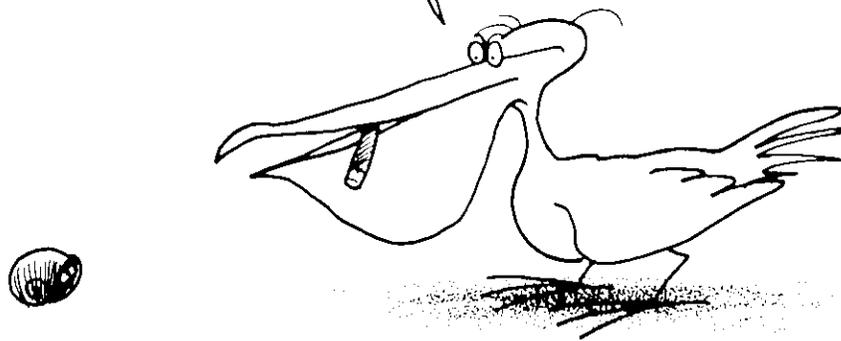


**JEAN-PIERRE PETIT**

DIE ABENTEUER DES ANSELM WÜßTEGERN

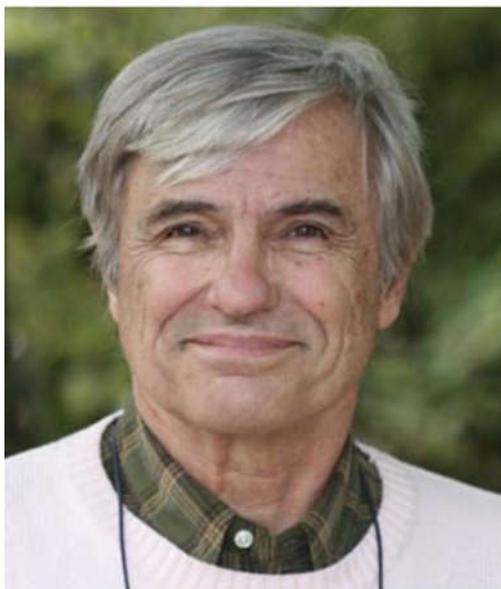
# DIE MAGNETISCHE SCHALLMAUER

Nur keine Wellen!



# 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.

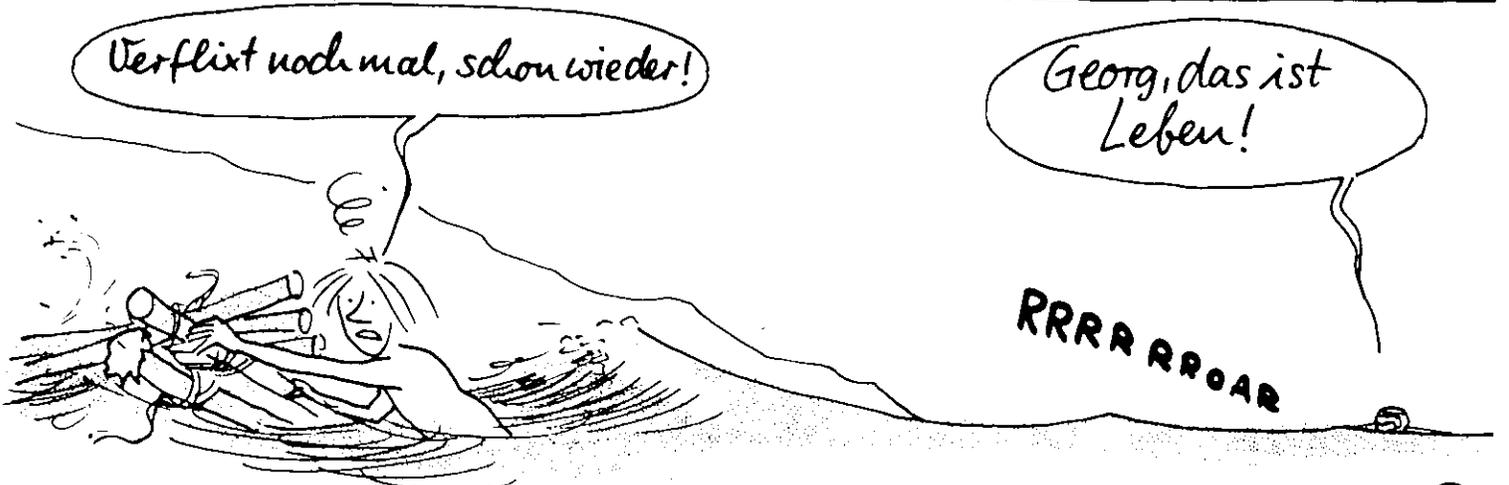
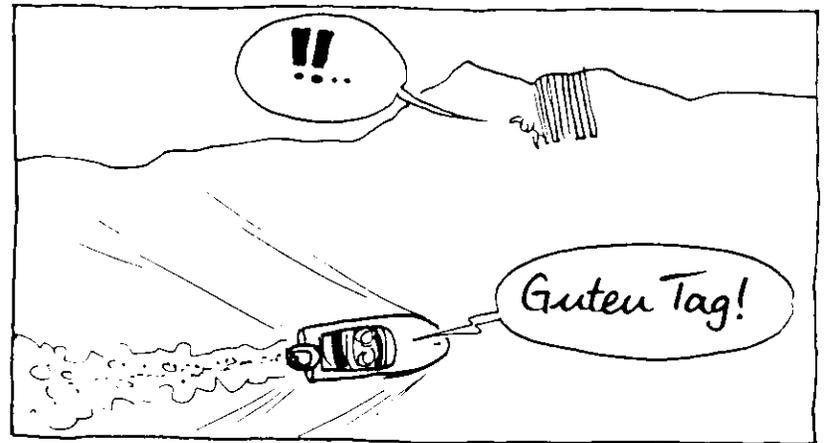
Ich verstehe Sie nicht.  
Da ist doch nichts,  
wo Sie suchen.

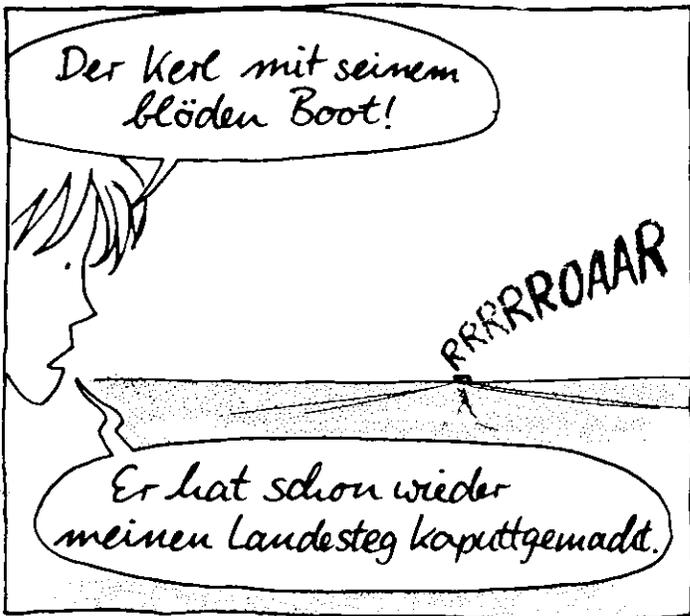




Ich weiß, aber hier  
ist wenigstens Licht.

