

PHYSIK DES FLIEGENS

Entwicklung eines Unterrichtsvorschlages für ein „fast vergessenes“ Teilgebiet im Mechanikunterricht der Oberstufe

Monika Geyer, Anton Isola

BHAK Judenburg

Judenburg, 2003

INHALTSVERZEICHNIS

ABSTRACT

1.	Von der Idee zur praktischen Umsetzung.....	3
2.	Fragebogenerhebung	3
3.	Lehrstoffverteilung	5
4.	Inhalte und Methoden.....	5
5.	Papierflieger	11
6.	Anwendung von Winkelfunktionen.....	11
7.	Broschüre „Physik des Fliegens“	11
8.	Weltraumhalle & Sonderschau Otto Lilienthal im Haus der Natur in Salzburg.....	12
9.	Resümee	12

Abstract

Im Schuljahr 2002/03 bildete das Projekt „Physik des Fliegens“ den zentralen Kern des Oberstufen-Physikunterrichts der 3BK Klasse (3. Jahrgang, HAK Judenburg).

Ziel dieses Projekts war es, begleitend zum Unterricht ein **Vermittlungskonzept** für dieses sehr beliebte, aber im Lehrplan der Oberstufe kaum behandelte Thema zu erarbeiten, zu erproben und einem breiten Lehrerkreis zur Verfügung zu stellen. Inhaltlich wichtig dabei war mir neben der Festigung des Verständnisses von Luft als einem Medium, das aus leicht beweglichen Teilchen besteht, und in gewissem Maße kompressibel ist, vor allem der Begriff „Auftrieb“, insbesondere eine altersgerechte Vermittlung des aerodynamischen Auftriebs.

Zur Herausarbeitung des Unterschieds zwischen statischem und dynamischem Auftrieb waren die Schüler angehalten **Referate** zu halten. In Kleingruppen (drei bis fünf Personen) wurde Material über den Traum vom Fliegen, das Ballonfahren, den Bau von Zeppelin, die Raketentechnik und die Entwicklung von Flugzeugen aus dem Internet gesammelt, schriftlich zusammengefasst und in der Klasse vorgestellt. Historische Betrachtungen zur Entwicklung der Fliegerei fanden in den Arbeiten ebenso Eingang wie heutige Anwendungen im Bereich der zivilen Luftfahrt und Möglichkeiten der Verbesserung von Flugeigenschaften diverser Flugobjekte sowie deren Grenzen aus physikalischer Sicht.

Abgerundet wurde das Thema mit dem Besuch der **Sonderausstellung „Otto Lilienthal“** im Haus der Natur in Salzburg.

1. Von der Idee zur praktischen Umsetzung

Im Rahmen der Recherchen zu meiner Dissertation „Vermittlung von Mechanik an Schule und Hochschule am Beispiel der Hydro- und Aeromechanik“ war ich im Sommersemester 2002 auf die Initiative IMST² gestoßen und stellte sogleich einen Projektantrag.

Nachdem der Antrag zu Beginn des vergangenen Schuljahres positiv erlegt worden war, suchte ich nach einem interessierten Kollegen zur Zusammenarbeit. Und so bildete das Projekt „Physik des Fliegens“ im Schuljahr 2002/03 den zentralen Kern des Oberstufen-Physikunterrichts der 3BK Klasse (3. Jahrgang, HAK Judenburg). Begleitend dazu wurden im Mathematikunterricht zum Thema „Anwendungen der Winkelfunktionen“ einschlägige Beispiele gerechnet.

2. Fragebogenerhebung

Zur Erhebung der Grundstimmung und Vorbereitung auf das Thema wurde den SchülerInnen in der ersten Unterrichtseinheit umseitiger Fragebogen zur Beantwortung vorgelegt¹.

¹ Die vollständige Auswertung erfolgte mit Hilfe von SPSS und wird von den Autoren auf Anfrage gerne zur Verfügung gestellt.

