I.B.50

Mechanik

Der Luftwiderstand bei Velomobilen – Lernen an Stationen

Jost Baum

© Wikimedia Commons/CC BY-SA 3.0 de/Logigeditieur

© RAABE 2024

VORANSICHT

Umweltfreundliche Verkehrsmittel, wie zum Beispiel das Fahrrad, sind der Schlüssel zu Klimaschutz und zu einer Erhöhung der Lebensqualität. Neben dem klassischen Fahrrad stellt auch das Velomobil eine Alternative für die persönliche Fortbewegung dar. Durch ihre stromlinienförmige Karosserie weisen sie einen wesentlich geringeren Luftwiderstand im Vergleich zu Fahrrädern und Liegerädern auf und können so die Antriebsenergie wesentlich effizienter in die Fortbewegung umsetzen. Die Lernenden erarbeiten anhand des Velomobils den Zusammenhang zwischen Luftwiderstand und dem Strömungswiderstandskoeffizienten (c_w-Wert).

KOMPETENZPROFIL

Klassenstufe:	7–10
Dauer:	2–3 Unterrichtsstunden (Minimalplan: 1–2)
Kompetenzen:	Die Lernenden erhalten einen Überblick über die technische Entwicklung des Velomobils. Sie verstehen die Bedeutung des c_w-Wertes für die Konstruktion und berechnen den Luftwiderstand sowie den entsprechenden Energieaufwand.
Thematische Bereiche:	Luftwiderstand, Strömungswiderstandskoeffizient, mechanische Arbeit, Kraft, Energieaufwand, Verkehrswende

Auf einen Blick

Ab = Arbeitsblatt, Tx = Infotext, Gd = Grafische Darstellung

1. Stunde

Thema:	Einführung des c_w-Wertes
M 1 (Tx, Ab)	**Station 1: Felix ist spät dran und tritt in die Pedale …**
Thema:	Berechnung FLR und W
M 2 (Ab)	**Station 2: Wir berechnen den Luftwiderstand**

2./3. Stunde

Thema:	Die Entwicklung des Liegerads
M 3 (Tx, Ab)	**Station 3: Vom Kettenantrieb zum Liegerad**
Thema:	Historische Bedeutung des Velomobils
M 4 (Tx, Ab)	**Station 4: Das pedalgetriebene Velocar von Mochet**
Thema:	Technische Entwicklung des Velomobils
M 5 (Tx, Ab)	**Station 5: Das Velomobil im Wandel der Zeit**
Thema:	Moderne Velomobile
M 6 (Tx, Ab)	**Station 6: Das Mö von Evovelo**
Thema:	Berechnungen des Luftwiderstands und der notwendigen Energie
M 7 (Ab)	**Station 7: Wir berechnen den Luftwiderstand**
M 8 (Gd, Tx)	**Geometrische Formen und deren Luftwiderstände**

Minimalplan

Bei Zeitmangel kann nach dem Einstieg mit **M 1** und der Übung von **M 2** direkt mit **M 5** und **M 7** die Thematik behandelt werden.

VORANSICHT

© RAABE 2024

Station 1: Felix ist spät dran und tritt in die Pedale ... M 1

Verändert nach © DuKai photographer

Felix hatte den Rucksack mit den Schulsachen am Abend vorher schon gepackt, und das war auch gut so, denn er war fast schon zu spät dran, um den Physikunterricht von Herrn Drögemüller noch rechtzeitig zu erreichen. Er musste sich beeilen, denn eins war sicher, Unpünktlichkeit konnte Herr Drögemüller beim besten Willen nicht ab, und seine Physiknote war alles andere als berauschend. Grund genug, um sich zu beeilen, ohne Frühstück das Haus zu verlassen und in die Pedale zu treten, was das Zeug hält. Zu allem Überfluss hatte er in der Eile seinen Fahrradhelm vergessen und seine Haare flatterten im Wind, genau wie seine Regenjacke, deren Reißverschluss klemmte, als er sie angezogen hatte. Das Fahrrad, das zuvor schon sein älterer Bruder genutzt hatte, besaß keine Gangschaltung und hatte einen hohen Lenker, sodass er aufrecht sitzen musste, als er sich gegen den Wind stemmte. Dann setzte der leichte Nieselregen ein, der seine Brille beschlagen ließ, und er wäre fast ohne anzuhalten über die Kreuzung gefahren, bei der die Ampel kurz vor ihm von Gelb auf Rot sprang. Als dann neben ihm auch noch das stromlinienförmige Velomobil von Herrn Drögemüller vorbeischoss, war es endgültig um seine Laune geschehen. Viel später saß er ausgelaugt und klatschnass als Letzter auf seinem Stuhl und rieb seine Brille trocken, während Herr Drögemüller folgendes Schaubild auf den Overheadprojektor legte:

