

51 Bionik

Martin Apolin (Stand November 2012)

Flugtechnik

A1 Flugzeuge, Helikopter, Vögel, Raketen, Was passiert aus Sicht des Impulssatzes mit bzw. bei allen fliegenden Objekten? Was muss daher mit der Luft hinter einer Tragfläche passieren, damit ein Auftrieb entsteht? Hilf dir mit Abb. 1 und 2!



Abb. 1: Die Träger-Rakete Saturn V (Foto: NASA).



Abb. 2: Ein Helikopter über dem Meer (Foto: U.S. Navy)

A2 In Abb. 3 siehst du eine inkorrekte Darstellung der Strömungsverhältnisse an einem Flügel. Was ist falsch daran? Hilf dir mit A1 und Abb. 4.

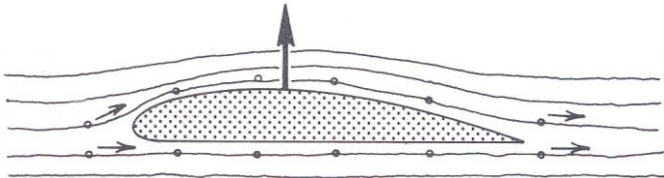


Abb. 3 (Quelle: www.physics.umd.edu)

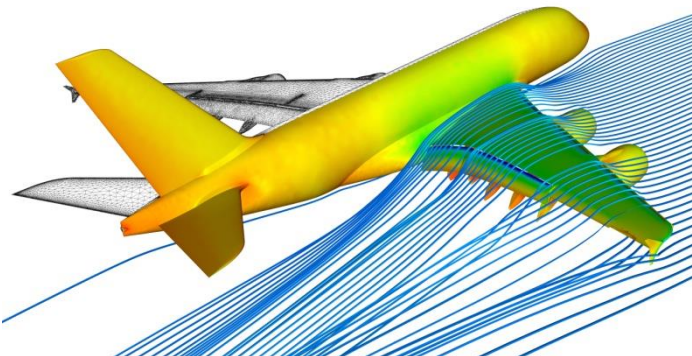


Abb. 4: Numerische Strömungssimulation an einem Airbus A380 (Quelle: Institute for Aerodynamics and Flow Technology)

A3 In Abb. 5 siehst du, wie es bei einem Flugzeug über den Tragflächen zu einer Nebelbildung kommt. Versuche den Effekt qualitativ zu erklären.



Abb. 5: Nebelbildung über den Tragflächen einer Verkehrsmaschine (Foto: Cyron Ray Macey; Quelle: Wikipedia).

A4 Was passiert mit Auftrieb und Luftwiderstand, wenn man den Anstellwinkel einer Tragfläche verändert (siehe Abb. 6 b)? Welcher Zusammenhang besteht zu Abb. 7?

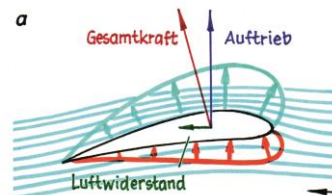


Abb. 6 a und b (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 51.7, S. 124)

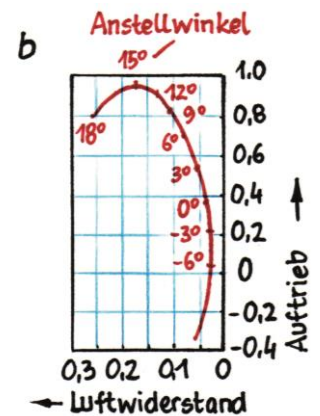


Abb. 7: Die Landeklappen einer Boeing 737 (Foto: Marcela; Quelle: Wikipedia)

A5 Der Flugverkehr verursacht in Summe etwa 2 % der globalen CO₂-Emission. Absolut gesehen werden jedes Jahr durch Flugzeuge etwa 650 Millionen Tonnen CO₂ erzeugt. Winglets können den Kerosinverbrauch um etwa 4 % reduzieren. Um wie viel könnte dadurch, wenn alle Flugzeuge mit Winglets ausgestattet werden, die globale Emission absolut und relativ reduziert werden? Vergleiche

che auch mit der jährlichen CO₂-Emission von Österreich (Abb. 8; Anm.: Österreich hat etwa 8,5 Mio. Einwohner).

