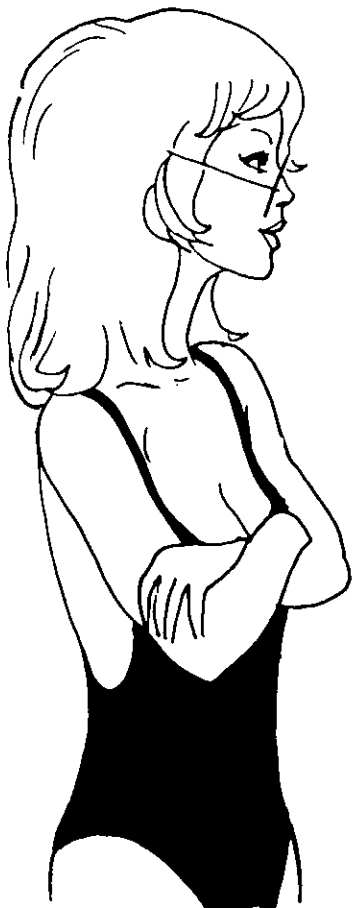


**JEAN-PIERRE PETIT**

**DIE ABENTEUER DES ANSELM WUßTEGERN**

**WARUM  
KANN ICH NICHT  
FLIEGEN?**



# Wissen ohne Grenzen

**Gemeinnützige Vereinigung, die 2005 gegründet wurde und von zwei französischen Wissenschaftlern geleitet wird. Ziel: Verbreitung wissenschaftlicher Erkenntnisse mit Hilfe des Bandes, das durch kostenlos herunterladbare PDFs gezogen wird. Im Jahr 2020: 565 Übersetzungen in 40 Sprachen wurden so erreicht. Mit mehr als 500.000 Downloads.**



**Jean-Pierre Petit**

**Gilles d'Agostini**

**Die Vereinigung ist vollkommen freiwillig. Das Geld wird vollständig den Übersetzern gespendet.**

**Um eine Spende zu tätigen, verwenden Sie die PayPal-Schaltfläche auf der Startseite:**

<http://www.savoir-sans-frontieres.com>



Die Vereinigung « Wissen ohne Grenzen », gegründet und unter dem Vorsitz von Professor Jean-Pierre Petit, Astrophysiker, hat zum Ziel, wissenschaftliches und technisches Wissen in der größtmöglichen Zahl von Ländern und Sprachen zu verbreiten. Zu diesem Zweck hat Professor Jean-Pierre Petit sein gesamtes populärwissenschaftliches Werk aus dreissig Jahren, und im besonderen die illustrierten Alben, frei zugänglich gemacht. Dementsprechend ist ein jeder frei, die vorliegende Datei zu vervielfältigen, entweder in digitaler Form oder in Form gedruckter Kopien und sie in Bibliotheken oder im Rahmen von Schule, Universität oder Vereinen zu verbreiten, deren Ziel die gleichen sind wie von « Wissen ohne Grenzen », unter der Bedingung, daraus keinen Profit zu erzielen und ohne dass ihre Verbreitung eine politische, sektiererische oder religiöse Konnotation beinhaltet. Diese Dateien im Format pdf können auch ins Computernetzwerk von Schul- oder Universitätsbibliotheken gestellt werden.



Jean-Pierre Petit plant zahlreiche weitere Werke, zugänglich für ein noch größeres Publikum. Einige werden selbst von Analphabeten gelesen werden können, dadurch, daß die Textepartien "zu sprechen beginnen" sobald ein Klick auf sie erfolgt. Diese Werke werden also als Stütze zur Alphabetisierung verwendet werden können. Andere Alben werden « zweisprachig » sein, indem man durch einen einfachen Klick von einer Sprache zur anderen wechseln kann, nachdem die Sprachkombination zuvor gewählt wurde. So entsteht eine neue Stütze zum Erlernen von Fremdsprachen.

Jean-Pierre Petit ist 1937 geboren. Er hat seine berufliche Laufbahn in der französischen Wissenschaft gemacht. Er ist Plasmaphysiker gewesen ( plasma physicist ), hat ein Informatikzentrum geleitet, Programme entwickelt, hunderte von Artikeln der unterschiedlichsten Wissensgebiete in wissenschaftlichen Zeitschriften veröffentlicht, von der Mechanik der Flüssigkeiten bis zur theoretischen Kosmologie reichend. Er hat ungefähr dreissig Werke veröffentlicht, die in eine Vielzahl von Sprachen übersetzt wurden.

Kontakt zu « Wissen ohne Grenzen » kann über die Website <http://www.savoir-sans-frontieres.com> aufgenommen werden.

# PROLOG:

Eines Morgens erwachte Anselm in sehr schlechter Laune.



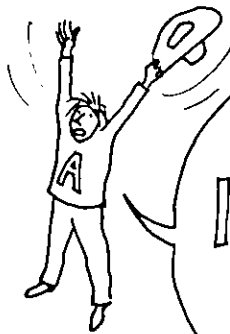
Ausem fühlte sich traurig und leer. Die Welt war öde wie nie zuvor. Die Tage glichen einander wie die Regentropfen.



Max!  
Wo ist Max?



Der ist da oben.  
Was hat der für  
ein Glück!



**MAX,  
ICH WILL AUCH  
FLIEGEN!**



Max, Du mußt mir das Fliegen beibringen. Du wirst schon einen Weg finden. Ich habe es satt, auf diesem Planeten herumzukriechen.

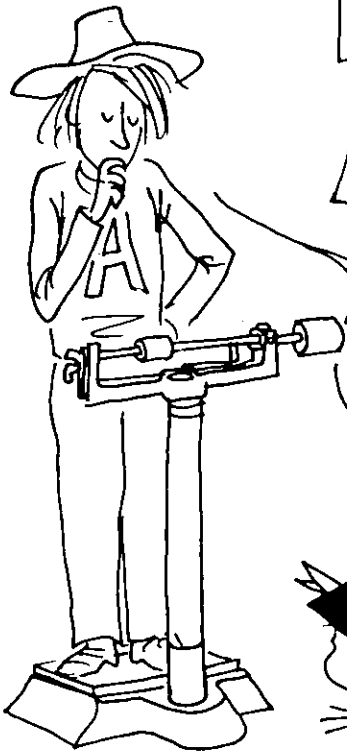


Das muß die Luft sein, die auf meinen Schultern lastet.



Im Gegenteil! Nach Archimedes gibt sie Dir einen Auftrieb und vermindert Dein Gewicht um 80 Gramm.

# ES WAR EINMAL EIN ARCHIMEDES

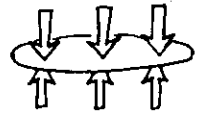


Du meinst, daß die Waage wegen des archimedischen Prinzips nicht mein wahres Gewicht zeigt?

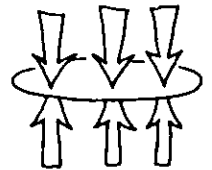
Genau! In Wirklichkeit wiegst Du 80 Gramm mehr.



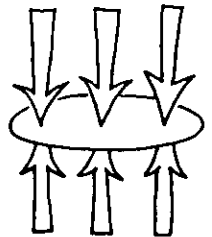
Das archimedische Prinzip... davon redet man und redet, ... aber was ist das eigentlich?

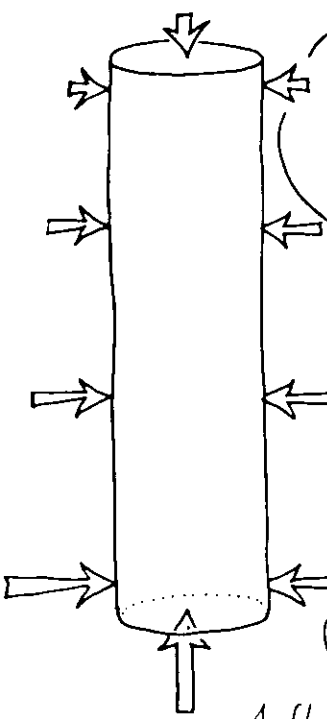


Kräfte, die in einem Fluid (d.h. in einem Gas oder in einer Flüssigkeit) auf eine Scheibe wirken:



Stell' Dir eine Scheibe vor, die in der Luft schwebt. Die Luftsäule über ihr drückt auf ihre Oberseite. Je höher die Luftsäule ist, umso größer ist die Kraft. Wenn die Scheibe aber unendlich dünn ist, wirkt auf ihre Unterseite eine gleichgroße, entgegengesetzt gerichtete Kraft, und die Summe der Kräfte ist Null.





Jetzt stell Dir statt der Scheibe einen Zylinder vor. Die Kraft auf seine Unterseite ist größer als auf die Oberseite. Die Differenz entspricht dem Gewicht eines gleich großen Zylinders aus Luft. Die seitlich wirkenden Kräfte heben sich gegenseitig auf.

$\rightarrow + \leftarrow = \text{Null}$



Aber  
 $\uparrow + \downarrow = \text{Auftriebskraft}$   
 $= \text{Gewicht des verdrängten Luftvolumens}$

Hm, dann sind die 80 Gramm von vorher also das Gewicht der Luft, die ich verdränge?

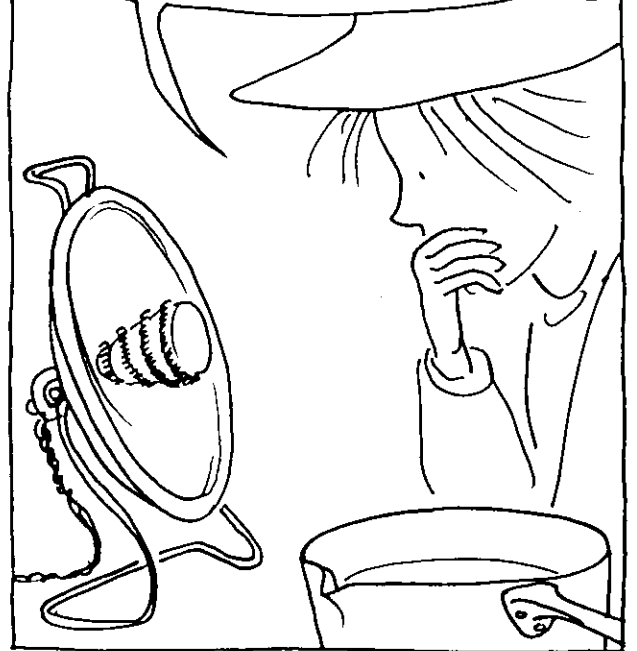
Auftriebskräfte spielen in der Natur eine wichtige Rolle:

# KONVEKTIONS-STRÖMUNGEN

Adelzig Gramm... zum Fliegen ein bisschen wenig.

Ich werde mir Tee kochen.

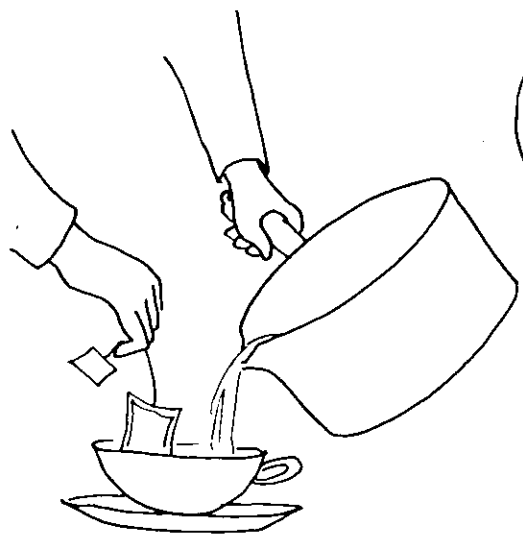
Ob ich es schaffe, das Wasser mit dieser Heizsonne zum Kochen zu bringen?





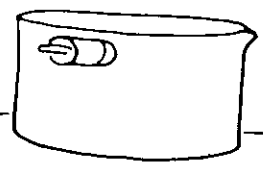


Sie ist äußerst wirkungsvoll. Es kocht schon!

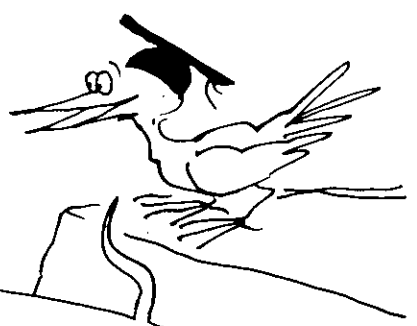


Aber der Tee ist ganz kalt...

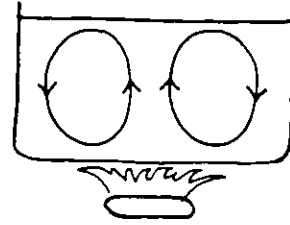
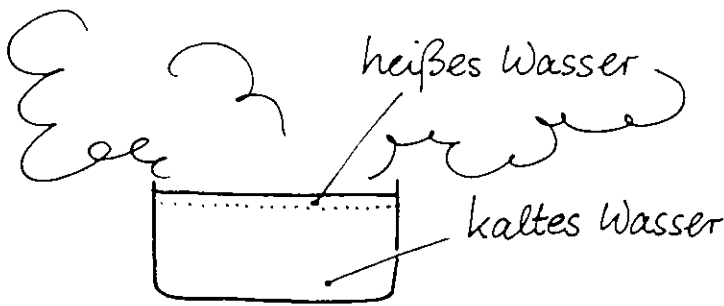
...und das Wasser im Topf auch!



Ich träume doch nicht. Vor einer Minute hat das Wasser doch noch gekocht!

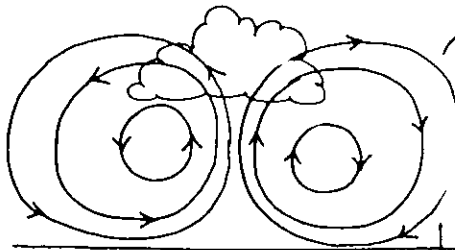
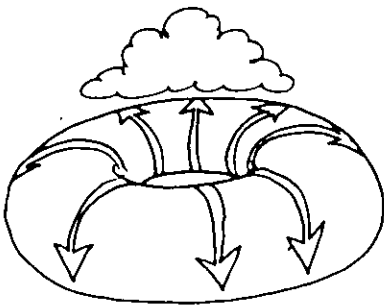


Du hast nur seine Oberfläche erhitzt und eine dünne Schicht von heißem Wasser erzeugt, die auf dem kalten Wasser schwimmt.



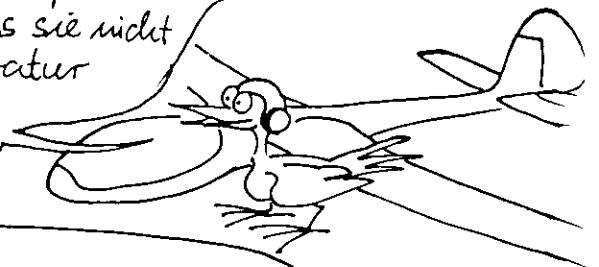
Erwärmt man das Wasser dagegen von unten her, so dehnt es sich dort aus, wird dadurch leichter und steigt nach oben. An der Oberfläche kühlt es sich wieder ab, zieht sich dabei zusammen und sinkt außen nach unten zurück. So entsteht eine KONVEKTIONS-STRÖMUNG.

In der Luft gibt es die gleiche Erscheinung: An einigen Stellen nimmt der Erdboden die Wärme besonders stark auf. Über diesen Stellen wird auch die Luft sehr warm. Je wärmer sie ist, umso mehr Wasser kann sie in Form von Wasserdampf enthalten. Außerdem dehnt sie sich aus und beginnt daher zu steigen. In der Höhe ist es kälter. Der Wasserdampf kondensiert zu Tröpfchen, und es bildet sich eine schöne KUMULUSWOLKE.



WARME ↑ STELLE

Konvektions-Strömungen durchmischen die Luft und gleichen damit die Temperaturunterschiede aus. Wenn es sie nicht gäbe, würde die Temperatur des Erdbodens einige hundert Grad erreichen.



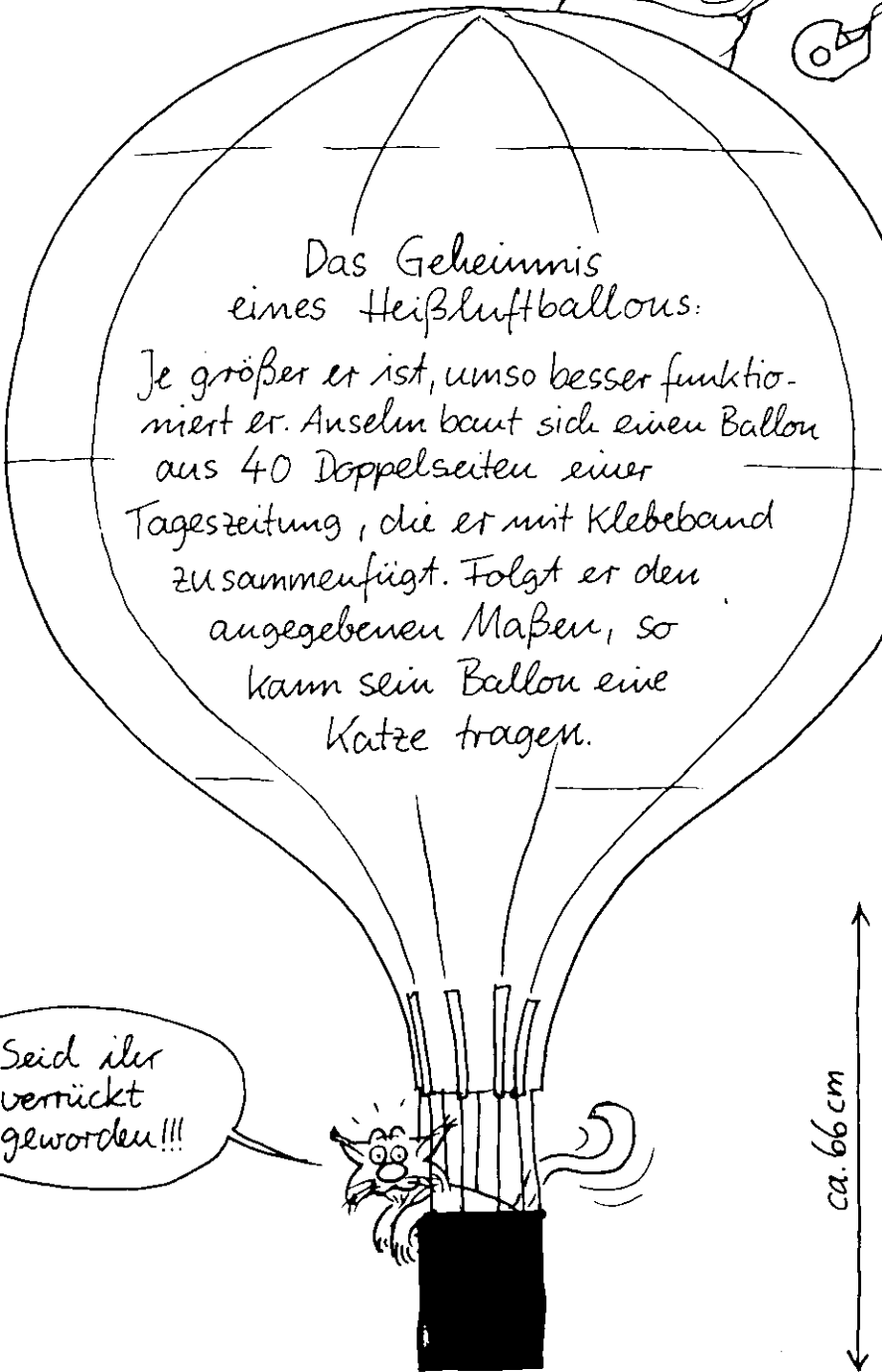
Wenn ich mich an eine warme Luftblase hängen könnte, würde ich vielleicht davonfliegen?

Geben Sie doch mit ihren Füßen acht, verdammt nochmal!





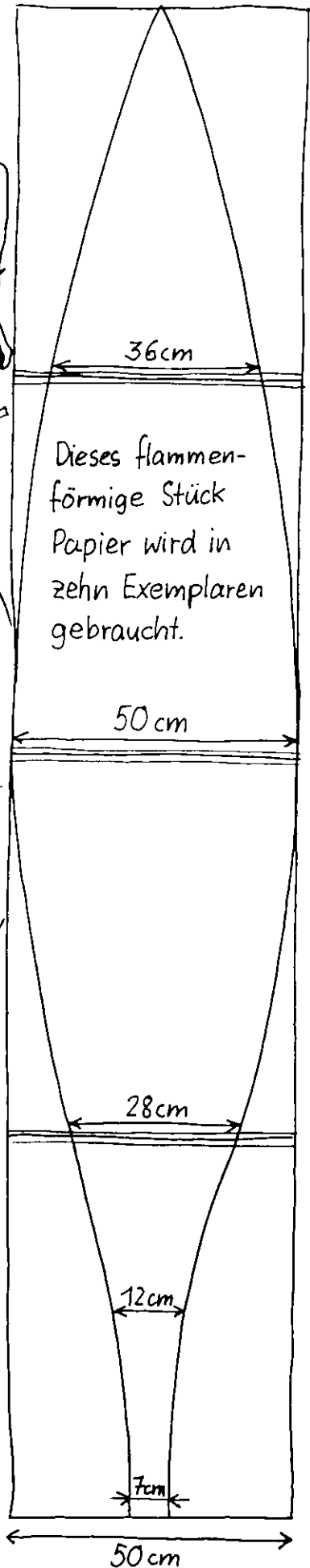
# LEICHTER ALS LUFT



Das Geheimnis  
eines Heißluftballons:

