

Die physikalische Faszination des Fliegens mit einem Low-cost Flugzeugmodell untersuchen



LEON BREIMANN – ALEXANDER PUSCH

In diesem Beitrag wird eine relativ einfache, fachlich korrekte Erklärung zur Physik des Flugzeugs auf Grundlage der auf ein Flugzeug wirkenden Kräfte gegeben. Die vorgestellte Erklärung bedient sich der Krümmung von Stromlinien als Indikator für Gebiete unterschiedlichen Drucks. Zur Untersuchung flugbestimmender Eigenschaften wird ein Low-cost Flugzeugmodell vorgestellt und experimentell analysiert. Das Flugzeugmodell besteht aus Teilen aus dem 3D-Drucker und einfachen Normteilen und kann mit Lernenden nachgebaut werden.

1 Einleitung

Das Fliegen fasziniert die Menschheit bereits seit mehreren tausend Jahren. Mit OTTO LILIENTHAL und den Gebrüdern WRIGHT ist es den Menschen vor etwas mehr als einhundert Jahren erstmals gelungen, ein funktionierendes Flugobjekt mit Personen an Bord zu entwickeln. Mittlerweile ist das Fliegen für die meisten Menschen alltäglich geworden. Dennoch bleibt das Phänomen Fliegen faszinierend, weshalb sich der ein oder andere beim Basteln eines Papierfliegers vermutlich schon mal die Frage gestellt hat: *Warum fliegen Flugzeuge?* Das Thema über die Physik des Fliegens lässt sich dabei in den Kernlehrplan der Gesamtschule für den Bereich der Naturwissenschaften, *Bewegung in Natur und Technik* (KLP NRW, 2013) einbetten. Für Gymnasien sowie Realschulen bietet es sich hingegen in einer Projektphase an.

Experimentieren ist ein zentraler Teil des Physikunterrichts und darum sollte auch die Behandlung der Frage, warum Flugzeuge fliegen, mit passenden Experimenten begleitet werden. Für die Betrachtung des Auftriebs an einer Tragfläche sind bereits viele Experimente vorhanden. Diese reichen von einfachen Freihand-Experimenten bis hin zu Aufbauten von Lehrmittelfirmen zur quantitativen Untersuchung der Auftriebskräfte. Da jedoch die Frage nach dem Fliegen von Flugzeugen nicht nur der Auftriebskräfte an der Haupttragfläche, sondern einer Gesamtbetrachtung aller Kräfte am Flugzeug bedarf, benötigt es ein Experiment, an dem diese Kräfte und ihr Zusammenspiel untersucht und ausprobiert werden können.

Um dies zu ermöglichen, wurde ein Flugzeugmodell als so genanntes Variablenkontrollexperiment entwickelt (Abb. 1). Das Flugzeugmodell weist die wesentlichen Komponenten auf:

der *Rumpf* samt *Bug*, der das notwendige mitzuführende Gewicht trägt, die *Tragfläche*, die einen Auftrieb erzeugt, sowie ein *Höhen- und Seitenleitwerk* am Heck des Flugzeugs.

An diesem Flugzeugmodell lassen sich die für das Fliegen relevanten Parameter, die die Kräfte am Flugzeug beeinflussen, kontrolliert verstellen. Das Modellflugzeug ist dabei als Low-cost Bausatz entwickelt worden und besteht aus 3D-gedruckten Teilen und günstigen Normteilen und Alltagsmaterialien.

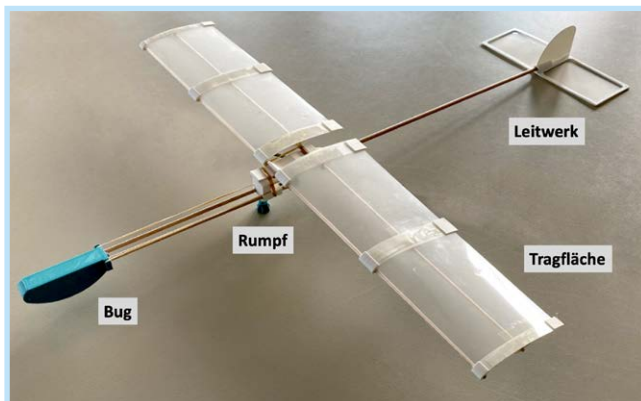


Abb. 1. Low-cost Flugzeugmodell

2 Erklärung des Fliegens

Fliegen wird im populärwissenschaftlichen und auch im schulischen Kontext in der Regel über das Phänomen des Auftriebs an einer Tragfläche erklärt (WODZINSKI, 1999). Dieses Phänomen beruht vor allem auf dem Druckunterschied zwischen der Ober- und der Unterseite an der Tragfläche.

Beschäftigt man sich mit dem großen Gebiet des Modellflugzeugbaus (bspw. DMV, o.J.), so wird schnell klar, dass Fliegen deutlich vielschichtiger ist, als nur Auftrieb an der Tragfläche (Kapitel 2.4). Es greifen verschiedene Kräfte an den Komponenten des Flugzeugs an und bestimmen gemeinsam die Flugeigenschaften (Kapitel 2.4). Wenn diese Kräfte nicht aufeinander abgestimmt sind, kann kein erfolgreicher Flug absolviert werden.

