffekte betrachtet, das bedeutet die Dichte bleibt immer konstant.<sup>3</sup> Des Weiteren beschränke ich mich in meiner Arbeit auf die Tragflächen, die für das Fliegen ausschlaggebend sind.

Darüber hinaus sollte die Reynolds-Zahl bekannt sein, eine dimensionslose Kenngröße, die folgendermaßen berechnet werden kann:

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta}$$

dabei gibt  $\rho$  die Dichte des Fluids an,  $v$  die Geschwindigkeit,  $d$  die charakteristische Länge – bei einem Flügel wäre dies die Tiefe – und  $\eta$  die Viskosität<sup>4</sup>

oder vereinfacht:

$$Re = v \cdot t \cdot 70000$$

mit  $v$  als Geschwindigkeit und  $t$  als Tiefe des Flügels<sup>5</sup>

---

<sup>2</sup> Wolfgang Send, Auftrieb und Wirbeldichte beim Fliegen, in Didaktik der Physik - Leipzig 2002, von V. Nordmeier, Berlin: Lehmanns-Verlag, 2002, S. 2.

<sup>3</sup> Ebd.

<sup>4</sup> Kolb, persönliches Interview, per Videokonferenz, 06.08.2023

<sup>5</sup> Werner Thies und Martin Hepperle, Eppler-Profile, MTB 1/2, Baden-Baden: Verlage für Technik und Handwerk, 1992 (11. Auflage), S. 5.

### 3 Kräfte bei einem Flugzeug

Hinter dem Fliegen steckt eine physikalische Erklärung. Dabei spielen die Kräfte eine wichtige Rolle, denn diese entscheiden, wie sich ein Körper bewegt. Beim Flugzeug gibt es vier Kräfte (s. Abb. 1), die in diesem Kapitel genauer erläutert werden.

Wie bei allen Körpern auf der Erde ist das Flugzeug der Gewichtskraft  $F_G$  unterworfen. Des Weiteren wirkt die Schubkraft  $F_S$  nach vorne. Diese entsteht durch Propeller oder Turbinen und kann somit vom Piloten aktiv verändert werden. Besondere Wichtigkeit besitzt diese Kraft beim Steigflug – wie in Abb. 1 dargestellt – oder bei der Geschwindigkeitszunahme.<sup>6</sup> Allerdings können bestimmte Flugzeuge auch ohne Schubkraft fliegen, das bestätigen Segelflugzeuge. Da ich mich später bei den Profilen der Tragflächen hauptsächlich auf Modellsegelflugzeuge beschränke, werde ich hier nicht weiter auf die Schubkraft eingehen, weil sie zum Fliegen mit solchen Flugzeugen nicht ausschlaggebend ist.

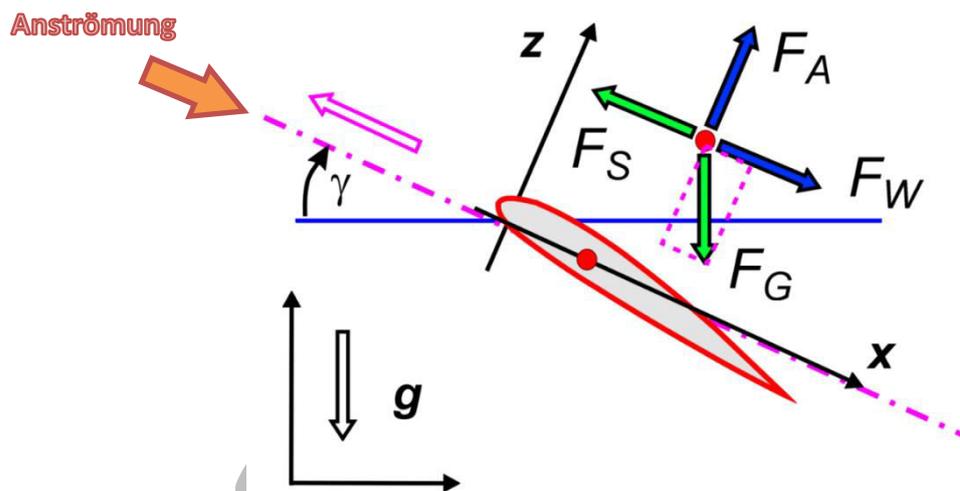


Abb. 1: Kräfte an der Tragfläche; hier im Flugzustand Steigflug<sup>7</sup>

Darüber hinaus wirkt die Widerstandskraft  $F_W$  nach hinten, da es z. B. Reibung ausgesetzt ist.<sup>8</sup> Die vierte und wichtigste Kraft ist die Auftriebskraft  $F_A$ , diese wirkt senkrecht zur Anströmung.<sup>9</sup> Deshalb trägt sie hauptsächlich zum Fliegen eines Flugkörpers bei. Nur auf die Stärke der Auftriebs- und der Widerstandskraft kann man durch die Profilierung der Tragflächen Einfluss nehmen. Das Verständnis von diesen beiden Kräften ist für die späteren

<sup>6</sup> Send, Auftrieb und Wirbeldichte beim Fliegen, Berlin, 2002, S. 6.