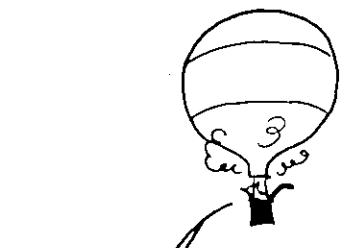
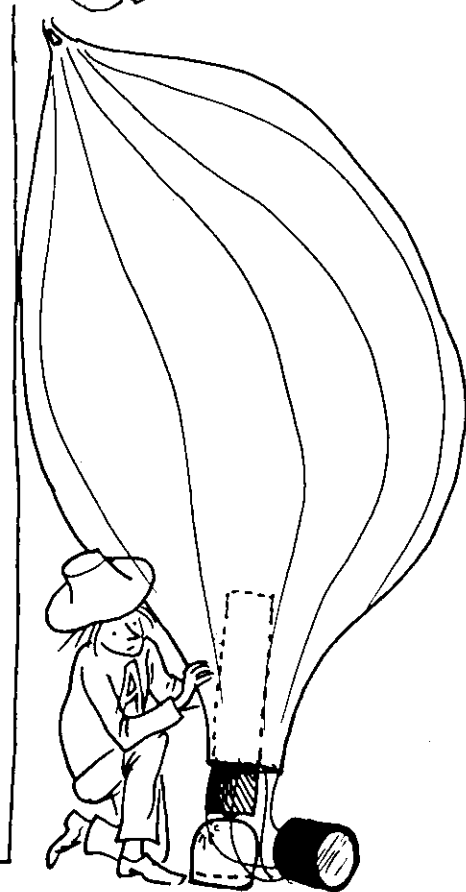
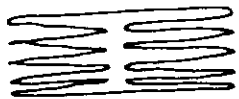
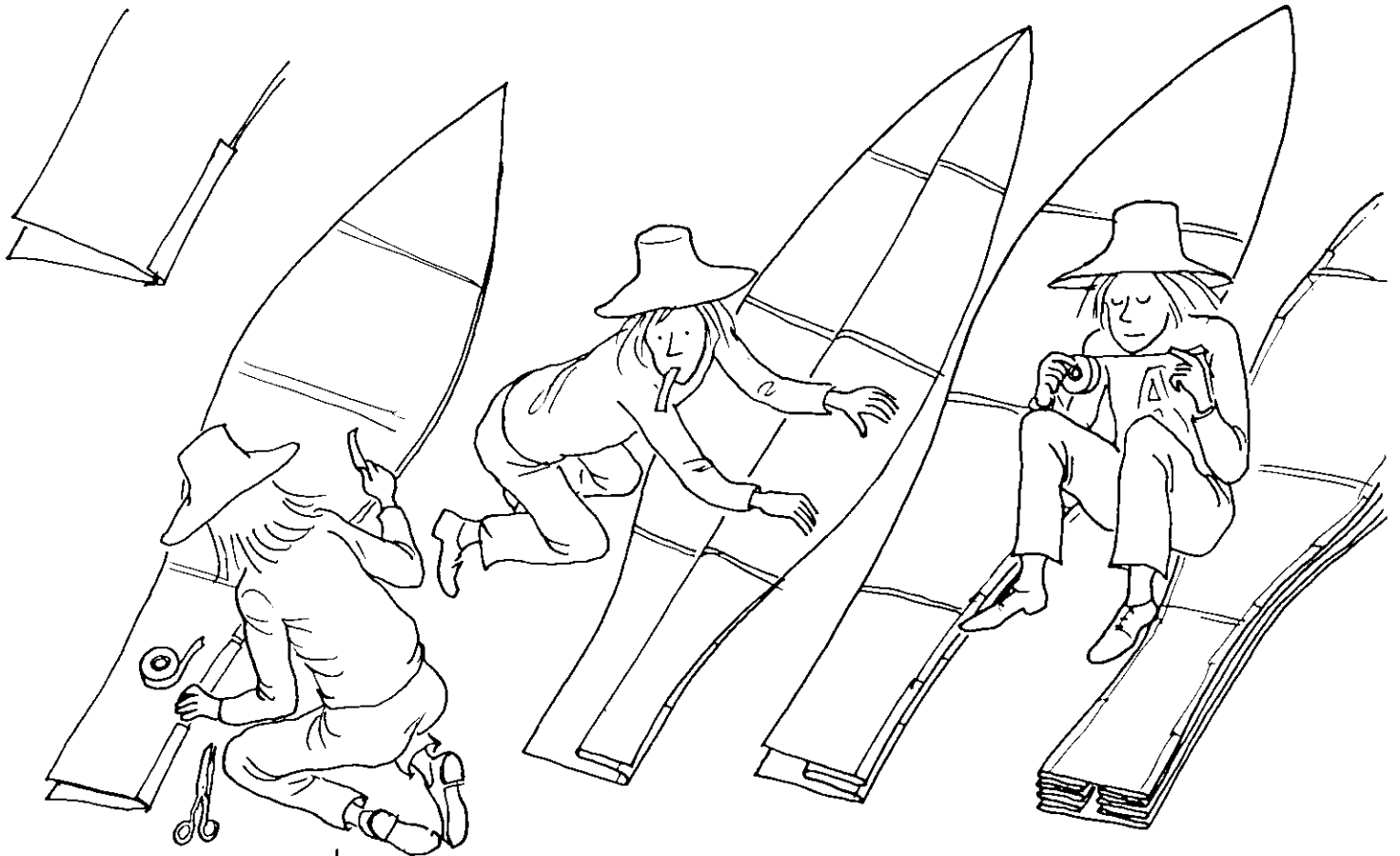
Je größer er ist, umso besser funktioniert er. Anselm baut sich einen Ballon aus 40 Doppelseiten einer Tageszeitung, die er mit Klebeband zusammenfügt. Folgt er den angegebenen Maßen, so kann sein Ballon eine Katze tragen.

Seid ihr verrückt geworden!!!



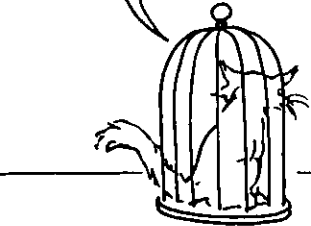
Vier mit Klebeband aneinandergefügte Doppelseiten einer Zeitung

So setzt Anselm seinen Ballon zusammen.

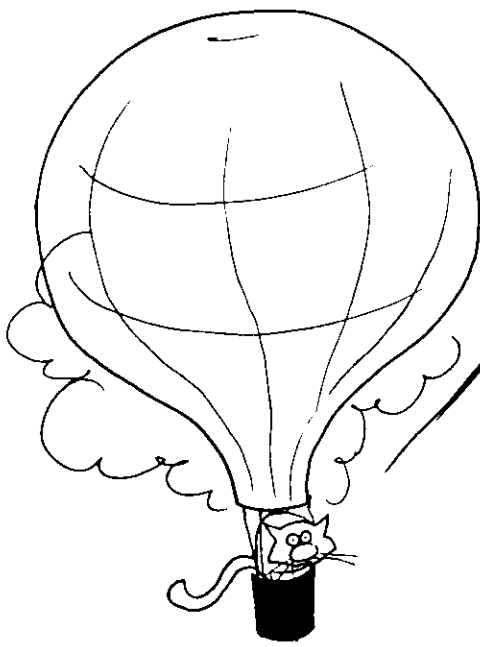


Ich hasse die Physik!

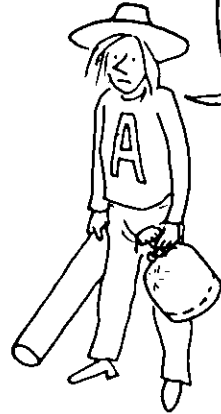
Mörder!



Die Luft im Ballon erwärmt Anselm mit einem Campingbrenner. Dabei schützt er das Papier mit einem Ofenrohr. Wenn die Luft warm genug ist, entfernt er Ofenrohr und Brenner und setzt die Katze in den Korb.



So etwas hat noch keine Katze erlebt.




Papierträume, die mich doch nicht in die Höhe bringen. Und außerdem ist diese Maschine ein Spielball der Winde. Ich kann sie nicht in die Richtung lenken, in die ich fliegen will.

Worin besteht das Geheimnis des Fliegens?




Beeile Dich, ich werde müde!







Nichts zu machen. Es funktioniert nicht.  
Irgendetwas habe ich noch nicht  
verstanden.



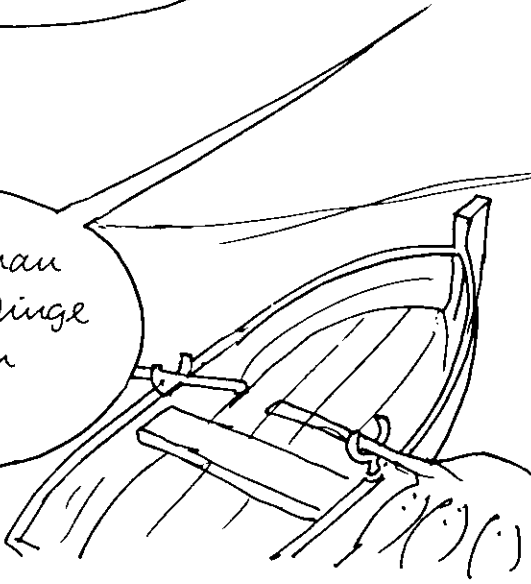
TSSS...  
TSSS...



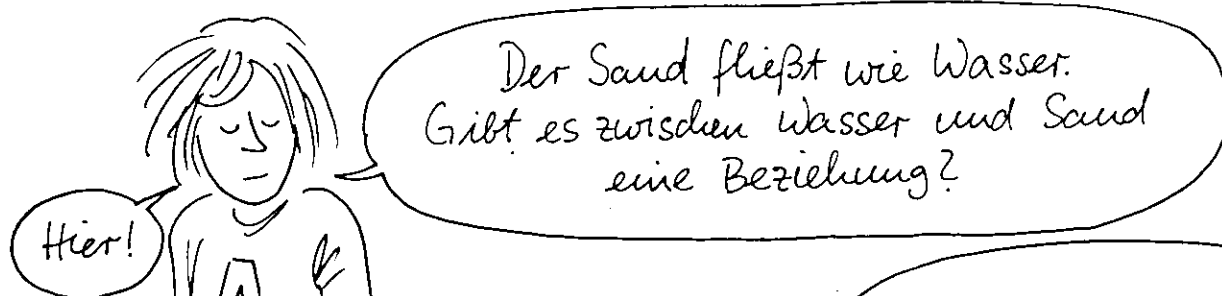
Ansehen, wenn Du fliegen willst,  
mußt Du Dich mit der Hydrodynamik,  
d. h. mit den Eigenschaften der Fluide ver-  
traut machen. So einfach ist das  
Fliegen nicht!



Was ist denn das  
überhaupt, ein Fluid?  
Ist das etwas, was  
fließt?



Ja, das kann man  
so sagen. Aber die Dinge  
sind ein bißchen  
komplizierter.

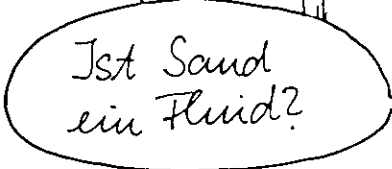


Der Sand fließt wie Wasser.  
Gibt es zwischen Wasser und Sand  
eine Beziehung?

Hier!

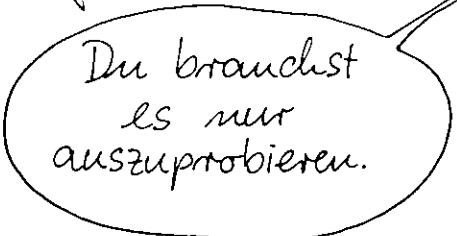


Sophie, gibt es auch  
im Sand einen  
Auftrieb?



Ist Sand  
ein Fluid?

# DIE FLUIDE



Du brauchst  
es nur  
auszuprobieren.



Hier sind zwei Dinge:  
Ein Geldstück und ein Ping-Pong-Ball.  
Wenn der Sand eine Art Flüssigkeit ist,  
müssen Geldstück und Ping-Pong-Ball  
darin nach dem archimedischen Prinzip  
einen Auftrieb erfahren, der dem  
Gewicht des verdrängten Sandes  
entspricht.



Sieh' an,  
Sieh' an...



Ich habe den Ball eingegraben und das Geldstück auf den Sand gelegt. Logischerweise müßte die Münze versinken und der Ball aufsteigen.

Nichts!

Vielleicht ist es nur eine Frage der Zeit?

Ist Ihr Kumpel verrückt geworden?

Der Physik muß man mißtrauen.

Wer hat mir bloß zu diesem Experiment geraten?

Jetzt habe ich genug!

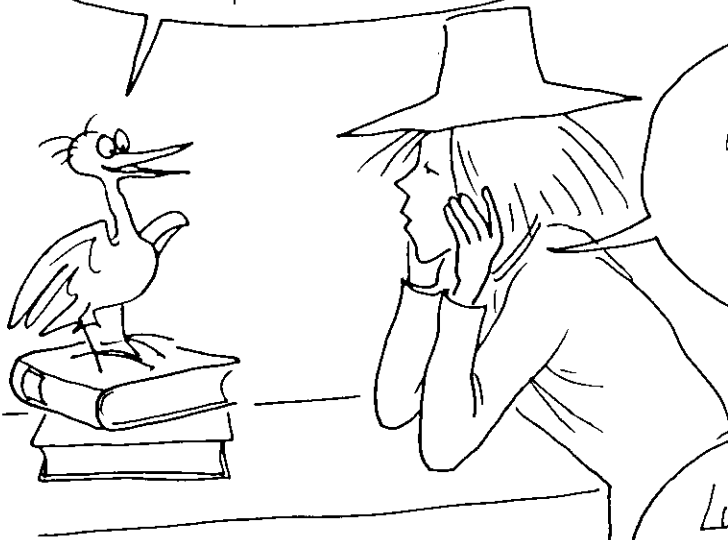


Und die Münze liegt am Boden. Indem Auselin den Kasten rüttelte, gab er den Sandkörnern die Möglichkeit aneinander vorbeizugleiten. Damit wurde der Sand „fluid“.



Sophie sagt, je feiner die Sandkörner sind, umso leichter wird der Sand fluid.

Also ist ein FLUID so etwas wie ein sehr feiner Sand, dessen Körnchen leicht aneinander vorbeizugleiten können?



Sophie hat uns erzählt, daß Lucretius sich im ersten Jahrhundert vor Christus auf diese Art eine Vorstellung von den Atomen gebildet hatte. (de natura rerum)



Sophie weiß immer alles besser.



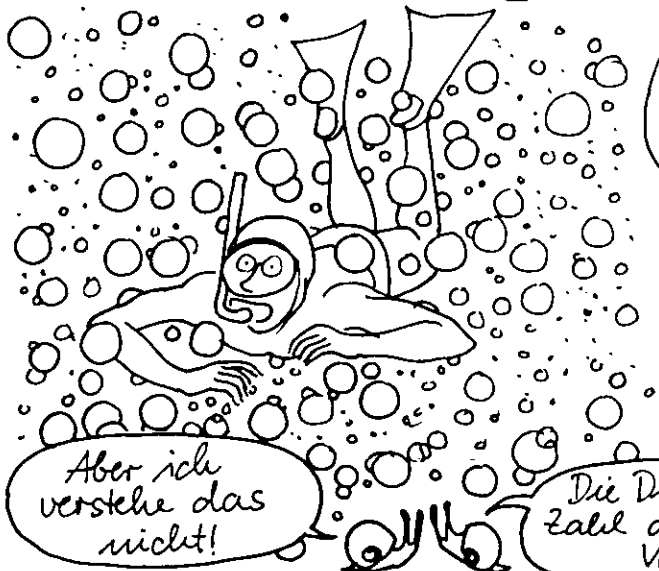
Um ein Fluid zu verstehen, muß man sich zunächst vergegenwärtigen, daß es sich um ein System von Molekülen handelt. Die Moleküle kannst Du Dir als kleine Kugeln vorstellen, die sich ständig bewegen und dabei aneinander stoßen oder aneinander vorbeigleiten. Man könnte von einem Chaos der Moleküle sprechen.

Hinein ins Chaos!



In einem Fingertut voll Luft befinden sich zwanzig Milliarden Milliarden Moleküle. Sie sind so klein, daß man sie selbst mit dem stärksten Mikroskop nicht zu sehen bekommt.

## DIE DICHTEN



Aber ich verstehe das nicht!

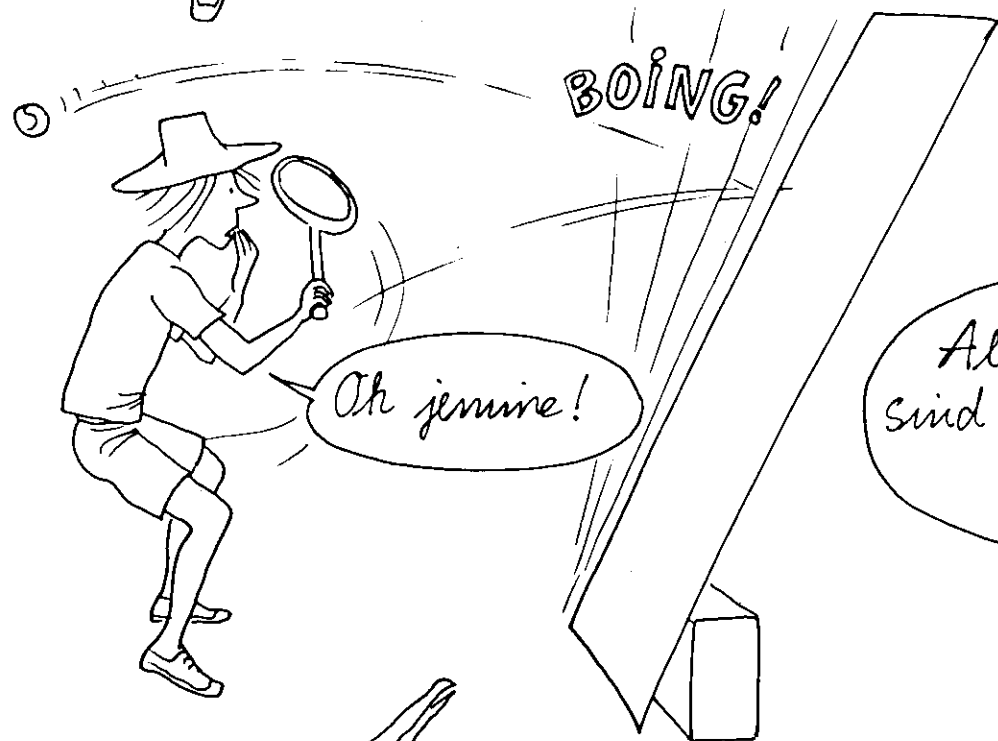
Das Konzept der Dichte ist so anschaulich, daß wir fast vergessen hätten, davon zu reden.

Die Dichte ist ein Maß für die Zahl der Moleküle in einer Volumen-Einheit.

# DER DRUCK:



Die Platte ist genau im Gleichgewicht. Jetzt muß ich nur noch das Werkzeug holen, um sie zu befestigen.



Oh jemine!

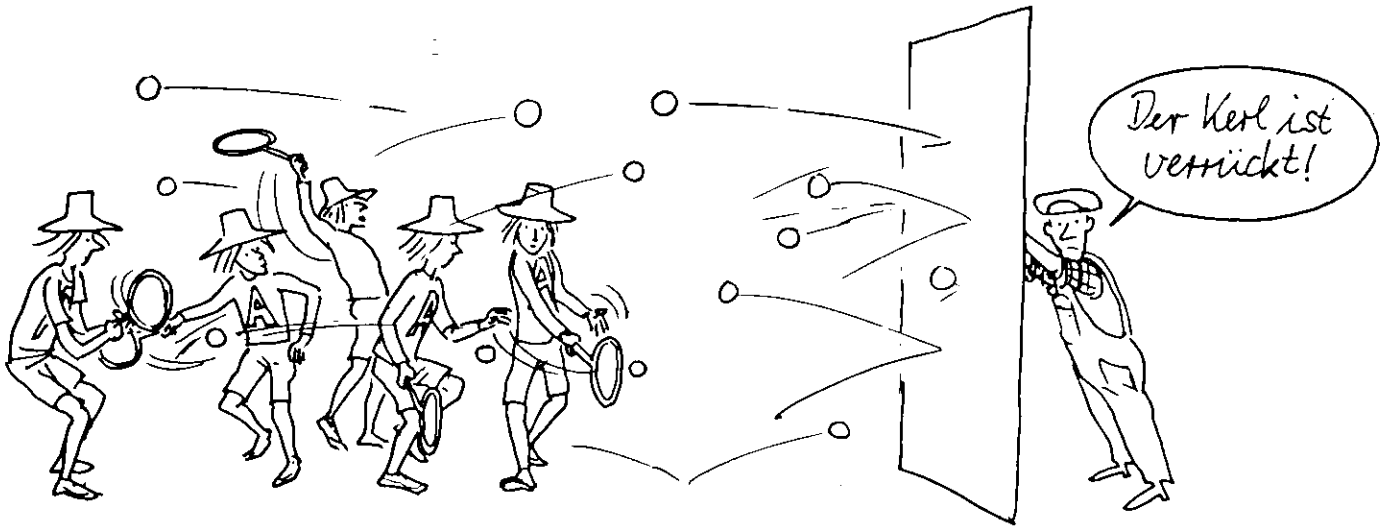
Alle Vögel sind schon da, ...  
♪



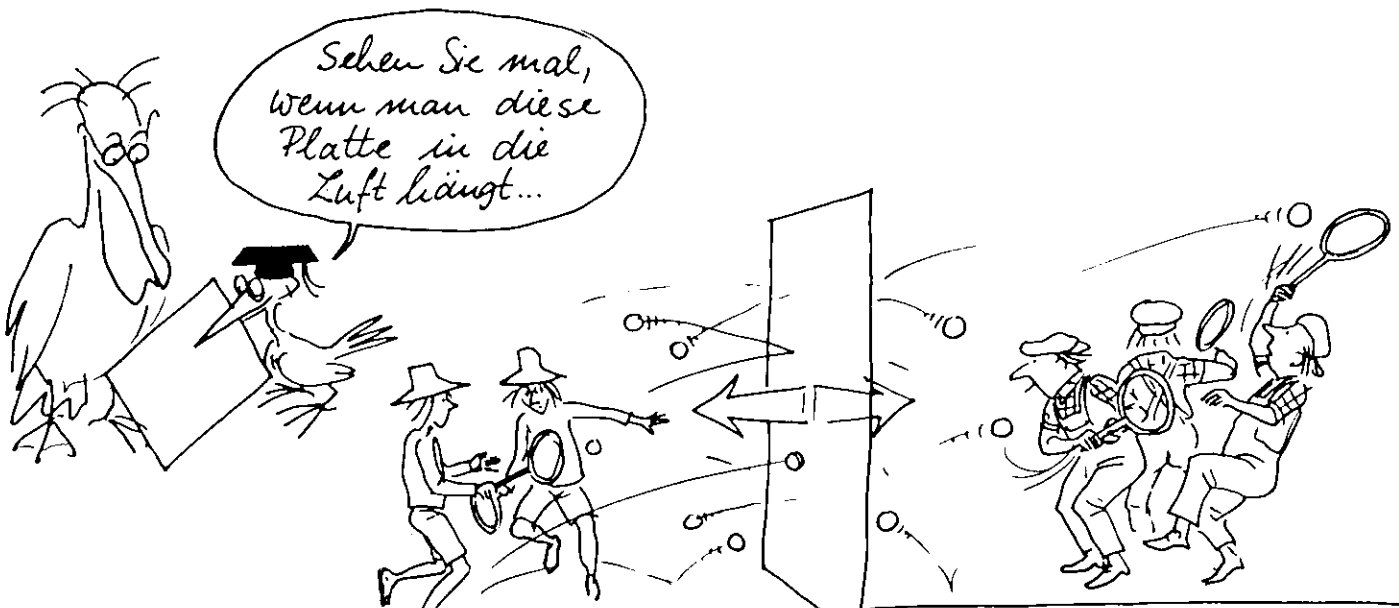
Kannst Du den Unfug verstehen?



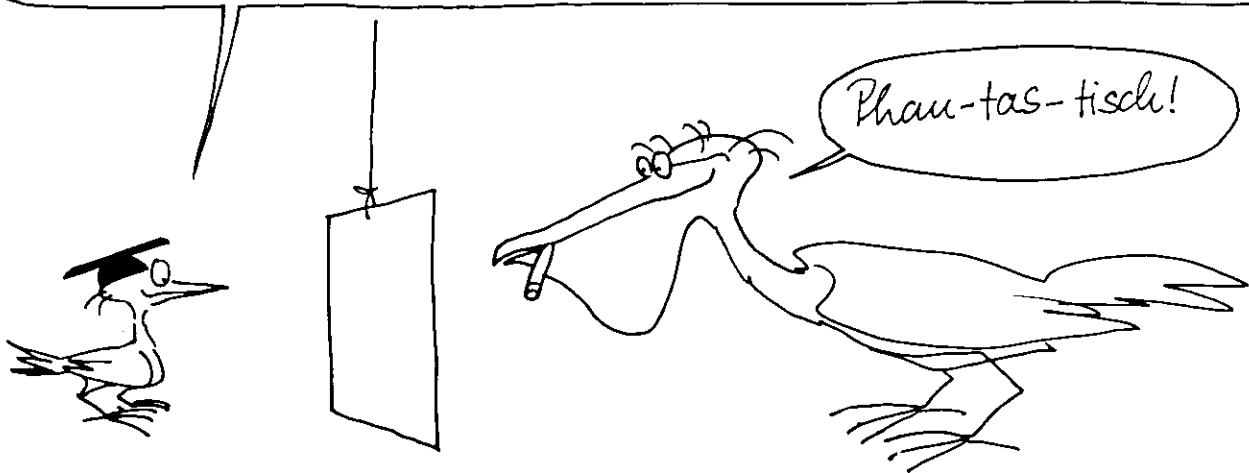
Das kommt noch.



