

TU Dresden

Fakultät Physik

Professur für Didaktik der Physik



*Praktikum:
Physikalische Schülerexperimente III*

Mechanik der Flüssigkeiten und Gase 2
Fluidmechanik
–
Aerodynamik

im

Wintersemester 2021 / 2022

vorgelegt von:

Tom Stieler

Lehramt für Berufsbildende Schulen

Metall- /Maschinentechnik und Physik

Matrikel: 4679151

tom.stieler@tu-dresden.de

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	3
1 Didaktische Rekonstruktion	3
2 Auftrieb am Tragflügelprofil	8
2.1 Einbettung in den Unterricht.....	8
2.2 Aufgabenstellung.....	9
2.3 Material und Aufbau.....	9
2.4 Durchführung.....	9
2.5 Beobachtung und Auswertung.....	10
2.6 Reflexion des Experimentes.....	10
3 Druckverteilung am Venturi-Rohr	12
3.1 Einbettung in den Unterricht.....	12
3.2 Aufgabenstellung.....	12
3.3 Material und Aufbau.....	13
3.4 Durchführung.....	13
3.5 Beobachtung und Auswertung.....	14
3.6 Reflexion des Experimentes.....	14
4 Druckunterschied am Tragflügel	16
4.1 Einbettung in den Unterricht.....	16
4.2 Aufgabenstellung.....	17
4.3 Material und Aufbau.....	17
4.4 Durchführung.....	17
4.5 Beobachtung und Auswertung.....	18
4.6 Reflexion des Experimentes.....	18
5 Fazit	20
6 Literaturverzeichnis	21
7 Selbstständigkeitserklärung	22

Einleitung

Fast jeder Zeitungsartikel, fachdidaktischer Aufsatz oder jedes Lehrbuch welcher die Aerodynamik oder das Fliegen thematisiert, beschreibt im ersten Absatz stets den Menschheitstraum, die Eroberung des Himmels und das Glück als heutiger Mensch dies alles erreicht zu haben. Die Erklärungsversuche zum dazugehörigen aerodynamischen Auftrieb und der Druckverteilungen reichen von populärwissenschaftlich bis hochgradig theoretisch, von leicht verständlich bis fachlich falsch.

Diese Arbeit versucht, einen Überblick über die wichtigsten Aspekte bei der Thematisierung des Auftriebs in der Sekundarstufe II zu liefern und drei grundlegende Versuche der Aerodynamik respektive der Fluidmechanik aufzugreifen und fachdidaktisch darzulegen.

1 Didaktische Rekonstruktion

Fachlicher Hintergrund

Für die Erklärung des *aerodynamischen Auftriebes* spielt die Zirkulationsströmung respektive die Wirbelbildung am Tragflügel eine entscheidende Rolle, nachfolgend wird das zugrundeliegende Prinzip in Anlehnung an Demtröder (2021, S. 249f.) erörtert:

Für ein unsymmetrisches Tragflügelprofil stellen sich bei laminarer Anströmung zwei unterschiedlich große Strömungsgeschwindigkeiten aufgrund von Reibungseffekten in der Nähe der Oberfläche ein. Auf der Unterseite ist die Strecke von der Vorder- bis zur Hinterkante kürzer als auf der Oberseite und die Strömungsgeschwindigkeit daher etwas größer. Treffen die beiden Strömungen am Ende des Profils aufeinander, bildet sich wegen des Geschwindigkeitsgefälles ein Wirbel. Nach den Grundlagen der Mechanik muss der Gesamtdrehimpuls erhalten bleiben und es resultiert eine Gegenströmung um das Tragflächenprofil, wie in Abbildung 1 schematisch zu sehen ist. Aus der Überlagerung der beiden Strömungen (laminare Abströmung + Zirkulation) ergibt sich in Summe eine größere Strömungsgeschwindigkeit auf der Oberseite und damit ein Druckunterschied aus dem schlussendlich die Auftriebskraft entsteht.

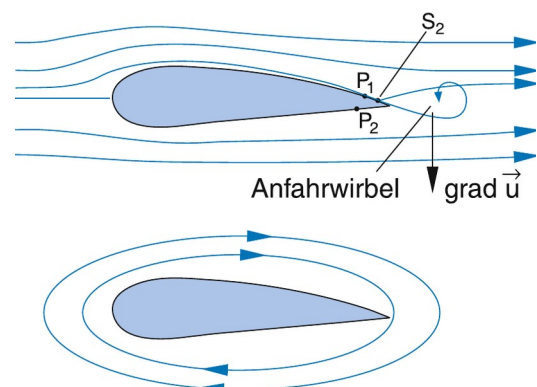


Abb. 1: Entstehung des Auftriebes am Tragflügelprofil. Die Wirbelbildung (oben) induziert eine Zirkulationsströmung (unten). (Demtröder 2021, Abb. 8.41)

Um den Druckunterschied am Tragflügelprofil erklären zu können, muss die *Bernoulli-Gleichung* eingeführt werden, diese dient der Beschreibung der mechanischen Energie und damit dem Energiesatz $E = E_{kin} + E_{pot}$. In ihrer allgemeinsten Form

$$\int_{s_1}^{s_2} \frac{\delta q}{\delta t} ds + \frac{1}{2} q^2 \Big|_{s_1}^{s_2} + \int_{s_1}^{s_2} \frac{1}{\rho} dp + G \Big|_{s_1}^{s_2} = 0,$$

beschreibt sie eine Strömung im Potential G mit der Strömungsgeschwindigkeit q entlang der Stromlinie von s_1 bis s_2 mit dem Druck p und der Dichte ρ . Unter der Bedingung, dass eine stationäre Strömung mit (näherungsweise) gleicher Dichte und ohne Änderung der Höhe (waagerechte Strömung) vorliegt, zeigt die Bernoulli-Gleichung den Zusammenhang, dass bei steigender Strömungsgeschwindigkeit q , der statische Druck p sinkt:

$$\left(\frac{1}{2} q^2 + \frac{p}{\rho} \right) \Big|_{s_1}^{s_2} = 0.$$

Zur Herleitung siehe Fröhlich (2021, Kap. 6.1).

Die Bernoulli-Gleichung legt damit die Grundlage für die Erklärung des aerodynamischen Auftriebs sowie der Geschwindigkeits- und Volumensmessung mittels Venturi-Düsen.