<sup>7</sup> Ebd.

<sup>8</sup> Helmut Quabeck, Design, Leistung und Dynamik von Segelflugmodellen, Babenhausen: HQ Modellflugliteratur, 1994, S. 36.

<sup>9</sup> Send, Auftrieb und Wirbeldichte beim Fliegen, Berlin, 2002, S. 7.

Überlegungen der verschiedenen Profile sehr wichtig, daher gehe ich im Folgenden auf den Auftrieb und den Widerstand intensiver ein.

### 3.1 Auftriebskraft

Der Auftrieb beim Flugzeug ist die Kraft, die nach oben wirkt. Wie bereits im vorausgehenden Abschnitt erwähnt, würde das Flugzeug ohne diese nicht fliegen.<sup>10</sup> Zur Erklärung lassen sich viele Ansätze und Theorien finden, die aber teilweise von falschen Annahmen ausgehen oder den Auftrieb nur unvollständig begründen können.<sup>11</sup> Dennoch werden zwei Ansätze im Folgenden thematisiert, die meines Erachtens die Auftriebskraft trotz weniger Fehler anschaulich und ausreichend erklären. Hierbei möchte ich zuerst auf den sehr populären Bernoulli-Effekt eingehen; anschließend beschäftige ich mich mit den Newtonschen Axiomen und dem Coandaeffekt.

#### 3.3.1 Bernoulli-Effekt

Der gängige Bernoulli-Effekt ist bekannt unter allen Piloten und wird heute noch in der Aerodynamik an Universitäten und Hochschulen gelehrt, obgleich falsche Annahmen enthalten sind und die Theorie nicht allgemein gilt.<sup>12</sup> Er basiert auf der Bernoulli Gleichung, die einen Zusammenhang von Druck und Geschwindigkeit aufstellt:

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

wobei  $\rho$  die Dichte angibt,  $p$  den Druck,  $h$  die Höhe,  $v$  die Strömungsgeschwindigkeit und  $g$  die Gravitationsbeschleunigung<sup>13</sup>

---

<sup>10</sup> Kolb, persönliches Interview, per Videokonferenz, 06.08.2023

<sup>11</sup> Alfred Ziegler, Warum fliegt ein Flugzeug? Über falsche und richtige Vorstellungen vom Fliegen, Frankfurt, 2020, S. 1.

<sup>12</sup> Dirk Sandhop, Hubschrauber-Physiklexikon: Hubschrauber / Helicopter. Heliport, 6. Februar 2022, <http://www.heliport.de/lexika/hubschrauber-physiklexikon/>.

<sup>13</sup> Ziegler, Warum fliegt ein Flugzeug? Über falsche und richtige Vorstellungen vom Fliegen, Frankfurt, 2020, S. 1.

Bei diesem Prinzip sind sowohl Stationarität und Inkompressibilität des umgebenden Fluids als auch eine reibungs- und wirbelfreie Betrachtung vorausgesetzt. Außerdem gilt die Bernoulli Gleichung – wie Abb. 2 verdeutlicht – nur tangential einer Strömungslinie.<sup>14</sup> Diese Linien zeigen den Weg eines Luftteilchens in der Strömung. Alle Luftteilchen mit gleichem Startpunkt folgen den selben Strömungslinien.