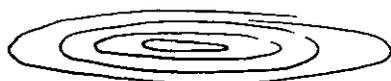
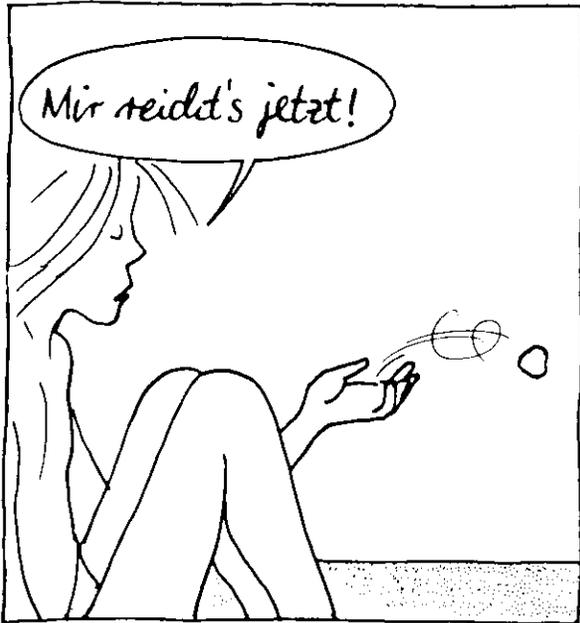
# PROLOG





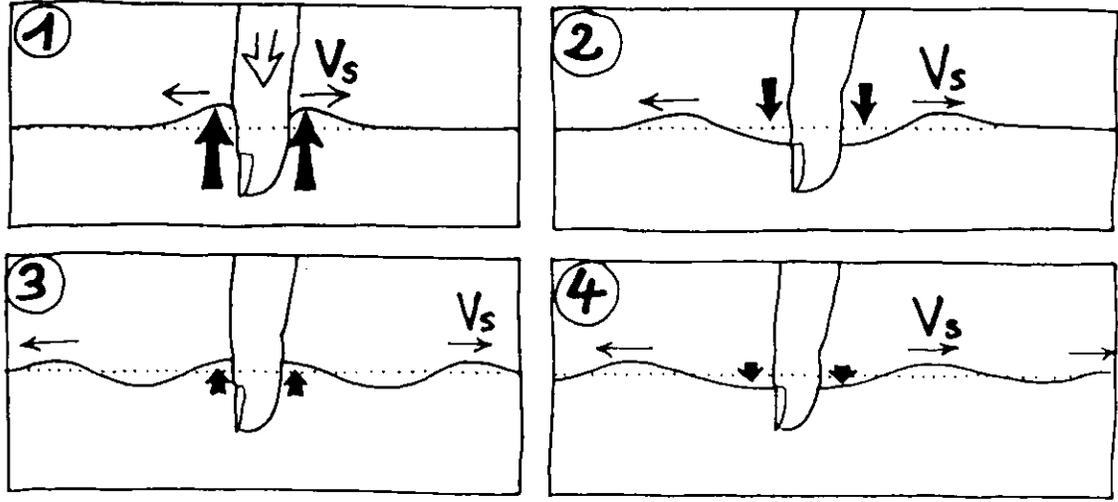
Von mir aus die Bugwelle. Das Resultat ist jedenfalls, daß alles kaputt ist.

# OBERFLÄCHENWELLEN

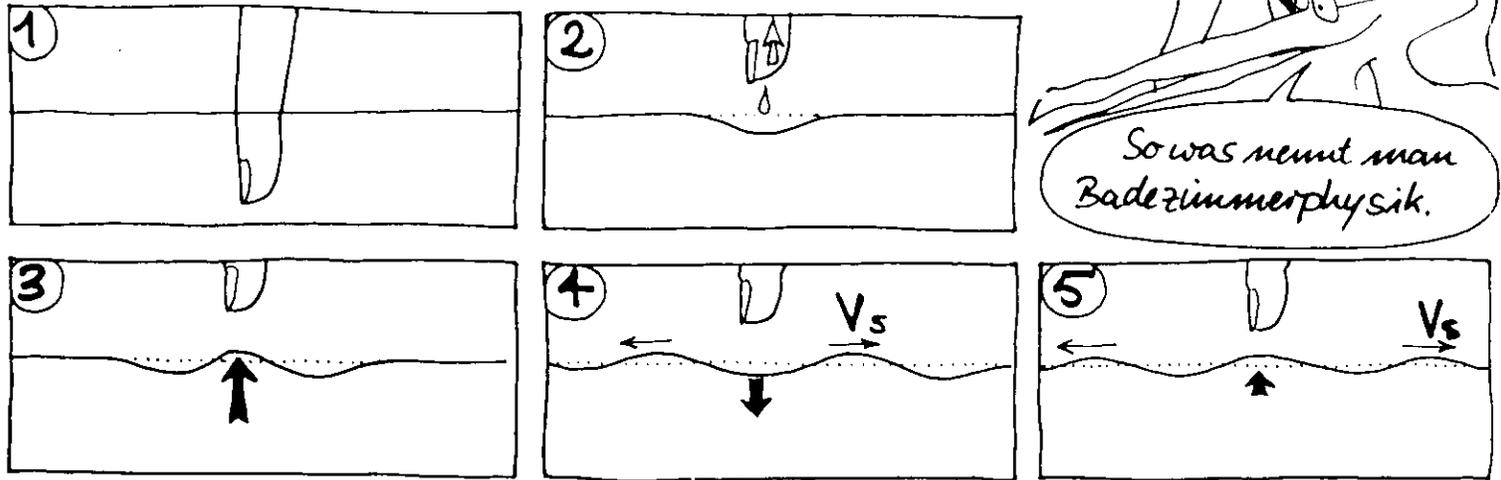




Wenn ich meinen Finger ruckartig eintauche, bildet sich eine Überhöhung, ein Wulst, der dann ausgeglichen wird durch eine Art Schwingung, durch OBERFLÄCHENWELLEN. Sie sind konzentrisch und werden nach außen hin schwächer. Anscheinend breiten sie sich mit einer konstanten Geschwindigkeit  $V_s$  aus.



Etwas Ähnliches passiert, wenn man den Finger aus dem Wasser herauszieht. Durch diesen Mechanismus versucht die Flüssigkeit, ihre ebene Oberfläche wieder herzustellen.



So was nennt man Badezimmerphysik.

Wenn sich die Wellen ausbreiten, wird die Energie auf eine immer größere Fläche verteilt.



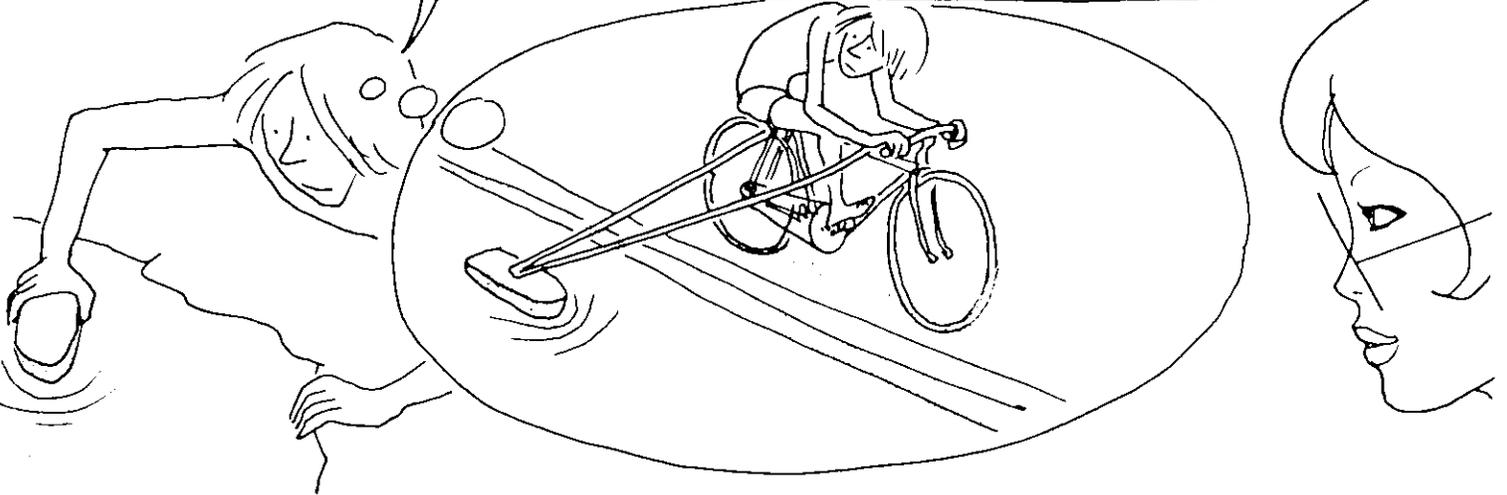
Und da die Energie erhalten bleibt, nimmt dabei die Amplitude der Wellen ab.

Wenn sich ein Gegenstand im Wasser bewegt, erzeugt er solche Wellen. Auf diese Art wird die Wasseroberfläche wieder eben.



Diese Wellen schieben die Moleküle, die vor dem bewegten Gegenstand sind, auseinander, damit die Flüssigkeit den Gegenstand aufnehmen kann.

Um das ganze zu untersuchen, wäre es gut, wenn ich den Gegenstand begleiten könnte.