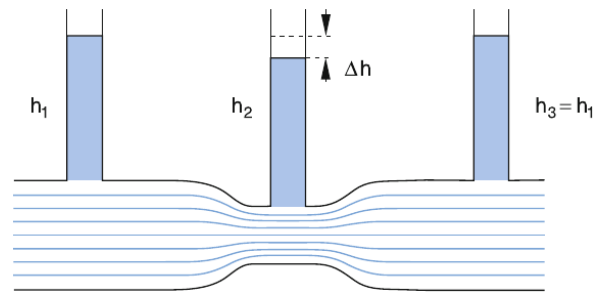


Abb. 2: Venturi-Düse als Anwendungsbeispiel der Bernoulli-Gleichung. (ebd., Abb. 8.9a)

Die *Venturi-Düse*, gelegentlich auch Venturi-Rohr genannt, verfügt über eine definierte Querschnittsänderung, welche zu messbaren Druckdifferenzen führt und somit unter Anwendung der Kontinuitäts- und der Bernoulli-Gleichung Rückschlüsse auf die Strömungsgeschwindigkeit und den Volumenstrom liefert (vgl. Odenbach 2021): Für die Betrachtung einer stationären Strömung unter konstanter Dichte ρ , konstanten Geschwindigkeiten über die Querschnitte A_1 und A_2 sowie einer gemessenen Druckdifferenz Δp kann die Strömungsgeschwindigkeit

$$q_1 = \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho} \left(1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right)}$$

in der Engstelle berechnet werden (vgl. Fröhlich 2021, S. 45).

Abbildung 2 illustriert die Bernoulli-Gleichung einer ideale Flüssigkeit ohne Reibung; zur besseren Anschaulichkeit wird auf das Modell der Stromlinie zurückgegriffen, welches die Laufwege einzelner Fluidelemente über die Zeit darstellt. In Analogie zum Modell der Feldlinien zeigt eine größere Dichte an Stromlinien eine höhere Geschwindigkeit an.

Didaktische Analyse

Um den dynamischen Auftrieb zu erklären, kursieren in den unterschiedlichsten Publikationen und Medien verschiedene Ansätze und Modelle. Gerade populärwissenschaftliche Varianten, welche gemeinhin als besonders schüler:innenfreundlich erscheinen, greifen zum Teil Hybridmodelle auf, ohne auf die Begrenztheit dieser hinzuweisen. Eine jede Lerneinheit zum Thema dynamischer Auftrieb sollte daher mit einer Wiederholung des *Modellbegriffes* einhergehen. Schüler:innen müssen sich bewusst machen, dass ein Modell nur begrenzte Aussagen treffen kann und im Laufe der Erkenntnisgewinnung alte Theorien von neueren ersetzt werden (vgl. Kircher; Girwidz 2010, Kap. 23). So stellen z. B. Geyer und Isola (2003, S. 7–10) in ihrem Unterrichtsentwurf sieben Erklärungsansätze zum Auftrieb vor, Wodzinski (1999, S. 18) beschränkt sich auf die drei häufigsten: Druckerklärung (besondere Tragflügelform), Rückstoßerklärung (Wechselwirkung zw. Luftteilchen und Flügel) sowie die Zirkulationsströmung.

Die verschiedenen *Erklärungsansätze* sind nicht nur vermeintlich unterschiedlich kompliziert, sondern sorgen i. d. R. für Fehlvorstellungen bezüglich des Fliegens. Wie Wodzinski treffend resümiert, gibt es für die Tatsache, dass sich an der Tragflächenoberseite ein Unterdruck ausbildet, keine passendere Begründung als über die Zirkulation. Der bekannte Ansatz, demnach die Luftteilchen auf der Oberseite einen längeren Weg zurücklegen müssen und daher eine höhere Geschwindigkeit aufweisen, ist ein Missverständnis. Die Fluidelemente treffen sich nicht am Tragflächenende. Die Rückstoßerklärung ist um Größenordnungen zu klein, um allein für den Auftrieb verantwortlich zu sein und kann außerdem nicht die Druckunterschiede erklären. (vgl. ebd., S. 20)

Erklärungsansätze über den *Impulssatz* an einem zweidimensionalen Profil findet man außer in Fachbüchern oder in Vorlesungen zur Strömungsmechanik so gut wie nie und übersteigen das Schüler:innenniveau bei Weitem. Meiner Meinung nach bietet dies eher einen quantitativen Ansatz, welcher im Physikunterricht nicht zwingend nötig ist. (vgl. ebd., S. 19; vgl. Fröhlich 2021, Kap. 5.2)

Alle bisherigen Überlegungen beinhalteten eine *zweidimensionale Betrachtung* des Tragflügelprofils. Zwar ändert sich das Prinzip der Zirkulationsströmung beim Übergang auf ein reales Flügelprofil mit *dreidimensionalen Abmessungen* nicht, gleichwohl werden die Zusammenhänge komplizierter: so entstehen u. a. Randwirbel und Wirbelschleppen aufgrund der hinzukommenden Tiefe des Flügels (vgl. Wodzinski 1999, S. 19f.). Da diese allerdings nichts am Prinzip der Auftriebsentstehung ändern, sollten sie aus didaktischen Blickwinkeln nicht in diesem Zusammenhang thematisiert werden, um eine kognitive Überlastung der Schüler:innen zu verhindern. Es sei an dieser Stelle erwähnt,

dass einige wenige Berufliche Gymnasien (BGY) ihre Fachrichtung auf *Luftfahrttechnik*¹ respektive die Aerodynamik gelegt haben, und auf diesen Schulen spielt der weiterführende Blick der technischen Widerstandsbetrachtung (induzierter Widerstand am Flugzeug) sehr wohl eine Rolle und auch Wirbelschleppen müssen in diesem Fall thematisiert werden.

Wesentlich grundlegender, wenn auch nicht frei von Fehlvorstellungen, ist der *Druck*. Gerade die Begriffe Stau-, Gesamtdruck, dynamischer und statischer Druck verleiten Schüler:innen schnell zu Verwechslungen und müssen demnach anschaulich eingeführt werden. Darüber hinaus assoziieren Schüler:innen den Druck oftmals mit Bewegungen, z. B. der Positionsänderung eines Kolbens, und nicht den eigentlichen Druckzuständen, welche das *Gepresstsein* des Fluids beschreiben. In Zusammenhang mit dem Auftrieb an Flügel muss der Unterricht deutlich machen, dass nicht der Druckunterschied als solches den Auftrieb erzeugt, da dieser lediglich eine ungerichtete Zustandsgröße ist, welche erst in Zusammenhang mit der Flügelfläche eine Kraft bewirkt. (vgl. Schecker [u.a.] 2018, S. 55f.)