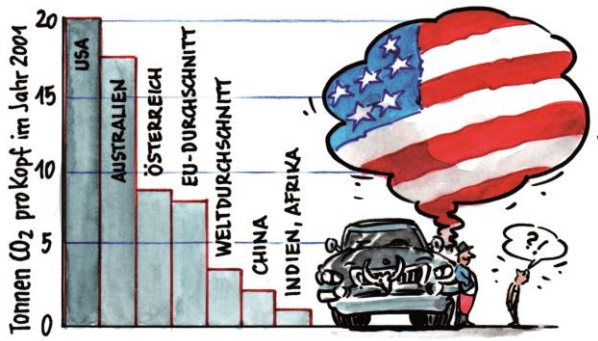


Abb. 8: Beispiele für CO₂-Produktionen (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 32.2, S. 46, BB7).

A6 Erkläre qualitativ, wie Vögel Auftrieb und Vortrieb mit ihren Flügeln realisieren (siehe Abb. 9).

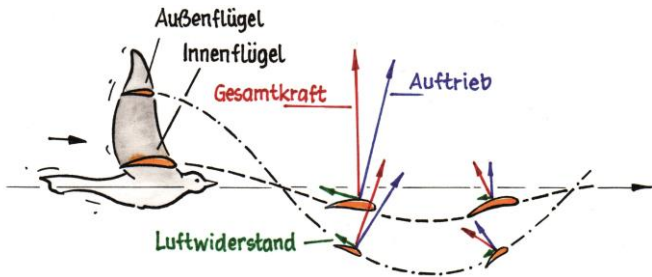


Abb. 9: Kräfte beim Flügelschlag einer Taube (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 51.5, S. 124).

Bionische Oberflächen

A7 Auf www.think-ing.de findet sich unter dem Titel "Vom Akkuschrauber bis zum Klettverschluss – Nebenprodukte der Weltraumfahrt" folgende Passage:

"Der Klettverschluss – mittlerweile von Sportschuhen über Funktionsbekleidung bis hin zu Taschenverschlüssen nicht mehr wegzudenken – ist ein Produkt der Weltraumfahrt. Damit in der Schwerelosigkeit des Space Shuttles keine Gegenstände herumdrifteten, wurde an jedes Teil an Bord des Raumschiffes ein Stück Klettverschluss angeklebt. So konnte es überall im Shuttle befestigt werden und stellte keine Gefahr für die Astronauten dar."

Kommentiere dieses Zitat!

A8 Auf mechanima-lab.upb.de ist folgende Textpassage zu lesen:

"Der Reibbeiwert [Anm.: der Reibungskoeffizient] ist materialabhängig. Wer schon einmal versucht hat, beispielsweise ein Edelstahlblech von einem anderen herunterzuziehen, weiß, warum der Haftreibungskoeffizient von Stahl auf Stahl mit 0,45 bis 0,8 recht hoch ist. Hingegen die auftretende Reibkraft, die einem Schlittschuhläufer entgegenwirkt,

bevor er sich in Bewegung setzen kann, ist vergleichsweise gering (Haftreibungsbeiwert 0,027). Gleitet der Schlittschuhläufer erstmal über das Eis, verringert sich die Reibungskraft (Kontakt Stahl auf Eis mit Gleitreibbeiwert 0,014). Bei bestimmten Anwendungen wird die Reibwirkung bewusst groß eingestellt, wie z.B. beim Klettverschluss, der einen Reibbeiwert von >1 aufweist."

Es gilt $F_R = \mu F_N$ (siehe Abb. 10). Ist es tatsächlich möglich, dass der Reibungskoeffizient μ größer als 1 wird (siehe auch Tab. 1)? Was würde das für das Verhältnis von Reibungskraft und Normalkraft bedeuten?



Abb. 10: Normalkraft und Reibungskraft (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 7.24, S. 63, BB5).

Stoffpaare	Haftreibungszahl	Gleitreibungszahl
Holz auf Stein	0,7	0,3
Gummi auf Beton (trocken)	0,65	0,5
Gummi auf Beton (nass)	0,4	0,35
Gummi auf Eis (trocken)	0,2	0,15
Gummi auf Eis (nass)	0,1	0,08
Stahl auf Teflon	0,04	0,04
Schlittschuh auf Eis	0,03	0,01

Tab. 1: Reibungszahlen für verschiedene Materialien (siehe auch Tab. 7.1, S. 63, BB5).

A9 a Zerlege die Gewichtskraft, die an diesem Objekt angreift, in Normalkraft (F_N) und Hangabtriebskraft (F_H).