Die unzählbaren Stöße der Moleküle auf eine Wand erzeugen das, was man den DRUCK nennt.

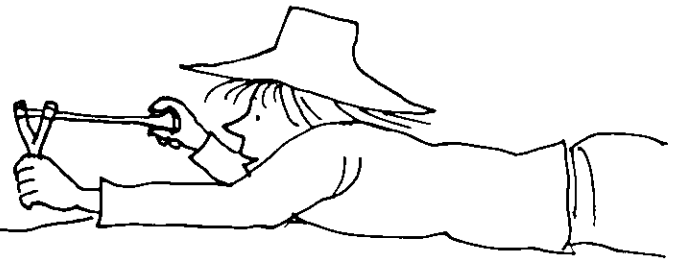


... so bleibt sie ruhig hängen, weil sie im Durchschnitt auf der einen Seite ebenso oft von Molekülen getroffen wird wie auf der anderen.

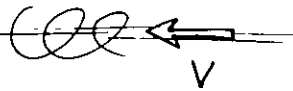
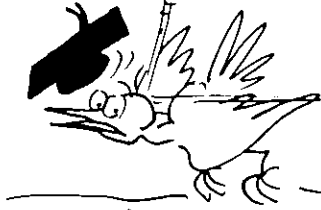


# DIE KINETISCHE ENERGIE:

Ein Objekt der Masse  $m$ ,  
das sich mit der Geschwin-  
digkeit  $V$  bewegt...

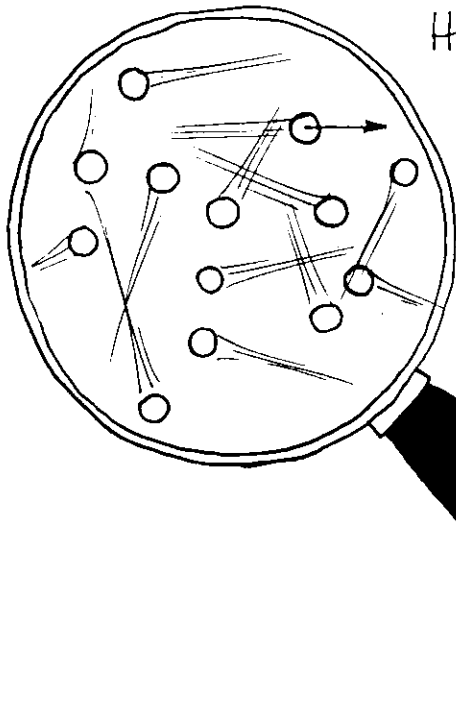


PLOP!



... hat per Definition  
die kinetische Energie  
 $\frac{1}{2} m V^2$

# DIE INNERE ENERGIE:

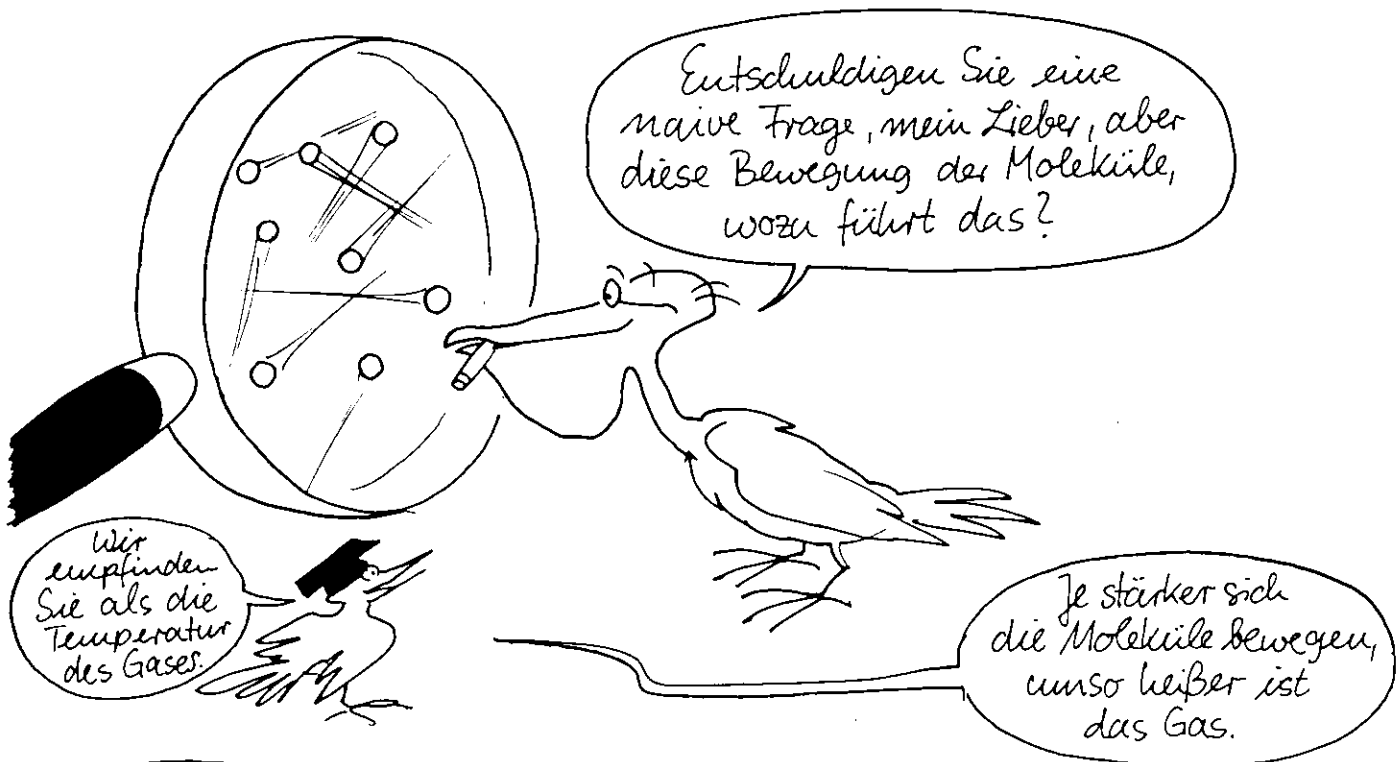


Hier ist ein mit Gas gefüllter Raum. Die in ihm  
enthaltenen Moleküle der Masse  $m$  bewegen sich  
ungeordnet oder (wie man auch sagt) thermisch.  
Ihre durchschnittliche Geschwindigkeit ist  $V$ .

Die innere Energie dieses Systems ist  
einfach die Summe der kinetischen Energien  
aller Moleküle, die das System enthält.

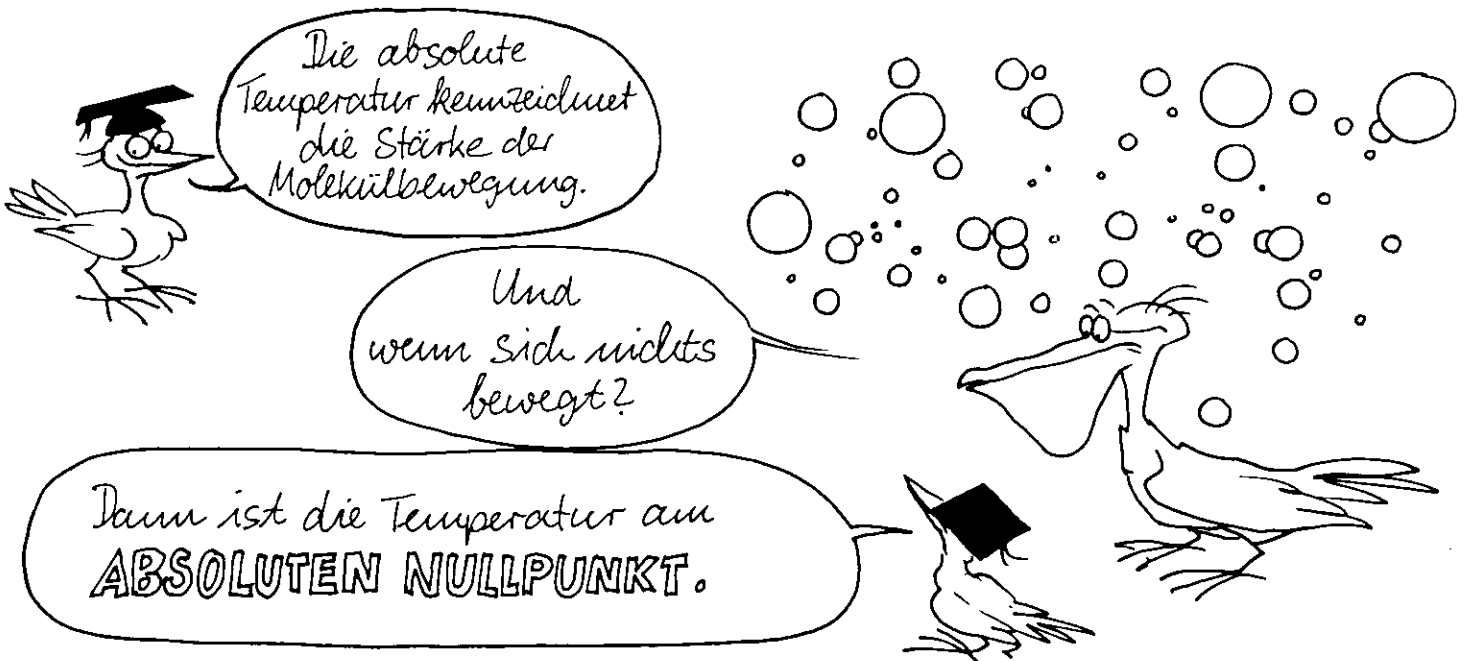


# DIE TEMPERATUR:



Die ABSOLUTE TEMPERATUR eines Gases ist ein Maß für die kinetische Energie der Moleküle dieses Gases.

## Die Direktion

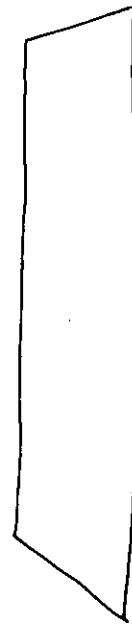


Tiefer kann die Temperatur nicht gehen. Man kann sich nicht weniger bewegen als gar nicht, nicht wahr?

Ohne die Molekülbewegung gibt es keine Stöße auf die Wände, also auch keinen Druck.



Aha, das habe ich verstanden!



Fassen wir zusammen:  
Je mehr Moleküle ein Gas enthält und je stärker sie sich bewegen, umso heißer ist das Gas und umso höher ist sein Druck.



# DIE WÄRME



Ein Objekt, das sich in einem Fluid befindet, ist zahllosen molekularen Stößen ausgesetzt. Auf diese Weise können die Moleküle ihre Energie auf das Objekt übertragen und es erwärmen.

Die Fähigkeit, Wärme zu übertragen, wächst mit der Dichte des Fluids. Wasser leitet die Wärme daher besser als Luft.





Wenn ein Astronaut im Weltraum schwebt, bewegt er sich in äußerst dünner Luft (nur zehn Moleküle pro Kubikzentimeter). Die Stärke der Molekülbewegung entspricht einer Temperatur von  $2500^{\circ}\text{C}$ . Dennoch verbrennt der Astronaut nicht, denn die Luft ist viel zu dünn, als daß die Moleküle viel Energie auf den Astronauten übertragen könnten.

Brrr...  $2500^{\circ}\text{C}$  und ich friere!

Die Temperatur ist hoch, aber der Wärmefluß ist extrem klein.

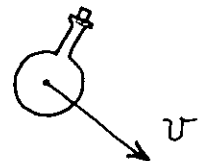
## DIE SCHWERPUNKTSENERGIE EINES GASES:



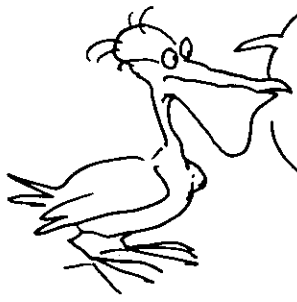
Dieses Glasgefäß enthält ein System von  $N$  Molekülen. Es hat die absolute Temperatur  $T$ .



Anselm wirft das Glasgefäß fort, so daß es sich mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegt. Auch der gemeinsame Schwerpunkt aller Gasmoleküle bewegt sich mit  $v$ .



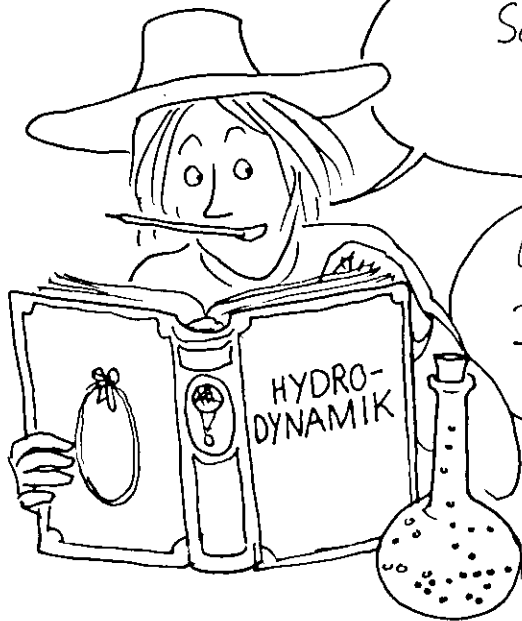
Der Schwerpunktsbewegung entspricht die kinetische Energie  $\frac{1}{2} M v^2$ , wenn man die Masse des Gases im Gefäß mit  $M$  bezeichnet.



Sie meinen, daß es zwei Arten von kinetischer Energie gibt?

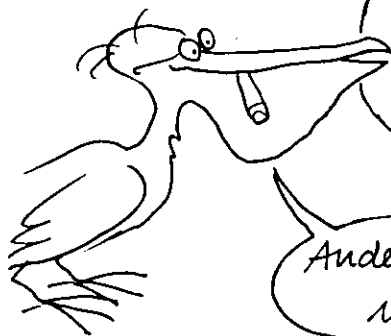


Ja und nein.  
Die Gesamtenergie des Systems der Moleküle im Gefäß ist die Summe aus der kinetischen Energie des Schwerpunkts und der inneren Energie der Moleküle.



Sag mal, die Hydrodynamik ist ja verdammt kompliziert.

Willst Du fliegen?  
Dann lerne zu fliegen!



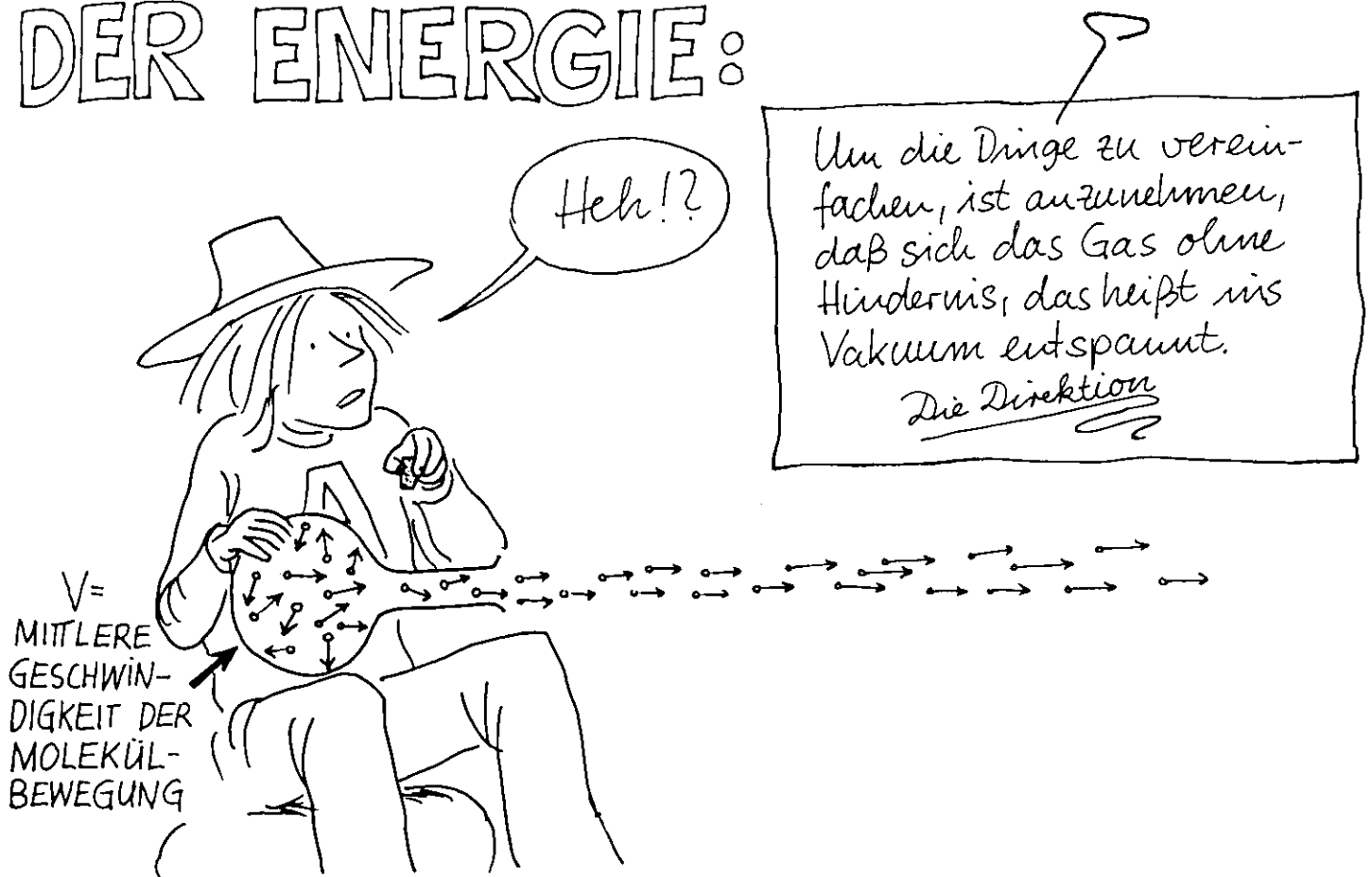
Gut... Das Buch sagt, daß man einen Teil der inneren Energie der Moleküle in kinetische Energie des Schwerpunkts umwandeln kann.

Anders gesagt: man kann Wärme in Bewegung umwandeln.

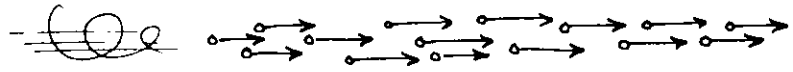
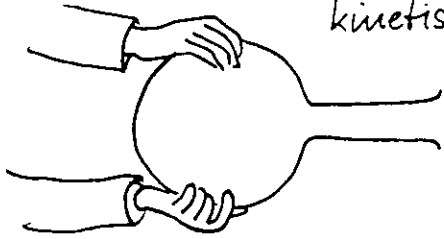




# DIE ERHALTUNG DER ENERGIE:



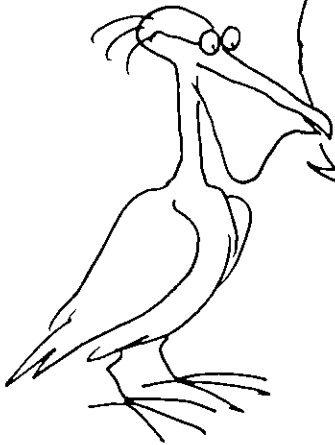
Leider ist eine vollständige Umwandlung von innerer Energie in kinetische Energie des Schwerpunkts nicht möglich.



ist  $N \times \frac{1}{2} m v^2$

Nach dem Satz von der ERHALTUNG DER ENERGIE bleibt aber die Gesamtenergie, das heißt die Summe aus der kinetischen Energie des Schwerpunkts und der inneren Energie der Moleküle, konstant.

Die Direction



Sagen Sie: Wenn ich das recht verstehe, wäre die Umwandlung vollständig, wenn alle Moleküle dieselbe Geschwindigkeit hätten, nachdem sie aus dem Gefäß herausgeströmt sind.

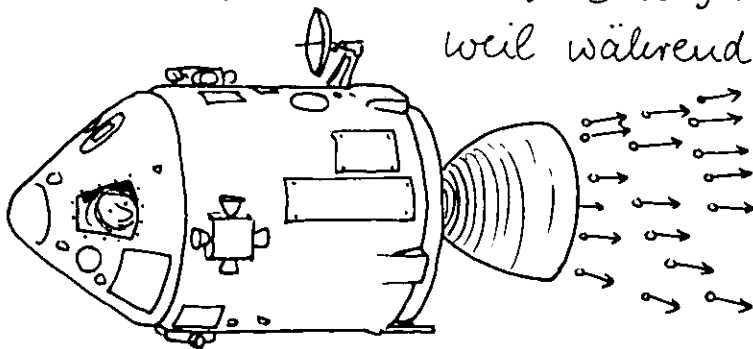


Ganz recht!

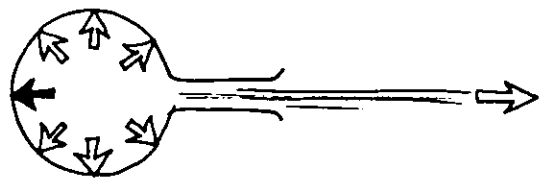
Anwendung dieser Umwandlung von innerer Energie in Schwerpunktsenergie:

# ANTRIEB DURCH RÜCKSTOß

Die Düsen eines Strahltriebwerks sind so geformt, daß sich eine optimale Umwandlung von Wärme in Bewegung ergibt. Der Rückstoß entsteht,



weil während des Ausströmens die Summe der auf die Hülle wirkenden

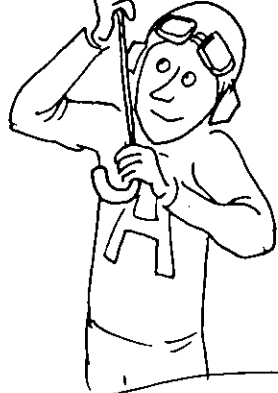


Kräfte nicht mehr gleich Null ist.

Ich verstehe!

Um zu fliegen, genügt es offenbar,  
Luft nach unten zu blasen.

Probieren  
wir das mal!



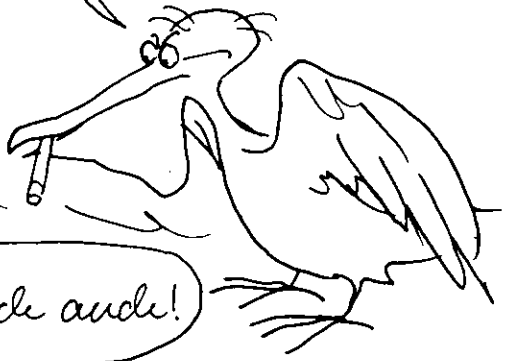
Hm, nicht sehr  
wirkungsvoll.

PEFFT!

Sieh mal, Auseru,  
die Flügel der Vögel haben nicht die  
Form eines Regenschirms. Du glaubst  
immer, Du hättest sofort alles verstan-  
den. Die Sache ist aber komplizierter.



Hm,  
hm...