2.1 Viele falsche Erklärungen

Eine häufige Erklärung versucht, den Auftrieb über den Impulserhalt zu erklären. Durch einen Anstellwinkel der Tragfläche zur Strömungsrichtung „prasselt“ die Luft gegen die Unterseite der Tragfläche und drückt diese gleichzeitig nach oben. Diese Erklärung vernachlässigt die Berücksichtigung des Auftriebs durch Druckunterschiede und kann daher auch die übliche Tragflächenform nicht erklären. Der Impulserhalt hat zwar einen Einfluss auf den Auftrieb, dieser ist jedoch gering. Als einzige Erklärung für den Auftrieb ist diese also nicht geeignet.

Verwendet man korrekterweise den Druckunterschied zwischen der Oberseite und der Unterseite der Tragfläche als maßgebliche Erklärung für den Auftrieb, so stellt sich die Frage, wie dieser Auftrieb zustande kommt. Ein häufiger Ansatz betrach-

tet dazu die Form der Tragfläche und begründet in einem ersten Schritt, dass die Luft vorne an der Tragfläche „aufgespalten“ wird und hinten an der Tragfläche „zusammengeführt“ wird. Unter der Annahme, dass sich zwei benachbarte „Luftteilchen“ vorne an der Tragfläche auftrennen und hinter der Tragfläche wieder zusammengehen, lässt sich die Hypothese aufstellen, dass sich das „Luftteilchen“ oben schneller bewegen muss, da es die längere Strecke zurücklegt. Ausgehend von dieser Hypothese wird dann der Bernoulli-Effekt herangezogen, der erkennen lässt, dass in schnelleren Luftströmungen ein geringerer Druck herrscht. Es herrscht also nach dieser Erklärung durch die unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten oberhalb der Tragfläche ein Unterdruck, wodurch die Tragfläche nach oben gedrückt wird.

Die in dieser Erklärung gemachte Annahmen, dass die Luftteilchen sich „aufteilen“ und wieder zusammenkommen müssen, ist dabei aber nicht korrekt. Zwar strömt die Luft oberhalb der Tragfläche schneller, sogar noch schneller als in der Annahme vermutet, jedoch kommt das nicht durch den Wegunterschied zustande. Die Geschwindigkeitsdifferenz lässt sich nicht direkt erklären, sondern ist ein Ergebnis des herrschenden Druckunterschieds, weshalb auch die BERNOULLI-Gleichung nicht zur Erklärung des Druckunterschieds herangezogen werden kann.

2.2 Erklärungsansatz auf Grundlage der Strömungslehre von WODZINSKI

WODZINSKI hat bereits 1999 eine Analyse der drei Erklärungsansätze vorgenommen und führte diese in eine fachlich korrekte, jedoch sehr umfangreiche Erklärung zusammen (WODZINSKI, 1999). Sie bezog sich dabei auf die Erklärung über den Impulserhalt, den Auftrieb durch Druckunterschiede und das Existieren von Zirkulationsströmungen um eine Tragfläche. Zentraler Punkt war dabei die Erklärung der Ursache für das an einer Tragfläche vorzufindende Strömungsbild um eine Tragfläche. Die Erklärung dringt dabei sehr tief in die Strömungslehre ein und kann dadurch für viele Schüler/innen eine fachliche Hürde darstellen. WODZINSKI stellt im Rahmen ihres Artikels die These auf, dass Schülerinnen und Schüler ein Strömungsbild intuitiv bereits korrekt oder zumindest passabel genug zeichnen würden.

2.3 Erkläransatz mit Strömungsverläufen

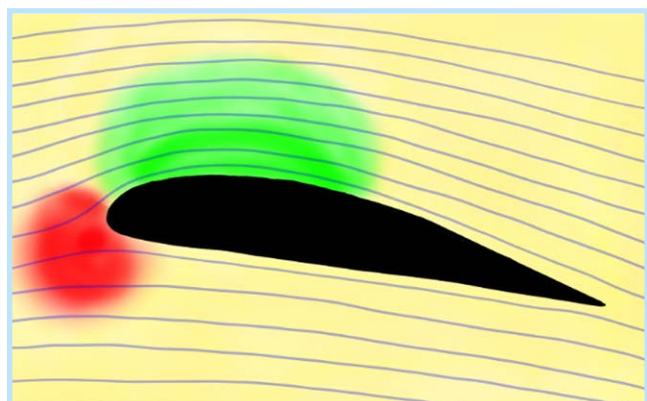


Abb. 2. Umströmte Tragfläche in zweidimensionaler Sicht bei Reibungsfreiheit (BREIMANN, 2023)

Lässt man Schüler/innen den Strömungsverlauf um eine Tragfläche skizzieren, so werden also viele vermutlich intuitiv den tatsächlichen resultierenden Verlauf zeichnen. Eine argumentative Betrachtung der Stromlinien ermöglicht dann die Identifikation von Hoch- und Tiefdruckgebieten vor, ober- und unterhalb der Tragfläche.

