

Stromlinien, Auftrieb und Luftwiderstand



Experimente mit einem Windkanal aus dem 3D-Drucker

MOHAMAD KARAKI – ALEXANDER PUSCH

In diesem Artikel wird ein modularer und kostengünstiger Windkanal vorgestellt, der mithilfe eines 3D-Druckers gefertigt werden kann. Er dient zur Veranschaulichung grundlegender Konzepte der Strömungslehre und ermöglicht Experimente zur Erzeugung und Untersuchung von Stromlinien sowie zur Messung von Auftriebs- und Luftwiderstandskräften.

1 Strömungslehre in Experimenten

Die Strömungslehre ist ein wichtiger Teil der alltäglichen Physik. Das Vermitteln aerodynamischer Konzepte im Unterricht stellt jedoch eine besondere Herausforderung dar. Luftströmungen sind in der Regel unsichtbar und somit schwer zugänglich, was dazu führen kann, dass Schüler/innen auf intuitive, aber physikalisch ungenaue Annahmen zurückgreifen. Die Strömungslehre, trotz ihrer Allgegenwärtigkeit, bleibt somit oft abstrakt. Kommerzielle Windkanalmodelle sind allerdings sehr teuer, auf wenige Funktionen beschränkt oder lediglich digital verfügbar (s. z.B. die App „WindTunnel“ (ALGORIZK, 2018)). In diesem Artikel wird daher ein modularer Low-Cost Windkanal aus dem 3D-Drucker vorgestellt. 3D-Druck ermöglicht es hier, einen erprobten Versuchsaufbau allen Lehrkräften zur freien Nutzung und Bearbeitung zur Verfügung zu stellen und somit einen Beitrag zur Chancengleichheit in der Bildung leisten. Das vorgestellte Modell ist dabei aber nicht nur eine preiswerte Alternative. Durch erweiterte Experimentier- und Darstellungsmöglichkeiten sowie die Möglichkeit des Aufgreifens von Schülervorstellungen schafft es auch einen echten didaktischen Mehrwert.

Im Folgenden werden zunächst die Rolle von Windkanälen in technischen Anwendungen vorgestellt und die theoretischen Grundlagen anhand des Modells der Stromlinien erläutert. Anschließend wird der 3D-gedruckte Windkanal beschrieben, bevor mögliche Experimente und deren Ergebnisse thematisiert werden.

2 Windkanäle in der technischen Anwendung

Windkanäle werden z.B. in der Luftfahrt- und Automobilindustrie verwendet, um aerodynamische Eigenschaften von Objekten unter kontrollierten Bedingungen untersuchen zu können. Dabei wird Luft um ein Objekt geleitet, sodass Strömungsverläufe visualisiert und relevante Kräfte gemessen werden können. Zentrale Größen sind hier in der Regel die Auftriebskraft F_A und die Luftwiderstandskraft F_W .

Die Technik entwickelt sich bereits seit dem 18. Jahrhundert. Pioniere wie OTTO LILIENTHAL und die Gebrüder WRIGHT nutzten einfache Windkanäle, um ihre Flugmaschinen zu optimieren. Später entwickelten GUSTAVE EIFFEL und LUDWIG PRANDTL ausge-

feiltere Versionen des Windkanals, wie sie so ähnlich bis heute z.B. von Forschungseinrichtungen und Automobilherstellern verwendet werden. Die Abbildung 1 zeigt den grundlegenden Aufbau eines Windkanals:

- **Gleichrichter:** Der Gleichrichter besteht aus engen, wabenförmig angeordneten Rohren, manchmal auch in Kombination mit Sieben. Er dient dazu, die vom Antrieb angesaugte Luft zu „glätten“ und Turbulenzen zu reduzieren, sodass eine gleichmäßige Strömung entsteht.
- **Düse:** Die Düse (auch Konfuser genannt) verkleinert den Querschnitt des Strömungsrohres, was zur Kontraktion der Strömung führt. Diese Querschnittsverengung erhöht die Strömungsgeschwindigkeit (was durch die Kontinuitätsgleichung quantifiziert werden kann).
- **Testkammer:** In der Testkammer wird das Testobjekt platziert. Hier finden die Messungen statt.
- **Diffusor:** Der Diffusor vergrößert den Querschnitt des Strömungsrohres nach der Testkammer, was zur Diffusion der Strömung führt. Dies reduziert die Geschwindigkeit der Luft wieder und trägt zur Stabilisierung der Strömung bei.
- **Antrieb:** Der Antrieb besteht aus einem Rotor, der die Luft beschleunigt. Der Antrieb ist ansaugend gestaltet, damit die Verwirbelungen des Rotors in die Umgebungsluft ausgestoßen und somit unerwünschte Turbulenzen vermieden werden.