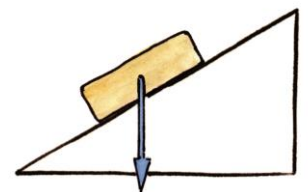


Abb. 11 (Grafik: Janosch Slama und Martin Apolin)

A9 b Je steiler eine schiefe Ebene ist, desto größer wird die Hangabtriebskraft F_H (siehe A9 a). Wenn sie größer wird als die Reibungskraft, die in die Gegenrichtung zeigt, beginnt das Objekt zu rutschen. Leite daraus eine Gleichung ab, die einen Zusammenhang zwischen dem Neigungswinkel α und dem Reibungskoeffizienten μ herstellt! Hilf dir mit der Gleichung aus A8! Wie groß kann die Neigung z. B. werden, wenn der Reibungskoeffizient 1 beträgt?

A9 c Nimm an, du befestigst den Block in Abb. 11 mit einem Klettverschluss an der Unterlage. Dann kannst du die Ebene

sogar senkrecht stellen, ohne dass der Block rutscht. Was bedeutet das für den Reibungskoeffizienten? Was bedeutet das für die Kraft, um den Block abzulösen? Wie sinnvoll ist in diesem Fall die Angabe von μ ?

A10 Auf www.gutefrage.net stellt ein User die Frage "Was sind Van-der-Vaals-Kräfte?". Diese Frage wird folgendermaßen beantwortet [aus dem Original übernommen]:

"Van-der-Waals-Kräfte, auch als Wasserstoffbrückenbindung bekannt, sind im Fall von Wasserstoff, die Anziehungskräfte zwischen Wasserstoffatomen, die bei Hitzezufuhr geschwächt werden."

Kommentiere dieses Zitat und hilf dir dabei mit Abb. 12.

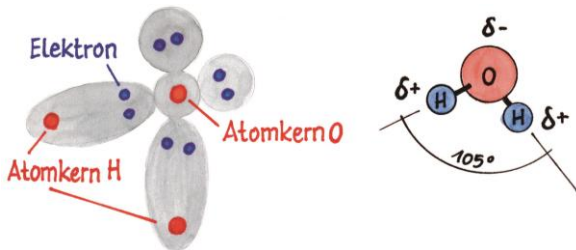


Abb. 12: Links: Orbitale und Außenelektronen eines Wassermoleküls; rechts: Vereinfachte Darstellung mit Ladungsverteilung. Bei den H-Atomen überwiegt die positive Ladung, beim O die negative (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 13.14, S. 127, BB5).

A11 a Mit Hilfe eines Rasterkraftmikroskops konnte man im Jahr 2002 die Haftkraft eines einzelnen Härchens auf den Gecko-Zehen messen. Dazu klebten die Forscher dieses auf die Nadel und setzten es auf die Glasoberfläche. Die Kraft, mit der es sich wieder ablösen ließ, betrug unvorstellbar winzige 10 Nanonewton! Wie viele Härchen muss ein Gecko daher mindestens an den Zehen haben, damit er kopfüber an einer Glasdecke laufen kann, wenn er eine Masse von einigen 100 g besitzt?

A11 b Die feinsten Härchen (Abb. 13) sind etwa 200 nm breit. Schätze ab, wie groß daher in Summe die Fußflächen eines Geckos *mindestens* sein müssen? Hilf dir mit A11 a.

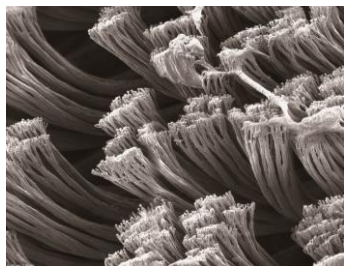


Abb. 13 (Quelle: Technische Universität Ilmenau, Institut für Mikro- und Nanotechnologien)

A12 Um die Effektivität von Haifischschuppen zu messen, baust du diese um den Faktor 500 vergrößert nach (siehe

Abb. 14). Die typische Schwimmgeschwindigkeit v eines Hais liegt bei 17 m/s. Du wählst für die Strömungsgeschwindigkeit im Kanal 1,7 m/s. Um wie viel Mal muss die kinematische Zähigkeit ν (Ny) deiner Flüssigkeit größer sein, damit dieselben Strömungsverhältnisse vorliegen wie bei einem Haifisch in Wasser? Verwende die Gleichung $R_e = \frac{v \cdot L}{\nu}$.



Abb. 14: Stark vergrößertes Modell einer Haifischhaut. Die Schuppen tragen scharfe Rippen, die den widerstandsvermindernden Effekt bewirken (Foto: Geri und Freki; Quelle Wikipedia).