© colourbox

Mein Gott, was war das?
Schon wieder ein Buch mit sieben Siegeln!

© colourbox

© RAABE 2024

VORANSICHT

Station 2: Wir berechnen den Luftwiderstand

M 2a

© Egor Shabanov/iStock/Getty Images Plus

Hier siehst du eine Formel, die die Kraft berechnet, die Felix aufbringen muss, um gegen den Luftwiderstand anzukommen:

$$FLR = \frac{1}{2} \cdot A \cdot c_w \cdot \rho_{Luft} \cdot v^2$$

Wobei:

- **FLR**: Luftwiderstand
- **A**: Fläche (Querschnitt des Körpers)
- **c_w**: Strömungswiderstandskoeffizient
- **ρ_{Luft}**: Luftdichte
- **v^2**: Quadrat der Geschwindigkeit

Mechanische **Arbeit** ist definiert als das Produkt aus der Kraft (F), die auf einen Körper wirkt, und der Strecke (s), die der Körper in dieser Richtung zurücklegt.

$$W = F \cdot s$$

Verrichtete Arbeit ist eine Form von Energie, daher gilt:

$$E = W = \text{verrichtete Arbeit mit der Einheit } Nm = J$$

- **E**: Energie
- **s**: Weg

Aufgaben

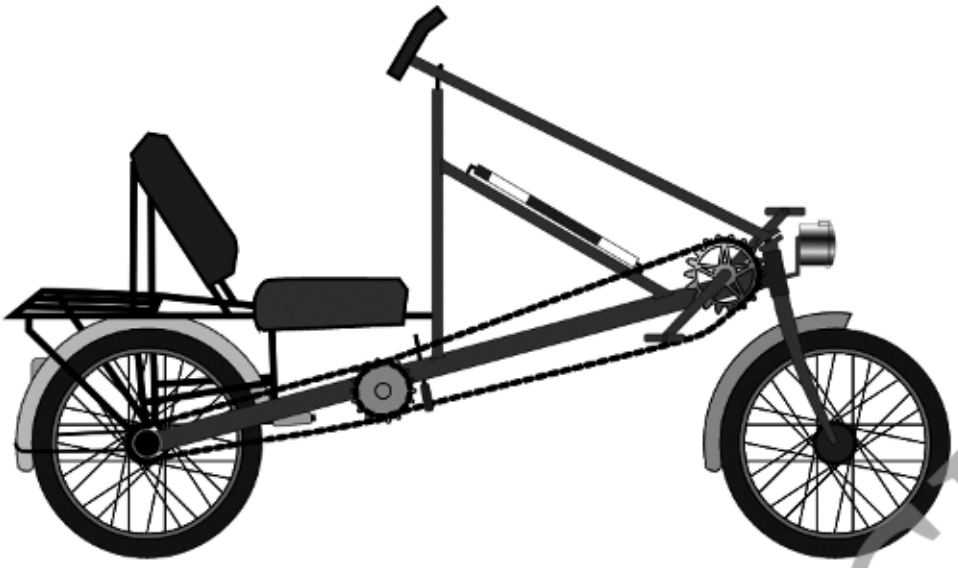
1. **Berechne** den Luftwiderstand für $c_w = 0{,}35$, $A = 0{,}9\ m^2$, $9\ \frac{km}{h}$, $\rho_{Luft}: 1{,}25\ \frac{kg}{m^3}$
   a) **Rechne** $\frac{km}{h}$ in $\frac{m}{s}$ **um**, bevor du den Wert in die Gleichung einsetzt.
   b) **Führe** eine Einheitengleichung **durch**.
   Tipp: Newton (Kraft); $N = \frac{kg \cdot m}{s^2}$!
2. **Berechne** die dafür notwendige Energie E = W. Der Schulweg beträgt 5 km.