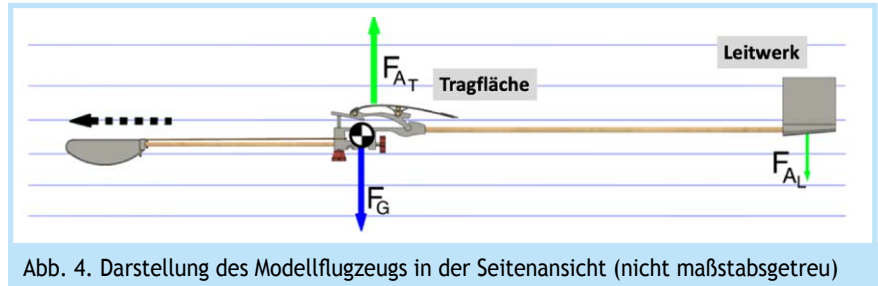


Abb. 4. Darstellung des Modellflugzeugs in der Seitenansicht (nicht maßstabsgetreu)

Bei der Umströmung der Tragfläche ist der Luftstrom zunächst gekrümmt. Mal zeigt die Krümmung von der Tragfläche weg und mal zeigt sie zur Tragfläche hin. In Abbildung 2 ist eine umströmte Tragfläche in zweidimensionaler Sicht gezeigt. Die Druckfelder ergeben sich auf Grund der Krümmung der Stromlinien. Gebiete mit hohem Druck sind in rot eingefärbt, Gebiete mit niedrigem Druck in grün.

Damit die Stromlinien ihren Verlauf überhaupt ändern, muss nach Newton auf die strömende Luft eine Kraft wirken. Dabei existieren nur drei Kräfte, die auf Strömungen wirken können, die sich bei einer Tragfläche vereinfacht durch *Reibung*, *Gravitation* und *Kraft durch Druckunterschiede* beschreiben lassen. Da Reibung bis auf eine Grenzschicht vernachlässigt wurden und Gravitation nicht die Ursache sein kann, muss eine Kraft durch Druckunterschiede wirken.

Durch den hohen Druck vor der Tragfläche kommt es zu einer Kraft entgegen der Flugrichtung des Flugzeugs. Das Flugzeug wird also durch den Luftstrom leicht abgebremst. Durch die Umströmung verringert sich der Luftdruck oberhalb der Tragfläche. Die dadurch entstandene Druckdifferenz zwischen Ober- und Unterseite führt zu einem Auftrieb des Flugzeugs. Die auf die Tragfläche wirkenden Kräfte sind in Abbildung 3 zu sehen. In *grün* ist die Auftriebskraft durch den Unterdruck oberhalb der Tragfläche und in *rot* die bremsende Kraft durch den Überdruck vor der Tragfläche dargestellt.

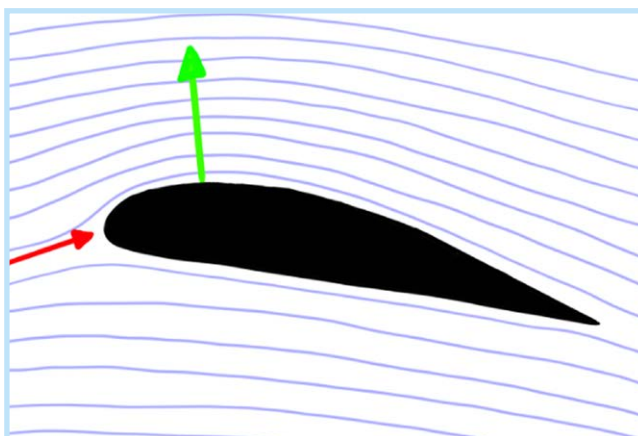


Abb. 3. Umströmte Tragfläche mit aus der Umströmung resultierenden Kräften auf die Tragfläche (BREIMANN, 2023)

2.4 Warum fliegt ein Flugzeug?

Die Betrachtung des *Auftriebs* an der Tragfläche ist nur ein Teil der gesamten Erklärung für die Frage, warum Flugzeuge fliegen.

Die weiteren Kräfte, wie *Abtrieb*, *Gewichtskraft* und *Luftwiderstand* an den weiteren Komponenten Rumpf und Leitwerk sowie deren Zusammenspiel sind mindestens genauso wichtig. Letztendlich ist – vereinfacht gesagt – das Zusammenspiel der Kräfte auf das Flugzeug entscheidend, ob und wie es fliegt. In Abbildung 4 sind die wesentlichen Kräfte, Auftriebskraft F_{AT} , Gewichtskraft F_G , sowie eine Abtriebskraft des Leitwerkes F_{AL} eines Segelflzeuges dargestellt. Der Massenschwerpunkt liegt in diesem Beispiel exakt unterhalb der Tragfläche. Es wird davon ausgegangen, dass sich alle Kräfte so ergänzen, dass es zu einem geradlinigen Vorausflug kommt. Durch Verschiebung des Schwerpunktes nach vorne oder nach hinten kann bei einem Segelflugzeug der Flug ab- bzw. aufwärts beeinflusst werden. In der Realität wird bei einem Flugzeug natürlich nicht der Schwerpunkt verlagert, sondern es werden z.B. Steuerklappen zur Umlenkung der Luftströmung verwendet.

In der diesem Artikel zugrunde liegenden Masterarbeit von BREIMANN (2023) finden sich weiterführende ausführliche Erklärungen und Herleitungen. Sie steht unter <https://physikkommunizieren.de/3d-druck/flugzeug/> zum Download. Eine detaillierte, fachliche Erläuterung zur Strömungslehre findet sich z.B. auch in SPURK & AKSEL (2010).

3 Das Flugzeugmodell für Experimente

Nachfolgend wird ein einfaches (Segel)Flugzeugmodell beschrieben, welches sich an vielen Ideen und Konzepten aus dem Segelflugzeugbau orientiert (die Physik des Modellfluges ist u.a. in THIES (1981) und DMV (o.J.) beschrieben) und durch die Variation von den Flug beeinflussenden Parametern variablenkontrollierte Experimente ermöglicht.