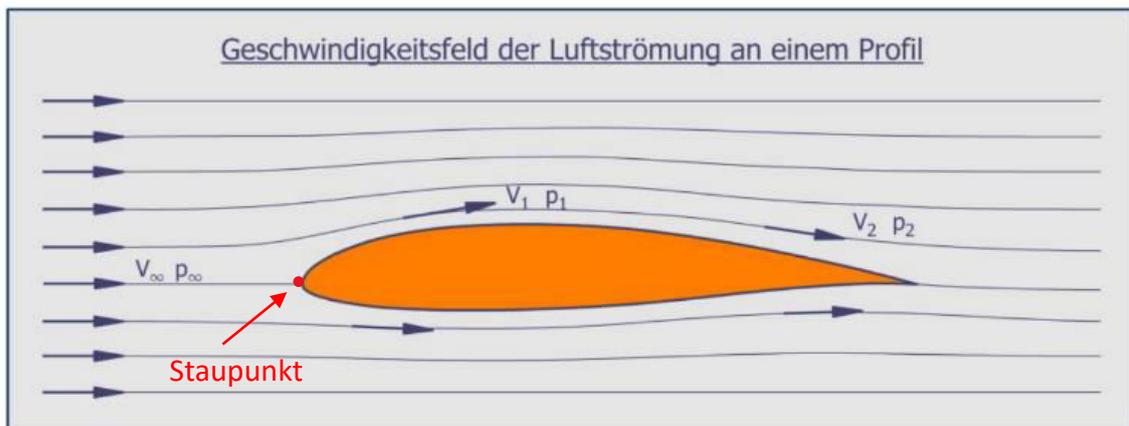


Abb. 2: Strömungsverlauf am Profil mit Strömungslinien ohne Coandaeffekt<sup>15</sup>

Zuerst einmal wird das Weglängenargument konkretisiert, das Dirk Sandhop anschaulich zusammenfasst. Wenn sich eine Tragfläche in der Luft bewegt, wird der Luftstrom am Staupunkt (s. Abb. 2) getrennt. Somit gibt es einen oberen und einen unteren Luftstrom. Durch die Wölbung auf der Oberseite der Tragfläche muss die Luft obenrum mehr Weg zurücklegen. Wenn man davon ausgeht, dass die beiden Luftströme nach der Tragfläche gleichzeitig wieder zusammenströmen, muss die Luft an der Oberseite schneller strömen als an der Unterseite. Aufgrund der verschiedenen Geschwindigkeiten, entstehen laut Bernoulli Druckunterschiede: an der Oberseite demnach ein Unterdruck und an der Unterseite ein Überdruck. Diese Druckverteilung, die in Abb. 3 gezeigt wird, sorgt für den Auftrieb nach oben.<sup>16</sup>

<sup>14</sup> Ziegler, Warum fliegt ein Flugzeug? Über falsche und richtige Vorstellungen vom Fliegen, Frankfurt, 2020, S. 1.

<sup>15</sup> Helmut Quabeck, HQ-Profile für den Modellflug, Babenhausen: HQ Modellflugliteratur, 2015, S. 12.

<sup>16</sup> Sandhop, Hubschrauber-Physiklexikon: Hubschrauber / Helicopter.

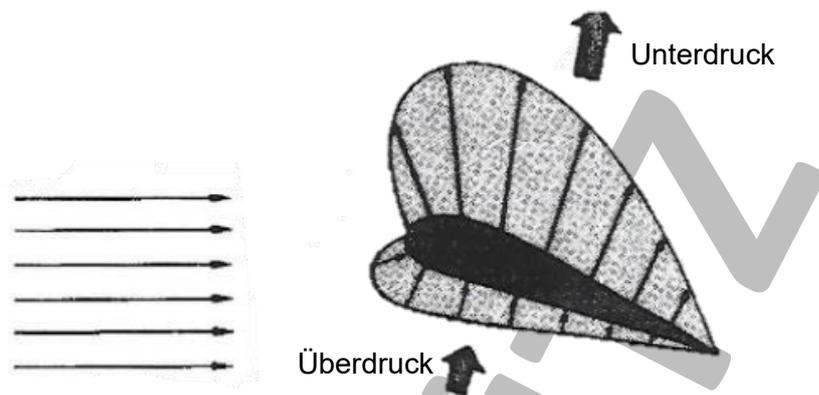


Abb. 3: Unter- und Überdruck an einer Tragfläche<sup>17</sup>

Eine zweite Theorie, bei der die Bernoulli Gleichung ebenfalls Anwendung findet, beschäftigt sich mit der Zirkulation um den Tragflügel, die durch den Anfahrtswirbel entsteht.<sup>18</sup> Diese Strömung ist in Abb. 4 dargestellt.