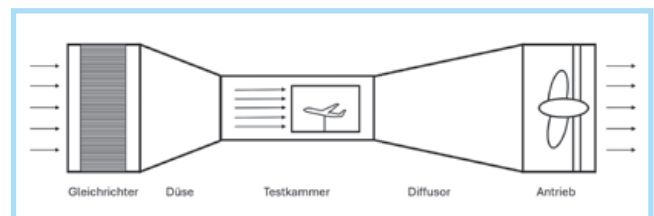


Abb. 1. Schematische Darstellung der Bestandteile eines Windkanals

3 Theoretische Grundlagen im Modell der Stromlinien

Um die Funktionsweise und Gestaltung des Modells nachvollziehen zu können, werden im Folgenden die theoretischen Grund-

lagen und mögliche Fehlvorstellungen zur Strömungslehre bei den Lernenden beschrieben. Da der Windkanal mit Einsätzen arbeitet, an denen verschiedene aerodynamische Effekte besprochen werden können, werden unter anderem der aerodynamische Auftrieb und der Magnus-Effekt thematisiert.

3.1 Aerodynamischer Auftrieb

Eine Erklärung zum aerodynamischen Auftrieb kann im Modell gekrümmter Stromlinien erfolgen. Stromlinien sind ein geometrisches Hilfsmittel, um die Bewegung von Fluidteilchen zu beschreiben. Wenn ein fester Körper mit einem Fluid angeströmt wird, dann kann das Fluid in der Regel den Körper nicht durchqueren, sondern muss um ihn herum strömen. Da das Fluid aber nicht ausschließlich an der Vorderkante des Körpers abgelenkt wird und die Stromlinien auch nicht geradlinig vom Körper wegführen (das Fluid umschmiegt den Körper), ergeben sich gekrümmte Stromlinien. Die Abbildung 2 zeigt ganz allgemein ein Beispiel für eine gekrümmte Stromlinie. Zur Veranschaulichung kann im Bereich des grauen Punktes ein umströmter Körper angenommen werden. Zu erkennen ist eine auf das Zentrum der Bewegung zeigende Zentripetalkraft \vec{F}_z . Um diese Kraft zu bewirken, ist eine Druckdifferenz senkrecht zur Stromlinie erforderlich, die durch den Druckgradienten $grad\ p$ beschrieben wird: $\vec{F}_z = - grad\ p\ dV$. Entsprechend der oben beschriebenen Gleichung zeigt der Druckgradient vom Zentrum der Bewegung nach außen. Eine Krümmung nach innen geht mit einer Druckzunahme nach außen einher und umgekehrt.

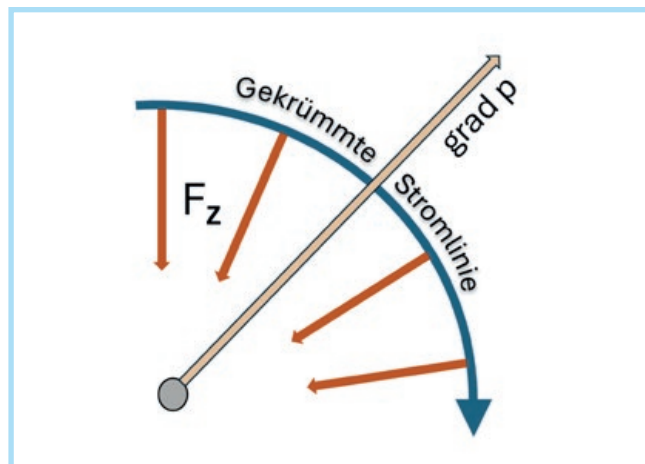


Abb. 2. Zentripetalkraft an einer gekrümmten Stromlinie (eigene Darstellung in Anlehnung an MATZDORF (2022))

Die Abbildung 3 verdeutlicht die Zusammenhänge von Stromlinien und Druckgradienten am Beispiel eines umströmten Zylinders. Bei der Anströmung von links krümmen sich die Stromlinien nach außen, was zu einem Druckanstieg an der Vorderseite führt. Ober- und unterhalb des Zylinders entstehen durch die nach innen gerichteten Kräfte Unterdruckgebiete. Auf der Rückseite krümmen sich die Stromlinien wieder weg vom Körper, was ein Hochdruckgebiet erzeugt.

Mithilfe dieses Ansatzes lässt sich schließlich auch der Auftrieb am Flugzeug erklären (Abb. 4). Vorne am Flügel bildet sich ein Hochdruckgebiet, das den Luftwiderstand erhöht, während

oberhalb des Flügels ein Unterdruckgebiet den Auftrieb erzeugt. Gewölbte Flügelprofile erzeugen auch bei geringem Anstellwinkel Auftrieb, weshalb sie in der Luftfahrt bevorzugt werden. Weitere Erklärungen finden sich bei BREIMANN und PUSCH (2024).

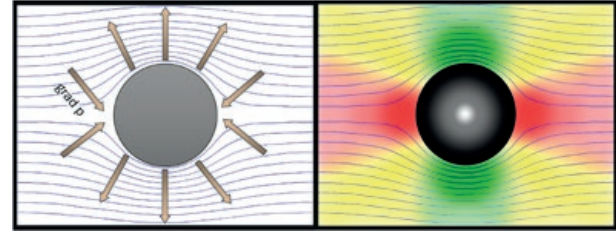


Abb. 3. Links: Potentialströmung um einen Zylinder mit Druckgradienten. Rechts: Potentialströmung um einen Zylinder mit eingefärbten Druckunterschieden. Grün signalisiert niedrigeren, Rot höheren Druck (BREIMANN, 2023, eigene Bearbeitung).