A13 a Auf www.spiegel.de (07.08.2008) heißt es zum Thema Schwimmanzüge:

"Ist es überlegene Technik, ist es Aberglaube? Der superleichte High-tech-Schwimmanzug eines britischen Herstellers sorgt für Furore unter Profi-Sportlern. Wirklich erklären lässt sich die Magie des Wassertextils nicht - doch seine Kunden haben schon mehr als 40 Weltrekorde aufgestellt."

und weiter

"Der Widerstand beim Schwimmen kann bei Top-Athleten so groß werden, dass man es sich nur schwer vorstellen kann. Nach Angaben australischer Forscher liegt er in Rennen mit Weltrekordgeschwindigkeit bei 11 bis 12 Kilogramm pro Schwimmer. Das sei etwa mit den Kräften vergleichbar, die man spüre, wenn man seinen Kopf bei 145 Kilometern pro Stunde aus dem Autofenster halte."

Kommentiere beide Zitate!

A13 b Schätze mit einer Fermi-Rechnung zum zweiten Zitat ab, ob der Vergleich mit dem Kopf, den man aus dem Autofenster hält, stimmen kann. Verwende dazu die Formel für den Luftwiderstand $F_L = 0,5 \cdot \rho \cdot c_W \cdot A \cdot v^2$. Nimm für den Kopf vereinfacht eine Kugelform mit einem Durchmesser von 25 cm an, also einen wirklich großen Kopf, um bei der Abschätzung auf der sicheren Seite zu sein. Verwende für Dichte und c_W -Werte Tab. 2 und 3 auf der nächsten Seite und interpretiere das Ergebnis!

	ungefähre Dichte in kg/m ³
Helium	0,18
Luft, 20 °C, Normaldruck	1,20
Kohlenstoffdioxid	1,98
Olivenöl	910
Eis 0 °C	917
Mensch, eingeatmet	940– 990
Wasser, 4 °C	1000
Mensch, ausgeatmet	1010–1100
Meerwasser normal	1025
Totes Meer	1170
Quecksilber	13546

Tab. 2: Dichtewerte ausgewählter Stoffe

c _w -Wert	Form
2,0	lange Rechteckplatte
1,33	Halbkugelschale, konkave Seite, Fallschirm
1,11–1,17	runde Scheibe, quadratische Platte
0,45	Kugel
0,34	Halbkugelschale, konvexe Seite
0,08	Flugzeug
0,03	Pinguin

Tab. 3: Vergleich einiger c_w-Werte

A14 Auf Wikipedia steht zum Thema Adhäsion:

"Adhäsion (lat. adhaerere ‚anhaften‘), auch Adhäsions-oder Anhangskraft genannt, ist der physikalische Zustand einer Grenzflächenschicht, die sich zwischen zwei in Kontakt tretenden kondensierten Phasen ausbildet – also zwischen Feststoffen und Flüssigkeiten mit vernachlässigbarem Dampfdruck."

Versuche den Begriff Adhäsion so einfach wie möglich zu beschreiben!

A15 Was versteht man unter dem Begriff hydrophob? Überlege weiters, welcher Zusammenhang zwischen den Begriffen hydrophob, Adhäsion (siehe A14), Abb. 15 und dem Lotus-Effekt besteht.

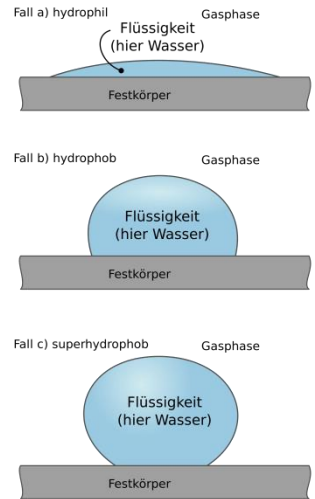


Abb. 15 (Grafik: Cepheiden; Quelle: Wikipedia)

A16 Was ist der Unterschied zwischen der Van-der-Waals-Kraft (siehe A10 und Gecko) und Adhäsion?

Bionische Materialien und Strukturen; allgemein

A17 Das Rad ist eine der wichtigsten Erfindungen des Menschen. Warum gibt es in der Natur keine Räder?

A18 a Knochen sind nicht durch und durch aus Substanz, sondern haben Bälkchen (Abb. 16). Was hat das für einen Vorteil? Woher „wissen“ diese, in welche Richtung sie sich ausrichten müssen?

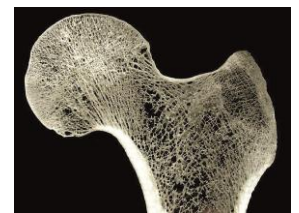


Abb. 16 (Foto: Institut für Konstruktionstechnik, TU Braunschweig)

A18 b Wenn Menschen lange Zeit krankheitsbedingt im Bett liegen müssen oder sich in Schwerelosigkeit befinden, verlieren die Knochen an Festigkeit. Warum?