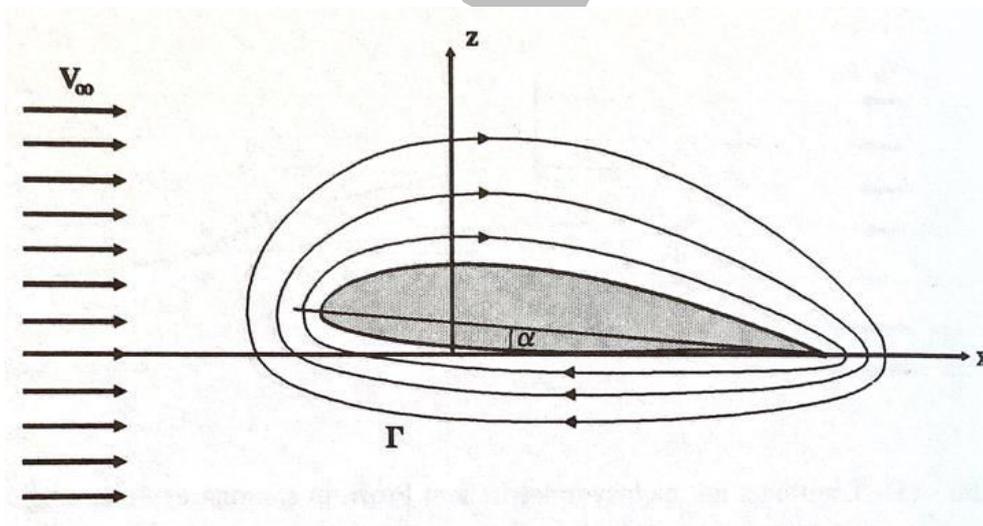


Abb. 4: Zirkulationsströmung an einem Tragflügel<sup>19</sup>

Dabei werden die Geschwindigkeiten der Zirkulation zu der Umgebungsgeschwindigkeit addiert. Demnach ergibt sich über dem Flügel eine größere Geschwindigkeit als darunter. Hier bewirken die verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten nach Bernoulli Druckunterschiede (s. Abb. 3), die die Auftriebskraft erzeugen.<sup>20</sup>

<sup>17</sup> Ziegler, Warum fliegt ein Flugzeug? Über falsche und richtige Vorstellungen vom Fliegen, Frankfurt, 2020, S. 10.

<sup>18</sup> Ebd., S. 8f..

<sup>19</sup> Quabeck, Design, Leistung und Dynamik von Segelflugmodellen. Babenhausen, 1994, S. 32.

<sup>20</sup> Ebd., S. 31ff..

Jedoch sind die beiden Erklärungen nicht allgemein gültig. Die Bernoulli Gleichung gilt für abgeschlossene Räume, kann jedoch nicht einfach auf einen Flügel übertragen werden. Daher können die Theorien bspw. in einem Rohr angewendet werden, allerdings nicht auf eine Tragfläche, die sich in einem offenen Bereich befindet. Des Weiteren kann man nicht davon ausgehen, dass die Luftströme bei der ersten Erklärung hinter den Tragflächen gleichzeitig ankommen müssen.<sup>21</sup> Demnach sind die Folgerungen nicht komplett richtig. Trotz den Fehlannahmen ist die Bernoulli Gleichung dennoch unumstritten eine Standardformel der Aerodynamik, die die Entstehung des Auftriebs anschaulich zu erklären versucht.

### 3.3.2 Newtonsche Axiome und Coandaeffekt

Als nächstes möchte ich noch eine weitere Begründung für den Auftrieb liefern, die ebenfalls Dirk Sandhop resümiert. Diese geht grundlegend von den drei fundamentalen Prinzipien der Mechanik von Isaac Newton aus, die auch als Axiome bezeichnet werden. Dazu ist der sog. Coandaeffekt entscheidend für das Verständnis.

Das erste Axiom, das Trägheitsgesetz von Galilei, besagt, dass sich ein Körper in Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit und gleicher Richtung weiterbewegt, solange keine äußeren Kräfte auf ihn einwirken. Da auf der Erde die Gewichtskraft zu überwinden ist, muss es eine Kraft geben, die bei Flugkörpern nach oben wirkt, damit das Flugzeug seine Geschwindigkeit und Richtung ändert.

Nach dem Grundgesetz der Mechanik, dem zweiten Axiom, wird der Körper in Richtung der Kraft beschleunigt, dabei ist die Beschleunigung direkt zur Kraft und indirekt proportional zur Masse des Körpers. Daraus entsteht die Formel  $F = m \cdot a$  und die Kraft kann berechnet werden.