Von den 6 männlichen und 23 weiblichen Probanden bekundeten 76 % ein großes bis sehr großes Interesse am Thema „Fliegen“. Ihr Wissen beziehen die befragten SchülerInnen gemäß Befragung hauptsächlich (knapp 59 %) aus der Schule bzw. aus dem Bereich Fernsehen, Filme, etc. Einen Papierflieger hatten alle bis auf eine Schülerin bereits gefaltet, rund 10 % hatten auch bereits einen Modellflieger gebastelt.

Die Frage nach dem Vorwissen einerseits und die Frage nach den Interessenschwerpunkten andererseits diente dazu, den weiteren Unterricht entsprechend dieser Kriterien vorzubereiten.

In Sachen Vorwissen zeigte sich, dass fast $\frac{1}{3}$ der SchülerInnen Fliegen aus Erfahrung kennen, u.z. von Flugreisen bzw. aus dem Urlaub. Nichtsdestotrotz hat nur ein einziger Schüler angegeben zu wissen, dass Flugzeuge aufgrund ihrer Antriebskraft fliegen. Zwei SchülerInnen hielten fest, dass ein Luftballon durch Gas aufsteigt und fünf SchülerInnen notierten, dass ein Drachen Wind zum Fliegen braucht.

Besonders interessiert zeigte sich die Klasse an technischen Details eines Flugzeuges wie Anzahl der Passagiere oder Aufbau und Funktionsweise (je 13 Nennungen), an physikalischen Grundlagen des Fliegens wie Auftrieb oder Aerodynamik (je 9 Nennungen), an der Geschichte der Luftfahrt (3 Nennungen) und am Pilotenschein (2 Nennungen).

3. Lehrstoffverteilung (5 Wochen á 2 Stunden)

- Luft als Medium, das aus beweglichen Teilchen besteht und in gewissem Maße kompressibel ist
- Aerostatischer Auftrieb: Archimedisches Prinzip
- Papierflieger-Bewerb
- Referate zum Thema: Der Traum vom Fliegen
 - Ballonfahren
 - Zeppeline
 - Raketen
 - Flugzeuge
- Aerodynamischer Auftrieb: Rückstoßprinzip, Bernoulli-Gleichung, Zirkulationstheorie
- Exkursion zur Sonderschau „Otto Lilienthal“ im Haus der Natur, Salzburg

4. Inhalte und Methoden

Neben der Festigung des Verständnisses von Luft als einem Medium, das aus leicht beweglichen Teilchen besteht, und in gewissem Maße kompressibel ist, geht es bei der „Physik des Fliegens“ vor allem um den Begriff „Auftrieb“ und hier besonders um eine altersgerechte Vermittlung des aerodynamischen Auftriebs. Diese Basisbildung sollte der Lehrer den SchülerInnen entsprechend nahe bringen.

Zur Erarbeitung der grundlegenden **Eigenschaften von Luft** hat sich folgende Vorgehensweise bewährt: Zunächst fand ein Brainstorming mit Fixierung der Gedanken der SchülerInnen an der Tafel statt. Dann wurde gemeinsam an einem Modell zur Beschreibung der Luft gefeilt, wobei der Lehrer die Rolle eines Moderators übernehmen sollte, der hilft, mögliche Irrwege durch kritische Fragen zu entlarven.

Ähnlich wurde mit dem Begriff „**Auftrieb**“ verfahren, zu dem die SchülerInnen ebenfalls genügend Vorwissen haben, um diesen für das Thema zentralen Begriff weitgehend selbständig zu umreißen.

Die **Unterscheidung von statischem und dynamischem Auftrieb** war dann ein nächster Schritt. Dazu durften die SchülerInnen in Kleingruppen (drei bis fünf Personen) Material über das Ballonfahren, den Bau von Zeppelinen, die Raketentechnik und die Entwicklung von Flugzeugen aus dem Internet sammeln, schriftlich ausarbei-

ten und die Ergebnisse vortragen. In einer nachfolgenden Diskussionsrunde wurde der Unterschied zwischen statischem und dynamischem Auftrieb gemeinsam erarbeitet.

Neben einer historischen Betrachtung der Fliegerei, ausgehend vom Wunsch der Menschen fliegen zu können wurden in den Referaten auch heutige Anwendungen im Bereich der zivilen Luftfahrt und Möglichkeiten der Verbesserung von Flugeigenschaften diverser Flugobjekte sowie deren Grenzen aus physikalischer Sicht ange-rissen.