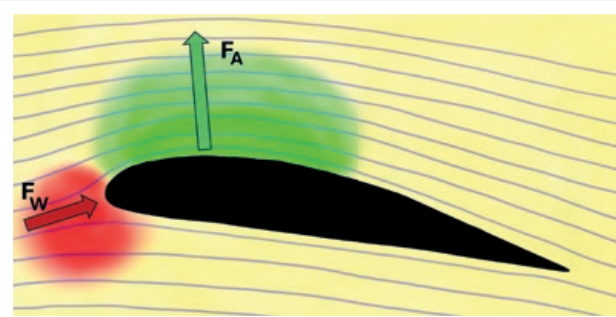


Abb. 4. Ein Tragflügel im Stromlinienmodell. Aus den Druckunterschieden (rote und grüne Einfärbungen) resultieren Widerstands- und Auftriebskräfte (BREIMANN, 2023, eigene Bearbeitung).

3.2 Magnus-Effekt

Analog zur Auftriebskraft kann im Modell der Stromlinien die Magnus-Kraft erklärt werden. Diese Kraft ist beispielsweise dafür verantwortlich, dass ein rotierender Fußball in einer Kurve fliegt. Sie entsteht – wie die Auftriebskraft – durch eine Druckdifferenz zwischen den beiden Seiten des rotierenden Objektes. Auf der Seite, die sich in die gleiche Richtung wie die Strömung bewegt, wird die Luft beschleunigt, was zu einem niedrigeren Druck führt. Auf der anderen Seite, wo sich der Körper entgegen der Strömung bewegt, wird die Luft abgebremst und es entsteht ein höherer Druck. Aus den Druckunterschieden ergibt sich dann eine resultierende Kraft.

3.3 Strömungsarten

Entscheidend für die Kraftwirkung ist auch die Art der Strömung. Nach OSBORNE REYNOLDS (1883) wird grundsätzlich zwischen laminarer und turbulenter Strömung unterschieden:

- **Laminare Strömung:** Bei einer laminaren Strömung verlaufen die Stromlinien nebeneinander, ohne sich zu durchmischen. Die Reibungskräfte innerhalb des Fluids (d.h. viskose Kräfte) sorgen für getrennte Stromlinien. Das Strömungsbild ist gleichmäßig und klar geschichtet.

- **Turbulente Strömung:** Bei einer turbulenten Strömung bilden sich Wirbel, welche zu einer Durchmischung der Stromlinien führen. Hier sind die beschleunigenden Kräfte größer als die viskosen Kräfte. Das Resultat ist eine Strömung, die durch starke Fluktuationen in Geschwindigkeit und Druck gekennzeichnet ist.

Der entscheidende Parameter für den Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung ist die Reynolds-Zahl. Sie ist ein essenzieller Faktor der Ähnlichkeitstheorie, die es erlaubt, physikalische Systeme unterschiedlicher Größenordnungen zu vergleichen: Dimensionslose Zahlen wie die Reynolds-Zahl oder die Mach-Zahl ermöglichen es, Experimente im Windkanal mit geometrisch ähnlichen, verkleinerten Modellen durchzuführen und die Ergebnisse auf reale Objekte in Originalgröße zu übertragen. Stimmt die Reynolds-Zahl von Original und Modell überein, so erhält man ein ähnliches Strömungsbild und kann beispielsweise Strömungsablösungen untersuchen.

3.4 Ablösung und Wirbelbildung

Im Gegensatz zur idealisierten, reibungsfreien Strömung (Viskosität und Reibungskräfte = 0, wie in den Abb. 3 und 4) bildet sich in der Realität eine Grenzschicht um umströmte Körper, in der die Fluidpartikel Reibung am Körper erfahren. Dies verursacht einen Verlust kinetischer Energie seitens der Partikel, wodurch sie nicht mehr das Hochdruckgebiet hinter dem Körper überwinden können. Als Folge löst sich die Grenzschicht vom Körper ab und es entsteht eine sogenannte Wirbelschlepe (oder auch Totraum). Hier herrschen turbulente Verwirbelungen, die den Luftwiderstand des umströmten Körpers erhöhen.

Bei ausreichender kinetischer Energie kann die Grenzschicht wieder am Körper anliegen. Ist dies aber nicht der Fall, droht ein Strömungsabriss, der insbesondere in der Luftfahrt gefährlich ist. Ein weiteres Praxisbeispiel sind Einbuchtungen eines Golfballes. Turbulente Grenzschichten lösen sich hier durch einen erhöhten Impulsaustausch der Fluidpartikel in der Grenzschicht später ab und reduzieren den Luftwiderstand.

3.5 Missverständnisse und Schülervorstellungen

Ein gängiges Missverständnis in der Vermittlung der Strömungsmechanik ist die Erklärung des Auftriebs anhand des Bernoulli-Prinzips, welches den Weglängenunterschied der Luftströmung oberhalb und unterhalb eines Körpers betont, obwohl dieser Unterschied nicht ursächlich für den Auftrieb ist. Missverständnisse wie diese können dann zu falschen Schlussfolgerungen führen, etwa der Annahme, dass die Flügelform wichtiger ist als der Anstellwinkel. In BREIMANN und PUSCH (2024) werden verschiedene falsche Erklärungsansätze zum Fliegen erläutert, sowie eine Erklärung mit Hilfe des auch hier verwendeten Stromlinienmodells vorgestellt.