Sachlogische Strukturierung

Die Erklärung des Auftriebs am Tragflügel ist in der Schule nicht ohne Weiteres zu verorten. So greift allein der Lehrplan des Gymnasiums in der siebten Klasse das Thema *Fliegen* in Wahlbereich 3 auf und thematisiert den Auftrieb durch Kräfte am Tragflügel. Woraus diese Kräfte resultieren, kann in dieser Klassenstufe kaum befriedigend erklärt werden, da keine Grundlagen zum Druck vorhanden sind. (vgl. Sächsisches Staatsministerium für Kultus 2020a)

Im folgenden soll der Lehrplan der Fachoberschule (FOS, Fachrichtung Technik) für die elfte Klasse als Grundlage dienen, da im Lehrplan des BGYs keinerlei Gestaltungsfreiraum existiert, den aerodynamischen Auftrieb anzusprechen. Zwar greift auch die FOS den Auftrieb nicht explizit auf, über *Wahlbereich 4: Mechanik der Fluide* kann allerdings das dynamische Verhalten von Gasen sowie die Bernoulli-Gleichung eingeführt und exemplarisch auf den Auftrieb am Tragflügel übertragen werden. (vgl. Sächsisches Staatsministerium für Kultus 2020b)

Vorteil dieses Wahlbereiches ist die ausführliche Wiederholung des Druckbegriffes für statische Zusammenhänge, den die Schüler:innen aus der Oberschule kennen sollten sowie dessen Erweiterung auf dynamisches Verhalten. Aus der Wiederholung heraus kann direkt auf die Begriffe Stau-, Gesamtdruck und dynamischer Druck eingegangen werden. Dies bspw. anhand eines Tragflügels oder der Prandtl-Sonde, welche für die

1 z. B. die Beruflichen Schulzentren *Christoph Lüders Görlitz* oder „*Otto Lilienthal*“ *Freital-Dippoldeswalde*

Geschwindigkeitsmessung an Flugzeugen zur Anwendung kommt und somit einen geeigneten Praxisbezug liefert. Nach Einführung der Bernoulli- und Kontinuitätsgleichung könnte mittels Velourpapier das Stromlinienbild am Tragflügel erzeugt und diskutiert werden (Einfluss der Reibung, laminare und turbulente Strömung, Ablösepunkt, ...). Schlussendlich wird als Ausblick die Zirkulationsströmung am Tragflügel eingeführt, um alle vorhergehenden Begrifflichkeiten anzuwenden. Dies entspricht im wesentlichen dem von Wodzinski (1999) skizzierten Unterrichtsgang.

Spannend ist darüber hinaus der Ansatz von Geyer (2003): Zu Beginn der Unterrichtssequenz zum aerodynamischen Auftrieb, erhielten die Schüler:innen sieben *Leseproben*, mit unterschiedlichen Erklärungsansätzen. Nach dem Lesen sollten die Schüler:innen zu jedem Text eine Frage formulieren und der Lehrperson geben. Ausgehend von den Texten und Fragen gestaltete sich der anschließende Unterricht.

2 Auftrieb am Tragflügelprofil

2.1 Einbettung in den Unterricht

Direkt zu Beginn des Lernbereiches sollte der folgende Versuch zum Auftrieb am Tragflügel stehen. Die Schüler:innen bedürfen noch keines expliziten Vorwissens und werden in dieser Klassenstufe sicherlich unterschiedliche Erklärungsansätze nennen können. Alternativ könnten vor Durchführung des Versuches die Leseproben von Geyer (ebd.) ausgeteilt werden. Ziel ist es:

- a) Erste Überlegungen zum Entstehen des Auftriebes in der Klasse zu sammeln und *Hypothesen zu bilden* – ganz im Sinne der Erkenntnisgewinnungskompetenz (vgl. Kultusministerkonferenz 2020, Kap. 2.2).
- b) Die Auftriebserzeugung in Abhängigkeit des Anstellwinkels („Gewichtsreduktion“) zu anzusprechen.
- c) Die vorherrschenden Kräfte am Tragflügel aus Klasse 7 zu wiederholen.

In den folgenden Stunden kann dann regelmäßig auf eben dieses Experiment verwiesen und der Erkenntnisprozess daran exemplarisch mit den Schüler:innen festgehalten werden.

Der Versuch sollte trotz seines simplen Aufbaus als *(halb-)quantitatives Demonstrationsexperiment* durchgeführt werden; zum einen sind i. d. R. nicht genügend Laminatoren und Luftstromerzeuger vorhanden, zum anderen ist wegen der hohen Lärmbelastung während des Versuches die Kommunikation erschwert. Außerdem steht nicht die Experimentierfähigkeit respektive das Protokollieren der Messwerte im Vordergrund, der Versuch dient vielmehr einer Visualisierung respektive Motivation des Themeneinstiegs.

Als *Lernziel* rückt klar das Formulieren von Hypothesen in den Vordergrund, an denen sich der spätere Unterrichtsverlauf orientiert:

Die Schüler:innen stellen – resultierend aus ihren Beobachtungen – Hypothesen zum Auftrieb am Tragflügel auf, notieren und sammeln diese (E2²).

2 Bezug auf die *Bildungsstandards im Fach Physik* der Kultusministerkonferenz (2020).

2.2 Aufgabenstellung

„Im folgenden Versuch wird das Tragflügelprofil von der Luft umströmt. Welche Beobachtung erwartest du bei der Anzeige der Waage zu sehen? Stelle Hypothesen auf (= begründete Vermutungen!), die das Phänomen erklären können. Notiere diese.“

2.3 Material und Aufbau

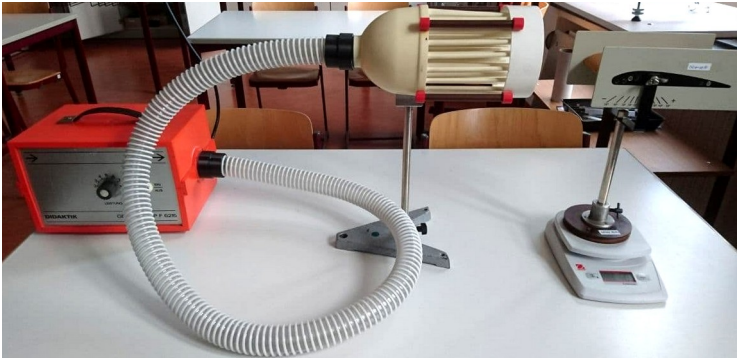


Abb. 3: Aufbau Demonstrationsexperiment zum Auftrieb am Tragflügel mittels Gewichtsreduktion auf einer Waage.