A19 Die Tafel Schokolade und die Zauneidechse (Abb. 17 und 18) haben etwas gemeinsam. Was? Es hat mit "Abbrechen" zu tun!



Abb. 17 (Foto: Evan-Amos; Quelle: Wikipedia)

Abb. 18: (Foto: Friedrich Böhringer ; Quelle: Wikipedia)

A20 Als Top-down ("von oben nach unten") und Bottom-up ("von unten nach oben") werden zwei entgegengesetzte Arbeitsweisen bezeichnet. Ordne diese beiden Begriffe Tabelle 4 richtig zu und suche dir jeweils ein Beispiel aus der Bionik dazu.

<ul style="list-style-type: none"> • Biologische Grundlagenforschung • Erkennen und Beschreiben eines zu Grunde liegenden Prinzips • Abstraktion dieses Prinzips (Loslösung vom biologischen Vorbild) • Suche nach möglichen technischen Anwendungen • Entwicklung technischer Anwendungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Definition des Problems • Suche nach Analogien in der Natur • Analyse der Analogien in der Natur • Suche nach Lösungen für das Problem mit den gewonnenen Erkenntnissen aus der Natur
---	--

Tab. 4: Ordne Top-down und Bottom-up den beiden in den Spalten beschriebenen Arbeitsweisen richtig zu.

Hilfe zu A1: Man kann es so sagen: Die Schwerkraft zieht alle Objekte nach unten. Sie würden daher vertikalen Impuls ansammeln und abstürzen, wenn sie nichts dagegen unternehmen. Daher müssen sie diesen Impuls wieder loswerden. Das schaffen sie durch das Rückstoßprinzip: Sie müssen etwas nach unten in Bewegung setzen. Bei Flugzeugen, Helikoptern und Vögeln ist es die Luft, bei einer Rakete der Brennstoff. Durch den dabei entstehenden Rückstoß wird das Ansammeln des Impulses verhindert. Bei Rakete und Helikopter ist das sofort ersichtlich (Abb. 1 und 2). Für ruhende Tragflächen von Flugzeugen oder von gleitenden Vögeln bedeutet das, dass diese die Luft nach unten ablenken *müssen*. Die Luftströmung muss daher nach der Tragfläche nach unten zeigen, auch wenn das oft in Abbildungen falsch dargestellt ist. Wäre das nicht der Fall, könnten Flugzeuge und Vögel nicht fliegen.

Hilfe zu A2: Damit die Tragfläche einen Auftrieb bekommt (= Impuls nach oben), muss die vorbeiströmende Luft einen Impuls nach unten bekommen. Das verlangt der Impulserhaltungssatz (siehe A1). Daher muss die Luft hinter der Tragfläche nach unten strömen, wie man sehr schön in der Simulation in Abb. 4 sieht.

Hilfe zu A3: Über den Tragflächen herrscht ein Unterdruck. Deshalb kommt es zu einer Expansion der Luft. Weil diese sehr schnell erfolgt, ist sie adiabatisch, und die Luft kühlt sich ab. Unter bestimmten Umständen kann diese Abkühlung so stark sein, dass es zum Kondensieren des Wasserdampfs in der Luft kommt und somit zur Nebelbildung.

Hilfe zu A4: Wenn der Anstellwinkel etwa -7° beträgt, die Tragfläche also leicht nach unten zeigt, ist der Auftrieb null. Bei $+15^\circ$ ist der Auftrieb mehr als doppelt so groß wie in der Normalposition (0°). Allerdings wächst dann auch der Luftwiderstand empfindlich an. Für Flugzeuge muss daher ein Kompromiss gefunden werden. Beim Landeanflug wird gewissermaßen der Anstellwinkel der Tragfläche erhöht (Abb. 7). Deshalb hat das Flugzeug bei der geringen Landegeschwindigkeit trotzdem noch genügend Auftrieb.

Hilfe zu A5: Absolut gesehen könnte die globale CO_2 -Emission um $(650 \text{ Mio. t}) \cdot 0,04 = 26$ Millionen Tonnen reduziert werden. Das klingt natürlich nach sehr viel, in Prozent ausgedrückt würde dadurch die globale CO_2 -Emission aber nur um $2\% \cdot 0,04 = 0,08\%$ gesenkt werden. Die Österreicher produzieren pro Kopf jedes Jahr etwa 8 t CO_2 . Bei $8,5$ Millionen Einwohnern macht das immerhin rund 68 Mio. t jedes Jahr. Durch den flächendeckenden Einsatz von Winglets könnte also pro Jahr weltweit etwa $2,5$ -mal so viel CO_2 eingespart werden wie Österreich produziert. So gesehen ist das auch wieder nicht schlecht.