Das dritte Newtonsche Gesetz ist das Wechselwirkungsprinzip, welches wie folgt definiert ist: „Übt ein Körper 1 eine Kraft auf einen Körper 2 aus. So übt Körper 2 eine gleich große, jedoch entgegengesetzte Kraft auf Körper 1 aus.“<sup>22</sup>

Damit gibt es zu jeder Kraft eine Gegenkraft nach dem Motto „actio gleich reactio“.

---

<sup>21</sup> Sandhop, Hubschrauber-Physiklexikon: Hubschrauber / Helicopter.

<sup>22</sup> Sandhop, Hubschrauber-Physiklexikon: Hubschrauber / Helicopter.

Des Weiteren entsteht am Flügel ein Coandaeffekt. Dieser lässt sich besonders schön in Abb. 5 erkennen, in der der Wasserstrahl der Löffelform folgt. Strömende Gase, wie die Luft oder das Wasser, fliesen an einer gekrümmten Oberfläche entlang, ohne sich abzulösen, solange die Krümmung der Oberfläche nicht zu stark ist. Deshalb folgt das Fluid dem gebogenen Profil, anstatt nach dem Flügel oder dem Löffel wieder in die ursprüngliche Richtung zu strömen. Dabei wird das Fluid am Ende abgelenkt. Durch Reibung beträgt die Geschwindigkeit der Luft an der Oberfläche gleich null und löst diesen Coandaeffekt aus.



Abb. 5: Wasserstrahl wird durch Form des Löffels abgelenkt<sup>23</sup>

Am Staupunkt wird die anströmende Luft geteilt und erst einmal nach oben gebogen. Der Luftstrom fließt entlang der Profiloberfläche gemäß des Coandaeffekts. Somit wird der Luftstrom nach unten abgelenkt und dabei beschleunigt, das illustriert ebenfalls Abb. 6. Nach dem ersten newtonschen Prinzip muss eine Kraft wirken, die diese Änderung bewirkt und gemäß dem dritten Axiom entsteht dazu eine Gegenkraft, die als Auftrieb charakterisiert werden kann.

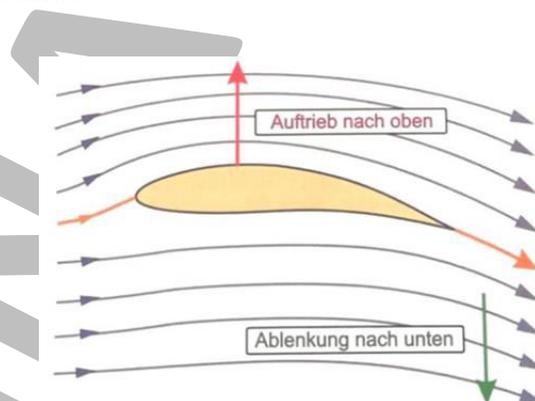


Abb. 6: Auftrieb als Gegenkraft zur Ablenkung<sup>24</sup>

<sup>23</sup> Bianca Högel, Abgelenkter Wasserstrahl, <https://biancahoegel.de/flug/aerodynamik/coanda-effekt.html>.

<sup>24</sup> Winfried Kassera, Flug ohne Motor, Motorbuch Verlage, 2021 (24. Auflage), S. 16.

Unter Betrachtung des zweiten Newtonschen Gesetzes lässt sich folgern, dass die ablenkende Kraft und die entgegenwirkende Auftriebskraft proportional zur Masse der bewegten Luft und deren Beschleunigung sind. Daraus kann für die Größe des Auftriebs geschlossen werden: je größer die Menge der Luft, die beschleunigt wird, je größer die Beschleunigung dieser Luft, und je größer die Ablenkung, desto größer der Auftrieb.<sup>25</sup>

Der Auftrieb lässt sich für jedes Profil berechnen. Dabei ermittelt man nicht für jedes Flugzeug, jede Geschwindigkeit und jeden Anstellwinkel die Größe des Auftriebs, sondern bestimmt – wie folgt – den Auftriebsbeiwert  $c_a$ :

$$c_a = \frac{A}{\frac{\rho}{2} \cdot V^2 \cdot S}$$

mit  $\rho$  als Dichte,  $V$  als Geschwindigkeit,  $A$  als Auftrieb und  $S$  als Bezugsfläche; im stationären Gleitflug gilt zudem Folgendes:  $A = m \cdot g$ , dabei entspricht  $m$  der Masse und  $g$  der Gravitationskonstante<sup>26</sup>