GENZ et al. (2023) identifizierten verbreitete Schülervorstellungen zur Strömungslehre, z.B. die Vorstellung, dass Luft über und unter dem Flügel am Ende des Flügels wieder zusammengeführt wird oder die Vorstellung, dass eine spitze Frontseite die aerodynamisch sinnvollste Lösung sei. Sie stellten fest, dass manche Schüler/innen eine Kugel als aerodynamisch optimale

Form betrachten und die Bedeutung der Rückseite eines Körpers für den Luftwiderstand unterschätzen. Zusätzlich glauben einige Schüler/innen, dass der aerodynamische Auftrieb stets nach oben zeige. Diese Missverständnisse können durch gezielte kognitive Konflikte und den Einsatz von Windkanalmodellen adressiert werden.

4 Windkanal aus dem 3D-Drucker

Der hier vorgestellte Windkanal ermöglicht drei verschiedene Experimente: Visualisierung von Strömungslinien, Messung der Auftriebskraft und Messung der Luftwiderstandskraft.

Unter <https://physikkommunizieren.de/3d-druck/windkanal/> stehen die 3D-Druck Dateien, die Konstruktionsdatei für das Programm Autodesk Fusion360 (Autodesk, 2024), falls Änderungen oder Erweiterungen vorgenommen werden sollen, sowie Materiallisten mit Bezugsquellen zur freien Verfügung. Der Aufbau der Module des Windkanals (Abb. 5) entspricht grundsätzlich dem in Abbildung 1 gezeigten, prinzipiellen Aufbau eines Windkanals. Zum Ansaugen der Luft wird ein Lüfter für Computergehäuse verwendet. Durch den Einsatz einer Hirth-Verzahnung (vgl. zwei ineinandergreifende „Kronen“) können die eingesteckten Testobjekte während der Umströmung im Winkel sehr einfach variiert und wieder fixiert werden. Die Module des Windkanals können durch den Einsatz von Kugelmagneten und ferromagnetischen Schrauben leicht und zuverlässig zusammengesetzt werden (Abb. 6).

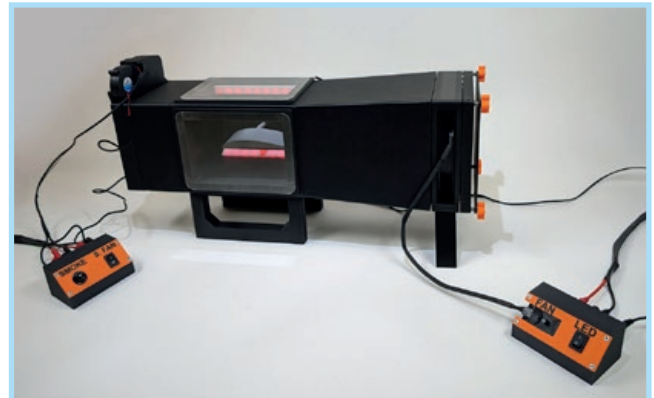


Abb. 5. Windkanal aus dem 3D-Drucker samt Steuergerät für den Rauch (links) sowie für den Lüfter und die Beleuchtung (rechts)



Abb. 6. Die Module (hier: Testkammer und Diffusor) werden mithilfe eines magnetischen Stecksystems verbunden

Visualisierung der Strömungslinien:

Um die Strömungen sichtbar zu machen, wird Glycerin in einer Raucheinheit verdampft. Die Raucheinheit besteht aus einem Radiallüfter, einem 3D-gedruckten Verbindungsstück, sowie dem Mundstück eines elektronischen Verdampfers (für E-Zigaretten). Die Raucheinheit kann flexibel vor dem Windkanal platziert werden, um dreidimensionale Wirbelfelder sichtbar zu machen (Abb. 7). Für eine übersichtliche, zweidimensionale Visualisierung wird die Raucheinheit in ein Einspeiser-Modul gesteckt, das den Rauch in vertikal angeordnete Ausgänge leitet. Darüber hinaus wird die Testkammer des Windkanals zur besseren Visualisierung der Strömungen und zur Fokussierung der Aufmerksamkeit durch LEDs beleuchtet.



Abb. 7. Die Raucheinheit ist vor dem Gleichrichter platziert

Messung der Auftriebskraft:

Zur Messung der Auftriebskraft wird eine kleine Waage in der Testkammer platziert, sodass anhand der Veränderung der angezeigten Masse des Testkörpers der Auftrieb berechnet werden kann (Abb. 8).



Abb. 8. Bestimmung der Auftriebskraft an einem Flügelprofil

Messung der Luftwiderstandskraft:

Zur Messung der Luftwiderstandskraft wurde ein Modul mit einer Laufkatze konstruiert, an das ein Kraftmesser eingehängt werden kann (Abb. 9). Es wurden diverse Einsätze konstruiert, wie z.B. hohle Halbkugeln, Vollkugeln, Golfbälle und Stromlinienkörper, um diese quantitativ vergleichen zu können. Es können somit im Experiment die o.g. Schülervorstellungen zur idealen aerodynamischen Form adressiert werden.