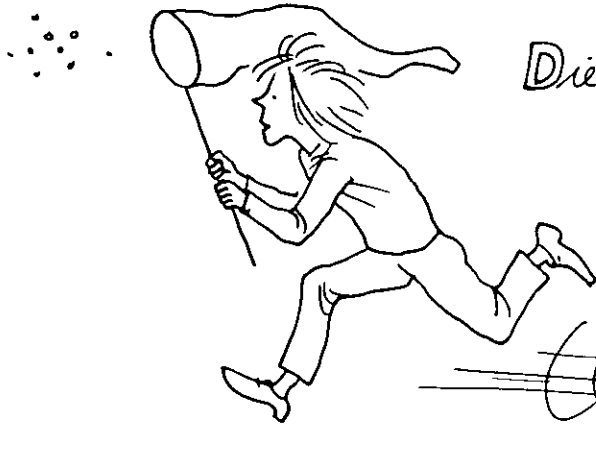


Du hast recht,  
Sophie.

Sie hat  
eine hübsche  
Figur.

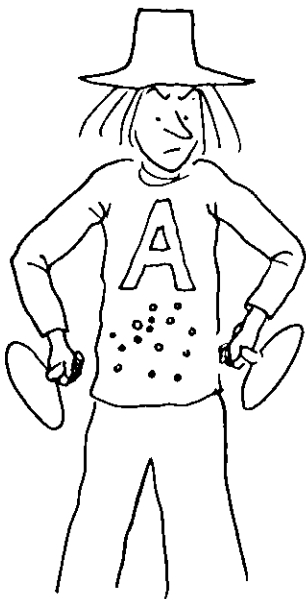
Na Sie doch auch!

# STRÖMUNGEN BEI GLEICHBLEIBENDER DICHTe



Die Moleküle eines Gases scheinen Angst vor gegenseitiger Berührung zu haben.

Jedenfalls sind sie immer so weit wie möglich voneinander entfernt.



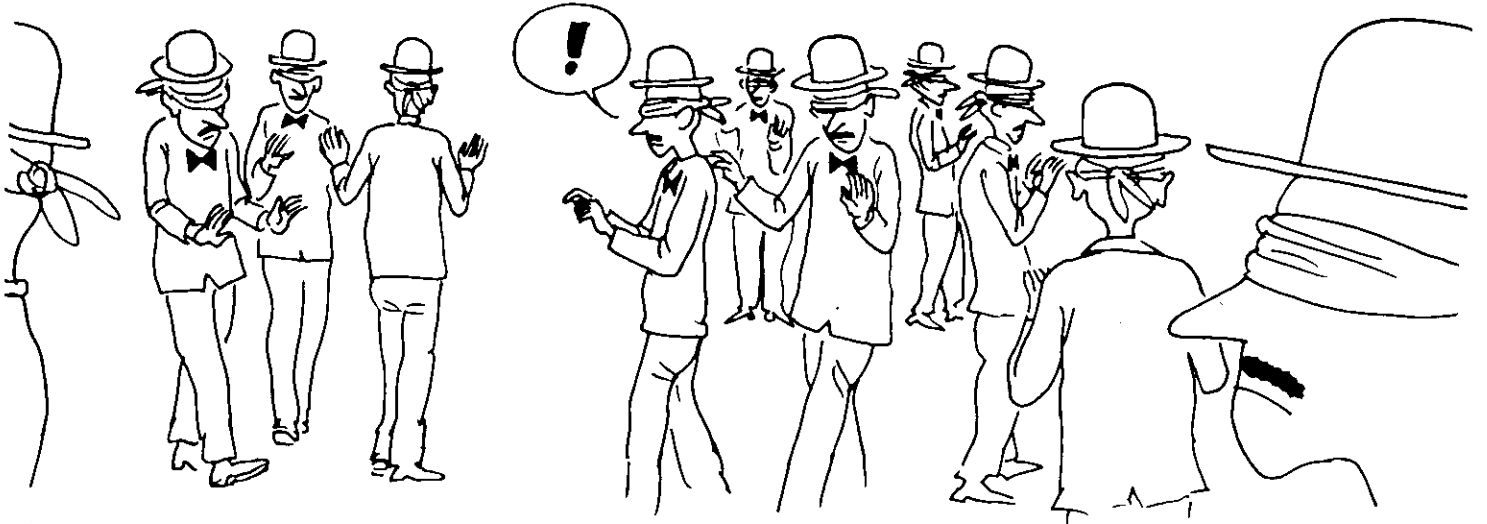
Da ist nichts zu machen. Auf diese Weise läßt sich die Dichte der Luft nicht erhöhen.

Mißlungen!  
Du bist nicht schnell genug. Wir haben Dich kommen sehen.

Wieso entfliehen die Moleküle in dem Augenblick, da die Schläger zusammenschlagen?

Vielleicht haben Sie Angst?

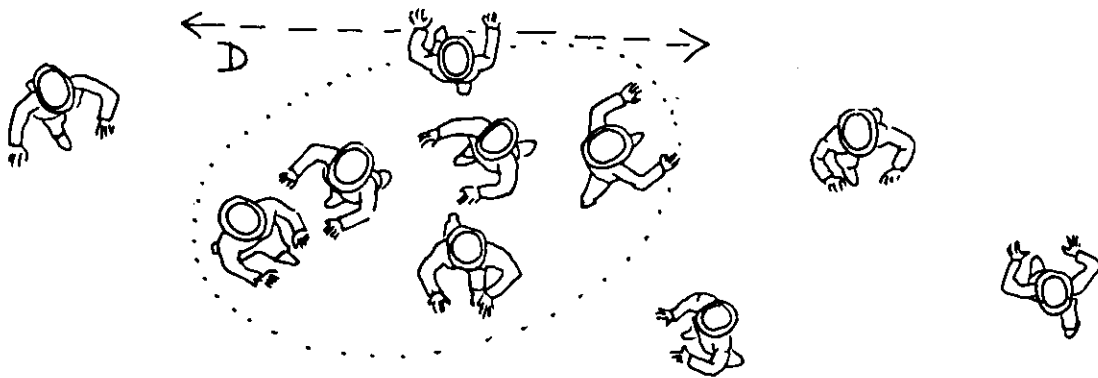
Wir wollen uns einen Platz vorstellen, auf dem viele Leute mit verbundenen Augen umherirren. Sie sollen die Rolle der Moleküle spielen. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Leute bewegen, entspricht dann der Geschwindigkeit  $V$  der thermischen Bewegung der Moleküle.



Alle Leute auf dem Platz bewegen sich. Im Mittel stoßen zwei von ihnen zusammen, nachdem sie einen Weg der Länge  $L$  zurückgelegt haben. Man nennt  $L$  die „MITTLERE FREIE WEGLÄNGE“.

In der Luft, die wir atmen, ist die Geschwindigkeit  $V$  der thermischen Bewegung der Moleküle nahezu 340 Meter pro Sekunde. Das entspricht einer freien Weglänge von ungefähr einem Hunderttausendstel Zentimeter, und die Zeit, die zwischen zwei Zusammenstößen eines Moleküls mit seinem Nachbarn verstreicht, beträgt ein Zehntausendstel einer Millionstel Sekunde.

Nichts bringt die Leute mit den verbundenen Augen dazu, sich an einer Stelle des Platzes zu sammeln. Im Gegenteil: Ihre ständige Bewegung würde jede Ansammlung vom Durchmesser  $D$  in der Zeit  $D/V$  zerstreuen.



$D/V$  ist die Zeit, die eine Person braucht, um die Strecke  $D$  zurückzulegen, um also den Ort der Ansammlung zu verlassen.



Da die Leute, mit den verbundenen Augen außerdem stumm sind, reichen ihre Kontakte nicht weiter als ihre Hände. Wenn nun in diese Menschenmenge ein Gegenstand mit einer Geschwindigkeit  $v$  eindringt, die kleiner ist als die Geschwindigkeit  $V_1$ , mit der sich die Leute bewegen, so können sie sich über das Ereignis nur informieren, indem sie zusammenstoßen. Diese Information breitet sich mit der Geschwindigkeit  $V$  aus, mit der sich die Leute bewegen, das heißt, die Leute können dem eindringenden Gegenstand ausweichen, bevor er sie erreicht.

# DER SCHALL

Er ist eine Art Welle, die sich mit der Geschwindigkeit  $V$  bewegt.



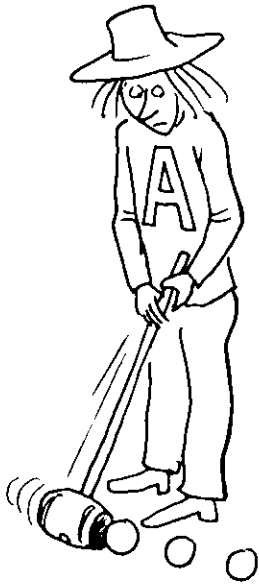
Es sei darauf hingewiesen, daß der Schall die Fortpflanzung eines Impulses ist, während die Materie, in der er sich ausbreitet, an ihrer Stelle verbleibt.

Der Schall ist eine DRUCKWELLE.



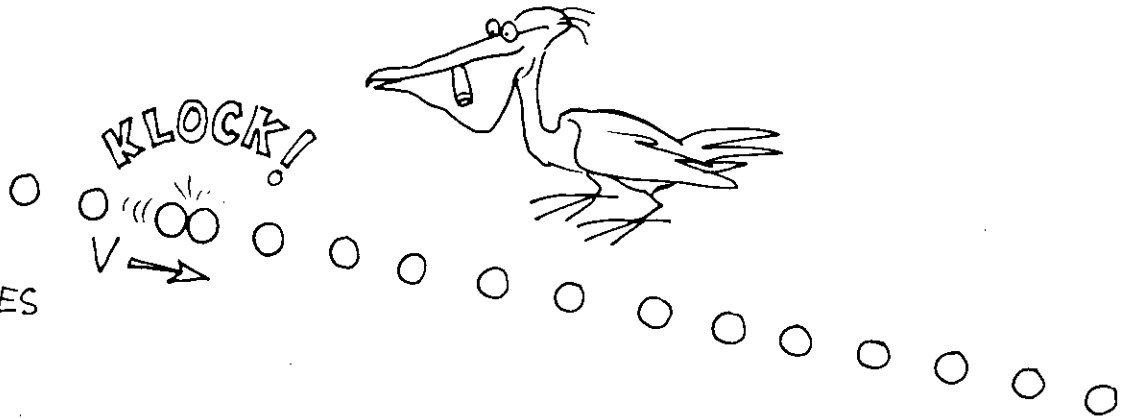
Über jede Bewegung, die Anselm mit seinen Tischtennisschlägern ausführt, „informieren“ sich die Moleküle zwischen den Schlägern mit Schallgeschwindigkeit. Sie können also leicht entfliehen, ohne ihre Dichte zu ändern.



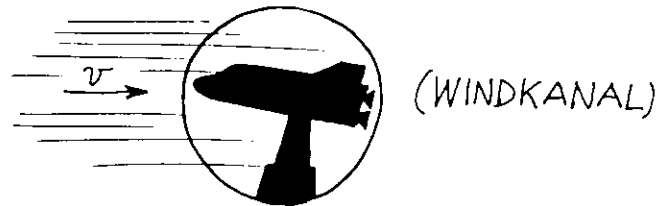
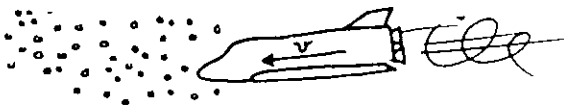


Auseln hat Krocket-Kugeln in eine Reihe gelegt. Er gibt der ersten Kugel einen Impuls, sie überträgt ihn auf die zweite, diese auf die dritte und so weiter. Auselns Kugeln bilden ein lineares Modell der Fortpflanzung des Schalls.

FORTPFLANZUNG  
DES IMPULSES



Geschwindigkeit ist relativ. Für uns macht es keinen Unterschied, ob  $v$  die Geschwindigkeit eines Objekts ist, das in ein ruhendes Gas eindringt, oder die Geschwindigkeit eines Gases, das auf ein Objekt trifft.



Das Verhältnis  $M = \frac{v}{V}$  wird als MACH-ZAHL bezeichnet, wenn  $V$  die Schallgeschwindigkeit ist. Ein strömendes Fluid befindet sich im Unterschallbereich, solange  $v$  kleiner als  $V$  und damit  $M$  kleiner als 1 bleibt. Es fließt dann mit gleichbleibender Dichte und wird „INKOMPRESSIBEL“ genannt.

Die Direktion

# DAS GESETZ VON BERNOULLI

Hier riecht nicht gut.

Es riecht nach Maulwurf.  
Wonach sollte es denn sonst riechen?

Sehen wir mal nach:  
Daniel Bernoulli, Schweizer  
Physiker, 1700-1782.

?

So müßte es gehen.

Was fummelt  
der da oben?

So, ich bin fertig.

Fertig? Mit was?

Mit meinem automatischen Belüftungssystem.



Der Wind bläst. Das ist gut. Spürst Du, wie er die Luft aus dem Bau saugt?

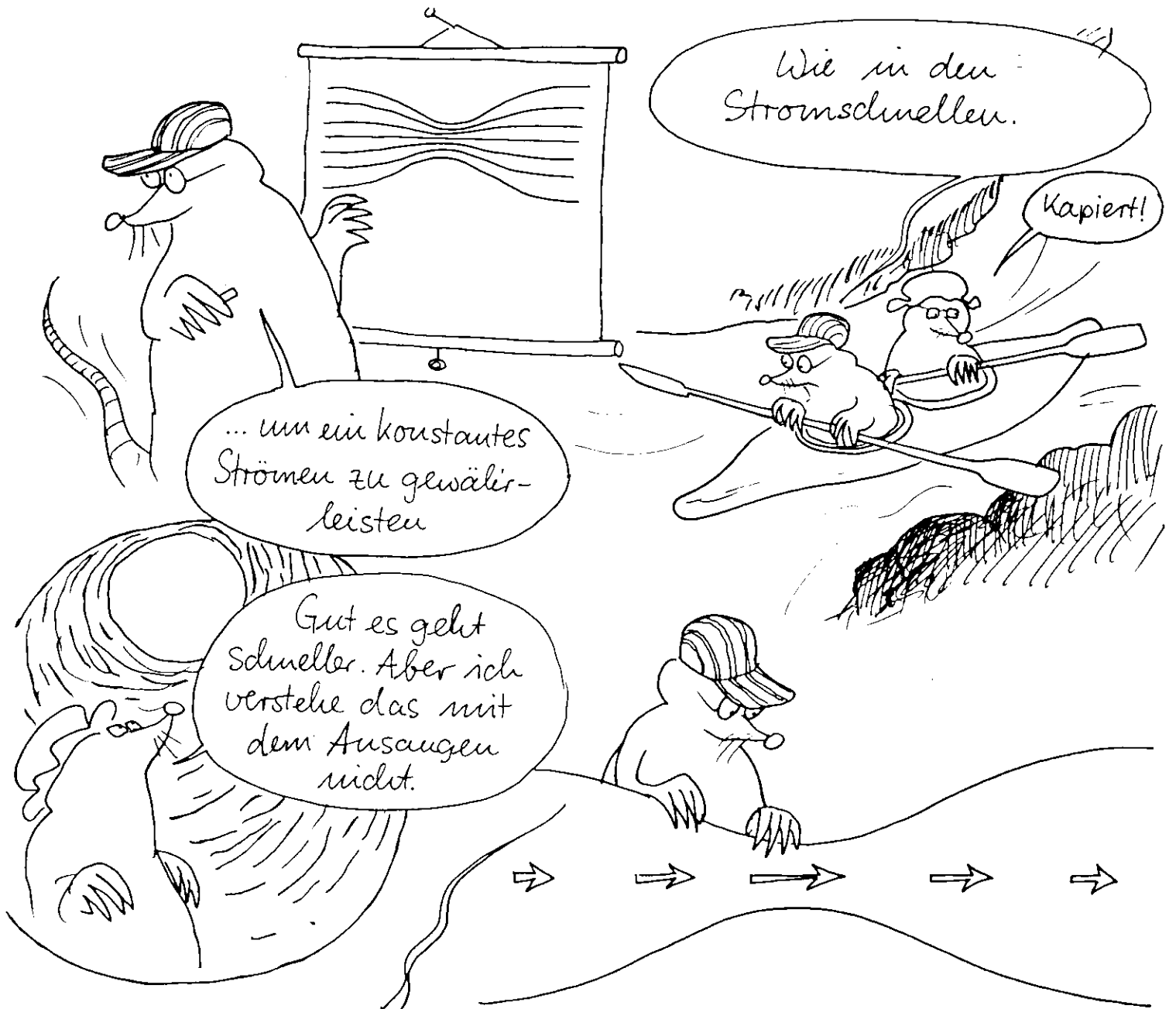


?!?

Ja, aber warum wird die Luft aus dem Bau gesogen?

Der Hügel ist für die strömende Luft ein Hindernis. Um es zu überwinden, muß sie sich beschleunigen...

Beschleunigen? Wie?



Wie in den Stromschnellen.

Kapiert!

... um ein konstantes Strömen zu gewährleisten

Gut es geht schneller. Aber ich verstehe das mit dem Ausaugen nicht.

Ein Paket von Luftmolekülen, das durch ein sich verengendes Rohr strömt, muß beschleunigt werden. Das geschieht so, daß die Luft hinter ihm stärker drückt als vor ihm. Es gelangt also aus einem Gebiet höheren in ein Gebiet niedrigeren Drucks.



An der engsten Stelle ist also der Druck am niedrigsten?



Richtig! Und danach, wenn das Rohr wieder weiter wird, nimmt er wieder zu.

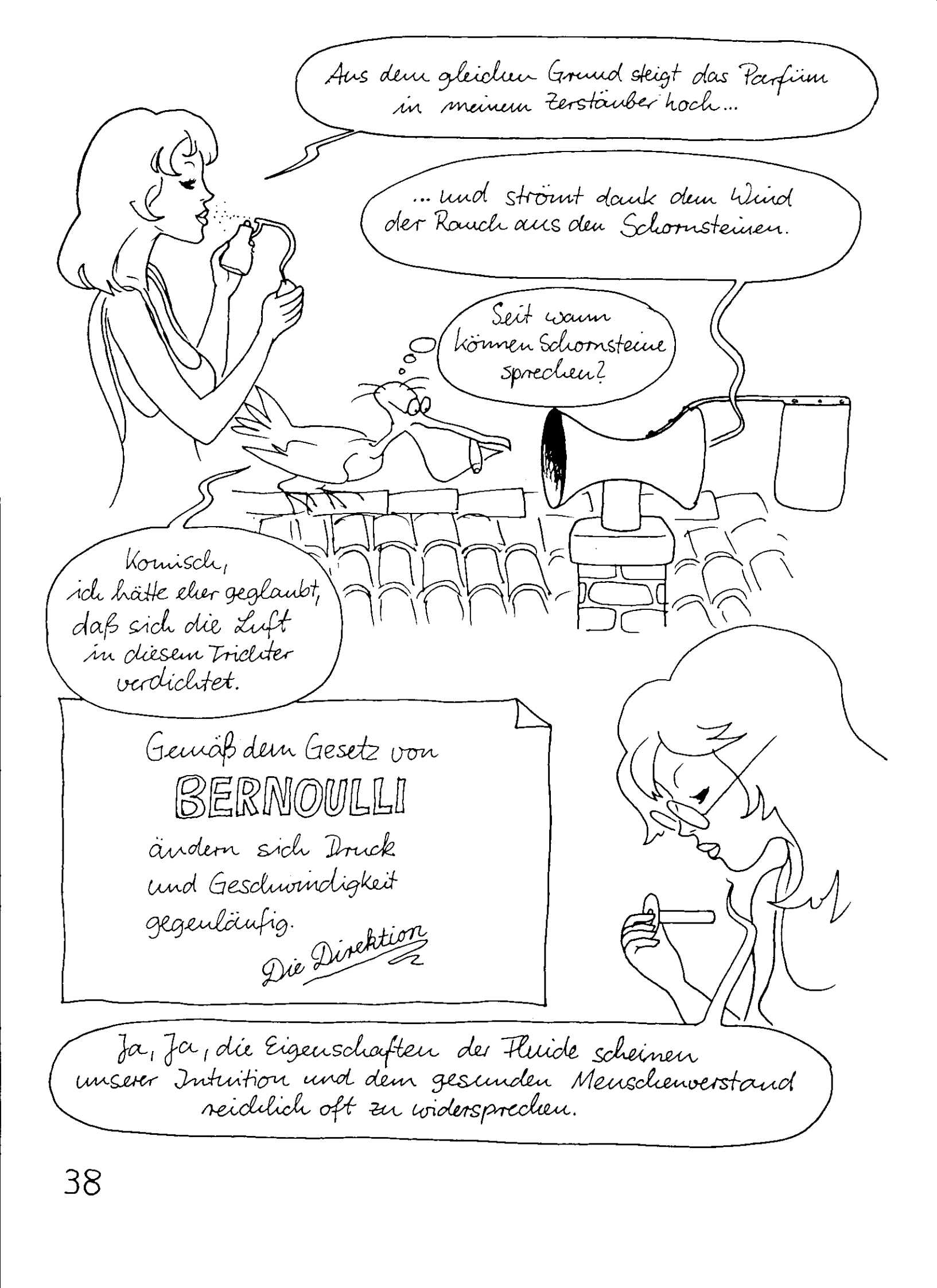
Und daher wird die Luft aus dem Bau gesogen.



Merkwürdig: Als wir hielten, war das Verdeck ganz entspannt und hing nach innen. Jetzt, da wir fahren, ist es aufgeblasen und nach außen gewölbt.



... also muß sich die Luft beschleunigen, um das Auto zu umfließen. Dabei sinkt ihr Druck und das Verdeck wird angesogen. Kapiert!



Aus dem gleichen Grund steigt das Parfüm  
in meinem Zerstäuber hoch...

... und strömt dank dem Wind  
der Rauch aus den Schornsteinen.

Seit wann  
können Schornsteine  
sprechen?

Komisch,  
ich hätte eher geglaubt,  
daß sich die Luft  
in diesem Trichter  
verdichtet.

Gemäß dem Gesetz von  
**BERNOULLI**  
ändern sich Druck  
und Geschwindigkeit  
gegenläufig.

*Die Direction*  
2

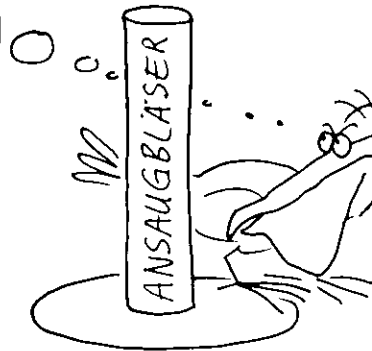
Ja, Ja, die Eigenschaften der Fluide scheinen  
unserer Intuition und dem gesunden Menschenverstand  
reichlich oft zu widersprechen.

Ein Beispiel dafür, wie

# PARADOX

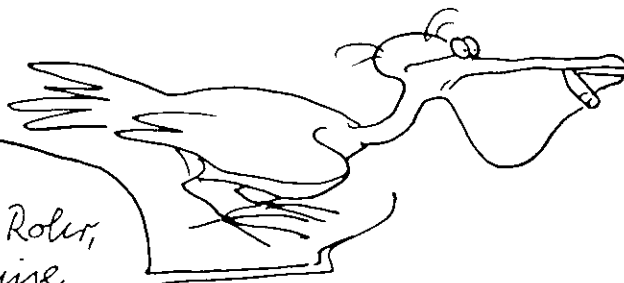
die Folgen des Gesetzes von Bernoulli sein können:

Das sieht ganz vernünftig aus, aber...