Zur **Erklärung des aerodynamischen Auftriebs** erhielten die SchülerInnen verschiedene Erklärungsmuster als Leseproben². Jeder Schüler musste die Texte selbstständig durchlesen und dann mindestens eine Frage dazu schriftlich formulieren und dem Lehrer abgeben. Anschließend wurden die unterschiedlichen Erklärungen im Plenum diskutiert.

² Quellenangabe:
Geyer, Monika: Konzept zur Dissertation „Vermittlung von Mechanik an Schule und Hochschule“ (2002)

Leseprobe 1:

Beschreibung nach Otto Lilienthal

Über die Strömungsverhältnisse an verschiedenen Tragflächenprofilen schreibt Lilienthal [zitiert in: MNU 40/5, Seite 271] 1889 einfach und klar:

„ Die an den Flächen [eines ebenen Tragflächenprofils] vorbeistreichende Luft erhält in beiden Fällen eine nach unten gerichtete Beschleunigung, denn die unter die Fläche treffende Luft muss unter den Flächen hindurch, und die über die Flächen vorbeistreichende Luft muss unbedingt den geneigten Raum oberhalb der Flächen ausfüllen.

Die Ablenkung des Luftstromes nach unten geschieht bei der ebenen Fläche zumeist an der Vorderkante, und zwar plötzlich. Hier tritt eine Stoßwirkung auf, welche wiederum zur Bildung von Wirbeln Veranlassung gibt.

Ganz andere Erscheinungen treten nun aber bei der gewölbten Fläche auf. Der auf diese Fläche treffende Luftstrom wird ganz allmählich aus seiner horizontalen Richtung abgelenkt und nach unten geführt. Derselbe erhält nach und nach und zwar möglichst ohne Stoß, eine nach unten gerichtete Geschwindigkeit.

Man sieht ohne weiteres, dass nur die schwach und glatt gewölbte Fläche, besonders wenn die Tangente zur Vorderkante genau in die Windrichtung steht, die an ihr vorbeistreichende Luft möglichst ohne Wirbel mit einer Geschwindigkeit nach unten entlassen wird, und zwar in einer Richtung, welche gewissermaßen der nach unten gerichteten Tangente des letzten Flächenstückes entspricht. Schon diese Tangentenrichtung tritt für die Vorteile der gewölbten Fläche ein.

Der nach unten gerichtete Bestandteil der lebendigen Kraft [heute sagen wir dazu Impuls] nach Verlassen der Fläche ist maßgebend für den nach oben gerichteten auf die Fläche ausgeübten Druck.“

Leseprobe 2:

Erklärungsansatz mit Hilfe des Rückstoßprinzips

Dadurch dass sich der Tragflügel durch die Luft bewegt, treffen Luftteilchen auf die Oberfläche auf und prallen dort ab. Die Teilchen werden beim Aufprall auf der Unterseite des Tragflügels reflektiert und als Summe aller Gegenkräfte ergibt sich eine nach oben gerichtete Kraft, der aerodynamische Auftrieb.

Leseprobe 2:

Erklärungsansatz mit Hilfe des Rückstoßprinzips

Dadurch dass sich der Tragflügel durch die Luft bewegt, treffen Luftteilchen auf die Oberfläche auf und prallen dort ab. Die Teilchen werden beim Aufprall auf der Unterseite des Tragflügels reflektiert und als

Leseprobe 3:

Erklärungsansatz mit Hilfe der Bernoulli-Gleichung



Anhand von Stromlinienbildern aus Wasserströmungen oder Strömungskammern (Windkanal) sieht man, dass die Stromlinien eines von vorn umströmten Tragflächenprofils an der Oberseite zusammengedrängt sind, während sie an der Unterseite auseinandergezogen sind.