Abb. 9. Bestimmung der Luftwiderstandskraft an einem Flügelprofil

Weitere Möglichkeiten:

Durch den modularen Aufbau können leicht weitere Experimente hinzugefügt werden. Denkbar wäre zum Beispiel die Entwicklung einer Bernoulli-Rampe mit Prandtl-Rohr für den Windkanal, um daran die Bernoullische Gleichung überprüfen zu können. Durch die bewusst simpel konstruierten Aufhängungen können auch eigene Einsätze im Windkanal getestet werden. Ein Vergleich zwischen Rennwagen und LKW könnte beispielsweise die deutlich größere Wirbelschleppe hinter dem LKW veranschaulichen. Technologische Fortschritte in der Bedienbarkeit von Programmen zu einfachen 3D-Modellierungen, Picture-to-model Anbietern und Photogrammetrie ermöglichen in Verbindung mit dem Windkanalmodell prinzipiell die aerodynamische Analyse aller denkbaren Objekte.

5 Mögliche experimentelle Ergebnisse und Grenzen

Mit den im vorherigen Kapitel vorgestellten Aufbauten wurden die nachfolgenden experimentellen Ergebnisse gewonnen. Als Ergänzung sind auf <https://physikkommunizieren.de/3d-druck/windkanal/> Videoaufnahmen zu einigen Experimenten verfügbar. In Kasten 1 ist eine kurze Zusammenfassung zur Deutung von Stromlinien-Profilen dargestellt.

5.1 Visualisierung von Strömungslinien

Die Abbildung 10 zeigt die visualisierte Strömung unter verschiedenen Anstellwinkeln eines gewölbten Flügelprofils (Strömungsrichtung von links nach rechts). Die Ablenkung der Strömungslinien an der Front des gewölbten Flügelprofils ist deutlich erkennbar. Der Theorie folgend bildet sich ein Hochdruckgebiet. Passend dazu liegen die Strömungslinien oberhalb der in die Strömung gerichteten Seite des Flügels enger beieinander. Dies spricht für eine höhere Strömungsgeschwindigkeit und ein vorliegendes Niederdruckgebiet. Am hinteren Teil des gewölbten Flügelprofils lässt sich eine reibungsbedingte Ablösung der Grenzschicht beobachten.

Dort ist u.a. die Ablösung deutlicher sichtbar als in der Fotografie und es lässt sich eine Verzögerung beobachten. Es ist erkennbar, dass sich die Partikel in der Grenzschicht langsamer bewegen. Eine Erhöhung des Anstellwinkels führt theoretisch zu erhöhter Turbulenz in der oberen Grenzschicht (höhere Geschwindigkeit) und schließlich zu verstärkter Ablöseerscheinung.

Um die Abbildungen der Strömungsprofile bei den einzelnen Experimenten besser deuten zu können, werden nachfolgend die im Artikel beschriebenen Erkenntnisse vereinfacht zusammengefasst:

- Eine Krümmung der Stromlinien weg vom umströmten Körper signalisiert ein Hochdruckgebiet.
- Eine Krümmung der Stromlinien hin zum Körper signalisiert ein Unterdruckgebiet.
- In einem Unterdruckgebiet bewegt sich die Strömung mit höherer Geschwindigkeit (Bernoulli-Prinzip).
- Liegen die Strömungslinien enger beieinander, spricht dies für ein Unterdruckgebiet und eine höhere Strömungsgeschwindigkeit.
- Aus Druckdifferenzen um einen Körper resultieren Kräfte, die auf ihn wirken (z.B. die Auftriebskraft oder die Magnus-Kraft).
- Bedingt durch Reibung kann sich die Grenzschicht der Strömung am Körper ablösen. Diese Strömungsabrisse haben einen signifikanten Einfluss auf die aerodynamischen Kräfte am Körper (z.B. Verlust des Auftriebs).

Kasten 1. Kurze Zusammenfassung zur Deutung von Stromlinien-Profilen

nungen. Sowohl im Video als auch in dem Standbild lässt sich außerdem gut eine Rückströmung beobachten. Ebenso theoriekonform ist das an den divergenten Strömungslinien zu erkennende Hochdruckgebiet im Bereich der Anströmung.