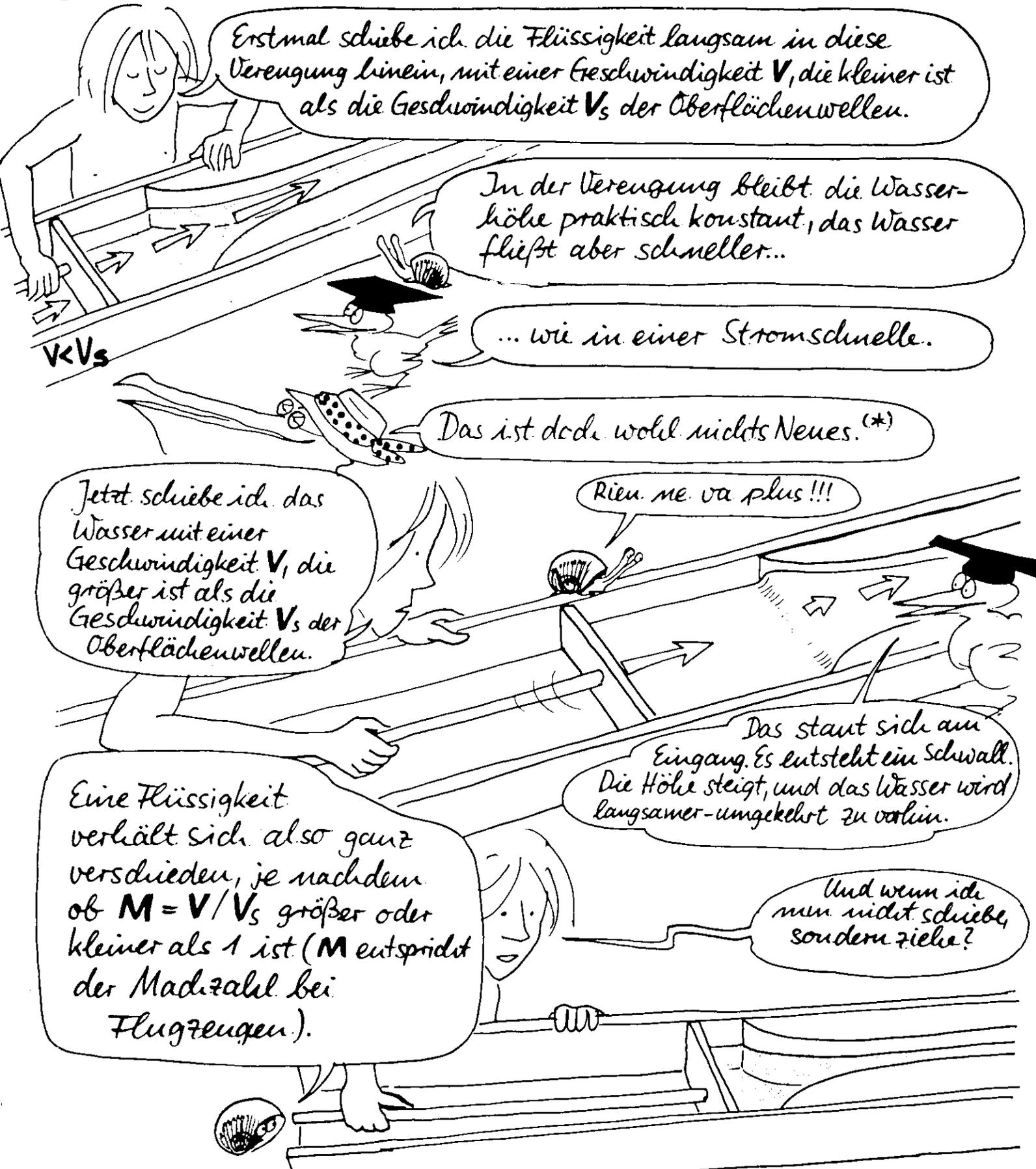
Etwas kompliziert, dein System. Statt des Gegenstands könntest du doch die Flüssigkeit bewegen.



Du hast Recht. Ich habe hier einen Wasserkanal gebaut. Mit diesem Schieber kann ich das Wasser in Bewegung setzen.

Direkt vor dem Schieber hat das Wasser dieselbe Geschwindigkeit  $v$  wie der Schieber.

# DIE HUGONIOT-BEZIEHUNG



Erstmal schiebe ich die Flüssigkeit langsam in diese Verengung hinein, mit einer Geschwindigkeit  $V$ , die kleiner ist als die Geschwindigkeit  $V_s$  der Oberflächenwellen.

In der Verengung bleibt die Wasserhöhe praktisch konstant, das Wasser fließt aber schneller...

... wie in einer Stromschnelle.

Das ist doch wohl nichts Neues. (\*)

Jetzt schiebe ich das Wasser mit einer Geschwindigkeit  $V$ , die größer ist als die Geschwindigkeit  $V_s$  der Oberflächenwellen.

Rien ne va plus!!!

Das staut sich am Eingang. Es entsteht ein Schwall. Die Höhe steigt, und das Wasser wird langsamer-umgekehrt zu vorhin.

Eine Flüssigkeit verhält sich also ganz verschieden, je nachdem ob  $M = V/V_s$  größer oder kleiner als 1 ist ( $M$  entspricht der Machzahl bei Flugzeugen).

Und wenn ich nun nicht schiebe, sondern ziehe?

(\*) Siehe Anselm Wüßtegens Abenteuer „Warum kann ich nicht fliegen?“ 7

Wenn du vorsichtig ziehst, so daß die Geschwindigkeit  $V$  des Wassers überall kleiner ist als die Geschwindigkeit  $V_s$  der Oberflächenwellen, wird das Wasser in der Verbreiterung des Kanals langsamer; die Wasserhöhe bleibt praktisch konstant.



Diese beiden völlig verschiedenen Verhaltensweisen faßte der französische Physiker HUGONIOT in einem Theorem zusammen:

Hugoniot	$V$ kleiner als $V_s$ („Machzahl“ $M$ größer als 1)	$V$ größer als $V_s$ („Machzahl“ $M$ größer als 1)
In einer VERENGUNG Die Flüssigkeit: Der Wasserspiegel:	wird schneller bleibt auf gleicher Höhe	wird langsamer sinkt steigt
In einer VERBREITERUNG Die Flüssigkeit: Der Wasserspiegel:	wird langsamer bleibt auf gleicher Höhe	wird schneller sinkt

Also nochmal: Je mehr man weniger schnell ist, und je weniger die Geschwindigkeit größer ist... oder nein... wohl eher umgekehrt...

Hi Hi Hi...

Uff!... Mir reicht's jetzt, diese Flüssigkeitsmasse ständig hin- und herzuschieben. Das müßte doch auch anders gehen.

So vielleicht. Indem man das Brett mehr oder weniger neigt, kann man die Strömungsgeschwindigkeit  $V$  beliebig einstellen.

Jetzt hat er aber doch alles verändert!...

Aber nein! Das Resultat ist dasselbe wie vorher.

Da ist wieder die Strömung in einer Verbreiterung! Unterhalb der kritischen Geschwindigkeit  $V_s$  wird die Flüssigkeit langsamer, und die Höhe bleibt praktisch konstant.

Erreicht die Flüssigkeit eine Geschwindigkeit  $V$ , die größer ist als  $V_s$ , sinkt der Wasserspiegel in der Verbreiterung und das Wasser wird schneller.

Geschwindigkeit  $V$  kleiner als die Geschwindigkeit  $V_s$  der Oberflächenwellen. „Machzahl“  $M < 1$

„MACHZAHL“  $M > 1$

ABSENKUNGS-ZONE

# WELLENFRONTEN

So, mal sehen, was passiert, wenn das Wasser durch eine Verengung fließt.