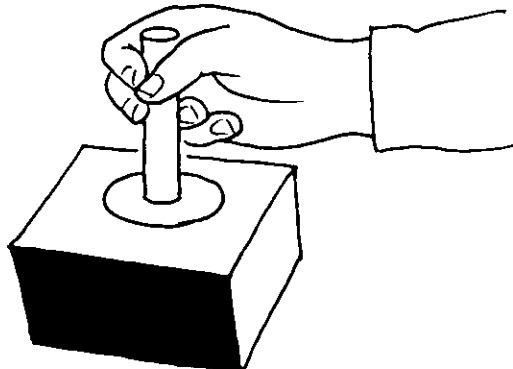


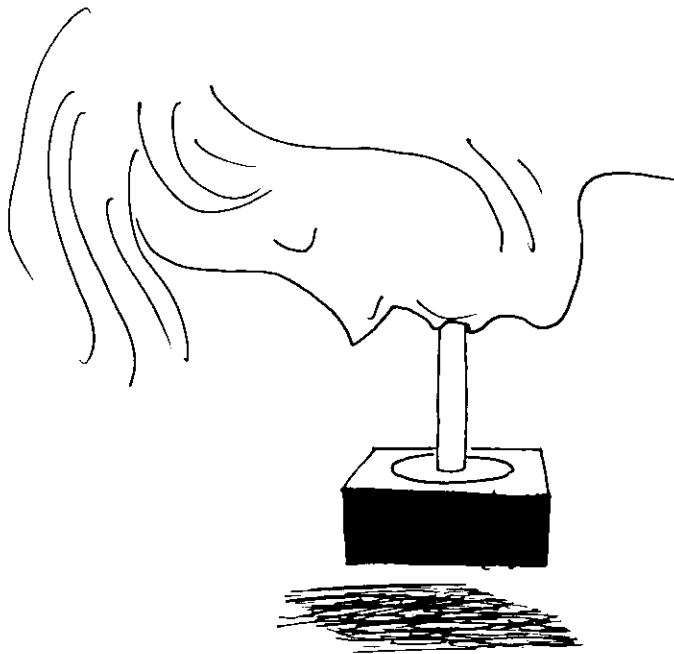
... was soll das sein? Schon wieder einer von diesen Tricks?

Offenbar ist das ein einfaches Roler, das unten in eine Schraube übergeht.

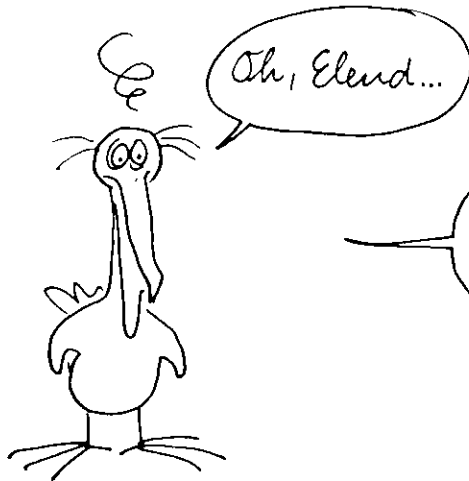


Ein Roler, das er auf eine Streichholzschachtel setzt.





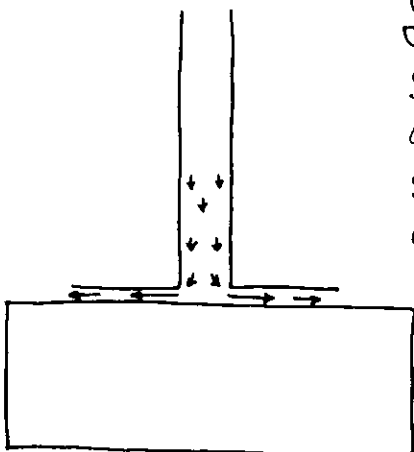
Er bläst...  
und ... hebt die  
Schachtel an!!!



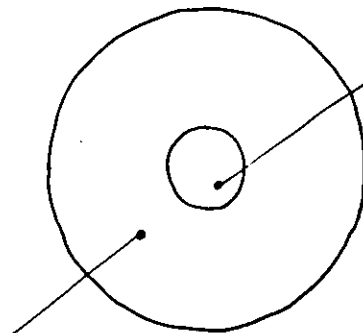
Oh, Elend...

... wie kann man  
ansaugen, indem  
man bläst?

Sobald die Luft das Rohr verläßt, muß sie zwischen  
Scheibe und Strichholzschachtel durch einen  
wesentlich engeren Querschnitt strömen und  
sich stark beschleunigen. Dabei sinkt ihr Druck  
unter den Druck der Atmosphäre.

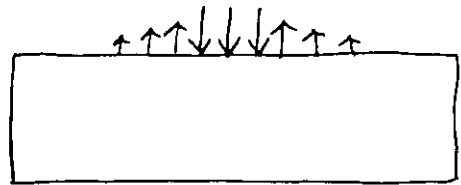
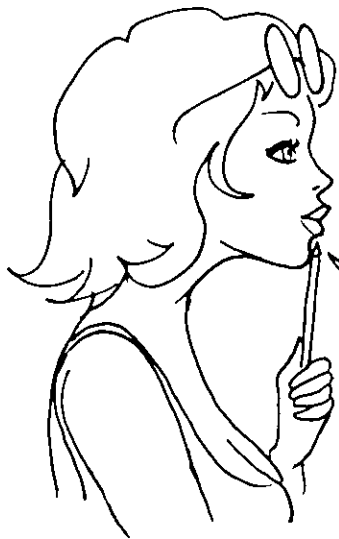


Unter der Scheibe ist der  
Druck der strömenden Luft  
kleiner als der Druck der  
Atmosphäre.



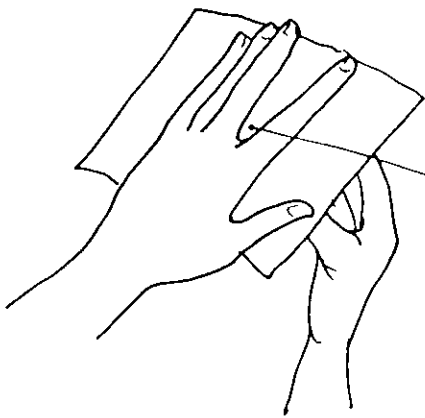
Am unteren Ende  
des Rohres ist der  
Druck der strömenden  
Luft größer als der  
Druck der Atmosphäre.





Das Resultat ist, daß Anselm die Schachtel ausaugen kann, indem er bläst.

Ein ähnliches Experiment kann man mit einem einfachen Blatt Papier machen.

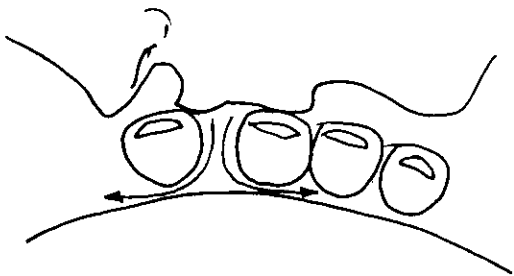


Man hält es wie hier gezeigt...

...und bläst dann hier sehr stark.



Sobald man bläst, kann man das Blatt loslassen. Es wird einen kurzen Augenblick haften bleiben.

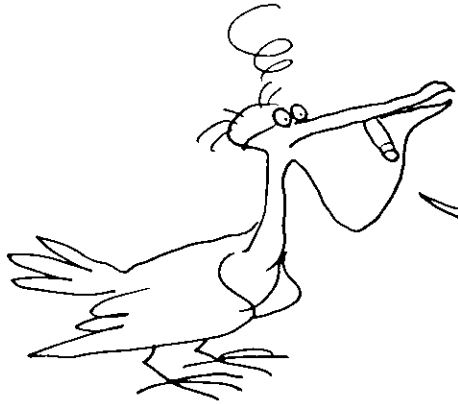


**WOHLGEMERKT:**

Man muß stark blasen!



Fliegst Du ein wenig mit?



Nach allem, was ich heute gesehen habe, ziehe ich es vor, zu Fuß zu gehen.



Fluide, Dichte, Druck, Temperatur, Reaktion, Bernoulli. Ich habe alle Triumpfe, um zu fliegen.

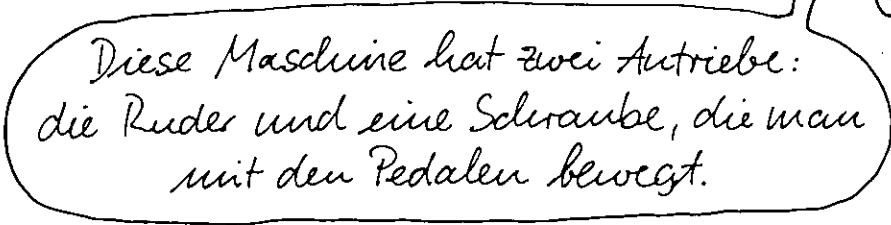
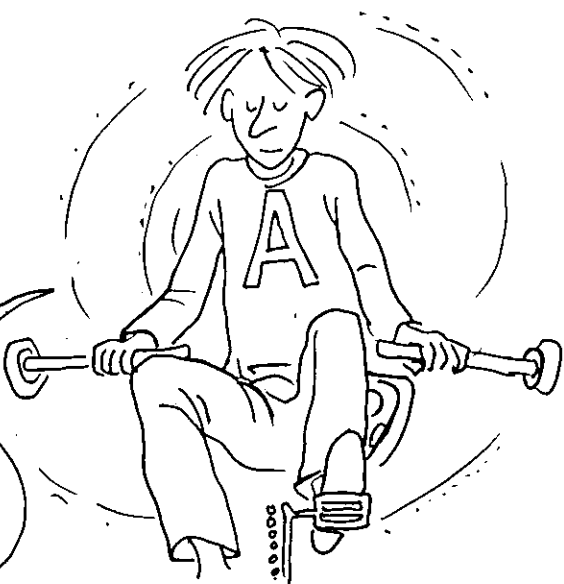
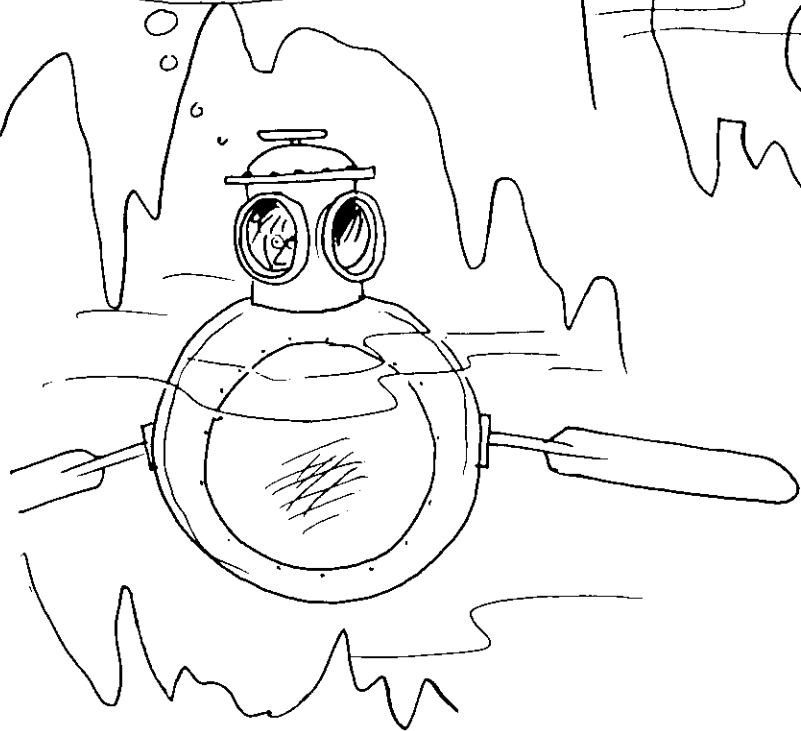
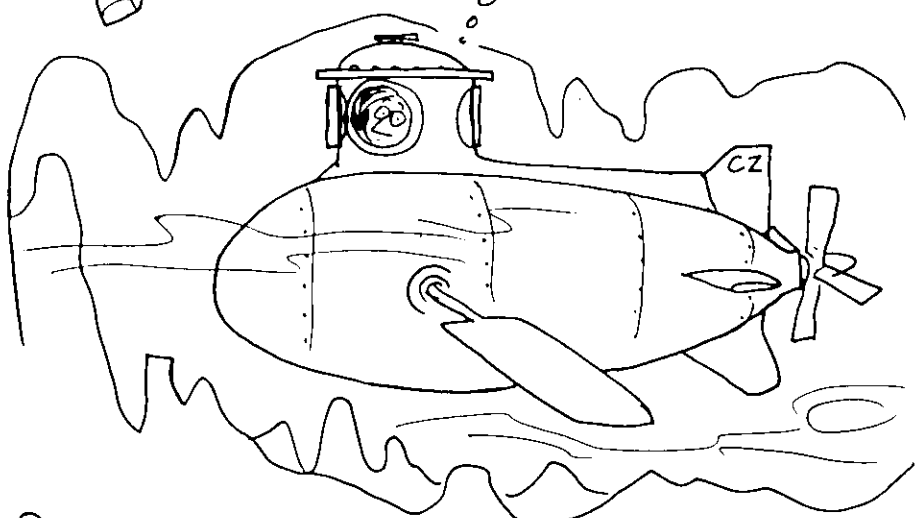
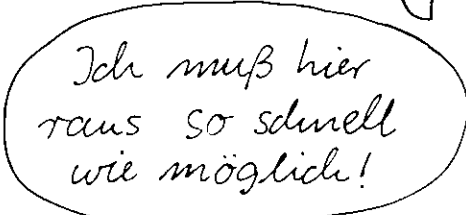
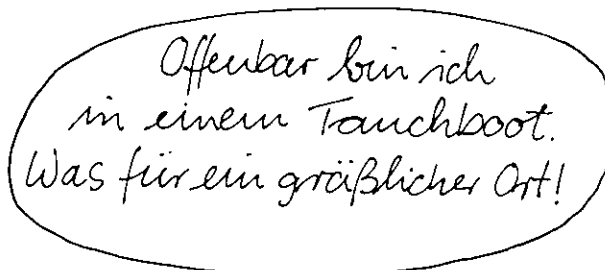
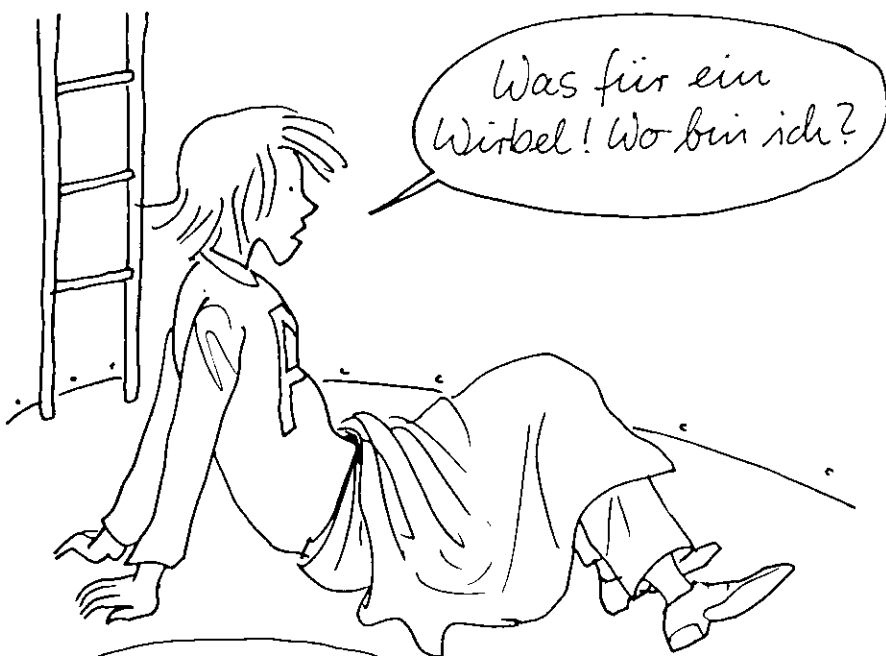
Nein, einer fehlt Dir.



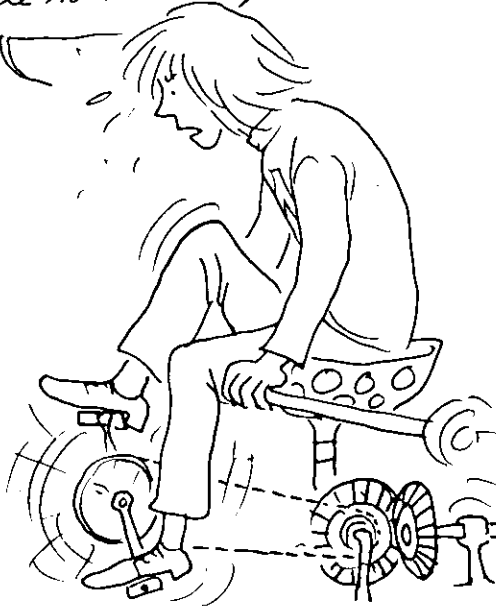
Welcher?



# ANSELMS TRAUM:



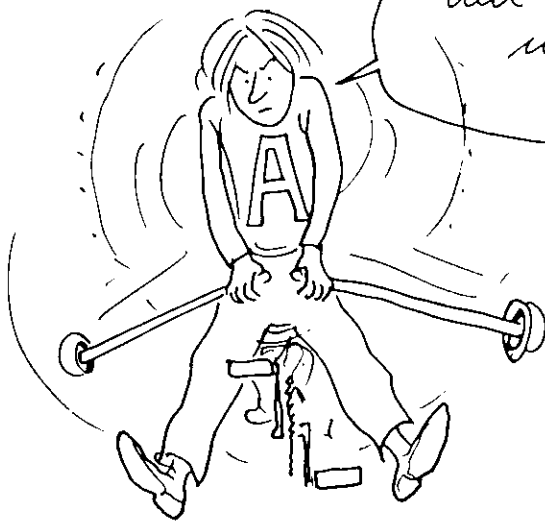
Zum Teufel,  
seit einer Stunde  
strampelst du...



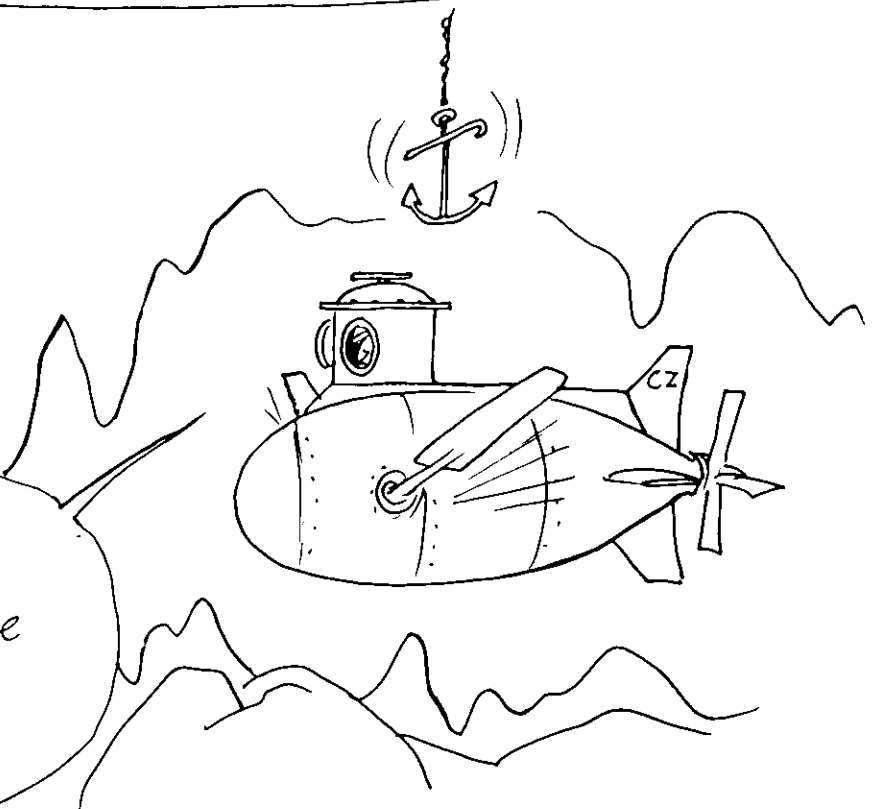
... und komme keinen  
Zentimeter weiter.



Probieren wir es mit  
den Rudern. Das bringt auch  
nichts. Ich fühle nicht mal  
einen Widerstand!

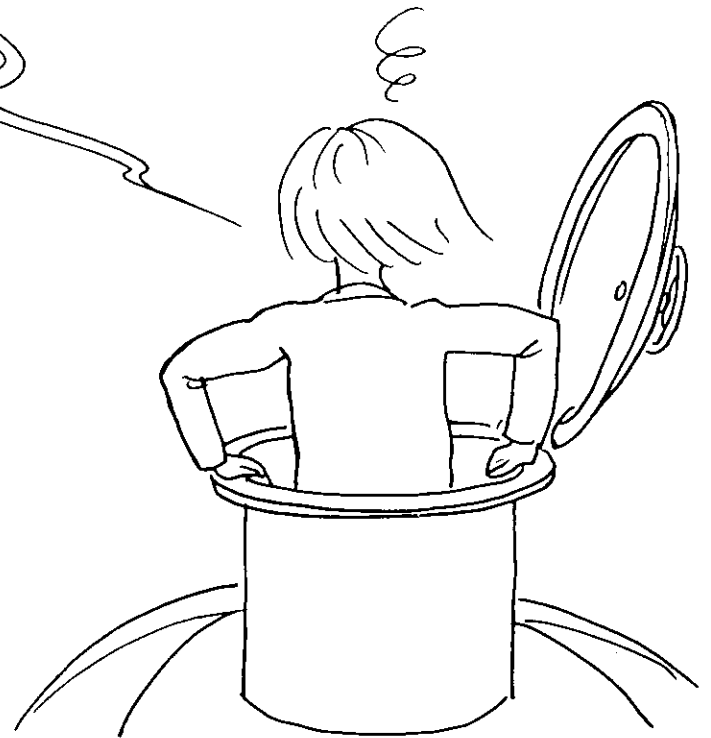


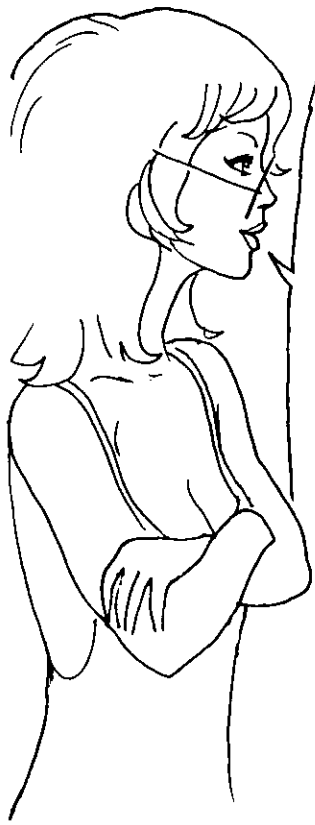
Bin ich  
im leeren Raum?  
Aber nein, dort könnte  
mein Boot nicht  
schwimmen.





Bei allen Wirbeln  
der Hölle, Sophie erkläre  
mir, was das bedeuten  
soll!