VORANSICHT

© RAABE 2024

Station 3: Vom Kettenantrieb zum Liegerad

M 3



Premier vélo couché

© Wikimedia Commons/CC BY-SA 3.0/Manotechnologie — Travail personnel

Liegerad von Charles Mochet von 1933

Nachdem sich der Kettenantrieb im Fahrradbau in den 80er- und 90er-Jahren des 19. Jahrhunderts durchgesetzt hatte, entwickelten Erfinder zahlreiche Varianten dieses Konzepts. Dabei wurde mit der Anordnung des Tretlagers experimentiert. Für alle Liegeräder trifft zu, dass sich das Tretlager oberhalb des Vorderrades befindet.

Vom Kurzlieger spricht man dann, wenn das Tretlager vor dem Vorderrad liegt, vom Langlieger, wenn sich das Tretlager hinter dem Vorderrad befindet.

© Wikimedia Commons/CC BY-SA 3.0/Reise Reise

Blauer Langlieger

© Wikimedia Commons/CC BY-SA 4.0/EvaK – EvaK

Roter Kurzlieger

Die ersten Vorläufer des heutigen Liegerades waren das französische Fauteuil-Velociped mit Ballonreifen aus dem Jahr 1893, das von Ferdinand Krafft aus Saarbrücken, das Liegerad von Drewitz und das Sesselrad des Schweizer Herstellers Challand (1895).

© RAABE 2024

VORANSICHT

M 4 Station 4: Das pedalgetriebene Velocar von Mochet

In Frankreich ...

Die von Charles Mochet in den Zwanziger- und Dreißigerjahren des 20. Jahrhunderts entwickelten pedalgetriebenen „Velocars" bestanden aus Sperrholz und hatten einen offenen Boden über einem Stahlrohrrahmen. Sie waren leicht genug, um von zwei Erwachsenen, mit Lebensmitteln und sogar kleinen zusätzlichen Familienmitgliedern, durch Pedalkraft vorwärts bewegt zu werden. Vor dem Ersten Weltkrieg hatte Mochet kleine, sehr leichte Autos gebaut. Seine Frau brachte ihn auf die Idee, pedalgetriebene, vierrädrige Fahrzeuge zu entwickeln. Sie hatte die Befürchtung, dass ihr damals 9-jähriger Sohn Georg sich beim Fahrradfahren verletzen könnte. Wenig später entwickelte sich aufgrund der Weltwirtschaftskrise ein Bedarf für diese Fahrzeuge, und Mochet entschied sich, die Fertigung von Automobilen einzustellen und sich ganz der Konstruktion von Velomobilen zu widmen. Er baute ein zweisitziges, vierrädriges pedalgetriebenes Fahrzeug für Erwachsene, das er „Velocar" nannte. Da sich die Arbeiter- und Mittelschicht der Franzosen aufgrund der schlechten wirtschaftlichen Situation nach dem Ersten Weltkrieg kein herkömmliches Automobil leisten konnte, fand das Wooden Velocar regen Absatz. Zwischen 1925 und 1944 stellte Mochet rund 6000 Velocars her.

© Wikimedia Commons/CC BY 2.0/dave_7

Bis in die 1930er-Jahre verzeichnete das Velocar steigende Verkaufszahlen. Auch während des Zweiten Weltkriegs, als es kein Benzin gab, stießen Mochets Velocars noch auf reges Interesse der Zivilbevölkerung. Selbst der französische Widerstand benutzte Velocars, da das Benzin von den Nazis beschlagnahmt worden war.

Aufgaben

Lies den Text und **bearbeite** die folgenden Aufgaben.