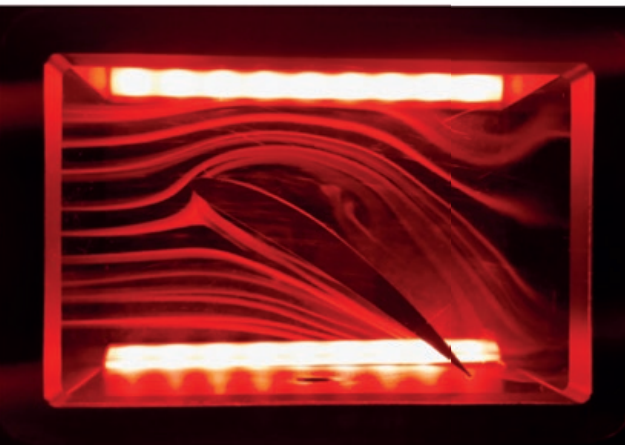
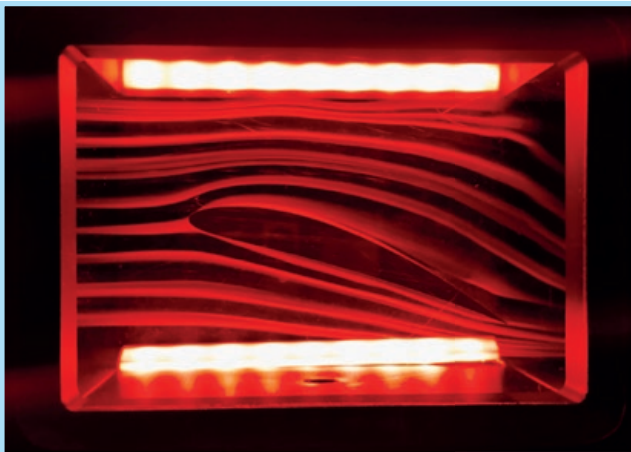


Abb. 10. Flügelprofil mit variablem Anstellwinkel im Windkanal

Die Abbildung 11 zeigt die Umströmung eines Zylinders. Hier kann der Ablösepunkt der Grenzschicht gezeigt werden. Ebenfalls klar erkennbar sind die Rückströmungen (mitsamt entsprechender Umkehrpunkte) und Wirbel hinter dem Zylinder. Rotiert man den Zylinder, lässt sich kurzzeitig der Magnus-Effekt sichtbar machen.



Abb. 11. Umströmter Zylinder im Windkanal

5.2 Messungen von Auftriebs- und Luftwiderstandskräften

Die Abbildung 12 zeigt die Werte der Auftriebskräfte (vgl. Abb. 8) an einem symmetrischen und einem gewölbten Flügelprofil im Windkanal bei unterschiedlichen Anstellwinkeln. Die Werte zeigen einen Unterschied der Auftriebskräfte an den beiden Flügelprofilen. Besonders deutlich ist die höhere Auftriebskraft des gewölbten Flügelprofils bei positiven Anstellwinkeln. Darüber hinaus lässt sich der Unterschied zwischen nach oben und unten gerichteter aerodynamischer Auftriebskraft erkennen. Hier kann die Schülervorstellung, dass der Auftrieb stets nach oben zeigt, herausgefordert werden. Weiterhin können die Messergebnisse an die Vorstellung anknüpfen, dass für den Auftrieb die Flügelform wichtiger ist als der Anstellwinkel: Das symmetrische Flügelprofil erfährt (theoriekonform) bei hohem positivem Anstellwinkel eine höhere Auftriebskraft als das gewölbte Profil bei niedrigem positivem Anstellwinkel. Der fehlende Messwert des gewölbten Profils bei einem Anstellwinkel von 45° ist darauf zurückzuführen, dass das Testobjekt von der Waage geweht wurde.

Die Abbildung 13 zeigt die Messung der Luftwiderstandskräfte an verschiedenen Körpern (vgl. Abb. 9). Deutlich erkennbar ist der große Unterschied zwischen der Halbkugel in geschlossener Ausrichtung (Anströmung der runden Seite) und in offener Ausrichtung (Anströmung der hohlen Seite). Dieser Vergleich ver-