Nach dem Gesetz von Bernoulli strömt eine Flüssigkeit bzw. ein Gas dort schneller, wo niedrigerer Druck herrscht. Nun kann man zeigen, dass an der Tragflächenoberseite eine der Tragflächenunterseite eine niedrigere Strömungsgeschwindigkeit vorliegt und daraus folgern, dass an der Oberseite ein Unterdruck und an der Unterseite ein Überdruck auftreten muss. Insgesamt resultiert daraus eine nach oben gerichtete Kraft, der aerodynamische Auftrieb.

Leseprobe 4:

Erklärungsansatz mit Hilfe der Zirkulation

An der Oberfläche eines Tragflügels, der von Luft umströmt wird, bildet sich eine sog. Grenzschicht aus. Das Geschwindigkeitsgefälle zwischen Luftströmung und Tragflächenprofil verursacht Reibungskräfte, was wir als Strömungswiderstand kennen gelernt haben.

Zwar weist ein Tragflächenprofil aufgrund seiner langgezogenen Tropfenform einen sehr kleinen Anströmwiderstand auf, doch wird aufgrund seiner Wölbung und der scharfen Hinterkante der „links herum“ laufende Wirbel des Wirbelpaares erheblich behindert und schließlich zum Abreißen gezwungen, während der „rechts herum“ laufende Wirbel hängen bleibt und von der Potentialströmung überlagert wird.

Auf diese Weise strömt die Luft an der Tragflächenoberseite schneller als an der Unterseite und der Tragflügel erfährt nach dem Bernoulli-Gesetz eine nach oben gerichtete Kraft, den aerodynamischen Auftrieb.

Leseprobe 5:

Erklärungsansatz nach Ludwig Prandtl

Prandtl entwickelte 1904 die sog. Grenzschichttheorie und zeigte dann in den 30er Jahren [zitiert in NiU 3 (1978), Seite 68], dass der Auftrieb am Schaufelgitter (i.e. eine tragflügelartige Fläche) *direkt aus einer Impulsbetrachtung der strömenden Luft hergeleitet werden kann.*

Nach Prandtl stammt der Auftrieb aus der Druckverteilung an der Grenze zwischen Außenströmung ohne Zähigkeit und Grenzschicht mit Zähigkeit. *Das relativ zum Profil bewegte Fluid wird nicht nur verdrängt, sondern durch die Zähigkeit des Fluids haften die Partikel direkt an der Oberfläche und reißen im Nahbereich die entgegengerichteten Partikel mit, sodass diese dem Profil nachlaufen...* [zitiert in: Physikalische Blätter 6 (2001), Seite 56].



Das Tragflächenprofil kann nach diesem Modell als eine stromlinienförmig verkleidete gebogene Umlenkfläche angesehen werden. Demgemäß lenkt das Tragflächenprofil aufgrund seiner Form die horizontal anströmende Luft nach unten um, was zu einer Änderung der Geschwindigkeit, also einer Beschleunigung und damit zu einer Änderung des Impulses der vorbeiströmenden Luft führt. Damit eine solche Umlenkung der Luftströmung erfolgt, muss der Tragflügel eine nach unten gerichtete Kraft auf die Luftströmung ausüben. Nach dem Impulserhaltungssatz erfährt der Tragflügel folglich eine entsprechende Kraft in die entgegengesetzte Richtung, also nach oben.

Damit ist die Entstehung des Auftriebs auf den Impulssatz bzw. das Rückstoßprinzip zurückgeführt.

Leseprobe 6:

Erklärungsansatz nach Klaus Weltner

Die Tragflächenumströmung ist von der Geometrie des Tragflächenprofils abhängig, denn der Tragflügel stellt für die Luftströmung ein Hindernis dar, das „umlaufen“ werden muss. Betrachtet man einen „Luftwürfel“ und verfolgt seinen Weg entlang einer gekrümmten Stromlinie an der Oberseite des Tragflügels, so muss man feststellen: Das Luftvolumen möchte sich infolge seiner Trägheit geradlinig weiterbewegen. Damit würde es sich aber vom Tragflächenprofil entfernen ... und so entsteht zwischen Tragflügel und der umströmenden Luft ein Unterdruck. Es ergeben sich also Druckdifferenzen senkrecht zu den Stromlinien. Dies bewirkt nun, dass Radialkräfte auftreten, die das Luftvolumen nach unten. Analog kann man einen „Luftwürfel“ an der Unterseite des Tragflügels auf seiner Bahn entlang des Tragflächenprofils verfolgen und dort - je nach Form des Profils - sowohl Gebiete mit Unterdruck als auch solche mit Überdruck finden.