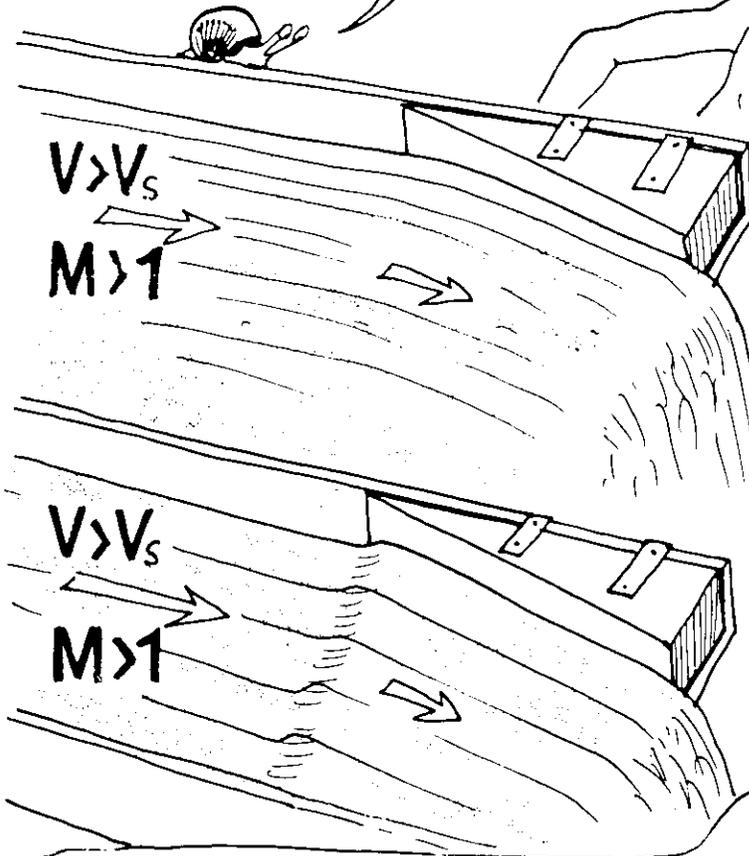
$V$  kleiner als  $V_s$   
 $M$  kleiner als 1



Wenn die Strömungsgeschwindigkeit  $V$  kleiner ist als  $V_s$  (Geschwindigkeit der Oberflächenwellen), nimmt  $V$  in der Verengung zu und die Wasserhöhe bleibt konstant.

Wenn aber  $V$  größer wird als  $V_s$ , steigt der Wasserspiegel und die Strömung wird langsamer.

Kipp doch das Brett noch etwas mehr, Anselm, mal sehen was passiert...



Dann ändern sich die Parameter der Flüssigkeit sprunghaft beim Durchgang durch eine WELLENFRONT. Das Wasser wird langsamer, und der Wasserspiegel wird angehoben.

# UMSTRÖMUNG EINES PROFILS

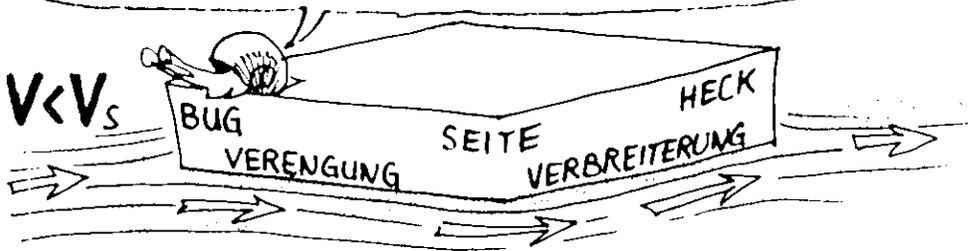
So... da alles funktioniert, kann ich endlich untersuchen, wie die Strömung um ein Profil herum aussieht.

Ich mache zunächst  $V$  kleiner als  $V_s$ .

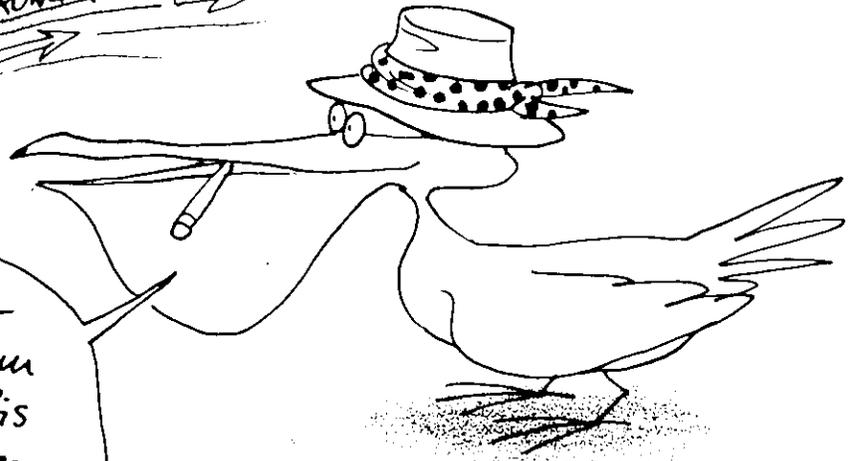


Dies ist das Modell eines Schiffsrumpfes.

Vom Bug an wird das Wasser zunächst beschleunigt, das entspricht einer Verengung.

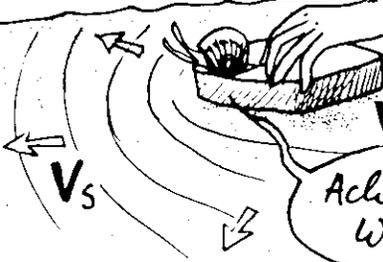


Hmm... tatsächlich! Bei der Seitenkante ist die Geschwindigkeit am größten. Dann wird das Wasser bis zum Heck hin wieder langsamer und erreicht schließlich dieselbe Geschwindigkeit wie am Anfang. Und der Wasserspiegel ist überall gleich.



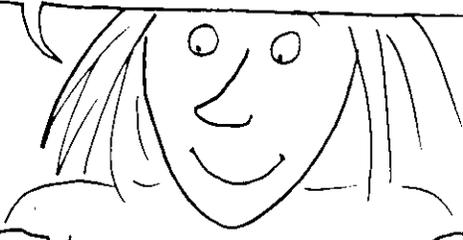


Die Oberflächenwellen, die sich mit der Geschwindigkeit  $V_s$  ausbreiten, können stromaufwärts laufen. So wird die Flüssigkeit vom Vorhandensein des Gegenstandes vorher "informiert", sie hat Zeit, den Empfang vorzubereiten: Sie beginnt auszuweichen, bevor der Gegenstand da ist.

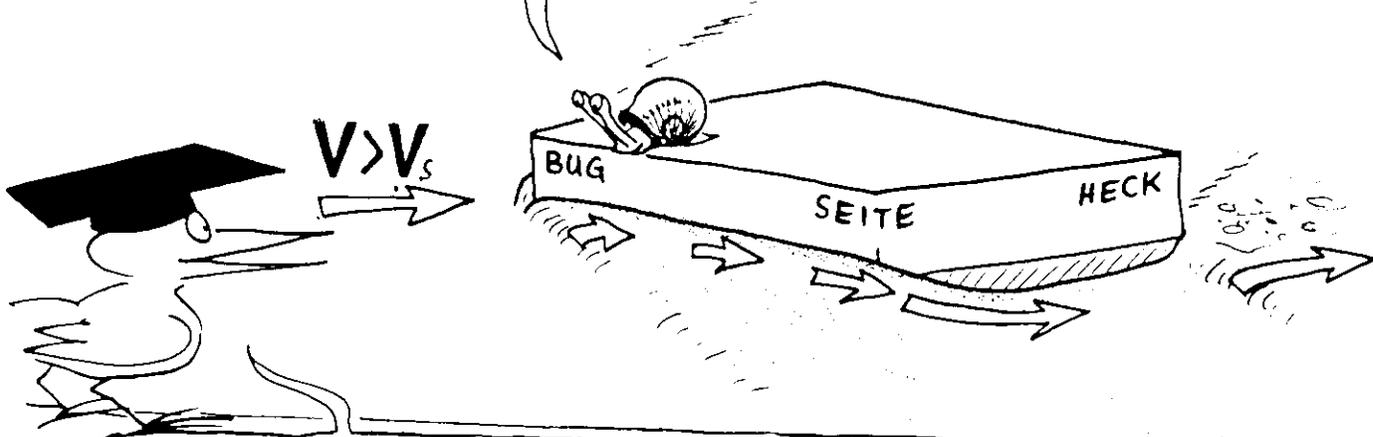


$V < V_s$   
Achtung da vorn!  
Wir kommen!...

So, jetzt neigen wir das Brett etwas mehr, so daß  $V$  größer als  $V_s$  wird!