Hilfe zu A6: Die Flügel sind nicht starr. Sie können mit den inneren und äußeren Flügelteilen unterschiedliche Anstellwinkel erzeugen. Der Flügelinnenteil ist vorwiegend für den Auftrieb verantwortlich. Der Außenteil liefert in der Abwärtsphase den Vortrieb, weil dann die Gesamtkraft nach vorne zeigt. Bei der Aufwärtsbewegung kommt es zwar zu einer abbremsenden Kraft (Gesamtkraft zeigt gegen die Flugrichtung). Diese ist aber kleiner als bei der Abwärtsbewegung. Deshalb bleibt eine Nettokraft übrig, die den Vogel nach vorne oben beschleunigt.

Hilfe zu A7: Es ist ja angeblich ziemlich viel ein Spin-Off der Weltraumfahrt. Richtig ist, dass Klettverschlüsse in der Raumfahrt eine große Rolle spielen, weil man etwa mit dicken Handschuhen eines Raumanzuges nur schwer Maschen binden kann. Tatsache ist aber, dass der Klettverschluss vom Schweizer Ingenieur GEORGE DE MESTRAL bereits 1948 erfunden wurde, also lange vor der Weltraumfahrt.

Hilfe zu A8: Tatsächlich ist der Reibungskoeffizient für die meisten Materialien kleiner als 1 (siehe Tab. 1). Deshalb wird auch manchmal behauptet, dass μ immer kleiner als 1 sein muss. Das stimmt aber nicht. Es gibt durchaus Materialien bzw. Materialkombinationen, bei denen $\mu > 1$ werden kann. Es gilt $F_R = \mu \cdot F_N$ und daher $\mu = F_R / F_N$. Ein $\mu > 1$ bedeutet lediglich, dass die Reibungskraft größer als die Gewichtskraft

kraft ist, dass es also salopp gesagt schwerer ist den Gegenstand zu schieben als ihn zu heben, und das ist bei einer Fixierung mit Klettverschluss durchaus der Fall.

Hilfe zu A9 a:

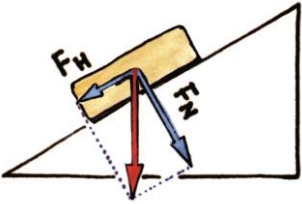


Abb. 19 (Grafik: Janosch Slama und Martin Apolin)

Hilfe zu A9 b: Wenn der Körper gerade noch nicht rutscht, muss F_H kleiner oder gleich F_R sein, es muss also $F_H \leq F_R$ gelten. Zusammen mit dem Reibungsgesetz $F_R = \mu \cdot F_N$ (siehe A8) ergibt das $F_H \leq F_R = \mu \cdot F_N$ und weiter $F_H \leq \mu \cdot F_N$ sowie $\mu \geq \frac{F_H}{F_N} = \tan \alpha$ (siehe Abb. 20). Man kann daher auch schreiben $\alpha \leq \arctan \mu$. Bei einem Reibungskoeffizienten von 1 kann die Steigung daher gerade noch 45° betragen.

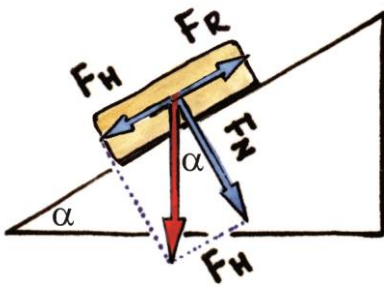


Abb. 20: Es gilt $F_H/F_N = \tan \alpha$ (Grafik: Janosch Slama und Martin Apolin).

Hilfe zu A9 c: Aus $\mu \geq \tan \alpha$ folgt bei einem Winkel von 90° für den Reibungskoeffizienten der Wert unendlich. Das bedeutet natürlich *nicht*, dass man eine unendlich große Kraft zum Ablösen benötigt. Der Reibungskoeffizient $\mu = F_N/F_R$ gibt ja das Verhältnis von Normalkraft zu Reibungskraft an, und im Falle einer senkrechten Wand verschwindet die Reibungskraft. Die Angabe des Reibungskoeffizienten im Falle einer mechanischen Verbindung zwischen zwei Flächen ist daher nicht sonderlich sinnvoll. Das sieht man daran, dass bei Winkeln über 90° , also einem Überhang, $\tan \alpha$ negative Werte annimmt und somit auch der Reibungskoeffizient. Und was soll man sich darunter vorstellen?