Gleichzeitig treten aber auch Druckdifferenzen in Richtung der Stromlinienbahnen auf. Das bewirkt etwa an der Tragflächenoberseite eine Beschleunigung der

Teilchen in Bahnrichtung, wie es durch das Gesetz von Bernoulli beschrieben wird. Somit ist der vorhandene Unterdruck die Ursache für eine höhere Strömungsgeschwindigkeit.

Der Auftrieb kommt somit einerseits dadurch zustande, dass infolge von Trägheitskräften Druckunterschiede senkrecht zur Strömungsrichtung entstehen, und zwar genau dann, wenn an der Oberseite höhere Druckdifferenzen auftreten als an der Unterseite.

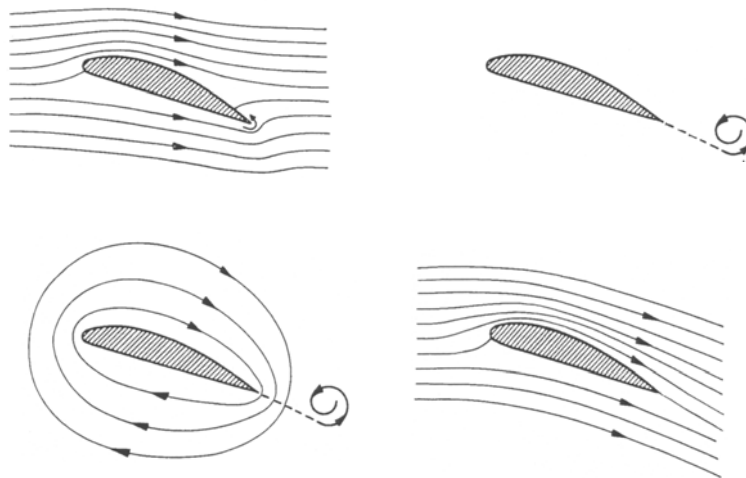
Andererseits verursacht der Impuls aufgrund der Beschleunigung der Teilchen in Bahnrichtung als Gegenkraft eine Aufwärtsbewegung des Tragflügels, die je nach Anstellwinkel einen mehr oder weniger großen Beitrag zum Auftrieb liefert.

Leseprobe 7:

Erklärungsansatz nach Rita Wodzinski und Alfred Ziegler

Eine Analyse von Stromlinienbildern ergibt eine Verengung der Stromlinien an der Oberseite, eine Erweiterung der Stromlinien an der Unterseite und Glattes Abströmen an der Hinterkante eines Tragflächenprofils. Unter Einbeziehung der Bernoulli-Gleichung muss an der Oberseite des Tragflächenprofils ein Unterdruck und an der Unterseite ein Überdruck herrschen; diese Druckdifferenz ergibt den aerodynamischen Auftrieb.

Warum die Luft an der Oberseite schneller strömt als an der Unterseite, kann man mit Hilfe der Zirkulationsströmung wie folgt begründen:



Vergleicht man das Stromlinienbild einer langsamen Umströmung mit dem der „normalen“ Umströmung, so fällt das unterschiedliche Strömungsmuster am hinteren Ende des umströmten Profils auf. Bei wachsender Geschwindigkeit deutet der Verlauf der Stromlinien auf eine Zirkulationsströmung hin. Da Wirbel immer paarweise auftreten, muss zu diesem Anfahrwirbel ein Gegenwirbel existieren, und genau das ist der Grund für die höhere Geschwindigkeit an der Tragflächenoberseite: Der aerodynamische Auftrieb entsteht nun dadurch, dass sich an der scharfen Hinterkante des Tragflügels ein Wirbel bildet und ein entsprechende Gegenwirbel um die Tragfläche zirkuliert, der sich der Umströmung überlagert, also die Strömung an der Oberseite beschleunigt und an der Unterseite abbrems.