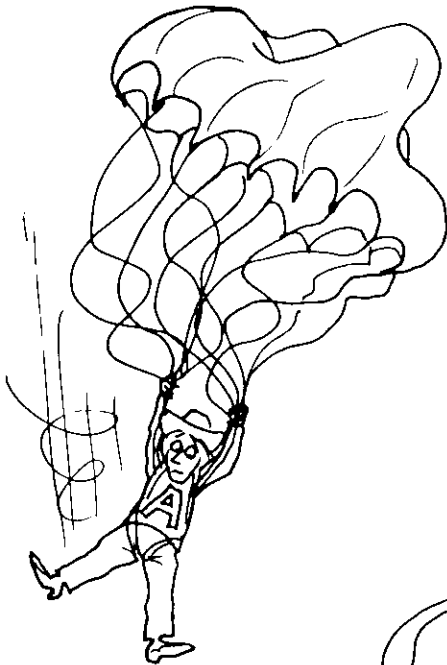




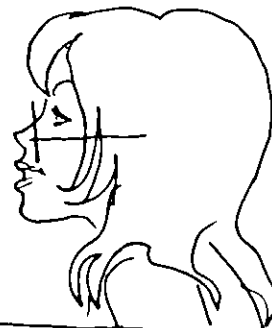
Du warst in superflüssigem Helium. Erinnerung Dich an die Geschichte mit dem Sand. Die Reibung zwischen den Körnern war so stark, daß der Sand nur zäh floß. Hier haben wir das Gegenteil: Unterhalb einer sehr tiefen Temperatur wird die Fließfähigkeit des Heliums unendlich und alle Reibungen werden zu Null.



Aber welche Beziehung besteht zwischen der Reibung und den Rudern, dem Fliegen oder der Wirkung einer Schiffsschraube?



In gewissem Sinn hattest Du vorhin mit deinem Regenschirm recht: Um in der Luft zu bleiben, muß man sich an ihr festhalten können.



Wäre die Luft SUPERFLÜSSIG, so wäre auch ein Fallschirm wirkungslos. Noch schlimmer: er würde sich nicht einmal öffnen, und Du müßtest im freien Fall zur Erde stürzen.

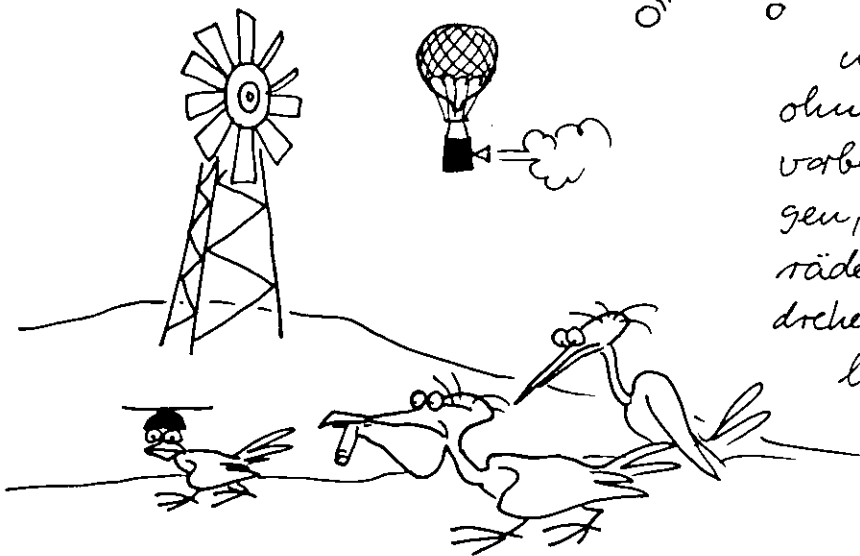
Das erste Tier, das versuchte, in den Himmel aufzusteigen, begriff sehr schnell, daß es sich auf die eine oder andere Weise an der Luft festhalten mußte.

Der Flug eines Gegenstandes, der schwerer ist als Luft, läßt sich mit einem Rennen auf einem Boden vergleichen, der ständig nachgibt und unter den Füßen zurückweicht.



Man muß aber in diesem Medium erstmal einen Halt finden.

Wäre die Luft superflüssig, so glitten ihre Moleküle aneinander und an allen Gegenständen ohne die geringste Reibung vorbei. Die Vögel wären gezwungen, zu Fuß zu gehen, Windräder könnten sich nicht drehen, und Lufttransporter ließen sich nur mit Luftschiffen bewerkstelligen, die einen Düsenantrieb haben.

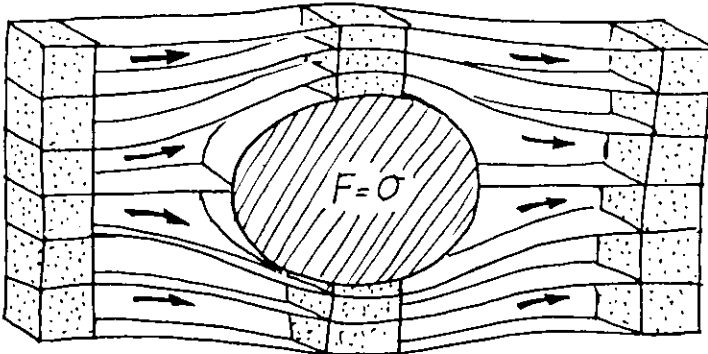


Die Reibung der Gasmoleküle ist also eine Voraussetzung des Fliegens.

# FLUIDE MIT REIBUNG

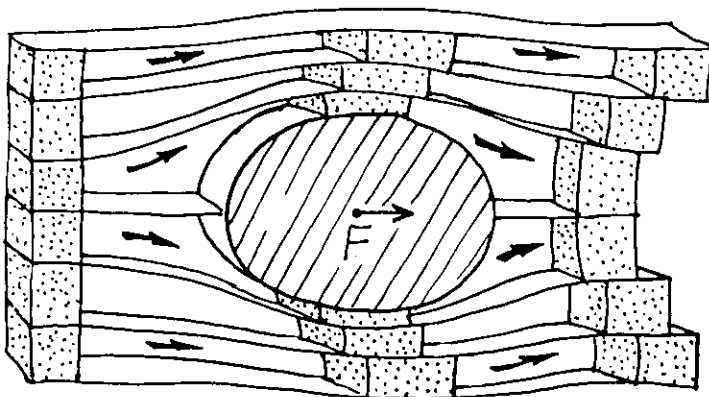


Wie diese Teller können übereinanderliegende Gasschichten nur unter Reibung aneinander vorbeigleiten.

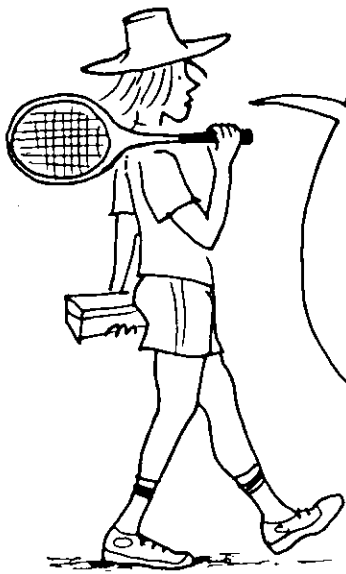


Wir wollen uns ein ruhendes Objekt vorstellen, auf das die Moleküle eines strömenden Gases treffen. Die Moleküle denken wir uns in Schichten untergebracht.

- Ist die Strömung reibungsfrei, so sind die „Molekülschichten“ hinter dem Objekt ebenso gestapelt, wie sie es vor ihm waren.
- Besteht dagegen eine Reibung, so wird sie die Moleküle, die nahe am Objekt vorbeiströmen, verlangsamen. Hinter dem Objekt werden die Schichten gegeneinander verschoben. Das Objekt bremsst das strömende Gas, und das Gas übt auf das Objekt eine Kraft  $F$  aus.

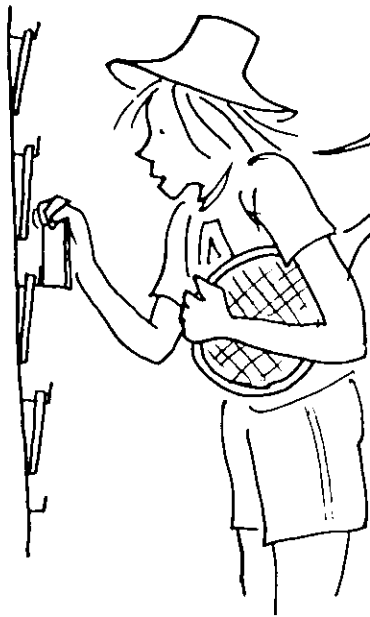






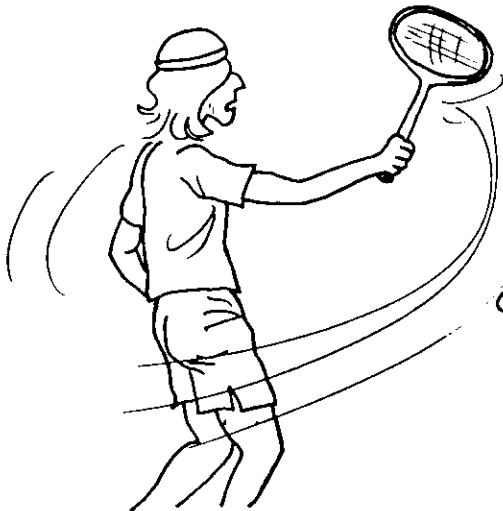
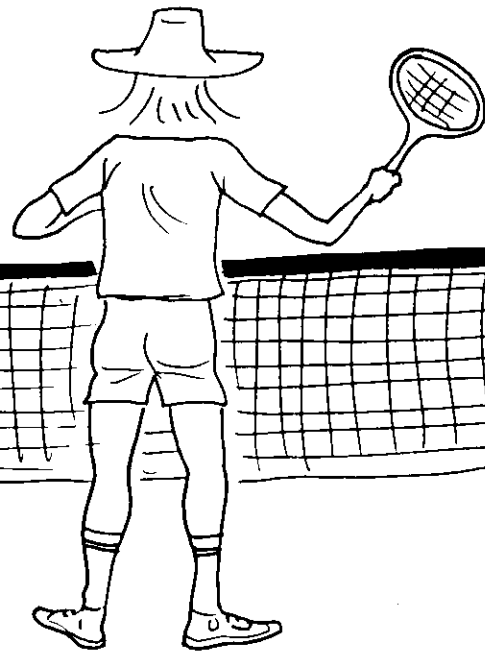
Tja, alles etwas kompliziert... ich gehe ein bisschen Tennisspielen, um mich zu entspannen. Da ist die Mechanik nicht so verwickelt, einfach Ballistik. Man schlägt einen Ball, boing, und wenn man es richtig ausstellt, trifft er ins Feld.

# DER ANGESCHNITTENE BALL

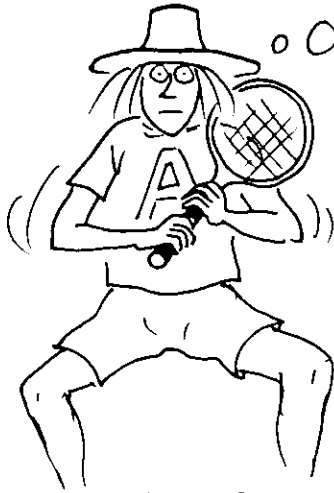


Ich muß mich eintragen.  
Ah, da ist ein freier Platz.  
Björn Borg... kein' ich nicht.

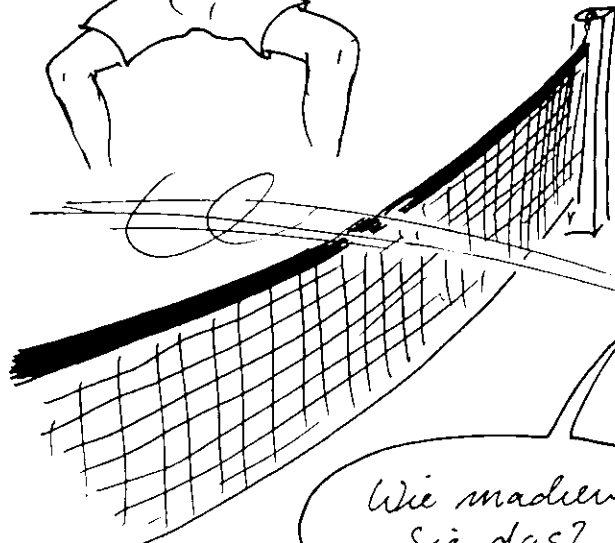
ready?



SCHPOK!



Verdammt, ich treffe nicht einen einzigen. Dieser Kerl hat eine komische Art, den Schläger zu lieben, während er schlägt. Das müßte doch die Bälle steigen lassen.



Tatsächlich gehen sie aber nach unten.

Wie machen Sie das?

Ganz einfach: Ich Sorge dafür, daß sich der Ball in diesem Sinne dreht.



SCHPOK!

Dann meißt er dazu, nach unten zu fliegen. So kann ich stärker zuschlagen und bekomme ihn trotzdem ins Feld.



PFFF

Ja, sicher

6-0, 6-0  
es ist...

...klar wie  
Soße.



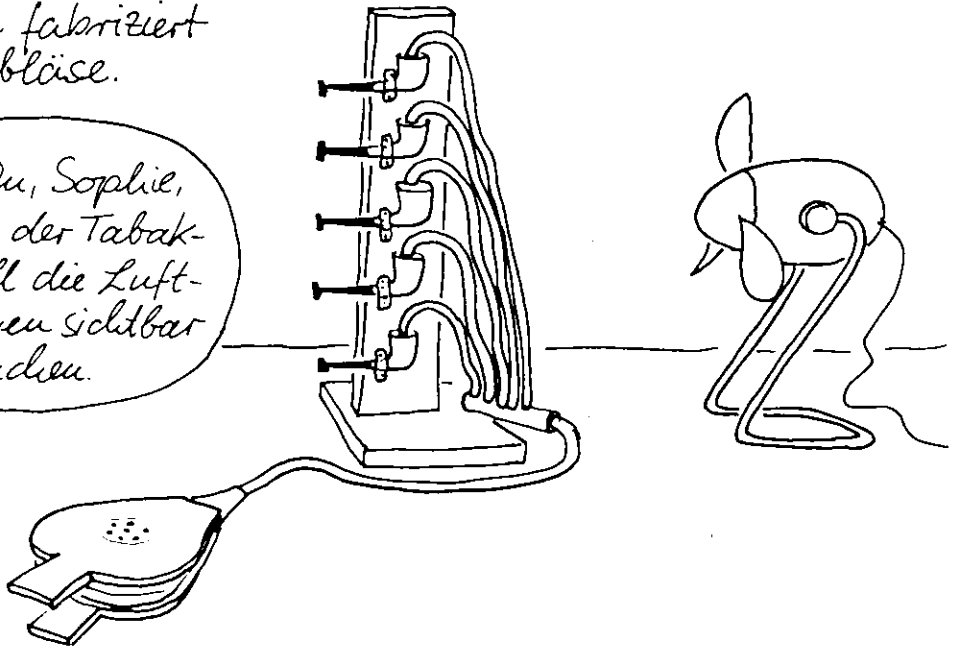


Nochmal: Borg jagt den Ball von links nach rechts. Wenn ich die Luft von rechts nach links strömen lasse, müßte das auf das Gleiche hinauslaufen.

Anselm fabriziert ein Geblöse.

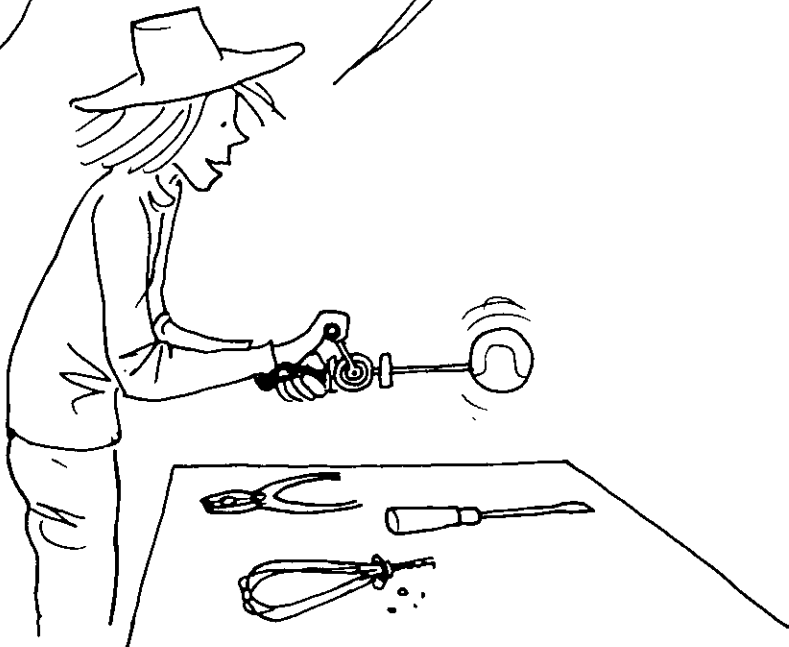


Siehst Du, Sophie, der Rauch der Tabakpfeifen soll die Luftströmungen sichtbar machen.



Bleibt dafür zu sorgen, daß der Ball rotiert. Das müßte hinlängen.

Ha!  
Das geht prima!

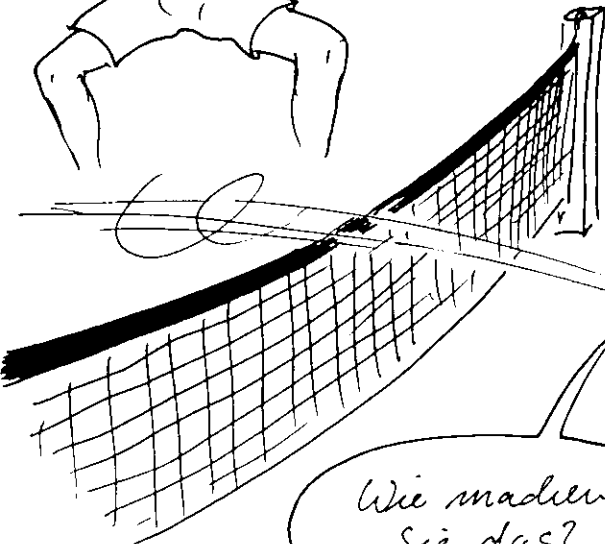




Verdammt, ich treffe nicht einen einzigen. Dieser Kerl hat eine komische Art, den Schläger zu lieben, während er schlägt. Das müßte doch die Bälle steigen lassen.

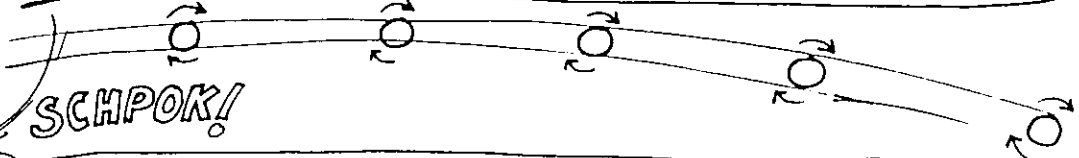


Tatsächlich gehen sie aber nach unten.



Wie machen Sie das?

Ganz einfach: Ich Sorge dafür, daß sich der Ball in diesem Sinne dreht.



Dann neigt er dazu, nach unten zu fliegen. So kann ich stärker zuschlagen und bekomme ihn trotzdem ins Feld.



PFFF

Ja, sicher

6-0, 6-0 es ist...

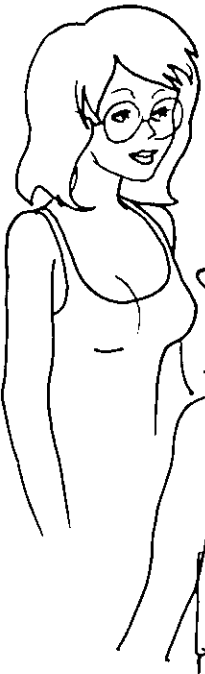
... klar wie Soße.



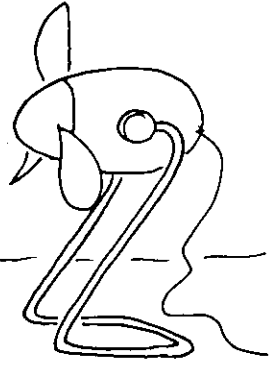
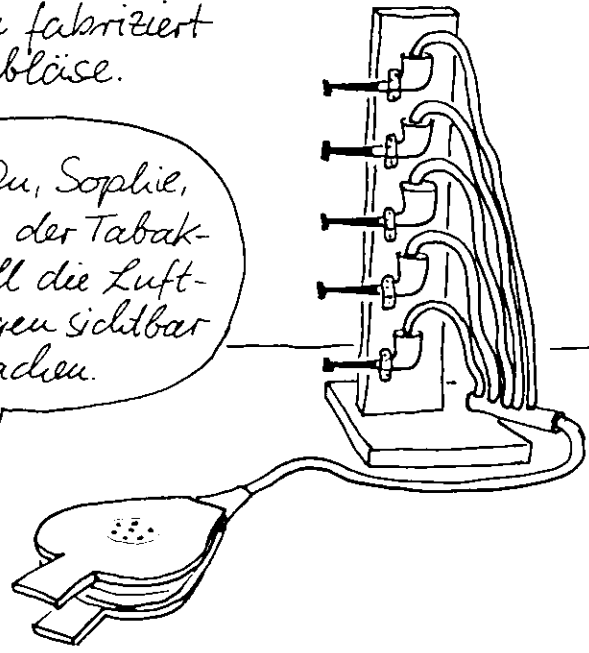


Nochmal. Borg jagt den Ball von links nach rechts. Wenn ich die Luft von rechts nach links strömen lasse, müßte das auf das Gleiche hinauslaufen.

Anselm fabriziert ein Gebläse.



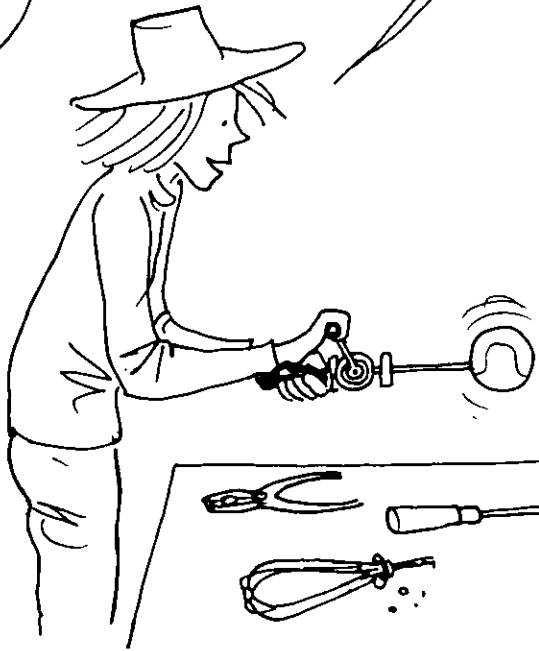
Siehst Du, Sophie, der Rauch der Tabakpfeifen soll die Luftströmungen sichtbar machen.