Hilfe zu A10: In einem Wassermolekül teilt sich das Sauerstoffatom mit jedem der beiden Wasserstoffatome je ein Elektron. Weil das Sauerstoffatom die Elektronen stärker anzieht, ist die Ladungsverteilung im Molekül nicht gleichmäßig - und zwar dauerhaft. Man spricht von einem polaren Molekül. Weil ungleichnamige Ladungen einander anziehen,

kann es zwischen Wasserstoff und Sauerstoff zweier verschiedener Atome zu einer Bindung kommen. Das nennt man eine Wasserstoffbrücke. Diese hat daher nichts mit der Van-der-Waals-Kraft zu tun, weil diese ja bei unpolaren Molekülen bzw. Atomen durch spontane und äußerst kurzlebige Asymmetrien zu Stande kommt.

Außerdem ist im Zitat von Wasserstoffatomen die Rede und nicht von Wassermolekülen. In Summe sollte man dieser Aussage also nicht allzu sehr trauen.

Hilfe zu A11 a: Geckos können einige hundert Gramm schwer werden. Nehmen wir einen fetten Gecko mit 500 g (0,5 kg). Dieser wird mit einer Gewichtskraft von etwa 5 N nach unten gezogen. Diese Gewichtskraft muss durch die Summe der Van-der-Waals-Kräfte zwischen Zehen und Glasdecke ausgeglichen werden. 10 Nanonewton sind 10^{-8} N. In Summe muss der Gecko also mindestens $5 \text{ N}/10^{-8} \text{ N} = 5 \cdot 10^8$ Härchen besitzen. Tatsächlich sind es sogar rund eine Milliarde Härchen.

Hilfe zu A11b: Auf den Zehen befinden sich in Summe etwa 10^9 Härchen mit einem Durchmesser von 200 nm (= $200 \cdot 10^{-9}$ m oder $2 \cdot 10^{-7}$ m). Nimm vereinfacht an, sie haben eine quadratische Fläche. Die Fläche eines Härchens hat daher $4 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$. Bei einer Milliarde Härchen macht das eine Fläche von $4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$. Ein Quadratmeter hat 10^4 cm^2 . Die gesamte "Härchenfläche" beträgt daher $0,4 \text{ cm}^2$, und so groß muss auch die Gesamtfußfläche *mindestens* sein. Weil die Härchen natürlich nicht lückenlos aneinander anschließen (siehe Abb. 13), ergibt sich ein realistischer Wert von einigen cm^2 .

Hilfe zu A12: Damit dieselben Strömungsverhältnisse vorliegen, muss die Reynoldszahl gleich groß sein. Durch Veränderung der Größe der Schuppen und Verlangsamung der Strömungsgeschwindigkeit verändert sich der Zähler um den Faktor $v \cdot L = 1/10 \cdot 500 = 50$. Um denselben Wert muss sich der Nenner verändern, also die kinematische Zähigkeit ν , damit wieder dieselben Strömungsverhältnisse vorliegen. Die Zähigkeit der Flüssigkeit muss also um den Faktor 50 größer sein als die von Wasser.

Hilfe zu A13 a: zu Zitat 1) Die "Magie" des Schwimmanzugs lässt sich sehr leicht über den geringeren Wasserwiderstand erklären und ist somit keine Hexerei!

zu Zitat 2) Der Widerstand hat die Einheit einer Kraft und nicht die einer Masse. Die Angaben müssen daher in Newton erfolgen. Gemeint sind somit wohl $11 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \approx 108 \text{ N}$ und bis $12 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \approx 118 \text{ N}$.

Hilfe zu A13 b: Die Fläche eines Kreises mit einem Radius von $12,5 \text{ cm}$ ($0,125 \text{ m}$) beträgt $A = r^2 \pi \approx 0,05 \text{ m}^2$. Das entspricht der Anströmfläche bzw. Schattenfläche A . 145 km/h entsprechen $145/3,6 \text{ m/s} \approx 40,3 \text{ m/s}$. Mit einem ρ von $1,2 \text{ kg/m}^3$ (Tab. 2) und einem c_W -Wert von $0,45$ für eine Kugel (Tab. 3), erhält man für die Luftwiderstandskraft $21,5 \text{ N}$. Damit ist man um rund einen Faktor 5 von den 108 bis 118 N (siehe A13 a) entfernt, und das, obwohl wir einen Riesenkopf angenommen haben. Nur wenn der Kopf die Form einer langen Rechteckplatte hätte, käme man etwa auf das richtige Ergebnis. Weil $F_L \sim v^2$ ist, müsste man die Geschwindigkeit um einen Faktor $2,2$ auf etwa 320 km/h erhöhen, damit F_L um den Faktor 5 steigt (weil $2,2^2 \approx 5$ ist).