3.1 Konzeption

Das Flugzeugmodell muss für den schulischen Kontext einige Kriterien erfüllen, die im Folgenden vorgestellt werden.

- **Sicherheit:** Das Modellflugzeug muss sicher sein, sodass im Unterricht keine Gefahren für die Schüler/innen sowie für Gegenstände bestehen.
- **Preis:** Das Modellflugzeug muss günstig genug sein, um es in größerer Stückzahl im Unterricht einzusetzen.
- **Montage:** Das Modellflugzeug muss durch Schüler/innen in relativ kurzer Zeit korrekt zusammengebaut werden können.
- **Stabilität:** Das Modellflugzeug muss ungeschickte Handhabung und Bruchlandungen möglichst zerstörungsfrei aushalten können.

4 Experimente

Mit dem hier vorgestellten Flugzeugmodell lassen sich unterschiedliche Einflussfaktoren für den Flug testen. Hierzu können auf sehr einfache Weise verschiedene *Tragflächenprofile*, *Einstellwinkeldifferenzen* und Änderungen der *Schwerpunktlage* realisiert werden. Der jeweilige Einfluss kann gegen die Normaleinstellung der Parameter verglichen werden. Zusätzliche Parameter sind die *Abwurfgeschwindigkeit* und der *Abwurfwinkel* sowie Störeinflüsse wie *Wind*.

Die Analyse der verschiedenen Einflussfaktoren wurde mit dem kostenlosen Videoanalyse-Programm Tracker (<https://physlets.org/tracker/>) realisiert. Dazu wurden das Flugzeugmodell mehrere Male bei gleicher Abwurfgeschwindigkeit und gleichem Abwurfwinkel geworfen. Aus den Videoaufnahmen der Flüge wurden mit Hilfe von Tracker Orts-Zeit-Diagramme erstellt und anschließend hinsichtlich der Flugbahn qualitativ ausgewertet (Abb. 6). Für die weitere Auswertung wurden diejenigen Flüge ausgewählt, bei denen eine annähernd gleiche Anfangsgeschwindigkeit und Abwurfwinkel gegeben waren.

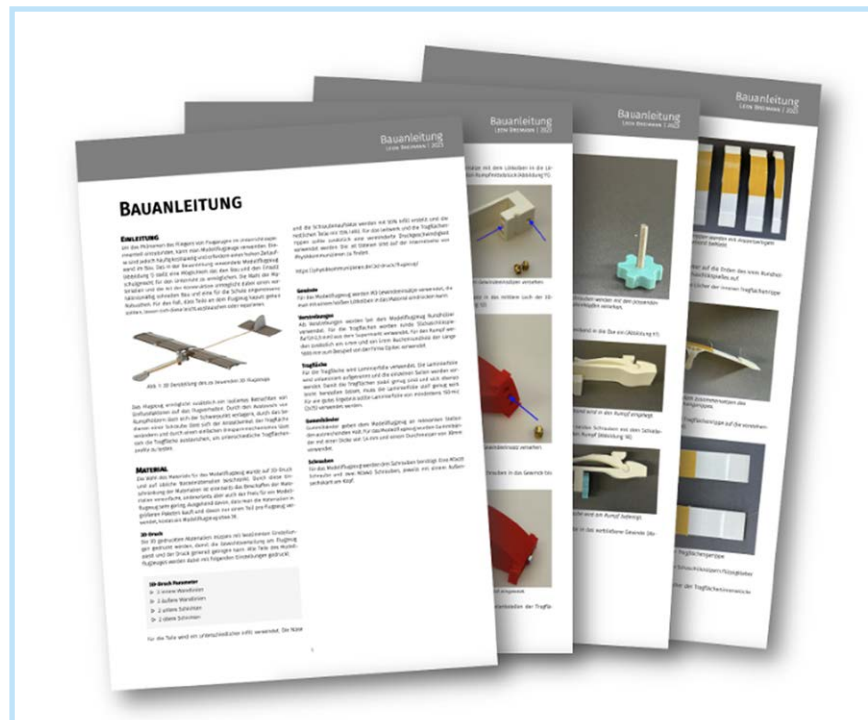


Abb. 5. Die ausführliche und schrittweise bebilderte Bauanleitung ermöglicht einen einfachen Nachbau des Flugzeugmodells

- **Variation der Variablen:** An dem Flugzeugmodell müssen die aus der Theorie bekannten Variablen des Fliegens im Rahmen einer Variablenkontrolle verändert werden können.
- **Funktion:** Das Flugzeug sollte fliegen (bzw. segeln) können und die maßgeblichen Variablen (s. Kapitel 4) sollten deutlich ihren Einfluss zeigen.

3.2 Bau

Für den Nachbau existiert eine ausführliche Bauanleitung (vgl. Abb. 5) mit deren Hilfe das Flugzeug aus einfachen Normteilen (bspw. M3x30 Schraube, Harthundholz) und Alltagsmaterialien (bspw. Gummibänder, Schaschlikspieße, Laminierfolie) sowie 3D-gedruckten Bauteilen hergestellt werden kann. Auf ein einzelnes Flugzeug heruntergerechnet betragen die Kosten weniger als 3,50 €, die Montage dauert für geübte Bastlerinnen und Bastler ca. eine halbe Stunde.