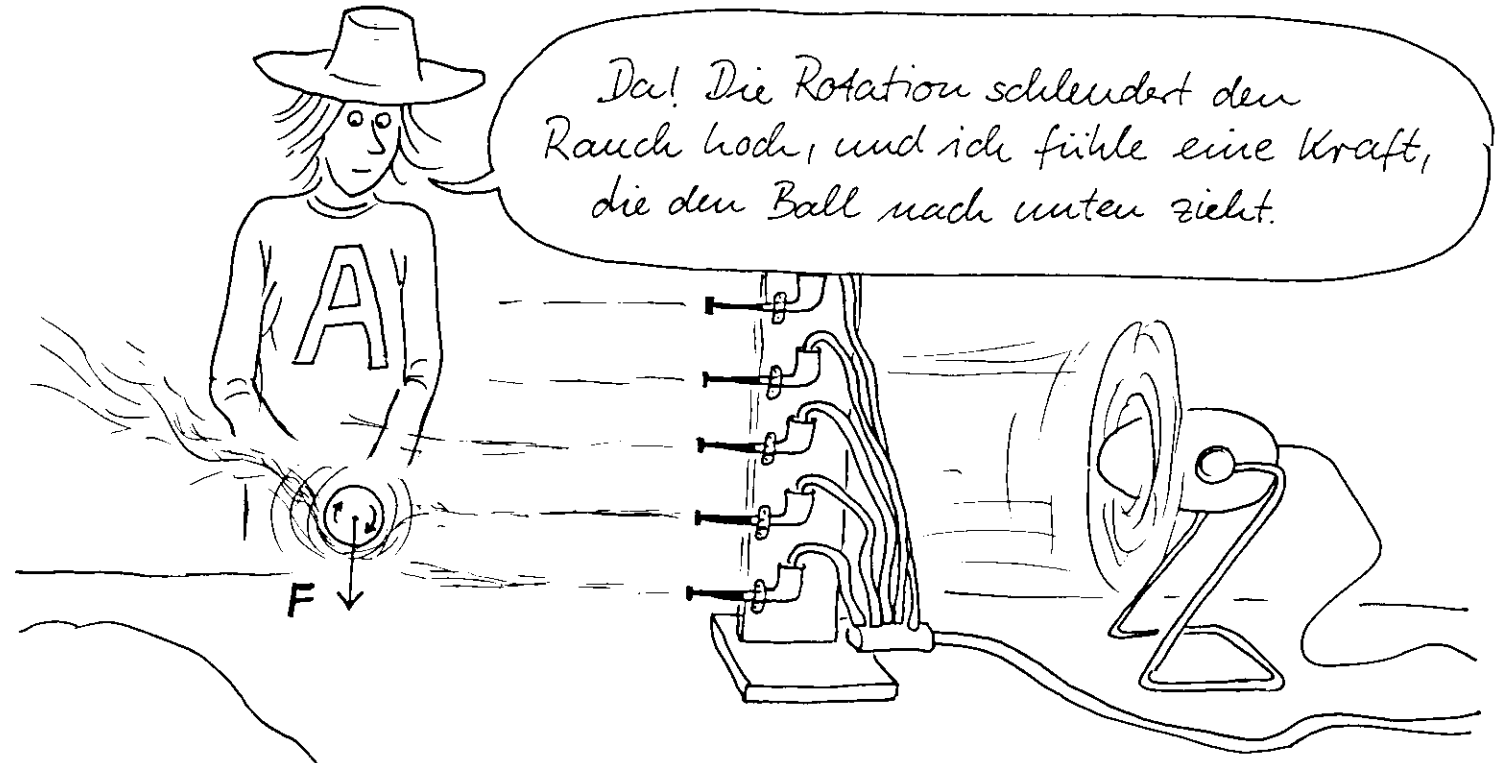


Bleibt dafür zu sorgen, daß der Ball rotiert. Das müßte hinlängen.



Ha!  
Das geht prima!

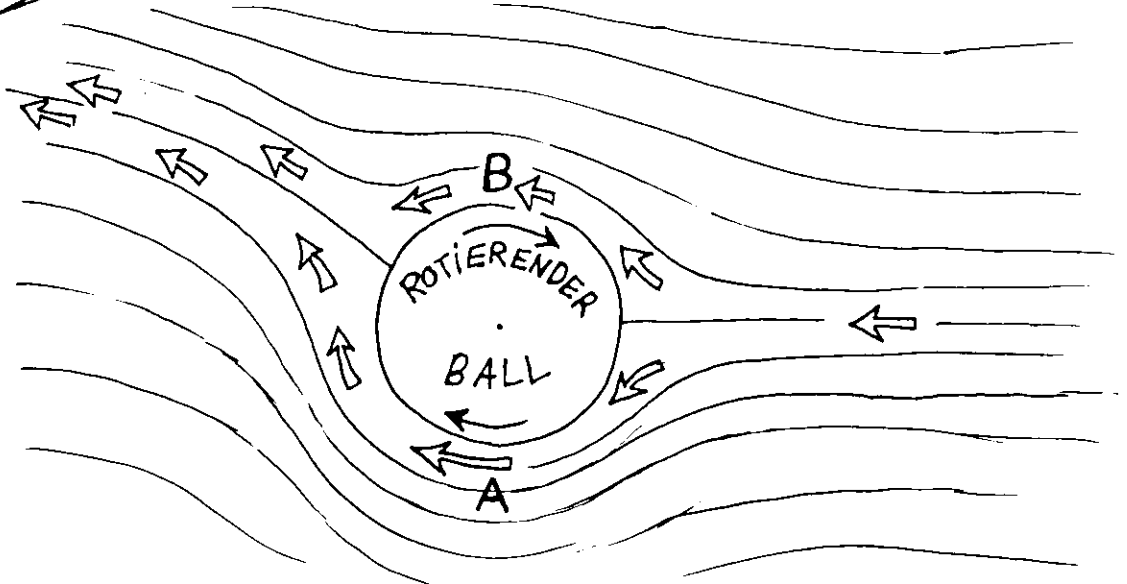




Da! Die Rotation schleudert den Rauch hoch, und ich fühle eine Kraft, die den Ball nach unten zieht.

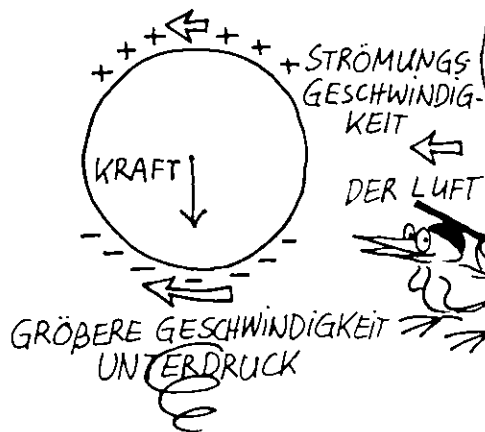


Die Erklärung: Dank der Reibung nimmt der rotierende Ball die Luft mit: Bei B wird sie langsamer, bei A schneller.



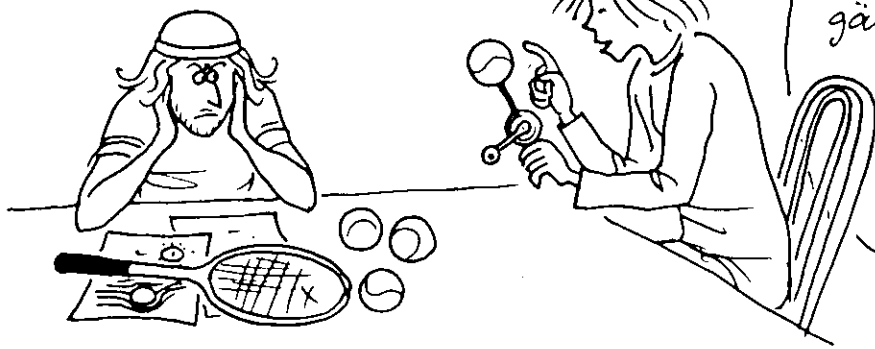
Bleibt nur, das Gesetz von Bernoulli anzuwenden.

KLEINERE GESCHWINDIGKEIT  
ÜBERDRUCK

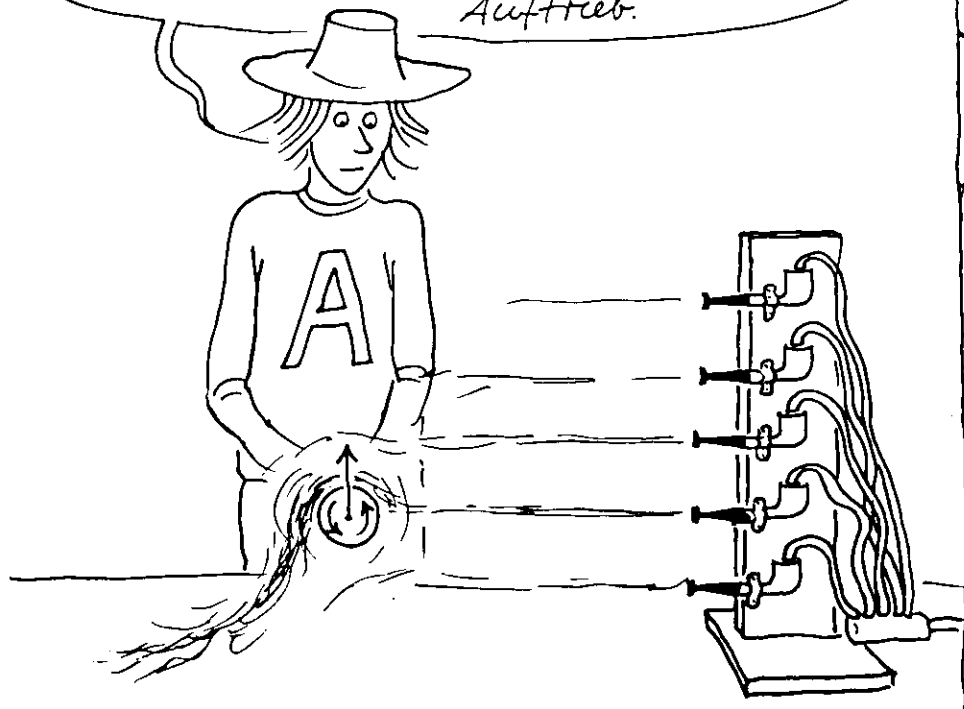


Druck und Geschwindigkeit ändern sich gegenläufig. Daher herrscht an der Unterseite des Balls Unterdruck und an der Oberseite Überdruck. Beides zusammen bestimmt die Richtung der Kraft.

Das geht alles nur wegen der Reibung am Ball. In einer superflüssigen Atmosphäre gäbe es keine Reibung, und Sie könnten keine angeschnittenen Bälle mehr schlagen.



Ha: Wenn man den Ball in der entgegengesetzten Richtung dreht, wird der Rauch nach unten geblasen und die Kraft kehrt sich um: es entsteht ein Auftrieb.

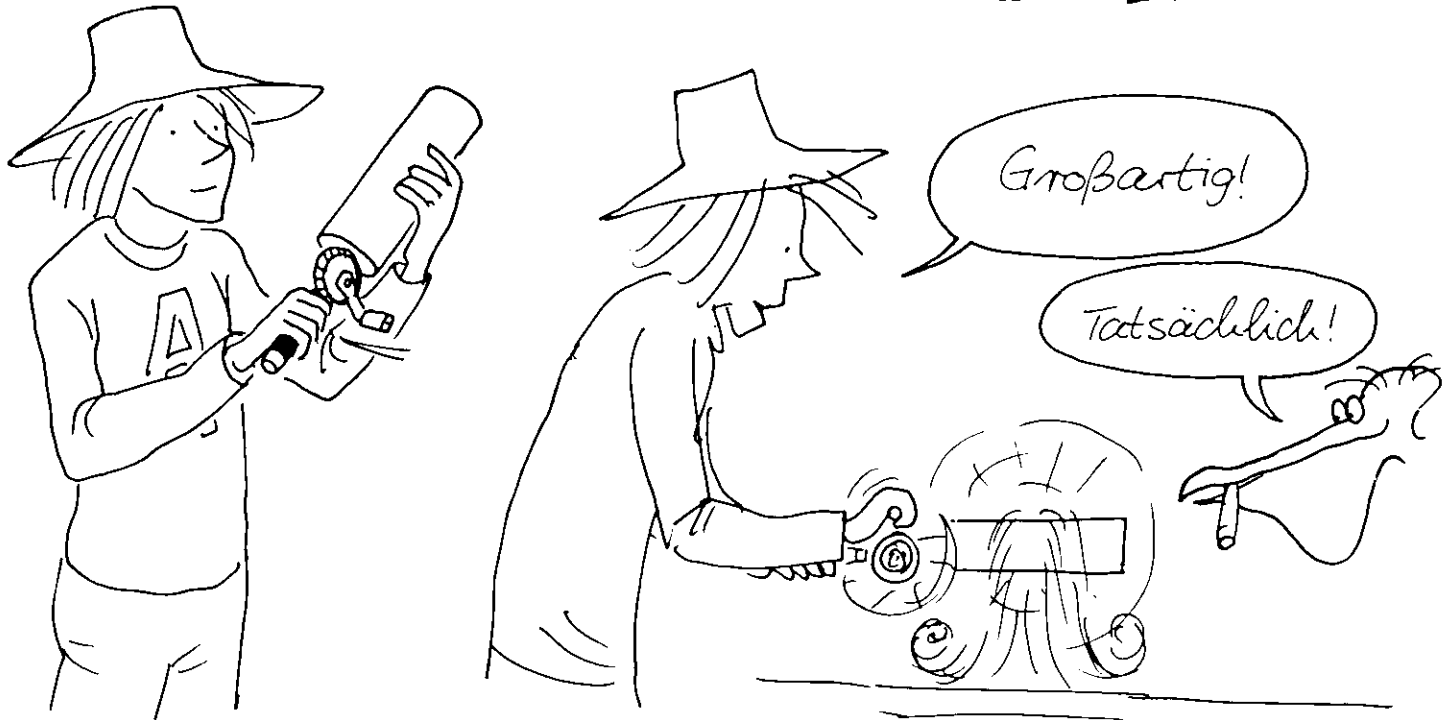


Was mit dem Ball geht, könnte vielleicht auch mit einem rotierenden Zylinder funktionieren?

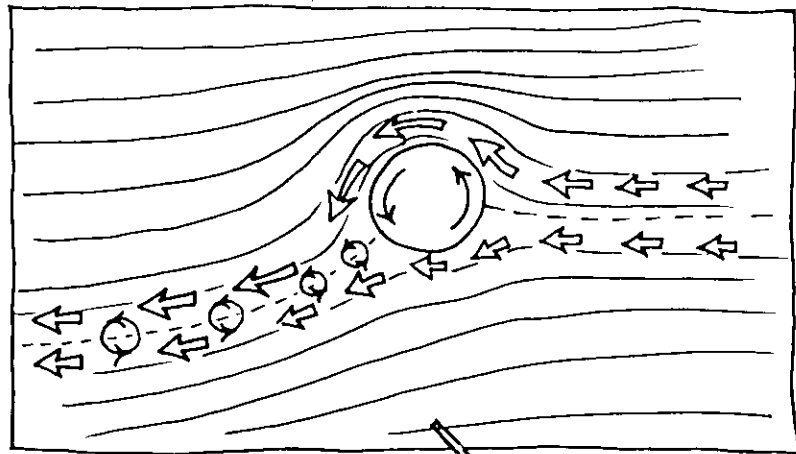


Wetten!

# DER FLETTNER-ROTOR



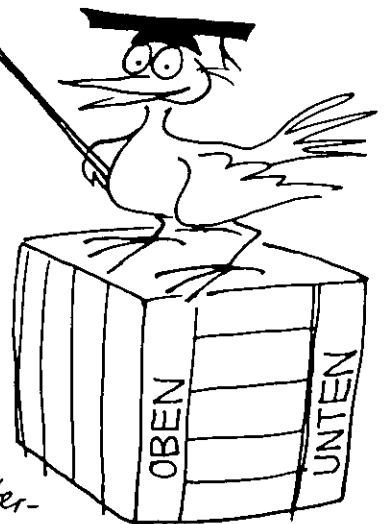
Liebe Kollegen und Freunde, lassen Sie uns gemeinsam überlegen, was in der Strömung vorgeht. Die Drehung des Zylinders erzeugt unterschiedliche Geschwindigkeiten in der oberen und unteren Strömung.



Wenn sich die beiden Luftschichten hinter dem Zylinder wieder vereinigen, reiben sie sich aneinander. Dadurch werden

- Mikroturbulenzen erzeugt, und
- die Unterschiede zwischen den Geschwindigkeiten ausgeglichen.

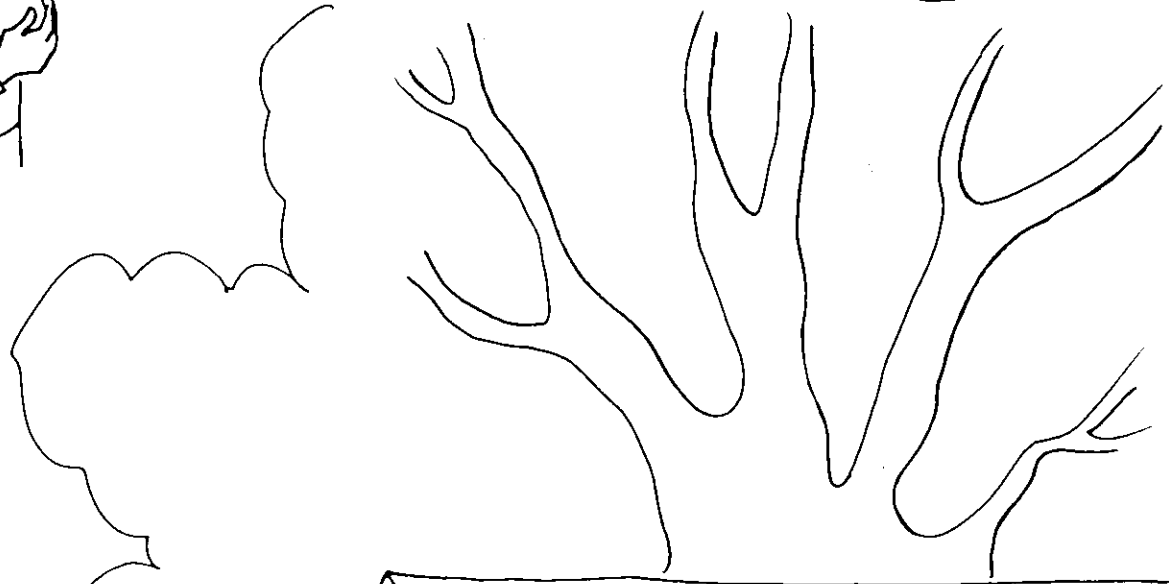
Infolge der unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten oberhalb und unterhalb des Zylinders besteht (nach dem Gesetz von Bernoulli) ein Druckunterschied, und dieser erklärt die Krümmung der Strömungslinien.







Wenn ich einen rotierenden Zylinder in der Luft bewege, so muß die Luft ihn tragen können. Ha! Sollte sich auf diese Weise eine fliegende Maschine bauen lassen?



KLONK  
KLONK!  
SCHWIEE

Was, soll denn das?



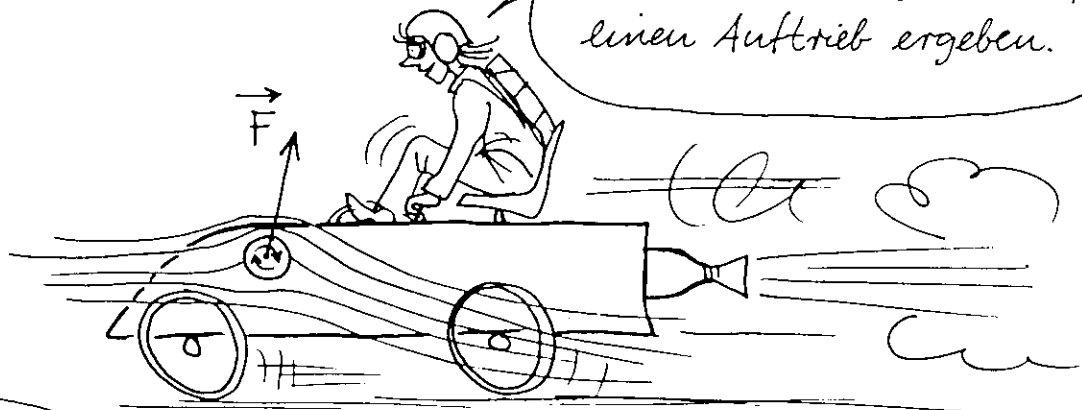
Das sieht kompliziert aus!

Jetzt brauche ich nur noch eine Antriebsrakete.



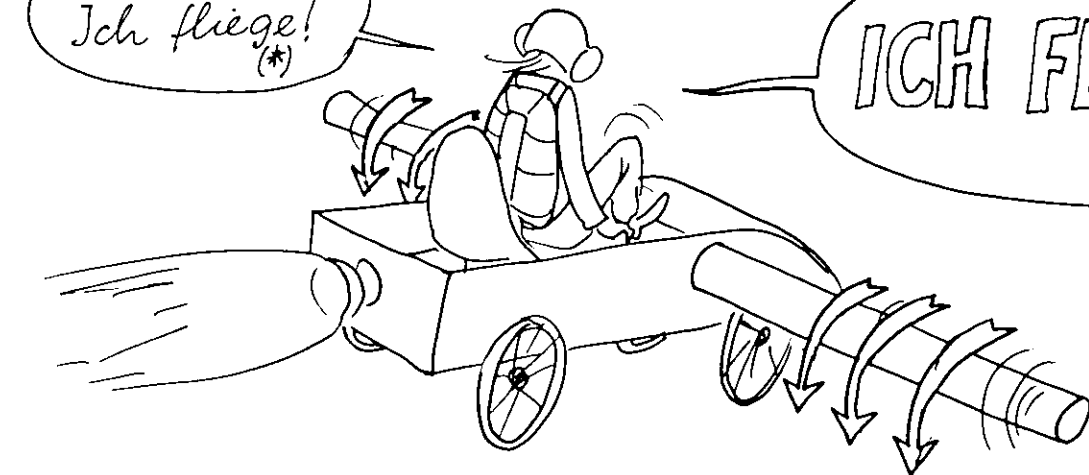


Die Kombination der beiden Bewegungen muß einen Auftrieb ergeben.

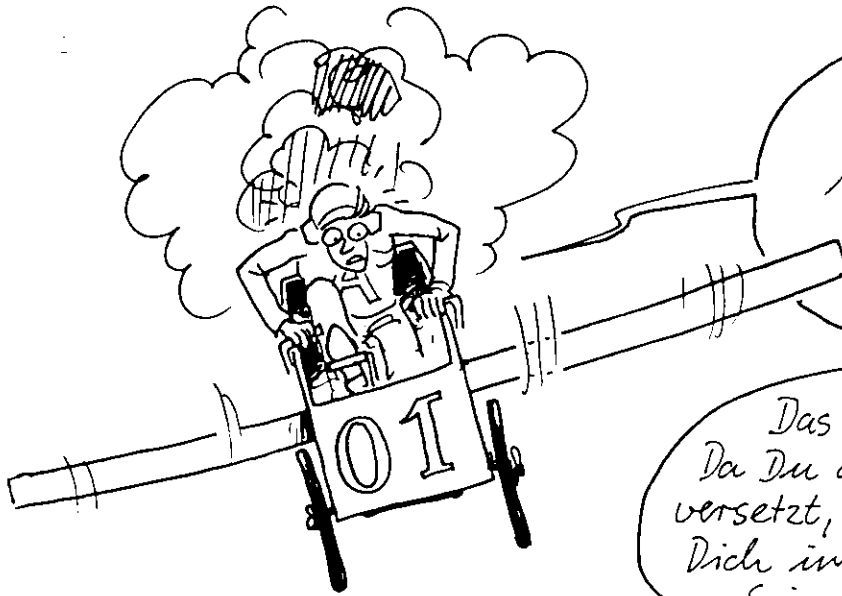


Es geht!  
Ich fliege!  
(\*)

**ICH FLIEGE!**



(\*) Wenn ich die nötige Kraft aufbringe, werde ich noch höher steigen!

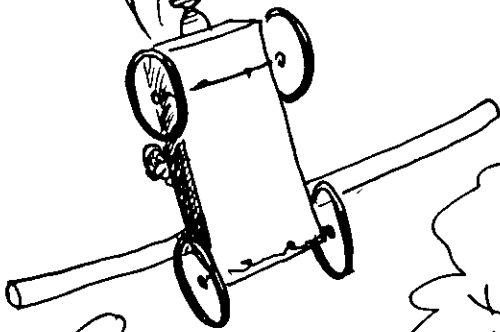


Hilfe!  
Meine Maschine geht in  
den Sturzflug über!