### 3.2 Widerstandskraft

Bei reibungsfreien Strömungen besagt das D'Alambertsche Paradoxon, dass die Summe aller Kräfte in Anströmungsrichtung null ist.<sup>27</sup> Wird allerdings die Reibung beachtet, so gilt dies nicht mehr, wie Dr. Helmut Quabeck im Weiteren erklärt. Der Gesamtwiderstand, beim Flugzeug auch als Luftwiderstand oder Luftreibung bezeichnet, setzt sich aus dem Reibungswiderstand  $W_R$ , dem Druckwiderstand  $W_D$  und dem induzierten Widerstand  $W_I$  zusammen.<sup>28</sup> Nur diese drei Arten werden im Folgenden näher erläutert, da es sonst den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

$$W = W_R + W_D + W_I$$

---

<sup>25</sup> Sandhop, Hubschrauber-Physiklexikon: Hubschrauber / Helicopter.

<sup>26</sup> Thies und Hepperle, Eppler-Profil, Baden-Baden, 1992, S. 12.

<sup>27</sup> Quabeck, Design, Leistung und Dynamik von Segelflugmodellen, Babenhausen, 1994, S. 24.

<sup>28</sup> Ebd., S. 37.

An der Oberfläche eines bewegten Körpers wirken Strömungskräfte in Anströmungsrichtung. Diese Kräfte lassen sich unterteilen in Schubspannung  $\tau$  und Normalspannung  $P$  (s. Abb. 7). Zum besseren Verständnis werden die Normalspannungen oft auch als Druck  $P$  bezeichnet.

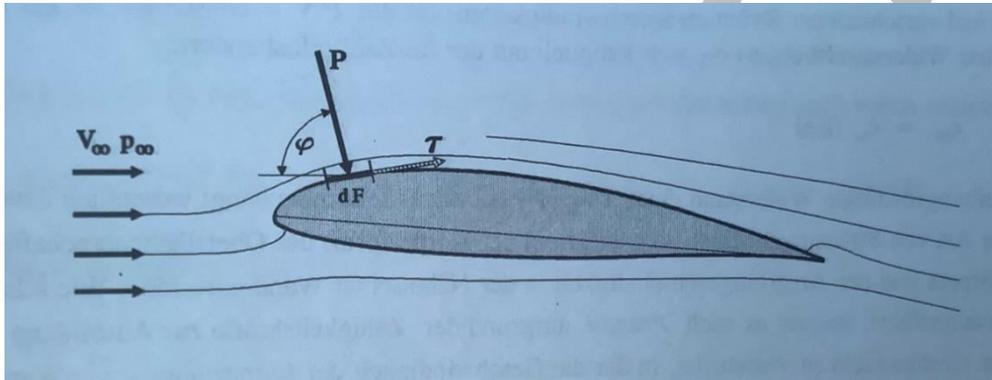


Abb. 7: Druck- und Schubkräfte am Tragflügel<sup>29</sup>

Durch die kinematische Zähigkeit der Luft kommt es zu Reibung und somit zu Schubspannungen an der Oberfläche, wodurch der Körper eine Kraft in Strömungsrichtung erfährt. Diese Tangentialkraft wird auch Reibungswiderstand  $W_R$  genannt.

Wie Abb. 8 veranschaulicht, entsteht am Staupunkt ein größerer Druck als am Ende des Flügels. Des Weiteren gibt es aufgrund der Reibung kinetische Energieverluste der Luft, dadurch bilden sich am hinteren Teil des Flugkörpers ebenfalls andere Druckverhältnisse aus. Somit entsteht der Druckwiderstand  $W_D$ .

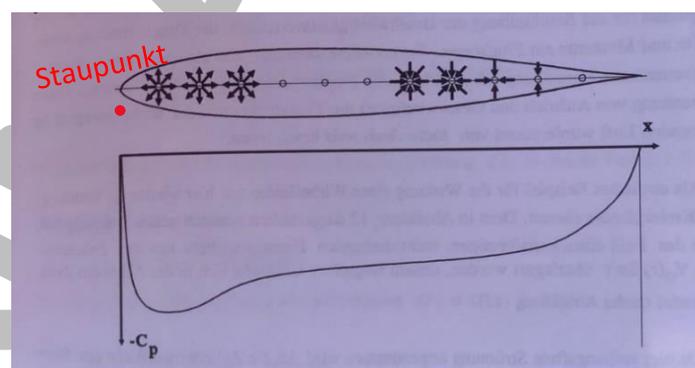


Abb. 8: Druckverteilung bei einem symmetrischen Profil<sup>30</sup>

<sup>29</sup> Quabeck, Design, Leistung und Dynamik von Segelflugmodellen, Babenhausen, 1994, S. 37.