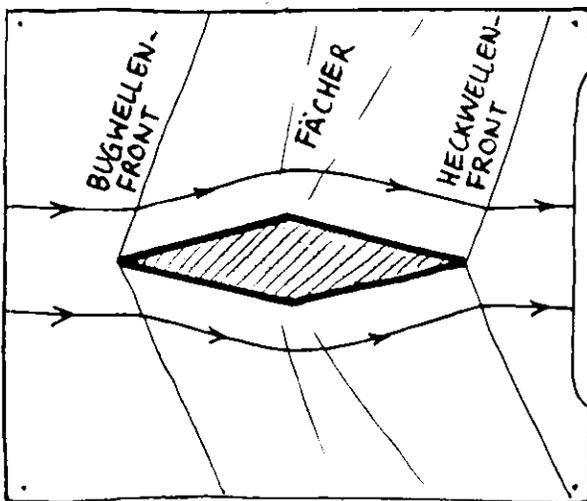
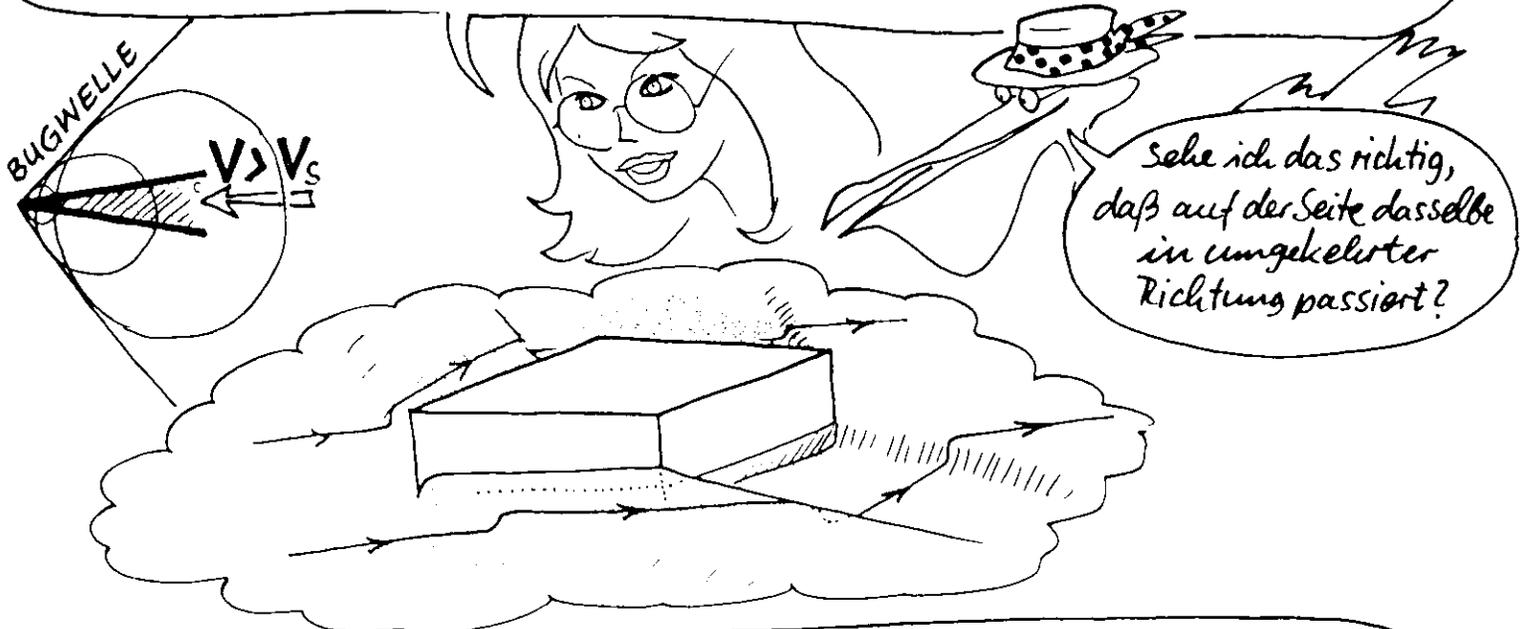
Nach dem Theorem von Hugoniot wird das Wasser beim Bug langsamer, an der Seite schneller und am Heck wieder langsamer.



Auf der Höhe des Bugs wird das Wasser sprunghaft langsamer, es steigt über den Normalpegel. An der breitesten Stelle angekommen, wird es wieder beschleunigt und sogar „überbeschleunigt“, d. h. seine Geschwindigkeit wird größer als die der freien Strömung. Gleichzeitig sinkt der Wasserspiegel unter den Normalpegel. Am Heck stellen sich Strömungsgeschwindigkeit und Wasserspiegel sprunghaft wieder auf ihre alten Werte ein.

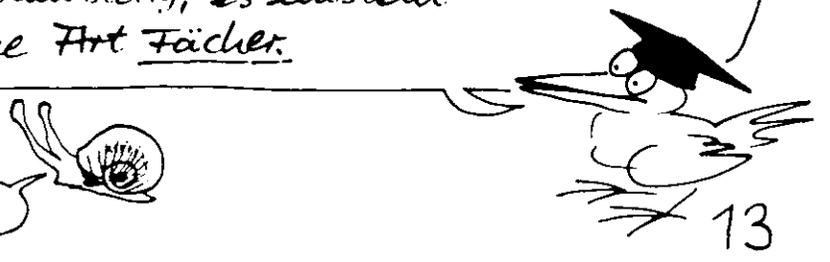
# DIE BUGWELLE

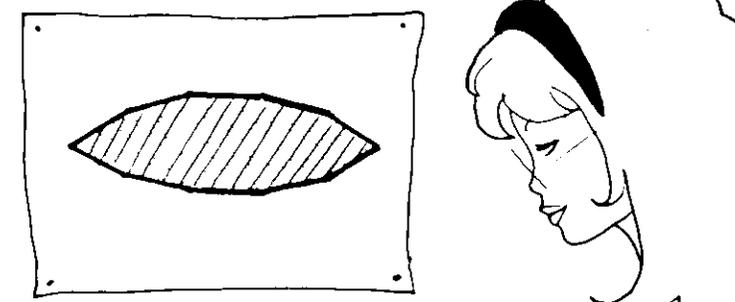
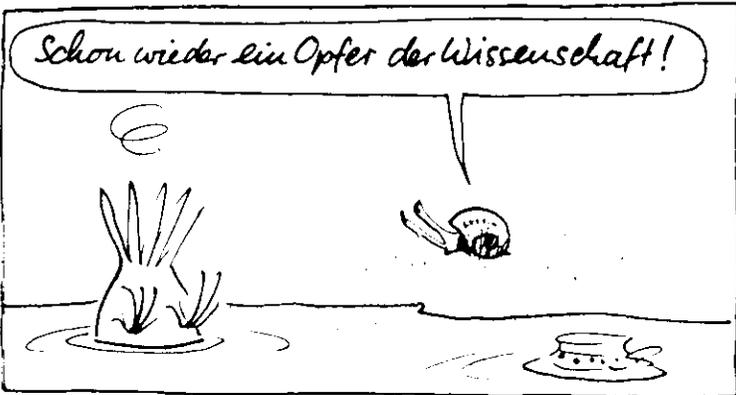
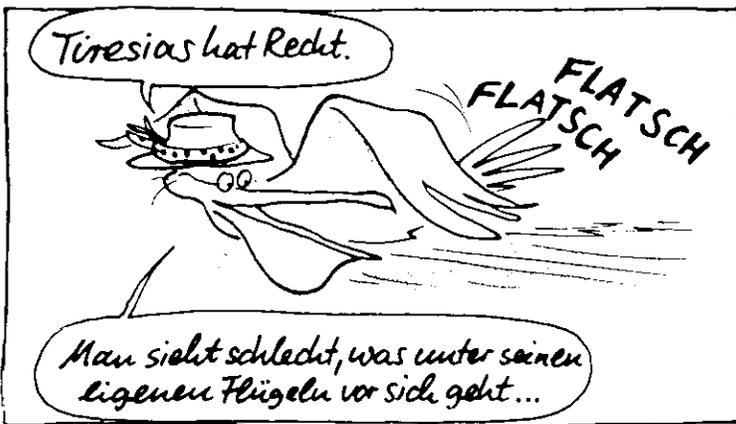
Wenn  $V$  größer als  $V_s$  ist, entstehen Wellenfronten, Sprünge im Wasserspiegel. Der Bug sendet Oberflächenwellen aus, die nicht mehr stromaufwärts gelangen können. Sie schieben sich übereinander und bilden einen Wulst aus Wasser: die Bugwelle.