1. **Begründe**, warum das pedalgetriebene Velocar von Mochet einen offenen Boden hatte.
2. **Nenne** die Gründe, die Mochet hatte, ein Velomobil zu bauen.
3. **Erkläre,** ob dabei der c_w-Wert der Karosserie eine Rolle spielte.
4. **Gib an,** warum das Velomobil nach dem 1. Weltkrieg ein wirtschaftlicher Erfolg war.
5. **Nenne** die Gründe für das rege Interesse am Velomobil nach dem 2. Weltkrieg.

© RAABE 2024

VORANSICHT

Station 6: Das Mö von Evovelo

M 6

Angesichts der Fragen der Energie- und Verkehrswende entwickeln Tüftler wieder neue Ideen für moderne Velomobile. Eines dieser Konzepte ist das Mö von Evovelo. Die Entwickler aus Spanien haben das Projekt als Open Source angelegt, sodass sich auch andere Tüftler und Tester mit ihren Ideen einbringen konnten.

© Foto: evovelo

Das Mö ist ein klassisches Velomobil, also ein (hier mit Holz) verkleidetes Fahrrad, das vor widrigen Witterungsbedingungen schützt. Als „Motor" dient nicht nur die Muskelkraft des Fahrers, sondern auch die durch Solar-Panels auf dem Dach gewonnene Solarenergie, die sowohl in den Elektromotor als auch in eine Batterie eingespeist wird. Zusätzlich zur Sonnenenergie wird die Energie, die beim Bremsen entsteht, ähnlich wie in Hybridfahrzeugen, dem System wieder zugeführt.

© Fotos: evovelo

Die Firma evovelo hat 2022 leider beschlossen, ihr Projekt Mö – wohl aufgrund fehlender Fördermittel – einzustellen. Es bleibt zu hoffen, dass sich ein Investor findet, der die Projektidee übernimmt und finalisiert. (https://www.evovelo.com/en/#contact)

© RAABE 2024

VORANSICHT

Station 7: Wir berechnen den Luftwiderstand

M 7a

Bearbeite folgende Aufgaben:

1. **Gib an,** wovon die Luftwiderstandskraft FLR abhängig ist.

2. **Gib an,** wovon der Strömungswiderstandskoeffizient c_w abhängig ist.

   Tipp: Nutze die Tabelle aus **M 8**

3. Die Energie zum Überwinden des Luftwiderstands wächst etwa mit dem Quadrat der Geschwindigkeit. Bei gleicher Strecke gilt ungefähr: Doppelte Geschwindigkeit entspricht vierfachem Energieaufwand.
   Weise diesen Zusammenhang **nach:**

   Gegeben ist: $A = 1\ m^2$, $c_w = 0{,}28$, $\rho_{Luft} = 1{,}25\ \frac{kg}{m^3}$, $v_1 = 5\ \frac{m}{s}$, $v_2 = 10\ \frac{m}{s}$, $S = 10\ km$

$$FLR = \frac{1}{2} \cdot A \cdot c_w \cdot \rho_{Luft} \cdot v^2$$

Wobei:

- **FLR**: Luftwiderstand
- **A**: Fläche (Querschnitt des Körpers)
  c_w: Strömungswiderstandskoeffizient
- ρ_{Luft}: Luftdichte
- v^2: Quadrat der Geschwindigkeit

Arbeit:

$$W = F \cdot s$$

Verrichtete Arbeit ist eine Form von Energie, daher gilt:

$$E = W = \text{verrichtete Arbeit mit der Einheit } Nm = J$$

- **E**: Energie
- **s**: Weg

Tipp:

$$FLR = m^2 \cdot \frac{kg}{m^3} \cdot \left(\frac{m}{s}\right)^2$$

$$FLR = \frac{kg \cdot m}{s^2}$$

$$FLR = N$$

4. **Berechne,** wie viel Energie du mit einem stromlinienförmigen Körper mit einem c_w-Wert von 0,05 sparen kannst.