Abb. 4: Detailansicht der Winkelanzeige am Flügelmodell. Zu erkennen sind ebenfalls die Druckmessstellen (Löcher).

Benötigt wird ein Luftstromerzeuger, ein Laminator, Schläuche, eine (Digital-)Waage, ein Tragflügelmodell mit integriertem Winkelmesser sowie Stativmaterial. Zusätzlich kann eine Fadensonde bereitgelegt werden.

Wie in Abbildung 3 zu sehen, wird das Flügelmodell auf der Digitalwaage vor dem Laminator positioniert, wobei der Luftstromerzeuger links und Tragflügel rechts (aus Schüler:innensicht) steht. Es ist darauf zu achten, dass das Modell nah und mittig vor dem Laminator platziert wird, um etwaige turbulente Strömungen zu verhindern und Reibungseffekte zu minimieren. Bei der Digitalwaage muss auf eine genügend große Anzeige geachtet werden, damit die Schüler:innen den Versuch verfolgen können. Ggf. mittels Dokumentenkamera die Anzeige der Waage sowie die Winkelanzeige projizieren.

2.4 Durchführung

1. *Vorbereitung:* Gewicht des Flügels bestimmen bzw. Waage nullen.
2. Den Flügel zu Beginn mit 0° Anstellwinkel ausrichten.
3. Luftströme zuschalten (maximale Leistung, für signifikante Gewichtsänderung).
4. (*Zusätzlich:* Laminare Strömung mit Fadensonde zeigen und kurz andiskutieren.)
5. Anstellwinkel variieren und Messwerte in Tabelle überführen.

2.5 Beobachtung und Auswertung

Die Messwerte aus Tabelle 1 zeigen die erwartete Auftriebserhöhung (Gewichtsreduktion) bei wachsendem Anstiegswinkel. Spannend ist, dass durch die unsymmetrische Profilform (siehe Abbildung 4) bereits bei 0° ein messbarer Auftrieb festzustellen ist. Schüler:innen sollten darauf hingewiesen werden, dass mit zunehmenden Anstellwinkel der Luftwiderstand stark zunimmt, wenn die Kräfte am Flügel besprochen werden.

Eingestellter Anstellwinkel	Gewichtsanzeige auf Waage
-20°	5 g
-10°	0 g
0°	-11 g
10°	-25 g
20°	-35 g
30°	-45 g
45°	-50 g

Tab. 1: Auftrieb am unsymmetrischen Tragflügel in Abhängigkeit des Anstellwinkels als Gewichtsreduktion auf einer Waage. Anzeige wurde vor Beginn genullt.

2.6 Reflexion des Experimentes

Der erwartete Effekt der Gewichtsreduktion ist im Versuch sichtbar geworden. Hinsichtlich der Vorbereitungszeit ist der Aufwand als Lehrperson minimal und es gibt keine signifikanten Stolperfallen im Aufbau; somit ist der Versuch im Unterricht schnell eingesetzt und kann bei Bedarf mehrfach gezeigt werden.

Schwierigkeiten könnten für die Schüler:innen bei der Herausarbeitung der Hypothesen auftreten, da lediglich die Wirkung des Auftriebes, aber nicht seine eigentliche „Entstehung“ (Zirkulation, Druckunterschied) beobachtbar sind! In diesem Zusammenhang müssen die Schüler:innenaussagen unbedingt festgehalten werden, damit der spätere Lernfortschritt aufgezeigt werden kann. Ebenfalls als kritisch zu bezeichnen ist beim verwendeten Aufbau (Abbildung 3) die Tatsache, dass der Laminator bei großen Anstellwinkeln nicht das komplette Flügelprofil umströmt, sondern lediglich von unten anstrahlt. Damit tritt im wesentlichen die Rückstoßwechselwirkung in Erscheinung, und die Auftriebskraft bzw. die Gewichtsreduktion weisen nicht das charakteristische Maximum auf: Zunächst stark anzusteigen und dann gering abzufallen. Dies ist im Anfangsunterricht allerdings vertretbar, da nur das Phänomen der Gewichtsreduktion eine Rolle spielt.

Erweiterungsmöglichkeiten bietet zum einen die kleine Zusatzaufgabe, die Gewichtsreduktion in eine Auftriebskraft umzurechnen, dies stellt eine Wiederholung des Stoffes aus Klasse 7 dar. Zum anderen können im eigentlichen Versuch verschiedenen Flügelprofile zum Einsatz kommen, z. B. symmetrisch, unsymmetrisch, gekrümmt, gerades Brett oder eine Kugel. Diese müssen ähnliche Abmessungen untereinander aufweisen, um eine Vergleichbarkeit der Messwerte zu garantieren. Um die Notwendigkeit des Laminators und den Begriff der laminaren Strömung anzusprechen, kann eine Fadensonde in Vergleich zu einem handelsüblichen Föhn eingesetzt werden.

Weist die Schule keine entsprechende Ausstattung auf oder ist die Anzeige der Waage sehr klein, sollte der Einsatz einer Simulation erwogen werden.

3 Druckverteilung am Venturi-Rohr

3.1 Einbettung in den Unterricht

Dieser Versuch findet in der Mitte des Lernbereiches statt, unmittelbar vor dem dritten. Ziel des halbquantitativen Demonstrationsexperimentes ist es, die verschiedenen Druckbegriffe, die Kontinuitäts- sowie die Bernoulli-Gleichung zu festigen. Darüber hinaus dient er der Illustration der Geschwindigkeits-/Volumenmessung in technischen Anlagen (vgl. Kircher; Girwidz 2010, S. 246f.).

Folgende *Lernziele* werden verfolgt:

Die Schüler:innen erklären die Geschwindigkeitsverteilung am Venturi-Rohr bei verschiedenen Querschnitten mittels des Modells der Stromlinien sowie der Kontinuitätsgleichung.

Die Schüler:innen benennen die verschiedenen Druckbegriffe am Venturi-Rohr und erklären sie mittels der Bernoulli-Gleichung. Dabei nutzen sie die Kenntnisse über die Geschwindigkeitsverteilung.