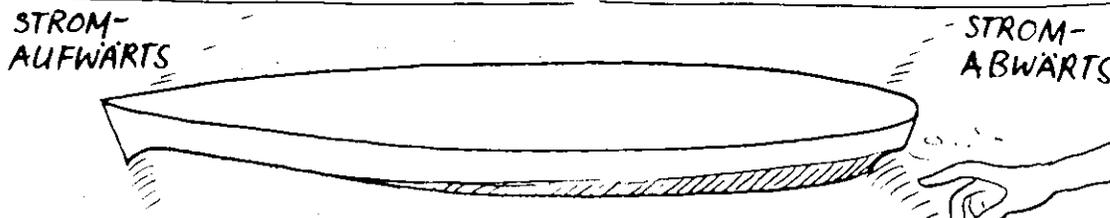
Ja, ja, Leo, am Bug und am Heck geschehen die Geschwindigkeits- und Höhenänderungen sprunghaft in den Wellenfronten. An der Seite dagegen variieren Geschwindigkeit und Niveau stetig, es entsteht eine Art Fächer.

Beobachten, Leo, beobachten!





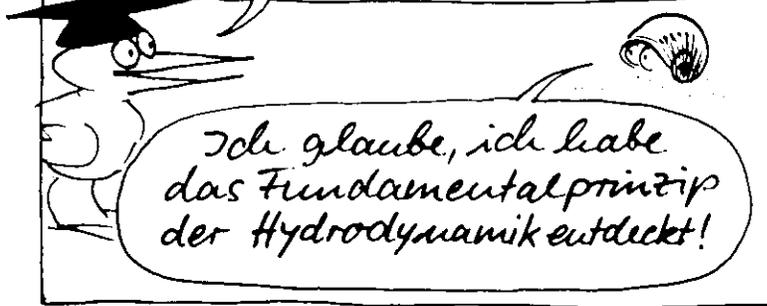
Einen Schiffsrumpf kann man sich vorstellen als eine Folge ebener Flächen.



Und die Heckwelle sorgt für den Anschluß an das Wasser stromabwärts. Das erklärt, warum ein Schiff keine Furche im Wasser erzeugt.

Außerdem wird die Geschwindigkeitsänderung, die durch die Reibung des Wassers am Schiffsrumpf hervorgerufen wird, durch die Turbulenz hinter dem Schiff rückgängig gemacht.

Tiresias, Sie überraschen mich immer wieder. Worin besteht es denn?



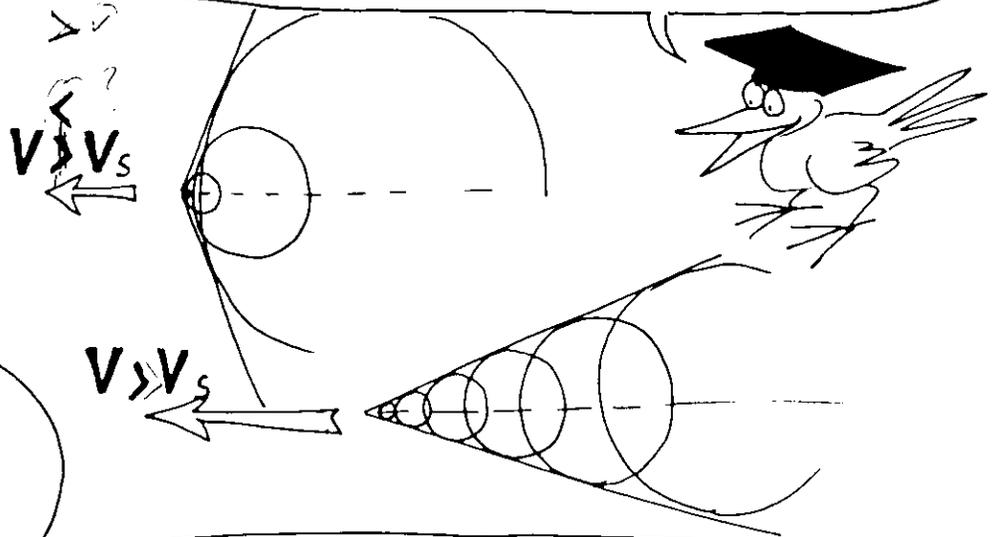
ES WIRD GEBETEN, DIE FLÜSSIGKEIT SO ZU BELASSEN, WIE MAN SIE VORGEFUNDEN HAT.

# MESSUNG DER GESCHWINDIGKEIT

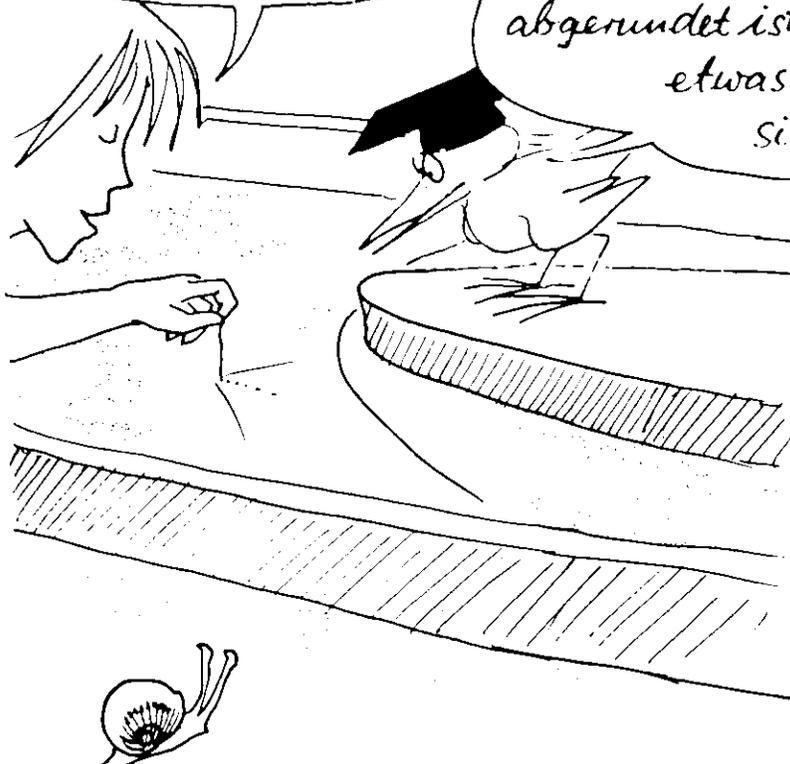
Um das alles zu verstehen, müßte man die Geschwindigkeit messen können.



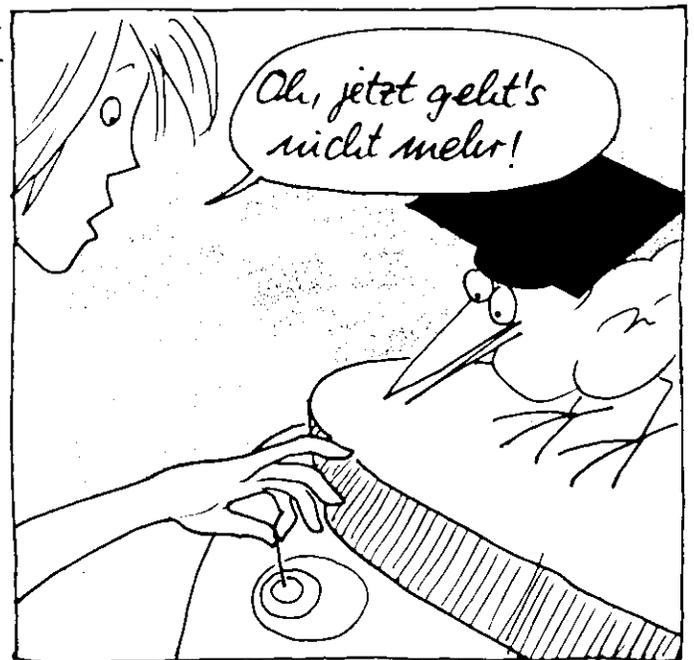
Hält man eine dünne Nadel in eine Strömung, für die  $V$  größer als  $V_s$  ist, so sind die unterschiedlichen Wellenfronten um so stärker zur Bewegungsrichtung hin geneigt, je größer die Strömungsgeschwindigkeit ist.



Du hast recht, Max. So kann man die Geschwindigkeit  $V$  sogar messen (\*).