<sup>30</sup> Ebd., S. 27.

An jedem einzelnen Punkt der Oberfläche existiert ein anderer Druck und eine andere Schubspannung. Werden allerdings beide über die gesamte Oberfläche integriert, ergibt sich die resultierende Kraft, die die Strömung auf den Körper ausübt.

Reibungs- und Druckwiderstand ergeben sich aus der Profilform und werden deshalb zum Profilwiderstand  $W_P$  vereinigt.

$$W_P = W_{P_R} + W_{P_D}$$

Da bei großen Re-Zahlen der Druckwiderstand relativ größer ist, wird der Staudruck  $q^\infty = \frac{\rho}{2} v^2$  der Anströmung verwendet, um annähernd den Profilwiderstand zu berechnen. Des Weiteren definiert Quabeck, dass der Widerstand „proportional zur umströmten Fläche  $F$  ist“<sup>31</sup> und daraus ergibt sich der Profilwiderstand  $W_P$ :

$$W_P = c_w \cdot F \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2$$

dabei gibt  $c_w$  die Widerstandbeiwert an,  $F$  die Bezugsfläche,  $\rho$  die Dichte und  $v$  die Geschwindigkeit<sup>32</sup>

Neben dem Reibungs- und Druckwiderstand entsteht außerdem der induzierte Widerstand, den Windfried Kassera anschaulich erklärt. Aufgrund der Auftriebskraft und den Randwirbeln, die entstehen, um die Druckunterschiede zwischen Ober- und Unterseite am Ende der Tragflächen auszugleichen, erfährt der Flugkörper einen Energieverlust. Somit wird eine Widerstandskraft verursacht.<sup>33</sup>

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Widerstandskraft eines Flugkörpers von der Anströmgeschwindigkeit  $v$ , dem Druck  $p$ , der Dichte  $\rho$  und der Zähigkeit  $\eta$  des Fluids sowie der Profilierung des Körpers abhängt.

---

<sup>31</sup> Quabeck, Design, Leistung und Dynamik von Segelflugmodellen, Babenhausen, 1994, S. 37.

<sup>32</sup> Ebd., S. 36ff..

<sup>33</sup> Kassera, Flug ohne Motor, 2021, S. 23.

Da sich das Medium Luft und dessen Zähigkeit nicht verändern lässt und auf den Druck ebenfalls nicht aktiv eingewirkt werden kann, gibt es am Flugzeug immer eine Widerstandskraft. Dennoch hat die Form des Körpers Einfluss auf den Anteil des Druck- und Reibungswiderstands, wie Abb. 9 vereinfacht präsentiert. Des Weiteren wirkt sich das Profil auf die Größe des Gesamtwiderstandes aus. Eine Erklärung dazu findet man im Abschnitt 4.2.

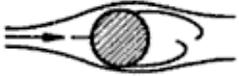
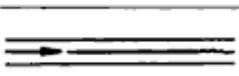
Körper	Widerstand	
	Druck	Reibung
	100%	0%
	90%	10%
	60%	40%
	10%	90%
	0%	100%

Abb. 9: Verhältnis von Druck und Widerstand je nach Körper abhängig<sup>34</sup>

<sup>34</sup> Wikipedia, Anteil des Druck- und Reibungs-wider-standes für verschiedene Körper, <https://de.wikipedia.org/wiki/Str%C3%B6mungswiderstand#/media/Datei:WiderstStr%C3%B6mK%C3%B6rper.png>

## **4 Einfluss der Tragflächenprofile auf die Flugeigenschaften**

Wie bereits erwähnt, sind die Tragflächen ausschlaggebend, damit das Flugzeug fliegt und sie können sogar hauptsächlich die Flugeigenschaften verändern.<sup>35</sup> Sowohl der Auftrieb als auch der Widerstand hängen von der Profilierung ab und diese beiden Faktoren beeinflussen das Flugverhalten sehr. Deshalb werden z. B. im Modellflug für jede Klasse andere Flugzeuge entwickelt, die für die jeweilige Flugaufgabe die optimalen Eigenschaften mitbringen. Im Folgenden wird der Vorgang beschrieben, wie die gewünschten Flugeigenschaften am Ende zustande kommen. Dabei werden die Eigenschaften festgelegt, theoretische Überlegungen zur Umsetzung durchgeführt und zum Schluss das Flugzeug in der Praxis untersucht.