Auf der Webseite <https://physikkommunizieren.de/3d-druck/flugzeug/> finden sich die STL-Dateien, die Bauteilliste und die Anleitung kostenlos zum Download.



Abb. 6. Aufbau des Experiments mit der in Tracker festgesetzten Achse und dem Maßstab. Der Maßstab in blau ist der linke Rand der Tafel, die Achsen in pink

4.1 Flugverhalten bei Normaleinstellungen

Zu Analyse des Flugverhaltens wurde zunächst eine Optimierung der einstellbaren Parameter an dem Modell vorgenommen, welche im folgenden „Normaleinstellung“ genannt wird. Aus 29 Würfeln mit „Normaleinstellungen“ (= „Normalflüge“) wurden 12 Flüge ausgewählt. Diese ausgewählten Flüge zeichneten sich durch eine vergleichbare Anfangsgeschwindigkeit von etwa $11 \text{ m/s} \pm 1 \text{ m/s}$ aus. Die verschiedenen Flugbahnen sind in Abbildung 7 zu sehen.

Die geringe Streuung der „Normalflüge“ zeigt, dass das Flugzeug bei nahezu gleichem Abwurfwinkel und Abwurfgeschwindigkeit eine reproduzierbare Flugbahn hat. Diese Reproduzierbarkeit wird im Folgenden ausgenutzt, um die Normalflugbahn qualitativ mit anderen Flugbahnen zu vergleichen, bei denen Variablen verändert wurden. Um einen Vergleich zu haben, wurde aus den 12 Flügen der zehnte Flug als Vergleichsflug ausgewählt. Dieser besitzt eine Anfangsgeschwindigkeit von 11 m/s und liegt als Flugbahn mittig zwischen den anderen. Aus den Flügen mit jeweils veränderten Variablen wird dazu ein zu den Anfangsbedingungen passender Flug ausgewählt.

4.2 Einfluss des Anstellwinkels

Insgesamt wurden sechs Flüge mit verändertem Anstellwinkel (drei mit vermindertem und drei mit erhöhtem Anstellwinkel) durchgeführt. Zum Vergleich der Flugbahnen wurden jeweils ein Flug mit verringer-

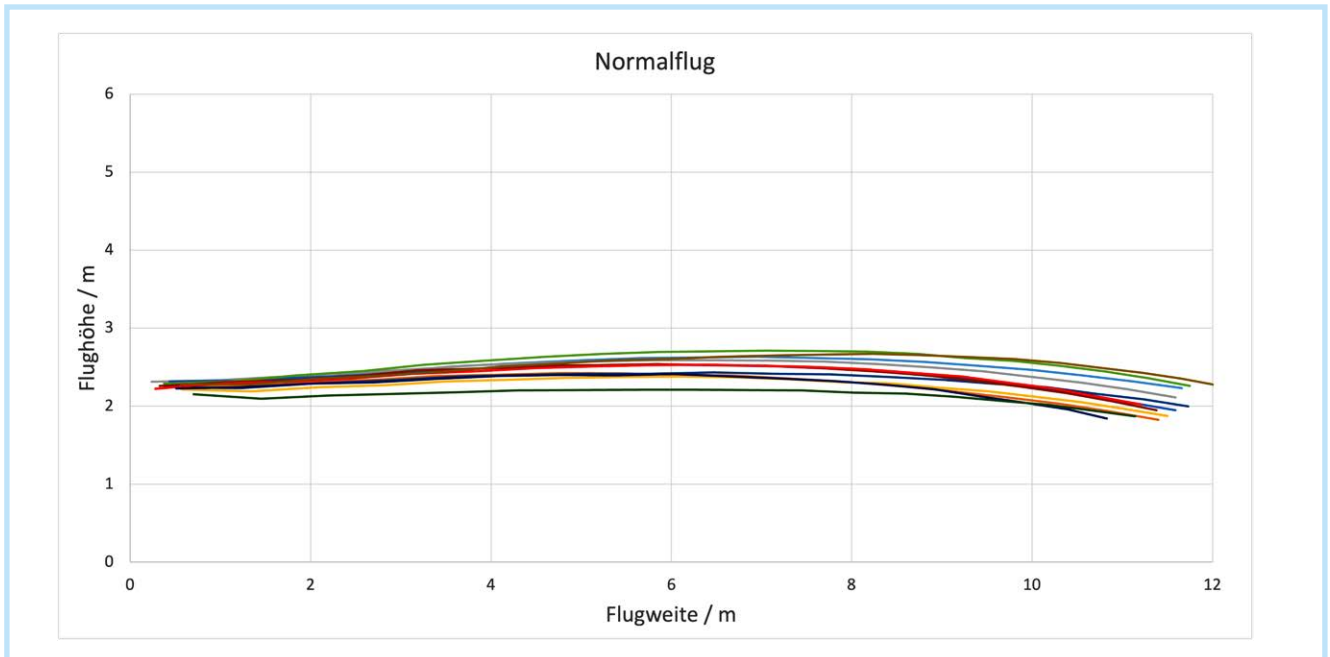


Abb. 7. Grafische Darstellung der 12 Normalflugbahnen mit annähernd gleichen Abwurfgeschwindigkeiten und Abwurfwinkeln

tem Anstellwinkel und ein Flug mit erhöhtem Anstellwinkel ausgewählt. Die beiden Flugbahnen im Vergleich zur Normalfluglage sind in der Abbildung 8 dargestellt.