Die Schüler:innen wenden die Kontinuitäts- sowie Bernoulli-Gleichung an, um einen Formelausdruck für die Geschwindigkeit respektive den Volumenstrom im Venturi-Rohr herzuleiten. Sie skizzieren darauf aufbauend die Funktion eines entsprechenden Volumenstrommessgerätes (S_5^3).

3.2 Aufgabenstellung

„Beobachte die Anzeige des U-Rohrmanometers während des Versuches. Was bedeuten die Veränderung des Wasserstandes und welche Drücke könnten gemessen werden?

Überlege dir darüber hinaus, mit welchen physikalischen Gesetze du das beobachtete Phänomen beschreiben kannst? (*Tipp*: Welche Rolle spielt die Geometrie des Rohres?)

Finde einen Formelausdruck für die Geschwindigkeit an der engsten Stelle im Rohr. Fallen dir Anwendungsfälle ein, bei denen die Kenntnis der Geschwindigkeit von Nöten ist? (*Tipp*: Was passiert, wenn man die Geschwindigkeit mit einer Dichte multipliziert?)“

3 Bezug auf die *Bildungsstandards im Fach Physik* der Kultusministerkonferenz (2020).

3.3 Material und Aufbau

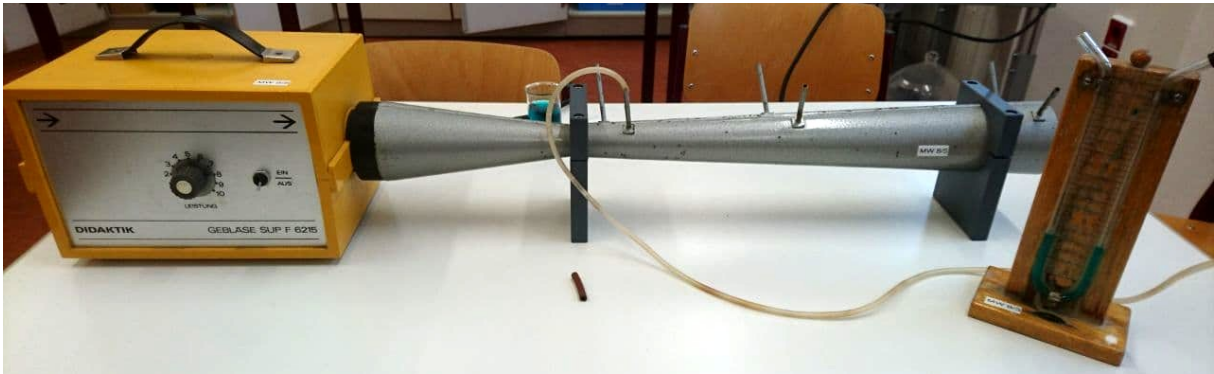


Abb. 5: Aufbau Venturi-Rohr mit U-Rohr-Manometer. Wasser ist zur besseren Sichtbarkeit mit Tinte versetzt.

Wie in Abbildung 5 dargestellt, werden ein Luftstromerzeuger, ein Manometer (U-Rohr, Cassy, Pasco), einige Schläuche, ein Venturi-Rohr mit Anschlussstellen zur Druckmessung sowie ggf. Tinte zum Einfärben des Wassers beim U-Rohr-Manometer benötigt.

Das verwendete Venturi-Rohr muss mit der kurzen Seite (ausgehend vom kleinsten Durchmesser) an den Luftstromerzeuger angeschlossen werden und weist drei Messpunkte mit jeweils zwei Druckmessstellen auf: Gesamtdruck und statischer Druck. Die Anschlussseite ergibt sich aus der Ausrichtung des Messrohres für den Gesamtdruck, welche in Abbildung 6 schematisch dargestellt ist.

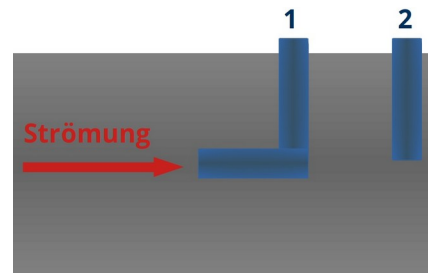


Abb. 6: Schematischer Aufbau der Messröhrchen für den Druck: Gesamtdruck (1), statischer Druck (2).

Ggf. sollte mittels Dokumentenkamera die Manometeranzeige projiziert werden.

3.4 Durchführung

1. Luftstromerzeuger an das Venturi-Rohr anschließen und einschalten. Bei Bedarf kann die Leistung variiert werden.
2. Am jeweiligen Querschnitt und Gesamtdruck und statischen Druck messen.
3. Messwerte halbquantitativ an der Tafel festhalten.