   a) Bei einer Geschwindigkeit von $5\ \frac{m}{s}$

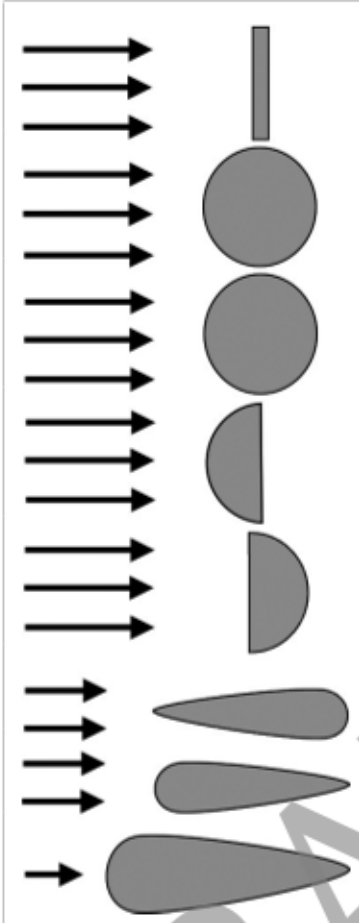
   b) Bei einer Geschwindigkeit von $10\ \frac{m}{s}$

© RAABE 2024

VORANSICHT

M 8 Geometrische Formen und deren Luftwiderstände

Der Vergleich des Luftwiderstands bei konstantem Luftstrom, in den unterschiedlichen Formen mit demselben Querschnitt, ist in folgender Tabelle dargestellt:



Geometrische Form	c_w-Wert
Platte	1,1–1,3
Langer Zylinder	0,35–1,2
Kugel	0,18–0,45
Halbkugel	Mit Boden 0,4 Ohne Boden 0,3
Halbkugel	Mit Boden 1,2 Ohne Boden 1,3
Kegel mit Halbkugel	0,16–0,2
Kegel mit Halbkugel	0,07–0,09
Stromlinienkörper	0,055

VORANSICHT

© RAABE 2024

Hinweise und Lösungen

Das folgende Übersichtsblatt mit Definitionen, Fachbegriffen und Formeln kann den Schülerinnen und Schülern für ihre Unterlagen ausgeteilt werden.

Unter **Luftwiderstand** versteht man in der Physik die hemmende Kraft, wenn sich ein Körper in der Luft bewegt oder wenn ein ruhender Körper strömender Luft ausgesetzt wird. Der Luftwiderstand ist dabei von folgenden Faktoren abhängig:

1. von der Größe des Körpers
2. von seiner Form
3. von der Oberflächenbeschaffenheit
4. von der Geschwindigkeit der Strömung oder der Bewegung des Körpers in der Luft

Hierbei gilt bei Luft folgende Formel:

$$FLR = \frac{1}{2} \cdot A \cdot c_w \cdot \rho_{Luft} \cdot v^2$$

FLR: Luftwiderstand; **A**: Fläche (Querschnitt des Körpers); $\mathbf{c_w}$: Strömungswiderstandskoeffizient; ρ_{Luft}: Luftdichte; $\mathbf{v^2}$: Quadrat der Geschwindigkeit

FLR: Luftwiderstand (Luftreibung)
A: Fläche (Querschnitt des Körpers)
$\mathbf{c_w}$**-Wert**: Der Strömungswiderstandskoeffizient, Widerstandsbeiwert, Widerstandskoeffizient, Stirnwiderstand oder c_w-Wert (nach dem üblichen Formelzeichen c_w) ist ein dimensionsloses Maß (Koeffizient) für den Strömungswiderstand eines von einem Fluid (Gas, Flüssigkeit) umströmten Körpers. Er wurde durch ein Experiment im Windkanal ermittelt. Der Wert berücksichtigt die Form und die Oberflächenbeschaffenheit des Körpers.
ρ_{Luft}: Einheitsgewicht der Luft, bezogen auf einen Luftdruck von 726 mm Quecksilbersäule und 10° Celsius. Er beträgt 1,25 $\frac{kg}{m^3}$
$\mathbf{v^2}$: Strömungsgeschwindigkeit des Fluidstroms (hier Luft)

Mechanische **Arbeit** ist definiert als das Produkt aus der Kraft (F), die auf einen Körper wirkt, und der Strecke (s), die der Körper in dieser Richtung zurücklegt.

$$W = F \cdot s$$

Verrichtete Arbeit ist eine Form von Energie, daher gilt:

$$E = W = \text{verrichtete Arbeit mit der Einheit } Nm = J$$

E: Energie; s: Weg

© RAABE 2024

VORANSICHT