Hilfe zu A14: Eine Möglichkeit ist: "Unter Adhäsion versteht man das Aneinanderhaften von verschiedenartigen Stoffen und Körpern aufgrund der Molekularkräfte." Siehe dazu auch A15!

Hilfe zu A15: Der Begriff hydrophob stammt aus dem Altgriechischen ($\text{hýdor} = \text{Wasser}$; $\text{phóbos} = \text{Furcht}$) und bedeutet somit wörtlich „wasserfürchtend“. Hydrophobe Stoffe sind also wasserabweisend. Wenn sich Wasser auf einem hydrophoben Stoff befindet, etwa einem Lotus-Blatt, dann ist die Adhäsion zwischen dem Tropfen und dem Blatt sehr gering. Dadurch hat der Tropfen beinahe Kugelform, kann wieder einfach vom Blatt abperlen und dabei den Schmutz wegsülen.

Hilfe zu A16: Adhäsion bezeichnet ganz allgemein den Zusammenhalt zwischen Molekülen zweier verschiedener Stoffe. Obwohl Adhäsion ein sehr alltäglicher Effekt ist, ist ironischer Weise deren Ursache nicht völlig geklärt und es gibt unterschiedliche Einteilungsmodelle. Die Van-der-Waals-Kraft wirkt nur zwischen unpolaren Molekülen und ist nur einer von mehreren Mechanismen der Adhäsion. Es gibt auch elektrostatische Kräfte zwischen polaren Molekülen und zwischen polaren und unpolaren Molekülen. Weiters gibt es Adhäsion durch mechanische Verankerungen. Und dann gibt es noch Adhäsion, bei der die sich berührenden Oberflächen eine chemische Verbindung eingehen.

Hilfe zu A17: Räder konnten in der Natur nicht entwickelt werden, weil biologische Gewebe auf die ständige Zufuhr von Nährstoffen und die Abfuhr von Abfällen angewiesen sind. Dadurch wird die kontinuierliche „Reparatur“ und folglich eine lange Lebensdauer von Lebewesen ermöglicht. Ein sich drehendes Rad auf einer Achse kann nicht mit einem Transportsystem zu einem Lebewesen verbunden werden, vor allem nicht mit einem Blutkreislauf und mit dem Herzen. Für die Fortbewegung in der Natur sind Räder zudem in den allermeisten Ökosystemen gar nicht brauchbar, es sei denn, die Natur hätte auch noch Straßen ohne Unebenheiten und ohne große Steigungen erfunden.

Hilfe zu A18 a: Die Bälkchen richten sich automatisch in die Richtung aus, in der die Belastungen besonders groß sind. Sie sparen Material und machen die Knochen leichter.

Hilfe zu A18 b: Damit die Bälkchen wissen, in welche Richtung sie sich ausrichten müssen, müssen sie belastet werden. Fällt die Belastung weg, kommen die Bälkchen salopp gesagt in Unordnung und der Knochen verliert an Festigkeit. Außerdem kommt es zusätzlich zu Knochenschwund.

Hilfe zu A19: Es geht um sogenannte "Sollbruchstellen", also Stellen in einer Struktur, die im Falle einer Belastung brechen sollen. Bei der Schokolade sind es die dünneren Bereiche zwischen den Rippen. Die Schokolade bricht also nicht irgendwie, sondern quasi geplant. Bei der Zauneidechse befinden sich solche Sollbruchstellen im Schwanz, und sie kann einen Teil davon bei Gefahr abwerfen, damit der Feind von dem zuckenden Anhängsel abgelenkt wird. Später bildet sich der Schwanz neu aus; allerdings bleibt er dann kürzer und schmaler. Die Schokolade wächst leider nicht mehr nach.

Hilfe zu A20:

Bottom-up	Top-Down
<ul style="list-style-type: none"> • Biologische Grundlagenforschung • Erkennen und Beschreiben eines zu Grunde liegenden Prinzips • Abstraktion dieses Prinzips (Loslösung vom biologischen Vorbild) • Suche nach möglichen technischen Anwendungen • Entwicklung technischer Anwendungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Definition des Problems • Suche nach Analogien in der Natur • Analyse der Analogien in der Natur • Suche nach Lösungen für das Problem mit den gewonnenen Erkenntnissen aus der Natur
Der Klettverschluss wurde nach dem Vorbild der Klettfrüchte entwickelt.	Flugzeug: Otto Lilienthal und die Gebrüder Wright beobachteten den Flug großer Vögel und optimierten damit ih-

	re Prototypen.
--	----------------

Tab. 5