3.5 Beobachtung und Auswertung

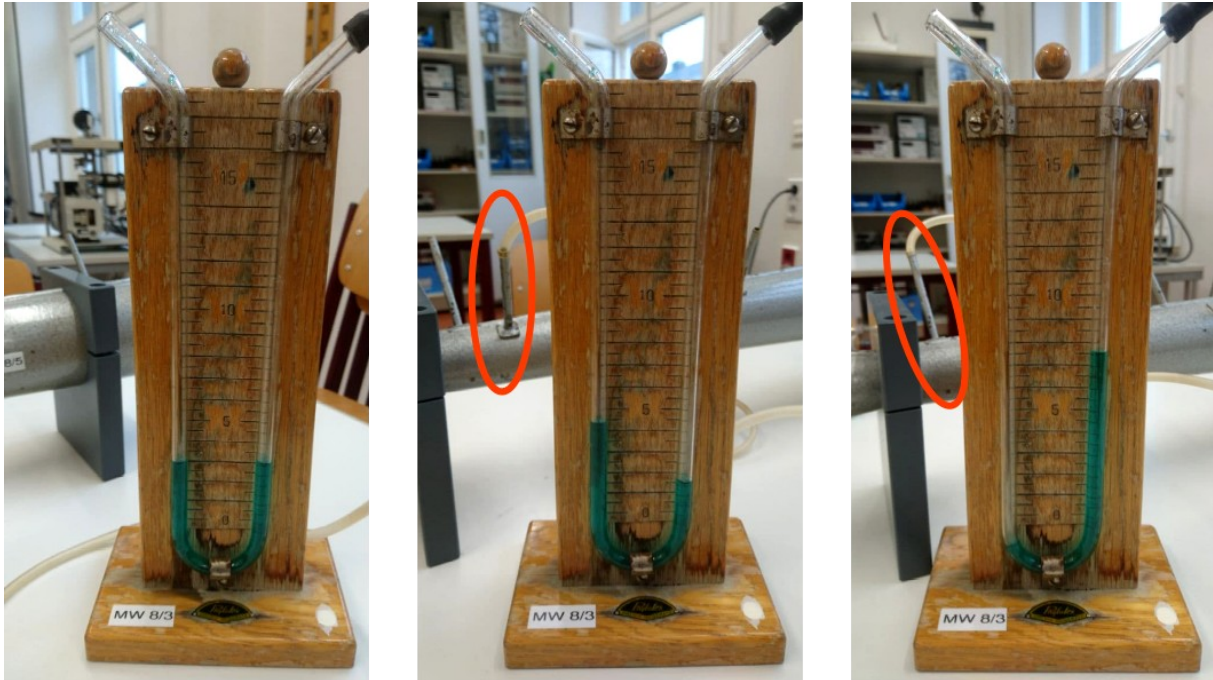


Abb. 7: Druckverhältnisse im Venturi-Rohr. Anschluss des Manometers auf der rechten Seite. Ohne Strömung (links), Gesamtdruckmesspunkt (mittig), statischer Druckmesspunkt (rechts). Anschluss des Manometers am Venturi-Rohr farbig hervorgehoben.

In Abbildung 7 sind exemplarisch die drei wesentlichen U-Rohr-Manometerzustände sichtbar: Gleicher Wasserstand bei Druckausgleich, ungleicher Wasserstand bei Über- oder Unterdruck. Je weiter hinten die Druckmessstellen liegen, desto geringer fallen die Druckunterschiede aus.

3.6 Reflexion des Experimentes

Der vorliegende Versuch eignet sich als Einstiegsexperiment (engage), ohne Kenntnis der Bernoulli-Gleichung, um einen Überraschungseffekt zu erzielen und daraus die Motivation / das Interesse der Schüler:innen für die kommende Stunde zu wecken. (vgl. ebd., S. 246ff.; Bybee [u. a.] 2006)

Mit dem gegebenen Versuchsmaterial konnte das U-Rohr-Manometer nur an der rechten Seite angeschlossen werden (s. Abbildung 7), obwohl die Anströmrichtung von links erfolgt. Dies ist für die Schüler:innen mit großer Sicherheit kognitiv herausfordernd und sollte in einem realen Unterrichtsgeschehen vermieden werden.

Obwohl für die Darstellung der Abnahme des statischen Drucks in der Engstelle die halbquantitative Variante ausreichend ist, könnte für leistungsstarke respektive interessierte Klassen eine quantitative Versuchsdurchführung (Cassy, Pasco) mit stärkerer Fokussierung der Auswertung lohnenswert sein. Gerade die Tatsache, dass allein aus der Druckmessung ein (Schätz-)Wert für die Strömungsgeschwindigkeit angegeben werden kann, ist vermutlich für einige Schüler:innen überraschend.

Zu Beginn des Versuches muss entweder die Druckmessung respektive die Ausrichtung der Messröhrchen im Venturi-Rohr diskutiert werden, um eine Schülervorstellung einer *Blackbox* zu vermeiden; oder der Versuch wird nach Einführung der Bernoulli-Gleichung durchgeführt und das Venturi-Rohr von beiden Seiten angeströmt. Die Druckverteilungen müssten dann wegen des einen Messröhrchens anders ausfallen und könnten mit den Schüler:innen besprochen werden.

4 Druckunterschied am Tragflügel

4.1 Einbettung in den Unterricht

Dieser Versuch ist gegen Ende des Lernbereiches verortet und findet nach:

- der Wiederholung des Druckbegriffes,
- der Einführung der Stromlinien sowie des Geschwindigkeitsprofils am Tragflügel (siehe Abbildung 8),
- und nach Besprechung der Kontinuitäts- sowie Bernoulli-Gleichung als Energiesatz statt.

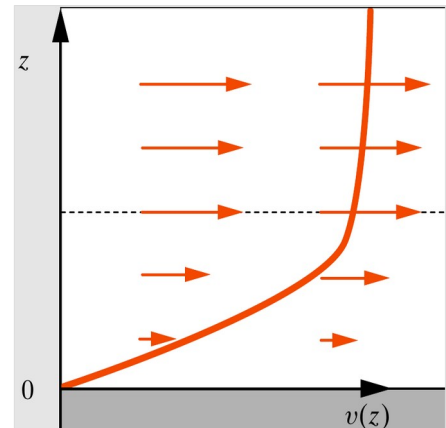


Abb. 8: Geschwindigkeitsprofil einer Strömung am Tragflügel. (Meschede 2010, Abb. 3.48)

Das vornehmliche Ziel ist es nun, die Bernoulli-Gleichung als physikalisches Gesetz quantitativ zu prüfen und auf den Flügel zu überführen (vgl. Kircher; Girwidz 2010, S. 246). Die Schüler:innen kennen den prinzipiellen Aufbau bereits aus dem ersten Versuch und können ihr erworbenes Wissen anwenden sowie die gesammelten Fragen und Hypothesen aus der Anfangsstunde besprechen. Aus den gewonnenen Kenntnissen wird zur Erklärung des dynamischen Auftriebes übergeleitet.

Der Versuch sollte als *quantitatives Demonstrationsexperiment* durchgeführt werden. Damit dennoch eine hohe Schüler:innenaktivität während des Versuches ermöglicht wird, werden einige Schüler:innen den Versuch unter Anleitung der Lehrperson absolvieren. Bspw. können einige die Messung vornehmen, andere die Messdaten an der Tafel sammeln.

Als *Lernziele* stehen zwei Punkte im Zentrum. Zum einem die Erklärung des Auftriebes mit dem erworbenen Wissen, zum anderen die computergestützte Auswertung:

Die Schüler:innen erfassen computergestützte Messreihen zur Druckverteilung an einem Tragflügelmodell mit Hilfe von Messschnittstellen und werten diese in Form von Diagrammen aus (S4⁴).

Die Schüler:innen erklären unter Nutzung des Stromlinienmodells sowie der Bernoulli-Gleichung über Betrachtung der Druckverhältnisse die Auftriebskraft am Flügel (S1).