Das ist ganz normal.  
Da Du die Luft in Drehungen  
versetzt, beginnst Du selbst,  
Dich im entgegengesetzten  
Sinn zu drehen.

Das ist  
das Prinzip von  
AKTION und REAKTION.

Was für ein  
Prinzip?



Anselm, hättest Du mich doch vorher gefragt!  
Es geht alles viel einfacher, aber Du willst  
immer alles selbst machen. Komm' jetzt,  
der Kaffee ist fertig!





Oh, diese Abenteuer!

Komisch, was in einer Tasse Kaffee passiert!

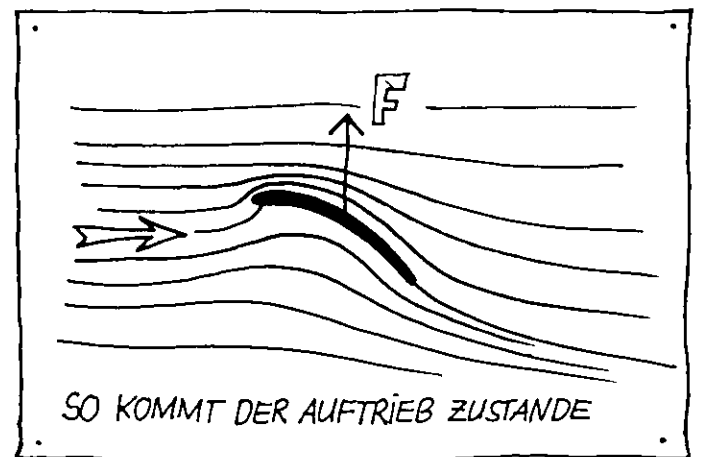
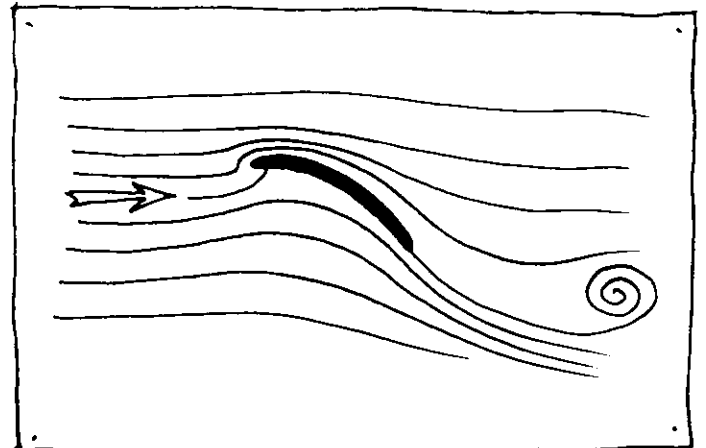
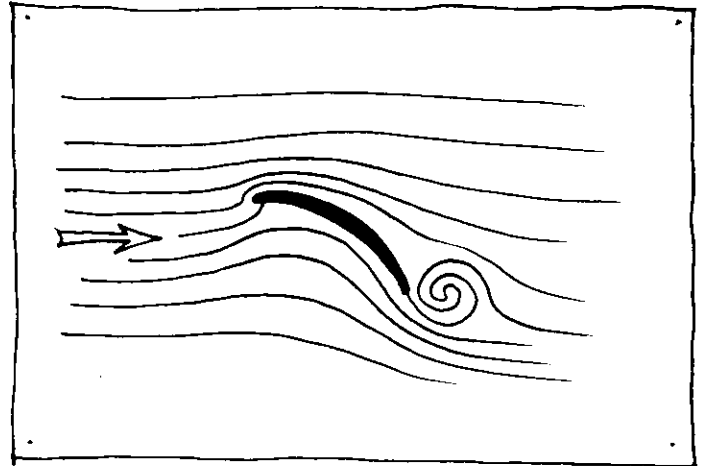
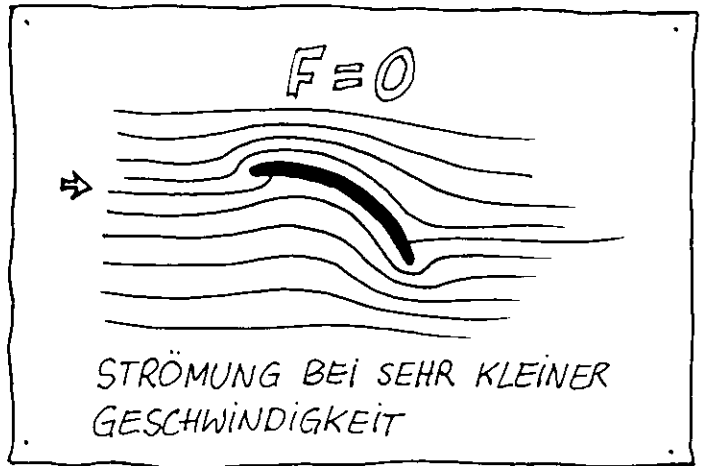


Wenn ich den Löffel vorsichtig bewege, fühle ich nur einen schwachen Widerstand...

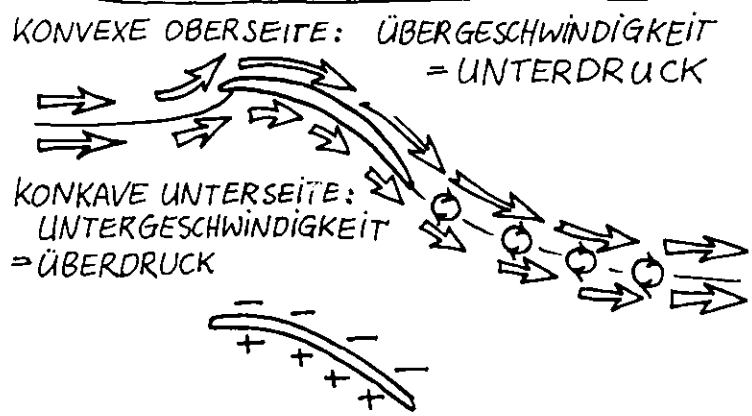


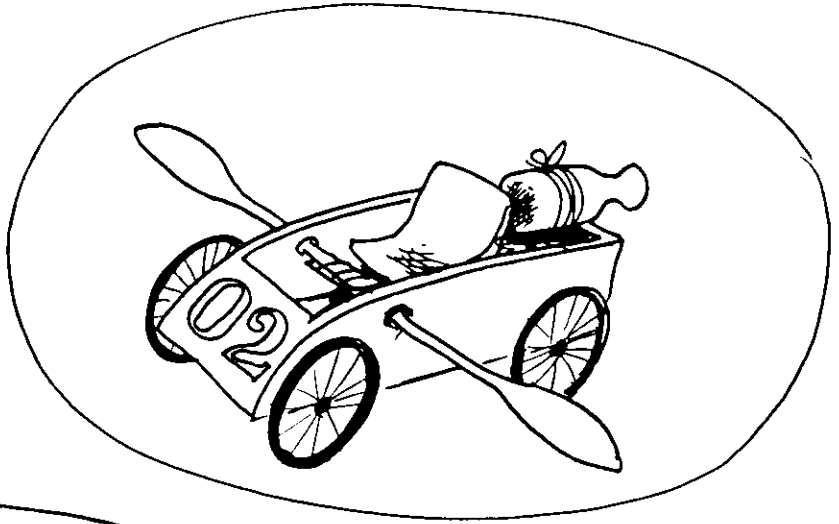
... wenn ich ihn aber schnell bewege, löst sich ein Wirbel ab.





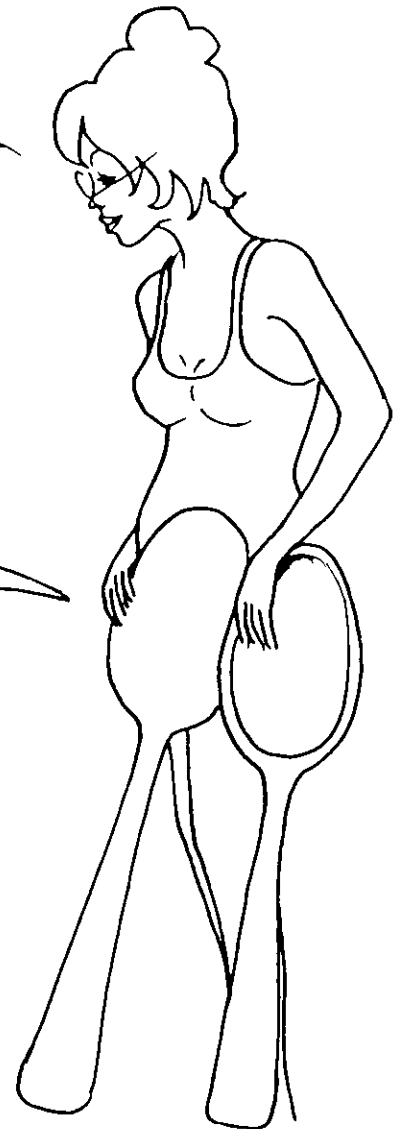
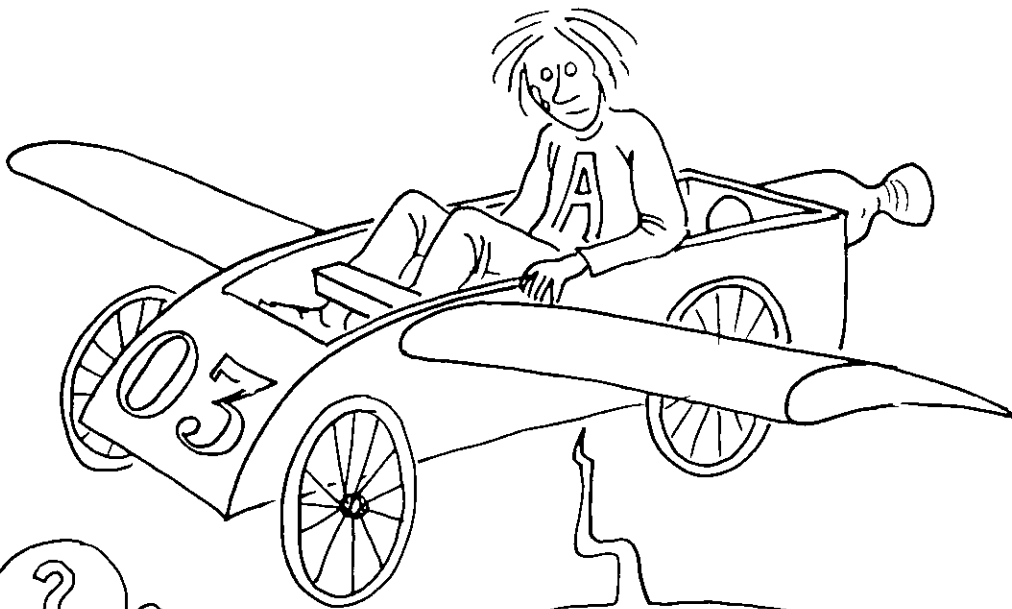
In den Zeichnungen hier siehst Du, wie sich die Strömung rings um den Löffel ändert, wenn Du ihn schneller bewegst. Der Kaffee strömt an der nach außen gewölbten (konvexen) Oberseite schneller als an der nach innen gewölbten (konkaven) Unterseite, und hinter dem Löffel löst sich ein Wirbel ab.





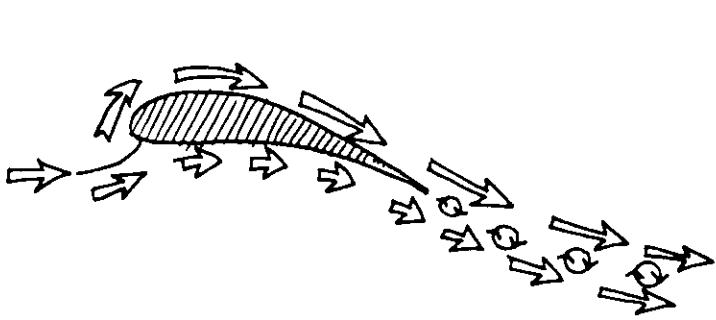
Ausgezeichnet! Ich werde  
mit Löffeln fliegen!

Der Flügel  
ist ein verbesserter  
Löffel.

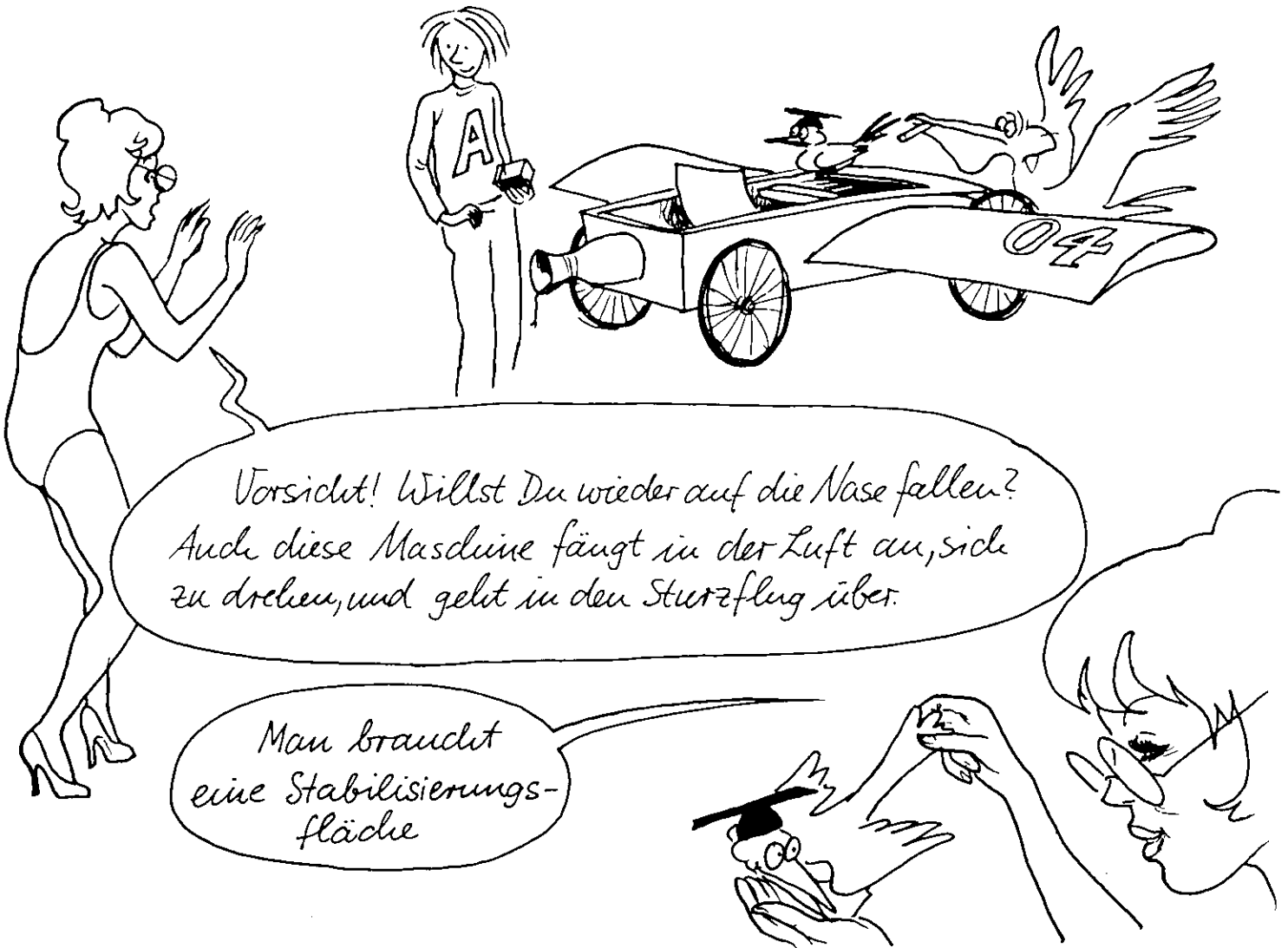


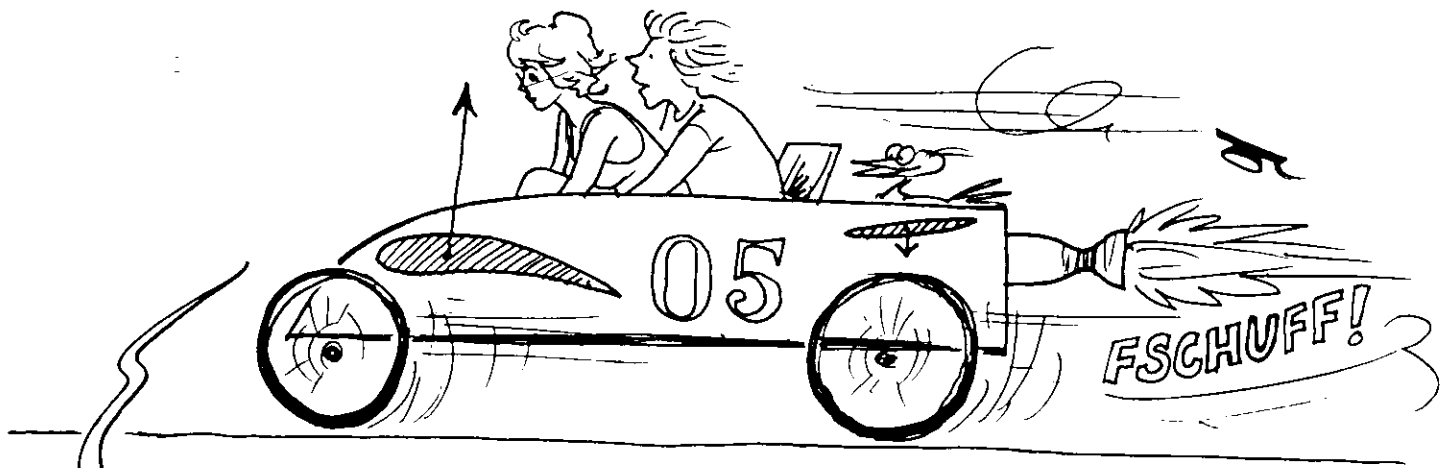
Eiwerstanden!  
Aber wo bleibt die  
Rotation?





Hinter dem Flügel findet man in strömender Luft die gleichen Mikroturbulenzen, wie hinter dem rotierenden Zylinder. Man kann den Flügel also als einen feststehenden Rotor auffassen

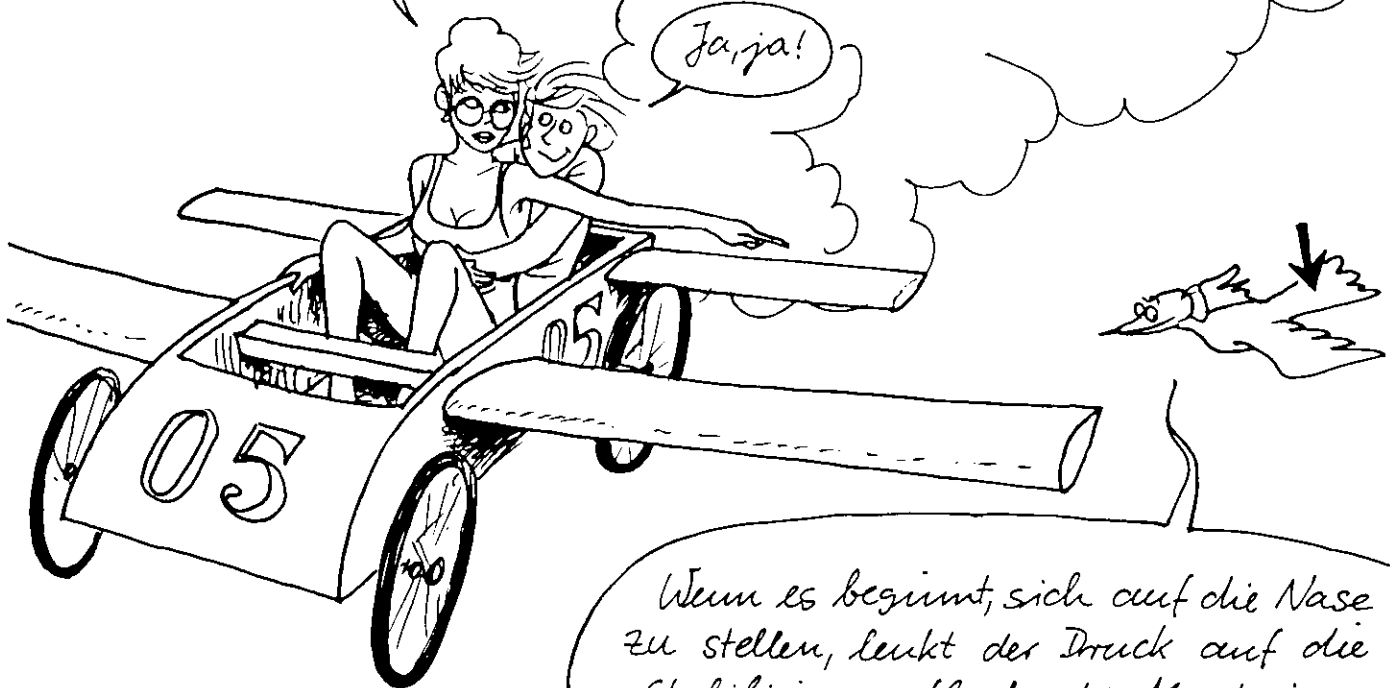




Die Stabilisierungsfläche ist ein kleiner Flügel, der in der Gegenrichtung geneigt ist und daher einen negativen Auftrieb erzeugt. Er drückt den Schwanz des Flugzeuges nach unten und verhindert, daß die Maschine nach vorn kippt.

Siehst Du Anselm, jetzt stabilisiert sich unser System von selbst!

Ja, ja!



Wenn es beginnt, sich auf die Nase zu stellen, lenkt der Druck auf die Stabilisierungsfläche die Maschine in die Flugrichtung zurück.





Die Stabilisierungsfläche  
hilft uns auch beim  
Aufstieg.



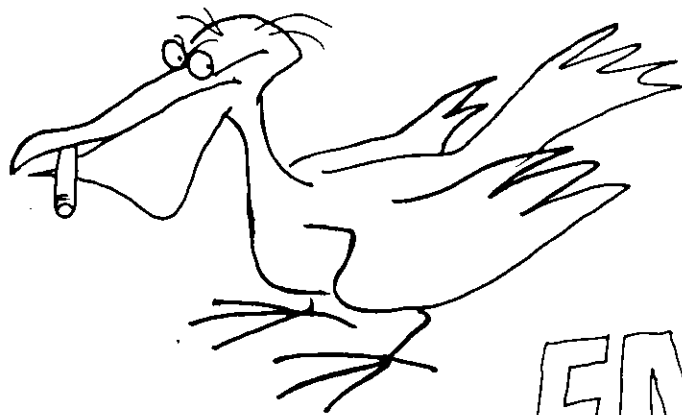
Anselm, hörst Du,  
was ich Dir sage?

Aber ja doch  
... aber ja doch!

Es ist wunderbar  
sich selbst-stabilisiert  
zu fühlen.



Und so lernte Anselm  
das Fliegen. Am Ende war alles  
furchtbar einfach. Und sein Interesse  
an der Wissenschaft wuchs  
mit der Flughöhe.



ENDE

Sie verstehen:  
Ohne die Reibung der Luft  
wäre die Strömung am Profil  
ganz und gar anders  
und würde keinen  
Auftrieb liefern.



WOLLEN SIE  
MIT MIR FLIEGEN?