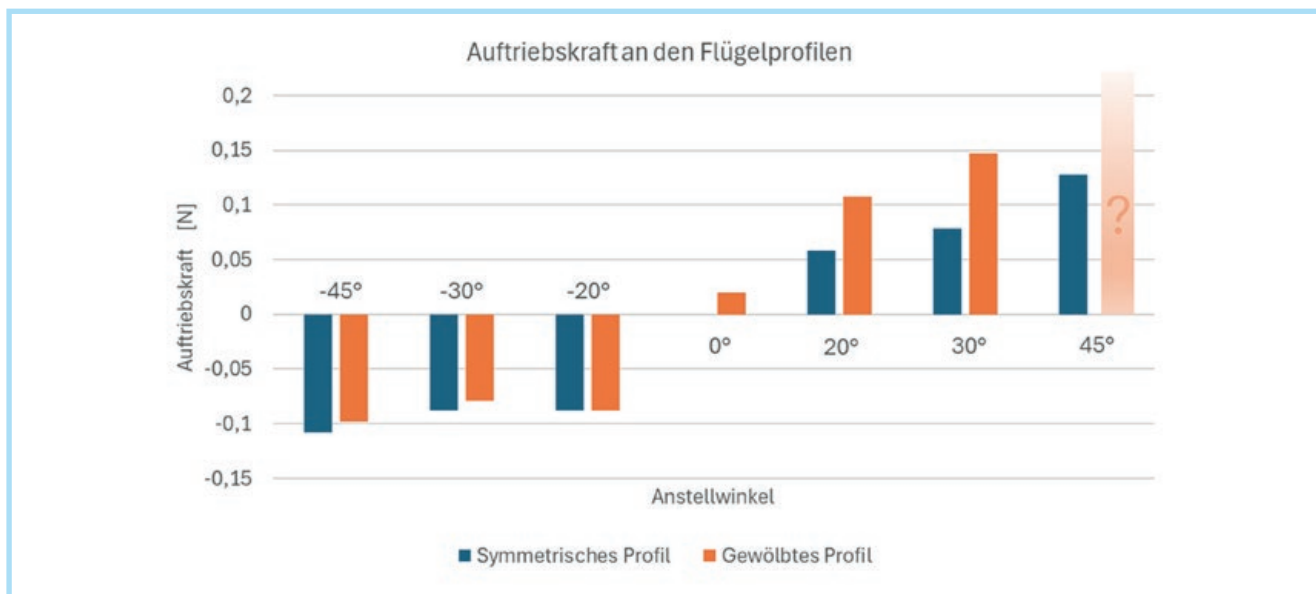


Abb. 12. Auftriebskräfte an verschiedenen Flügelprofilen bei unterschiedlichen Winkeln

deutlich, dass die Rückseite eines Objekts einen deutlichen Einfluss auf den Luftwiderstand hat, selbst wenn die angeströmte Vorderseite identisch ist. Korrekterweise hat die geschlossene Halbkugel einen etwas geringeren Luftwiderstand als die volle Kugel, wodurch die Messung auch die Schülervorstellung herausfordern kann, dass die Rückseite des Körpers für den Luftwiderstand keine Rolle spielt.

Der Vergleich zwischen einer Kugel ohne und mit Einprägungen (Golfball) zeigt einen qualitativ theoriekonformen Unterschied, wodurch die Funktionalität der Einprägungen am Golfball korrekt repliziert wird.

Aus den ermittelten Luftwiderstandskräften können C_w -Werte bestimmt werden. Die Werte sind in ihrer Relation zueinander qualitativ korrekt, weichen jedoch von den Literaturwerten

ab. Grund hierfür ist vermutlich die vergleichsweise geringe Strömungsgeschwindigkeit. Weitere Details zu den Messungen können bei KARAKI (2024) nachgelesen werden.

6 Fazit

Der vorgestellte Windkanal demonstriert, dass mithilfe eines 3D-gedruckten Low-Cost-Modells grundlegende Konzepte der Aerodynamik und Strömungslehre nicht nur anschaulich visualisiert, sondern auch quantitativ untersucht werden können. Durch den Einsatz von 3D-Druck konnten bestehende Low-Cost-Ansätze technisch und didaktisch so weiterentwickelt werden, dass beeindruckende Messungen selbst im Klassenraum möglich sind, wodurch das Verständnis dieser Konzepte praxisnah gefördert werden kann.

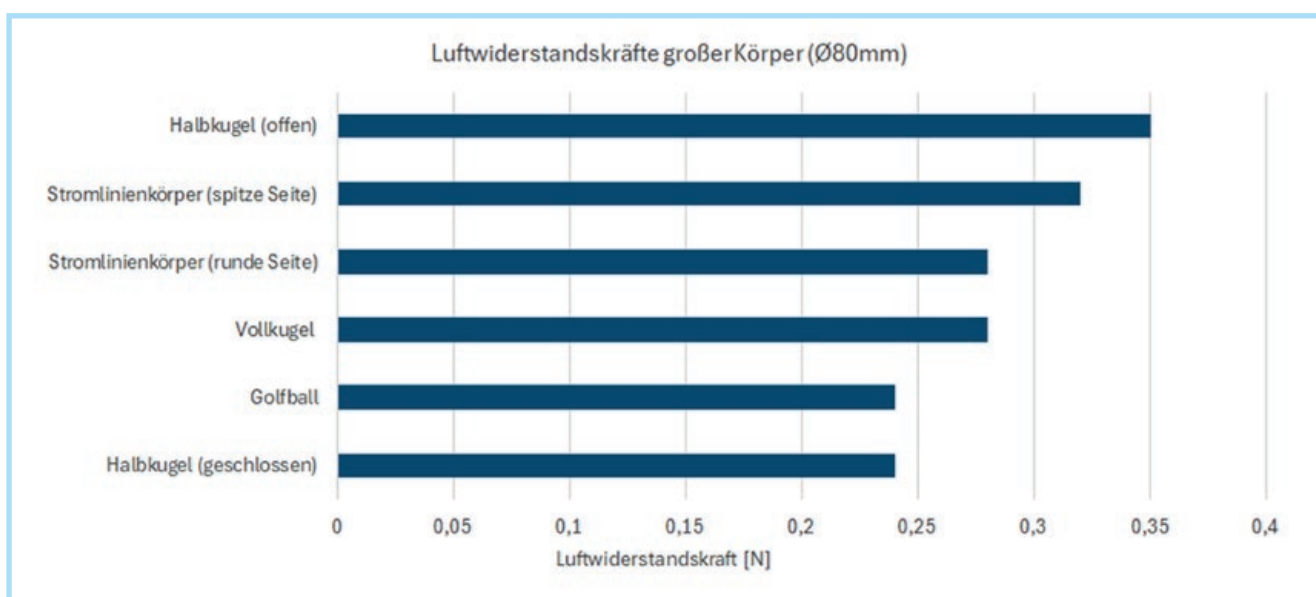


Abb. 13. Luftwiderstandskräfte verschiedener Objekte

Literatur

ALGORIZK (2018). *Windtunnel* [Software].
<https://www.algorizk.com/windtunnel/overview/> (03.12.2024).