### **4.1 Ziele der Konstruktion**

[...]

### **4.2 Theoretische Überlegungen zur Umsetzung der Ziele**

[...]

### **4.3 Praktische Übereinstimmung der zuvor ausgewählten Ziele**

[...]

## **5 Schluss**

[...]

---

<sup>35</sup> Kolb, persönliches Interview, 06.08.2023

## 6 Literaturverzeichnis

- BR, Die Flugpioniere Wright.** Planet Wissen, 14. Oktober 2019.  
[https://www.planet-wissen.de/technik/luftfahrt/fliegen\\_nach\\_dem\\_vorbild\\_der\\_natur/flugpioniere-wright-100.html](https://www.planet-wissen.de/technik/luftfahrt/fliegen_nach_dem_vorbild_der_natur/flugpioniere-wright-100.html) (Zugriff am 15.10.2023).
- Högel, Bianca.** *Abgelenkter Wasserstrahl (Abbildung).*  
<https://biancahoegel.de/flug/aerodynamik/coanda-effekt.html> (Zugriff am 13.10.2023).
- Kassera, Winfried.** *Flug ohne Motor.* Motorbuch Verlage, 2021 (24. Auflage).
- Kolb, Philip.** *Persönliches Interview.* Per Videokonferenz, 06.08.2023.
- Mahmoudi, Darius.** *PlusX (Abbildung).*  
<https://mahmoudi-modellsport.eu/plusx> (Zugriff am 05.10.2023).
- Quabeck, Helmut.** *Design, Leistung und Dynamik von Segelflugmodellen.* Babenhausen: HQ Modellflugliteratur, 1994.
- Quabeck, Helmut.** *HQ-Profil für den Modellflug.* Babenhausen: HQ Modellflugliteratur, 2015 (2. Auflage).
- Sandhop, Dirk.** *Hubschrauber-Physiklexikon: Hubschrauber / Helicopter.* Heliport, 6. Februar 2022.  
<http://www.heliport.de/lexika/hubschrauber-physiklexikon/> (Zugriff am 05.10.2023).
- Send, Wolfgang.** *Auftrieb und Wirbeldichte beim Fliegen.* In *Didaktik der Physik - Leipzig 2002*, von V. Nordmeier. Berlin: Lehmanns-Verlag, 2002.  
[https://www.aniprop.de/sites/default/files/dpg02\\_vortrag\\_send.pdf](https://www.aniprop.de/sites/default/files/dpg02_vortrag_send.pdf) (Zugriff am 05.10.2023).
- Thies, Werner, und Hepperle, Martin.** *Eppler-Profil, MTB 1/2.* Baden-Baden: Verlage für Technik und Handwerk, 1992 (11. Auflage).  
[https://www.bilimuygula.com/FileUpload/bs774731/File/108\\_eppler\\_\\_profile.compressed.pdf](https://www.bilimuygula.com/FileUpload/bs774731/File/108_eppler__profile.compressed.pdf) (Zugriff am 05.10.2023).
- Wikipedia.** *Anteil des Druck- und Reibungswiderstandes für verschiedene Körper (Abbildung).*  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Str%C3%B6mungswiderstand#/media/Datei:WiderstStr%C3%B6mk%C3%B6rper.png> (Zugriff am 05.10.2023).
- Ziegler, Alfred.** *Warum fliegt ein Flugzeug? Über falsche und richtige Vorstellungen vom Fliegen.* Frankfurt: 2020.  
[https://www.researchgate.net/publication/344900748\\_Warum\\_fliegt\\_ein\\_Flugzeug\\_Uber\\_falsche\\_und\\_richtige\\_Vorstellungen\\_vom\\_Fliegen](https://www.researchgate.net/publication/344900748_Warum_fliegt_ein_Flugzeug_Uber_falsche_und_richtige_Vorstellungen_vom_Fliegen) (Zugriff am 05.10.2023).

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

Insbesondere versichere ich, dass alle Stellen der Hausarbeit, die anderen Quellen im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, durch Angabe der Herkunft kenntlich gemacht wurden. Dies gilt auch für Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen sowie Quellen aus dem Internet.

Mir ist bekannt, dass die vorliegende Arbeit mit 0 Punkten bewertet werden kann, wenn gegen diese Grundsätze verstoßen wurde, und dass in diesem Fall eine Zulassung zum Abitur nicht möglich ist.

Lauingen, den ....06.11.2023.....  
(Datum)

.....Anna Schütz.....  
(Unterschrift der Schülerin / des Schülers)