5. Papierflieger



Nach einer theoretischen Einführung mit Modellvorschlägen aus dem Internet³ entwarfen die SchülerInnen ihre eigenen Papierflieger-Varianten. Das Falten der Modelle in der Klasse und der daran anschließende Test der Theorie in der Praxis – in der großen Aula unserer Schule - fand großen Anklang.

6. Anwendung von Winkelfunktionen

Motiviert durch den laufenden Projektunterricht suchte ich gemeinsam mit den SchülerInnen im Unterrichtsgegenstand „Mathematik und angewandte Mathematik“ im Lehrbuch: Kronfeller/Peschek „angewandte mathematik 2“ nach Beispielen aus dem Bereich des Fliegens, die von den SchülerInnen nach Studium des nebenstehenden Musterbeispiels 3223 mit Begeisterung in Partnerarbeit gelöst wurden.

3223 Ein Flugzeug fliegt vom Ort A in Richtung S $42,0^\circ$ O. Der Ort B befindet sich in 850 km Entfernung von A in Richtung S $31,0^\circ$ O. Nach wie viel km Flug hat das Flugzeug den kürzesten Abstand vom Ort B?

Lösung: Die Bedeutung der Himmelsrichtung S $42,0^\circ$ O (Süd $42,0^\circ$ Ost) ist aus Fig. 3.19 ersichtlich. Wir bezeichnen die beiden gegebenen Winkel mit α und β (siehe Fig. 3.20), also $\alpha = 42^\circ$, $\beta = 31^\circ$.

Wir setzen: $\overline{AB} = c = 850$ und $\overline{AF} = x$

$$\alpha - \beta = 42^\circ - 31^\circ = 11^\circ$$

$$\cos(\alpha - \beta) = \frac{x}{c}$$

$$x = c \cdot \cos(\alpha - \beta) = 850 \cdot \cos 11^\circ \approx 834$$

Nach etwa 834 km Flug hat das Flugzeug den kürzesten Abstand von B.

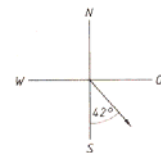


Fig. 3.19

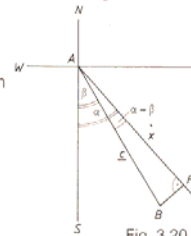


Fig. 3.20

7. Broschüre „Physik des Fliegens“

Die sorgfältig ausgearbeiteten schriftlichen Unterlagen zu den Referate wurden korrigiert, beurteilt und verbessert, nach Themen geordnet und in Form einer Broschüre⁴ für die Nachwelt erhalten.

³ Quelle: <http://brain.exp.univie.ac.at/ypapierflieger/pappapierflieger.html>

⁴ Die Broschüre liegt in der Schule auf und kann über die Autoren bezogen werden.

8. Weltraumhalle & Sonderschau Otto Lilienthal im Haus der Natur in Salzburg

Zum krönenden Abschluss des Projekts „Physik des Fliegens“ besuchten wir im Rahmen einer mehrtägigen Salzburgexkursion in der Woche nach Ostern die Sonderschau „Der Menschheitstraum vom Fliegen – Die Flugpioniere Otto Lilienthal und Igo Etrich“ im Haus der Natur.

Im Anschluss an die einstündige Führung durch die faszinierende Sonderschau und die beeindruckend gestaltete Weltraumhalle erhielten die SchülerInnen zwei Arbeitsblätter⁵ zum Thema ausgehändigt, die an Ort und Stelle in Gruppenarbeit (je 3 – 4 Personen) auszufüllen und in der Schule dann zu verbessern und nachzubesprechen waren.

9. Resümee

Das Schulprojekt „Physik des Fliegens“ wurde von Lehrenden und Lernenden gleichermaßen positiv aufgenommen.

Bei der Vermittlung eines doch eher anspruchsvollen Themas hat sich diese Art des Projektunterrichts hervorragend bewährt. Die SchülerInnen sind mit Freude und Eifer bei der Sache gewesen und haben begeistert neues Wissen aufgenommen.

Wir können diese Unterrichtsform nur weiterempfehlen!

⁵ Quelle: <http://www.hausdernatur.de>