Autodesk (2024). *Fusion* (v.2.0.19941) [Software].
<https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview> (03.12.2024).

BREIMANN, L. (2023). *Die Faszination des Fliegens*. Masterarbeit an der Universität Münster. <https://physikkommunizieren.de/wp-content/uploads/2023/07/Breimann-2023-Die-Faszination-des-Fliegens.pdf> (17.09.2024).

BREIMANN, L. & PUSCH, A. (2024). Die physikalische Faszination des Fliegens mit einem Low-cost Flugzeugmodell untersuchen. *MNU-Journal*, 77(2), 155–161.

GENZ, F., BRESGES, A. & FALCONER, K. A. (2023). The Flight Physics Concept Inventory: Reliably Evaluating Aerodynamic Lift, Drag and Associated (Naïve) Concepts of Flight in Class and In-Game. *CourseSource*, 10. doi: 10.24918/cs.2023.27.

KARAKI, M. (2024). *Frischer Wind im Physikunterricht – Der modulare Low-Cost-Windkanal aus dem 3D-Drucker*. Masterarbeit an der Universität Münster. <https://physikkommunizieren.de/wp-content/uploads/2024/09/Karaki-2024-Windkanal-gekuertzt.pdf> (17.09.2024).

KRÜGER, J. T., HÖFFLER, T. N., WAHL, M., KNICKMEIER, K. & PARCHMANN, I. (2022). Two comparative studies of computer simulations and experiments as learning tools in school and out-of-school education. *Instructional Science*, 50(2), 169–197. doi:10.1007/s11251-021-09566-1.

MATZDORF, R. (2022). *Auftrieb beim Flugzeug*.
<https://www.youtube.com/watch?v=Vs5gm7nSMBI> (17.09.2024)

REYNOLDS O. (1883). An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water in parallel channels shall be direct or sinuous and of the law of resistance in parallel channels. *Philos. Trans. R. Soc.* 174, 935–982.

MOHAMAD KARAKI, mohamadkaraki93@gmail.com, studierte an der Universität Münster Lehramt für Physik und Philosophie für Gymnasien und Gesamtschulen und ist derzeit im Vorbereitungsdienst in Berlin.

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

Plädoyer für ein Elektronenkollektiv-basiertes Rucksackmodell im Physikunterricht der Sekundarstufe I



STEFAN SCHMATZ

Das Rucksackmodell für Stromkreise kann aus allgemeinbildender und praktischer Sicht Minimalerziele erfüllen. Eine anspruchsvollere, fächerübergreifend motivierte, dem Elektronengasmodell lose verwandte Version fördert den systemischen Blick auf Stromkreise. Gegenargumente und mangelnde Anschlussfähigkeit werden diskutiert. Widersprüche zur Elektrodynamik sind später korrigierbar, wenn auch mathematische Lösungen fundamentaler Gleichungen den Energietransport *im* Draht nicht ausschließen.

1 Motivation

Die immer noch hochaktuelle Frage, welches „Modell des elektrischen Stromkreises [...] in der Schule genutzt werden“ soll (FRUBÖSE & WEISENBURGER 2022, 478; HÜBEL, 2023; FRUBÖSE, 2023) hat das sogenannte Rucksackmodell wieder in den Fokus gerückt, auch wenn gemäß einer Replik (HOPF, 2023, 174) die „Diskussionen zu diesem Modell [...] schon vor Jahren abgeschlossen“ seien, weil es „fachlich fragwürdig und fachdidaktisch ungeeignet“ sei und „lokales und sequenzielles Denken“ fördere; die traditionelle Spannungsdefinition beschreibe „nicht auf Ladungen lokalisierte Energiepakete, sondern die potenzielle Energie einer Ladung im elektrischen Feld“. Aus fachwissenschaftlicher Perspektive wird die elektromagnetische Energie durch elektrische und magnetische Felder trans-

portiert, und zwar in der Umgebung der Leitungen, nicht in ihnen. Die Leitung von der Spannungsquelle zum „Verbraucher“ und die Leitung zurück zur Spannungsquelle tragen zum Energietransport bei, dessen Richtung auch bei Anliegen einer Wechselspannung immer dieselbe bleibt, nämlich von der Spannungsquelle zum „Verbraucher“. Da die Energie in Stromkreisen nicht „rein“ elektrischer, sondern elektromagnetischer Natur ist, müssten sich Lernende mit elektromagnetischen Feldern und Wellen sowie mit dem Inhalt der MAXWELL'schen Gleichungen auseinandersetzen. Die Begriffe „elektrisches Feld“ und „elektrisches Potential“ sind allerdings nicht Gegenstand des Mittelstufenunterrichts, weder aus altersangemessener lernpsychologischer, noch aus schulpraktischer und derzeit auch nicht aus curricularer Sicht (z.B. Niedersächsisches Kultusministerium, 2015). Deshalb ist aus pragmatischer Sicht ein