4 Bezug auf die *Bildungsstandards im Fach Physik* der Kultusministerkonferenz (2020).

4.2 Aufgabenstellung

„Im folgenden wirst du die Druckverhältnisse am Tragflügel vermessen. Notiere deine Beobachtung (geeignete Form wählen!) und werte diese anschließend selbstständig aus. Die Verwendung von digitalen Auswertewerkzeugen ist ausdrücklich erlaubt. Nutze abschließend deine Beobachtung zur Erklärung des Auftriebes am Tragflügel. Verwende dafür das Modell der Stromlinien und die Bernoulli-Gleichung.“

4.3 Material und Aufbau

Benötigt werden ein Luftstromerzeuger, ein Tragflächenmodell mit Druckmessstellen, ein Manometer (Cassy, U-Rohr, Pasco), Schläuche, Stativmaterial und ein Laminator.

Der Aufbau erfolgt analog zum ersten Versuch, es wird lediglich die Waage durch das Manometer, in diesem Fall Cassy, ersetzt. Dies ist in Abbildung 9 dargestellt. Ggf.

sollte mittels Dokumentenkamera die Cassy-Anzeige projiziert werden. Sollte lediglich ein U-Rohr-Manometer zur Verfügung stehen, kann der Versuch voraussichtlich nur als halbquantitatives Experiment durchgeführt werden.

Das Tragflügelmodell verfügt über eine Staudruckmessstelle an der Vorderkante und jeweils vier Messstellen an der Ober- respektive Unterseite, welche über die Seite des Modells erreichbar sind (siehe Abbildung 4).



Abb. 9: Aufbau Demonstrationsexperiment zum Druck am Tragflügel. Messung erfolgt mit Cassy.

4.4 Durchführung

1. Cassy einschalten und für Druckmessung vorbereiten.
2. Tragflügelprofil horizontal vor dem Laminator ausrichten und den Luftstromerzeuger auf maximaler Stufe einschalten.
3. Die Messsonde an die einzelnen Messpunkte anschließen und Druckunterschiede notieren.
4. Anstellwinkel variieren und Vorgang wiederholen.

4.5 Beobachtung und Auswertung

Messpunkt	0° Anstellwinkel	20° Anstellwinkel
Staudruck	14 hPa	4 hPa
Oben 1	-6 hPa	-10,5 hPa
Oben 2	-5 hPa	-7,2 hPa
Oben 3	-1,2 hPa	-2 hPa
Oben 4	-0,3 hPa	-0,6 hPa
Unten 1	0 hPa	9 hPa
Unten 2	0,4 hPa	5,7 hPa
Unten 3	0,4 hPa	1,6 hPa
Unten 4	0,4 hPa	0,7 hPa

Tab. 2: Druckunterschiede am Tragflügelprofil.

Die Messwerte aus Tabelle 2 zeigen einen Unterdruck an der Tragflügeloberseite und einen Überdruck an der Tragflügelunterseite an, bei größerem Anstellwinkel (20°) tritt der Effekt stärker zu Tage. Der Staudruck sinkt scheinbar bei größerem Anstellwinkel, dies kann allerdings damit zusammenhängen, dass der vorderste Messpunkt nicht senkrecht angeströmt wird.

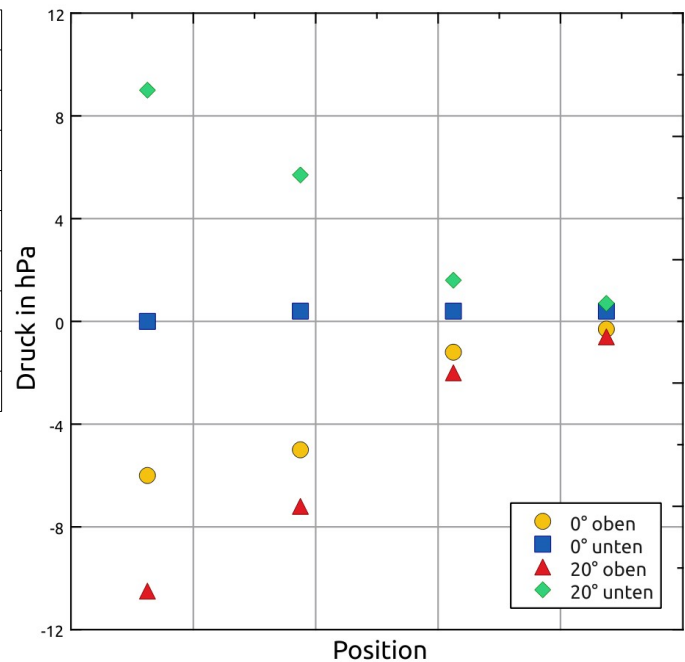


Abb. 10: Diagramm zur Druckverteilung am Tragflügelprofil (Anströmung von links). Der Staudruck ist nicht abgebildet.

Abbildung 10 visualisiert den Druckverlauf, wobei die Anströmung von links erfolgt.

4.6 Reflexion des Experimentes

Der Versuch lieferte die gewünschten Resultate. Der Effekt des Druckunterschiedes wird deutlich sichtbar, auch die Diagramme können leicht und zügig erstellt werden. Die Vorbereitungszeit ist wegen des Aufbaus der digitalen Messwertaufnahme minimal höher als im ersten Versuch. Es ist anzumerken, dass die quantitativen Messwerte eher für FOS oder BGY mit Vertiefung *Luftfahrttechnik* interessant sind, und für andere Vertiefungsrichtungen eventuell eine halbquantitative Auswertung reicht. Dies kann gerade bei Zeitmangel in Betracht gezogen werden.

Bei der *Auswertung* muss die Lehrperson verdeutlichen, dass Druck eine ungerichtete Zustandsgröße und keine Kraft ist. Über Betrachtung von Reibungseffekten und der Bernoulli-Gleichung können die Schüler:innen auf die Geschwindigkeits- und damit auf die Druckabnahme aufmerksam gemacht werden. Außerdem muss die Wirkung des Anstellwinkels begründet werden, ist dies (z. B. aus Zeitmangel) nicht möglich, sollte nur

ein Anstellwinkel vermessen werden. Um die Druckverhältnisse vollends verstehen zu können, muss abschließend die *Zirkulation* eingeführt werden, hierbei ist zu beachten, dass die Begriffe des Drehimpulses und der Impulserhaltung in der FOS erst in Klasse 12 behandelt werden.