Es ist deutlich zu erkennen, dass das Modellflugzeug bei erhöhtem Anstellwinkel gegenüber dem Normalflug nach oben fliegt. Der Flug nach oben geht bis zu einer Weite von acht Metern, ab der das Flugzeug anfängt, den Bug (die also die „Nase“) wieder Richtung Boden zeigen zu lassen. Ebenso ist nach einer gewissen Zeit des Sinkfluges, in dem das Modellflugzeug wieder beschleunigt wurde, zu erkennen, dass die Flugbahn langsam zurück in die Waagerechte dreht.

Dem gegenüber steht der Flug mit einem verringerten Anstellwinkel. Hier ist klar zu erkennen, dass das Flugzeug lediglich eine Kurve nach unten fliegt.

4.3 Einfluss des Profils

Aus drei Flügen mit verändertem Tragflächenprofil wurde ein Flug ausgewählt. In Abbildung 9 ist der Normalflug im Vergleich zu einem Flug mit planer (statt gekrümmter, vgl. Abb. 2) Tragfläche dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass der Flug mit der planen Tragfläche deutlich kürzer ausfällt als der Normalflug mit gekrümmter

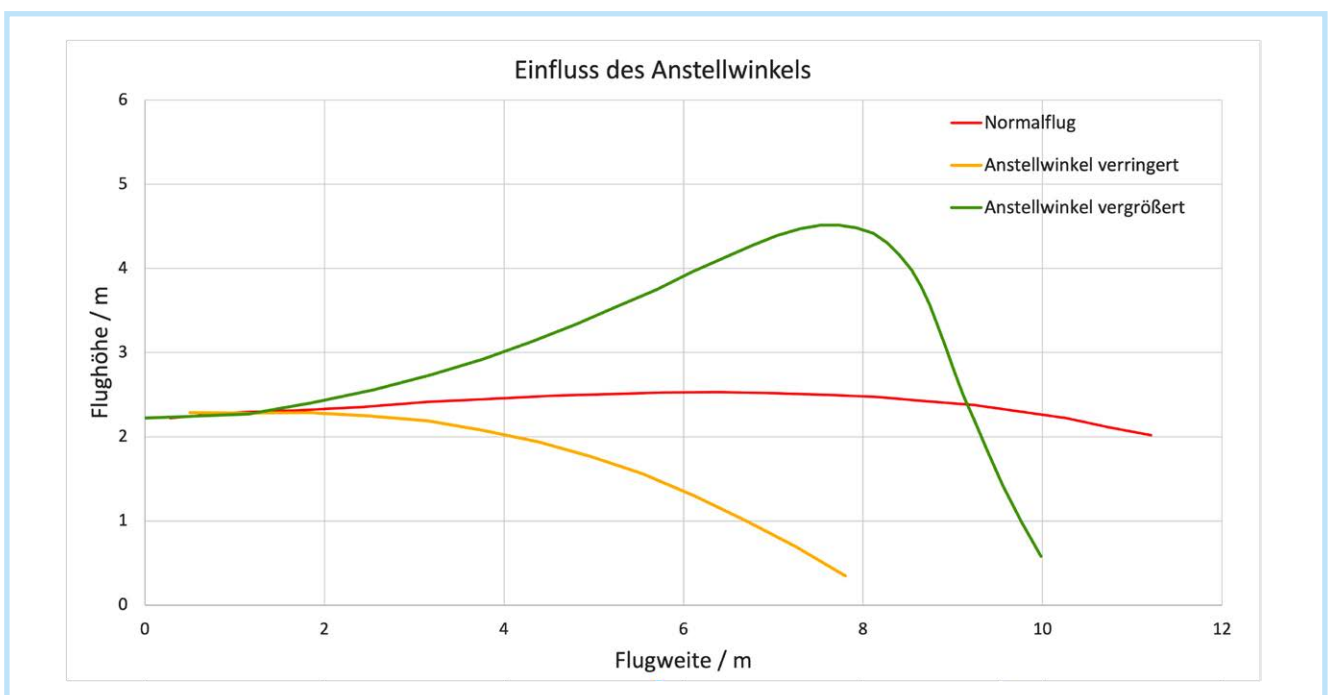


Abb. 8. Drei Flugbahnen mit vergleichbarer Abwurfgeschwindigkeit und Abwurfwinkel und verändertem Anstellwinkel