Hast Du das gesehen: wenn der Bug abgerundet ist, entsteht die Wellenfront etwas weiter vorn, sie hat sich abgelöst.

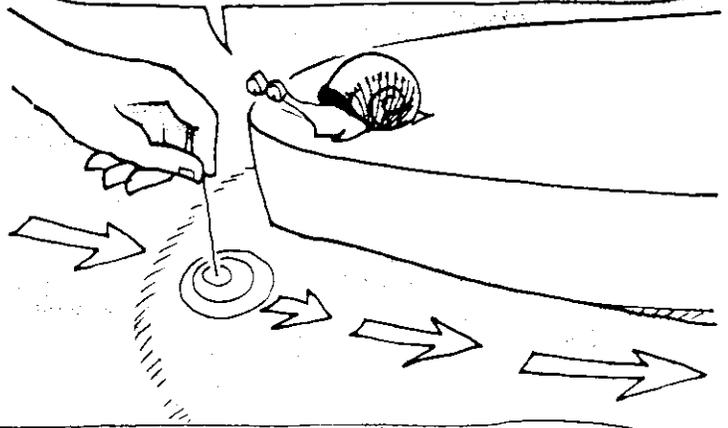


(\*). Siehe Anhang A

Das ist ganz normal. In dem Gebiet hier, in der Nähe des stumpfen Bugs, ist die Geschwindigkeit  $V$  unter dem Wert  $V_s$  gefallen.

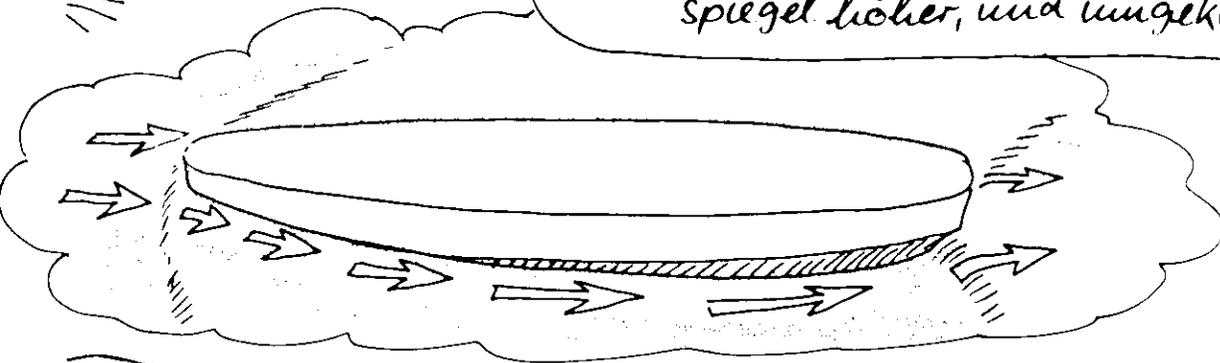


Es ist so, als ob sich der Gegenstand mit Hilfe der Bugwelle ein Gebiet schafft, in dem  $V$  kleiner als  $V_s$  ist, damit er sich ungezwungen bewegen kann.



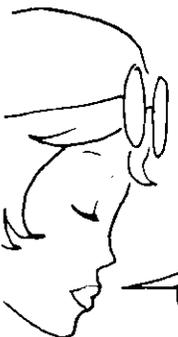
Aber wie kann denn das Wasser mit einer so niedrigen Geschwindigkeit überhaupt abfließen?

Das ist doch trivial, mein lieber Leo: Wo die Strömung langsamer ist, ist der Wasserspiegel höher, und umgekehrt.



Langsam wird doch alles etwas klarer.

Schluss jetzt!  
Es gibt Essen.



Es wäre nicht schlecht, wenn man diese Wellen irgendwie wegbringen könnte.

Die verbrauchen doch nur Energie!

Da wird irgendwas eingefädelt. Aber was nur?

Ja, da steckt Energie drin. Beweis: Der Nachbar kann mit seinem Boot unseren Landesteg kaputt machen.

Solange man die Flüssigkeit stromaufwärts „warren“ kann, bildet sich keine Welle...

Also müßte man, auch wenn man sich schneller als die Oberflächenwellen bewegt, irgendwie auf die Flüssigkeit stromaufwärts einwirken.