Zusätzliche *Ausgestaltungsmöglichkeiten* sind:

- a) Der Entwurf einer Stationsarbeit mit dem Versuch zum Venturi-Rohr, um eine höhere Schüler:innenaktivität während des Unterrichtes zu erreichen. Damit ließe sich der Staudruck sowie die Bernoulli-Gleichung festigen.
- b) Die (digitale) Auswertung mehr ins Zentrum zu rücken. Mit Pasco sind die Messwerte ggf. direkt auf den Handys der Schüler:innen und die Diagramme können automatisiert erstellt werden. Ebenfalls bietet sich ein Einstieg in Tabellenkalkulationsprogramme und deren Visualisierungsmöglichkeiten an. In Verbindung mit fächerverbindenden Unterricht könnten sogar Grundlagen der Programmierung (z.B. Python) zur Auswertung genutzt werden.
- c) Der gesamte Unterricht könnte mit der Erklärung der Funktionsweise des Manometers erweitert werden. Hier bieten sich z.B. die Schüler:innen Handys mit der App *Phyphox* an.

5 Fazit

Die Arbeit zeigt auf, dass die Thematik des aerodynamischen Auftriebes nicht frei von Fallstricken und Stolperfallen ist. Gerade die fachlich korrekte Darstellung der Auftriebsentstehung in Sekundarstufe I ist nicht ohne Weiteres zu leisten, da der Begriff des Druckes fehlt. Für eine breit angelegte Behandlung des aerodynamischen Auftriebes in Sekundarstufe II stellt der sächsische Lehrplan kaum Anknüpfungspunkte zur Verfügung und thematisiert dieses spannende Thema meist nur am Rande.

Um Fehlvorstellungen zum Auftrieb zu vermeiden und Hybridmodellen vorzubeugen, müsste die Zirkulation(-sströmung) wesentlich stärker fokussiert werden. Wegen der praktisch nur indirekten Darstellbarkeit in Experimenten, sollten hierfür geeignete Simulationen oder Lehrvideos unter fachdidaktischer Anleitung entwickelt und erprobt werden.

Die vorgestellten Versuche nahmen vor allem die Vermittlung und Festigung von Grundlagen wie z. B. des Stromlinienmodells, der Kontinuitäts- und Bernoulli-Gleichung in den Blick. Sind diese ausreichend vorhanden, kann das abstrakte Thema der Zirkulation darauf aufbauend mit den Schüler:innen diskutiert werden.

Eine Schwäche der diskutierten Versuche stellt die mangelnde Schüler:innenaktivität dar, da lediglich Demonstrationsexperimente vorgestellt wurden. Hier könnte perspektivisch die Erarbeitung in Form einer Projektarbeit oder eines entsprechenden außerschulischen Lernortes (Flugzeughersteller, Museen, Forschungseinrichtungen) nützlich sein.

6 Literaturverzeichnis

- Bybee, Rodger; Taylor, A.; Gardene, April: The BSCS 5E Instructional Model: Origins and Effectiveness. In: Jg. / 2006. URL: <https://bscs.org/reports/the-bscs-5e-instructional-model-origins-and-effectiveness/> - Download vom: 28.02.2022.
- Demtröder, Wolfgang: Experimentalphysik 1 / Mechanik und Wärme. 9. Auflage., Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum: 2021. URL: <https://katalog.slub-dresden.de/id/0-1765220823> - Download vom: 24.02.2022.
- Fröhlich, Jochen: Einführung in die Strömungsmechanik / Einführung in die Dynamik der Fluide (Vorlesungsskript). 2021.
- Geyer, Monika; Isola, Anton: Physik des Fliegens. Entwicklung eines Unterrichtsvorschlages für ein „fast vergessenes“ Teilgebiet im Mechanikunterricht der Oberstufe. In: Jg. / 2003. URL: https://www.imst.ac.at/imst-wiki/images/3/3b/Langfassung_Physik_Geyer.pdf - Download vom: 10.02.2022.
- Kircher, Ernst; Girwidz, Raimund: Physikdidaktik: Theorie und Praxis. 2. Aufl., Häußler, Peter (Hrsg.): Berlin, Heidelberg: Springer: 2010. URL: <https://katalog.slub-dresden.de/id/0-1648805086> - Download vom: 07.08.2019.
- Kultusministerkonferenz: Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife. In: Jg. / 2020. URL: <https://www.kmk.org/themen/qualitaetssicherung-in-schulen/bildungsstandards.html> - Download vom: 01.10.2020.
- Meschede, Dieter; Gerthsen Physik. 24. Auflage., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg: 2010. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-12894-3> - Download vom: 24.02.2022.
- Odenbach, Stefan: Mess- und Automatisierungstechnik 2 (Vorlesungsskript). 2021.
- Sächsisches Staatsministerium für Kultus: Lehrplan Berufliches Gymnasium / Physik. 2020a. URL: <https://www.schule.sachsen.de/lpdb/>.
- Sächsisches Staatsministerium für Kultus: Lehrplan für die Fachoberschule / Fachrichtung Technik / Angewandte Physik. 2020b. URL: www.bildung.sachsen.de/apps/lehrplandb/.
- Schecker, Horst; Wilhelm, Thomas; Hopf, Martin [u. a.] (Hrsg.): Schülervorstellungen und Physikunterricht: ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis. Berlin: Springer Spektrum: 2018. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57270-2> - Download vom: 08.01.2021.
- Wodzinski, Rita: Wie erklärt man das Fliegen in der Schule? Versuch einer Analyse verschiedener Erklärungsmuster. In: Plus lucis Jg. 2 / 1999, S. 18–22.

7 Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln angefertigt habe und dass alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, durch Angabe der Quellen als Entlehnung kenntlich gemacht wurden. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Prüfungsleistung eingereicht.

Dresden, der 28. Februar 2022

Hiermit nehme ich zur Kenntnis:

Sollte die obige Selbstständigkeitserklärung nicht der Wahrheit entsprechen oder der Versuch einer Täuschung festgestellt werden (bspw. Plagiate), wird die vorliegende Arbeit in der Regel mit der Note:

- „nicht ausreichend“ (5,0) im Sinne einer Täuschung bei Seminararbeiten und anderen entsprechenden schriftlichen Arbeiten oder sonstige Prüfungsleistungen oder
- „ungenügend“ (6,0) bei wissenschaftlichen Arbeiten als Bestandteil der Ersten Staatsprüfung

bewertet werden.