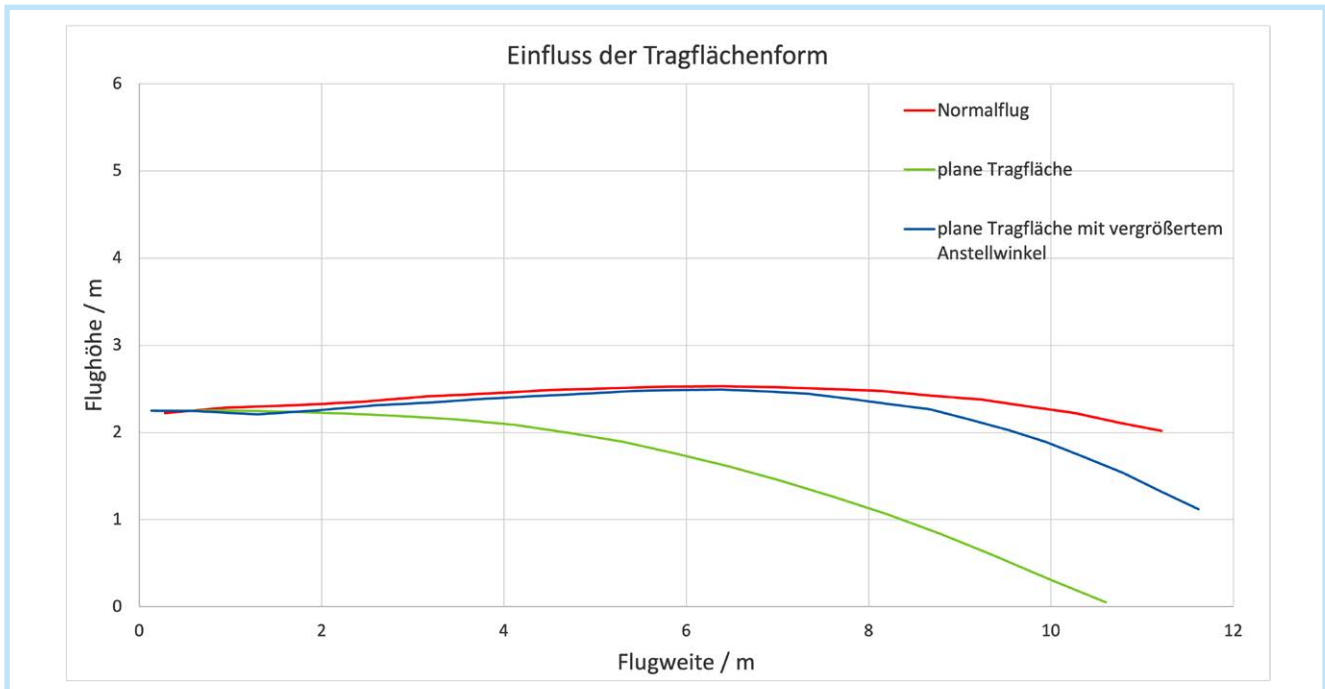


Abb. 9. Zwei Flugbahnen mit vergleichbaren Anfangswerten und planem Tragflächenprofil

Tragfläche, obwohl beide den gleichen Anstellwinkel in der Tragfläche besaßen. Damit zeigt sich, dass die plane Tragfläche bei gleichem Anstellwinkel deutlich weniger Auftrieb erzeugt als die gekrümmte. Vergleicht man jedoch die plane Tragfläche mit dem Flug mit dem geringeren Anstellwinkel aus Abbildung 8, so lässt sich erkennen, dass das Modellflugzeug beim Flug mit der planen Tragfläche deutlich weitergekommen ist. Das lässt darauf schließen, dass durch die plane Tragfläche zumindest ein gewisser Auftrieb erzeugt wurde.

4.4 Einfluss der Schwerpunktlage

Insgesamt wurden neun Flüge mit veränderter Schwerpunktlage ausgewertet.

Für den Vergleich mit der Normalfluglage wurden drei Flüge mit jeweils zwei im unterschiedlichen Abstand nach hinten gesetzten Schwerpunkten und ein Flug mit nach vorne versetzten Schwerpunkt ausgewertet. Die Flugbahnen im Vergleich zur Normalfluglage sind in Abbildung 10 dargestellt.

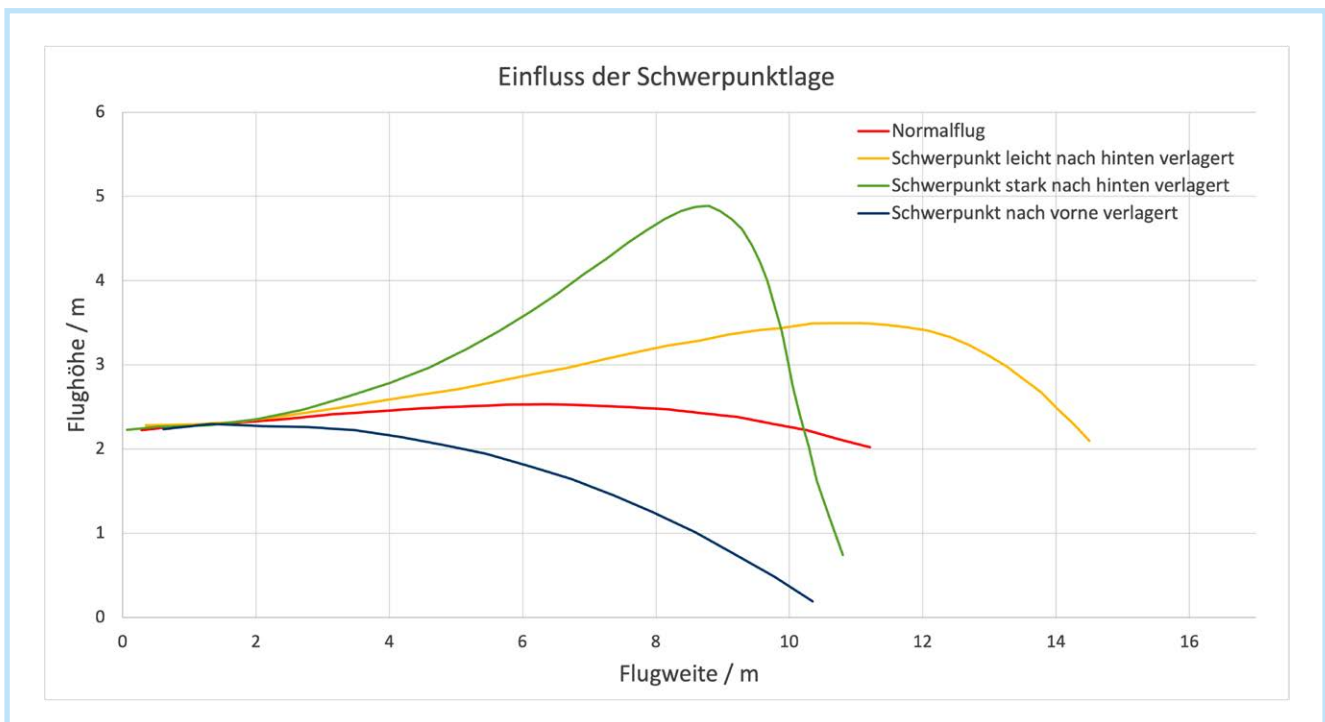


Abb. 10. Vier Flugbahnen mit vergleichbaren Anfangswerten

Der Grafik ist zu entnehmen, welchen Einfluss das Versetzen des Schwerpunktes auf die Flugbahn des Modellflugzeugs hat. Wird der Schwerpunkt etwas nach hinten gesetzt (gelber Graph), fliegt das Flugzeug stetig und leicht nach oben, bis es ab einer Flugweite von zehn Metern seine maximale Flughöhe erreicht und in den Sinkflug übergeht. Sobald es in den Sinkflug übergeht, verliert es relativ schnell an Höhe und sinkt sehr steil. Überreizt man das Versetzen des Schwerpunktes nach hinten, so erhält man eine Flugbahn wie den grünen Graphen. Das Flugzeug steigt noch stärker an und erreicht dabei eine deutlich größere Flughöhe als zuvor. Dabei wird es deutlich abgebremst und geht nach einer viel kürzeren Flugweite in einen Sinkflug über. Dieser erfolgt auch viel abrupter als bei dem nur leicht nach hinten gesetztem Schwerpunkt. Das Flugzeug sinkt anschließend auch viel steiler nach unten. Versetzt man hingegen den Schwerpunkt deutlich nach vorne, so steigt das Flugzeug im Vergleich zum Normalflug nicht an, sondern geht direkt in einen Sinkflug über.

5 Fazit

Mit dem Flugzeugmodell ist es möglich, kostengünstige Experimente zum Einfluss von verschiedenen *Tragflächenprofilen*, *Einstellwinkeldifferenzen* und *Änderungen der Schwerpunktlage* durchzuführen. Die Experimente ermöglichen zudem das Erlernen und Anwenden der Variablenkontrollstrategie und den Einsatz von digitalen Geräten wie dem Computer oder dem Tablet bei der Videoanalyse. Das Bauen (und falls notwendig) Reparieren der Low-cost Flugzeugmodelle kann die Schüler/innen motivieren und ihnen handwerkliche Fähigkeiten näherbringen.

Im Rahmen der Forschungsarbeit von BREIMANN (2023) wurden bereits die Einflüsse der Schwerpunktlage, des Anstellwinkels sowie der Tragflächenform untersucht. Es können durch weitere Variationen am Modellflugzeug noch weitere Einflüsse getestet werden, wie der Abstand zwischen Leitwerk und Tragfläche, die

Größe von Tragfläche oder Leitwerk und die Veränderung der Einstellwinkeldifferenz über einen veränderten Anstellwinkel des Leitwerks. Hierzu müssen zum Teil die 3D-Dateien und die Rundstäbe angepasst werden, was sich z.B. für fortgeschrittene Projektarbeiten eignet.

Literatur

BREIMANN, L. (2023). *Die Faszination des Fliegens - Ein enaktiver Zugang zur Physik hinter dem Fliegen anhand eines Low-Cost 3D-gedruckten Modellflugzeugs*. Masterarbeit an der Universität Münster. <https://physikkommunizieren.de/wp-content/uploads/2023/07/Breimann-2023-Die-Faszination-des-Fliegens.pdf> (07.09.2023).

Deutscher Motorflieger Verband e.V. (DMV) (o.J.). *Grundlagen zum Modellflugsport*. <https://www.dmfv.aero/wp-content/uploads/2019/11/Grundlagenwissen-Modellflugsport.pdf> (07.09.2023).

Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (KLP NRW) (2013). *Kernlehrplan für die Gesamtschule - Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen Naturwissenschaften Biologie, Chemie, Physik*. https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/lehrplan/130/KLP_GE_NW.pdf (07.09.2023)

SPURK, J. H., AKSEL, N. (2010). *Strömungslehre - Einführung in die Theorie der Strömungen*. 8. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer

THIES, W. (1981). *Modellflug Lexikon*. Baden-Baden: Verlag für Technik und Handwerk

WODZINSKI, R. (1999). Wie erklärt man das Fliegen in der Schule? *Plus Lucis*. 2/99, 18-22.

LEON BREIMANN studierte an der Universität Münster Lehramt für Physik und Mathematik auf für Gymnasien und Gesamtschulen und arbeitete als Studentische Hilfskraft am Institut für Didaktik der Physik. Aktuell absolviert er sein Referendariat am Anne-Frank-Gymnasium in Werne und dem ZfSL Hamm.

Dr. ALEXANDER PUSCH lehrt und forscht am Institut für Didaktik der Physik an der Universität Münster. ■