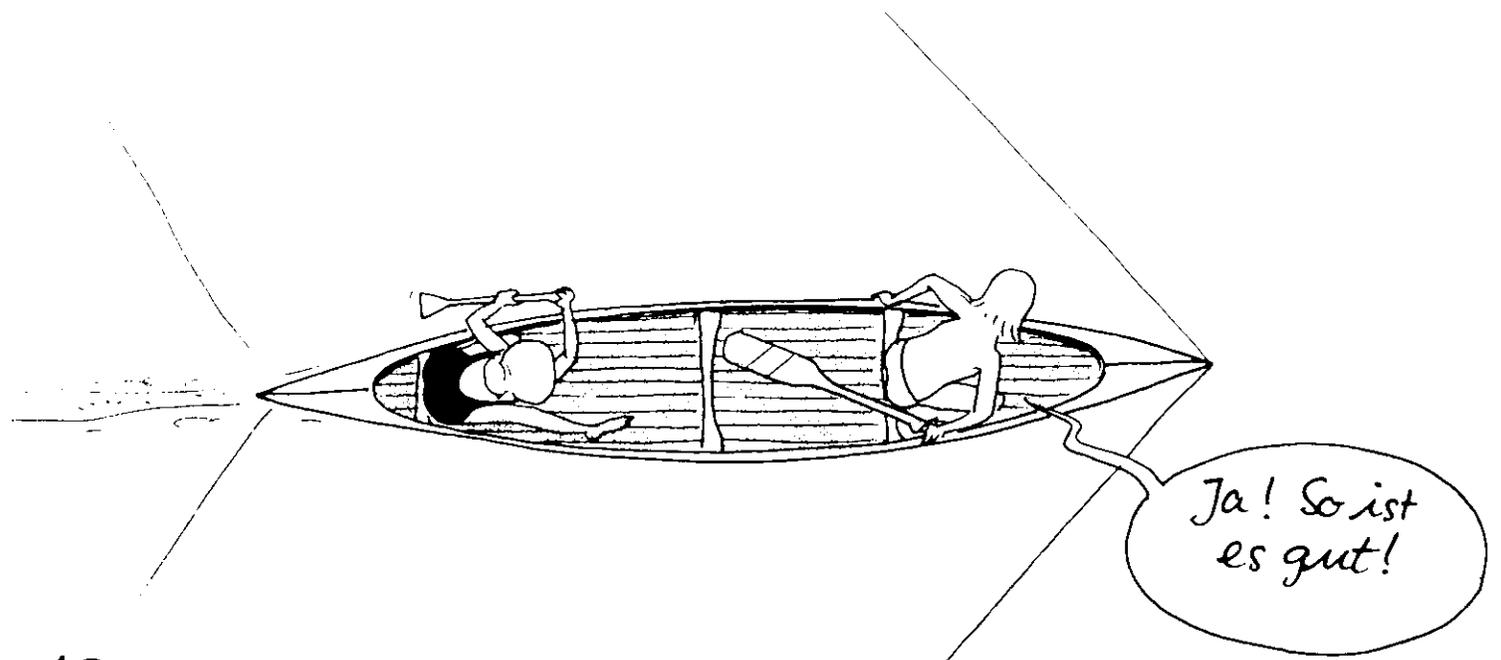
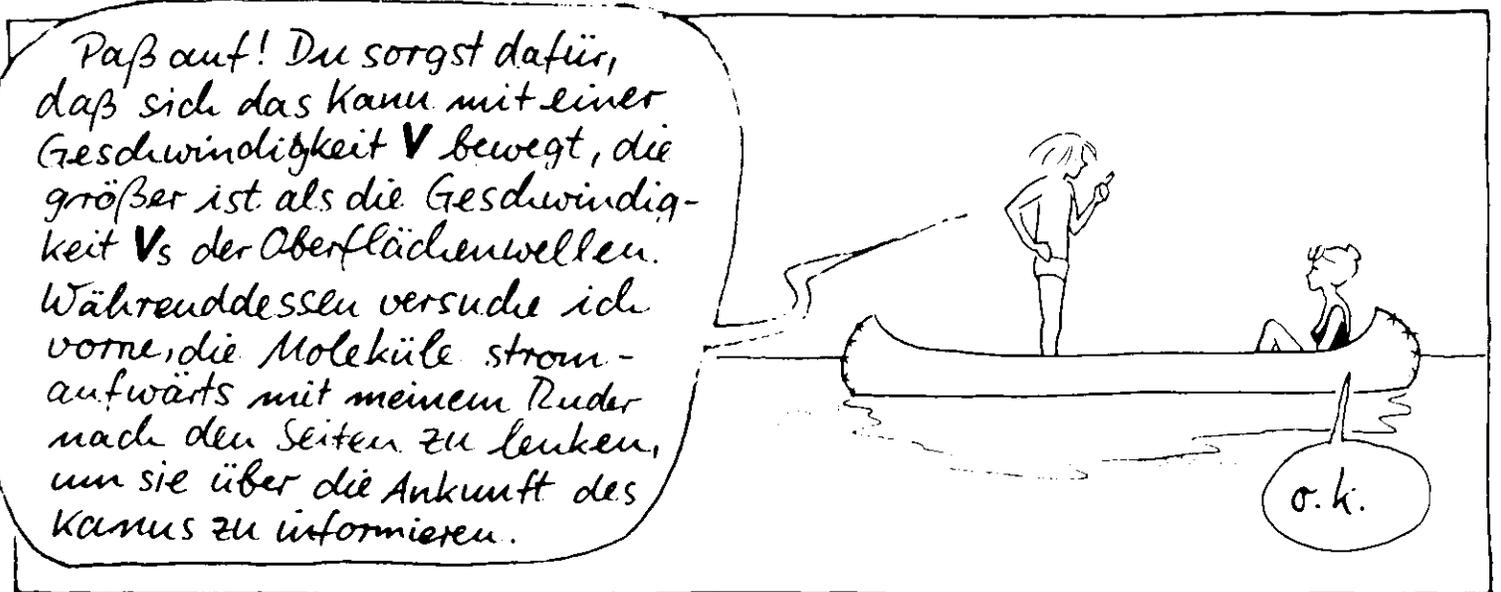
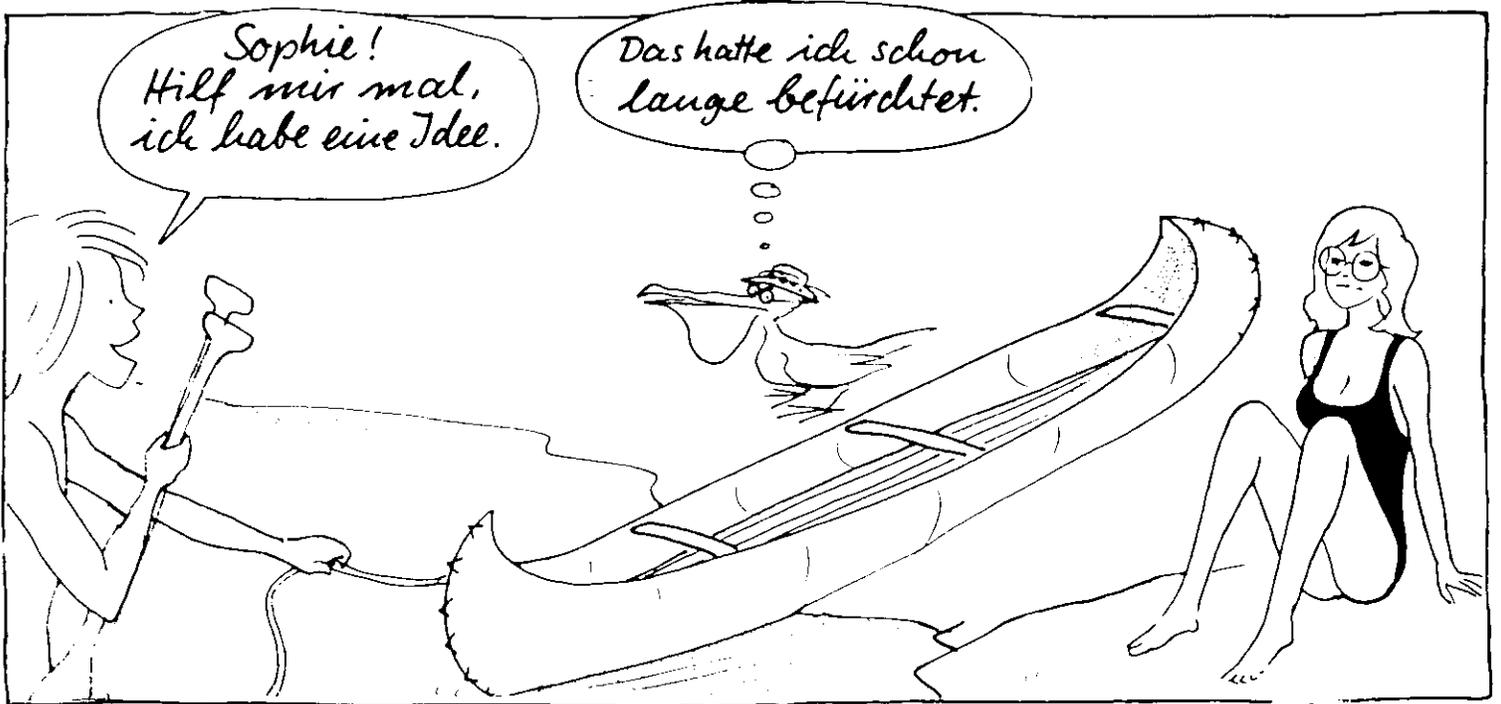
HEPP!

Geschirr-spülen...

Es muß doch eine Lösung geben.

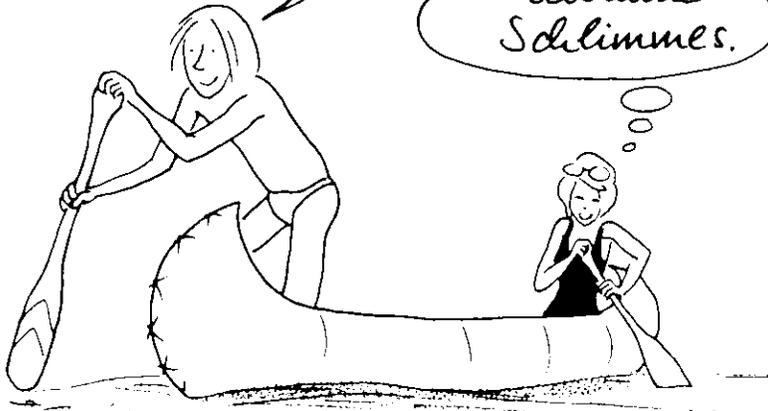
AH!...

SCHNIPP!

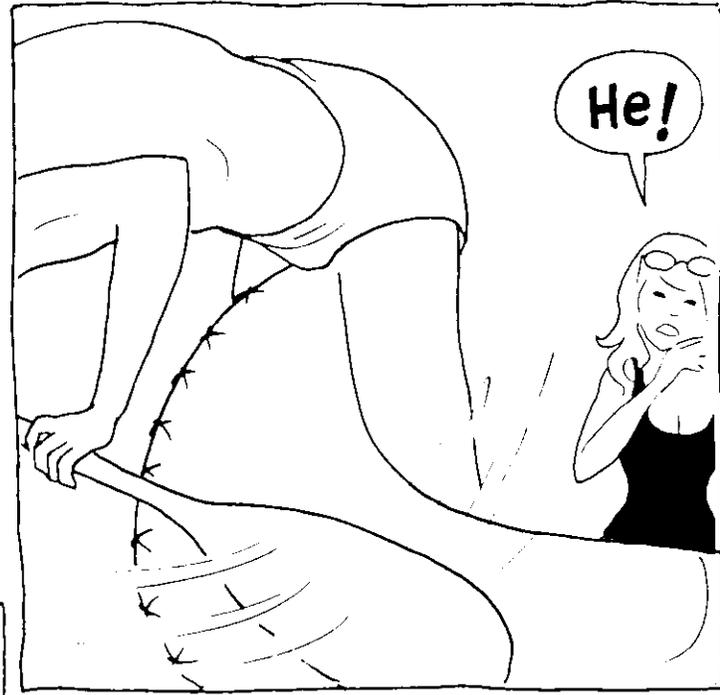


Mal sehen, was wir sehen werden.

Ich ahne Schlimmes.



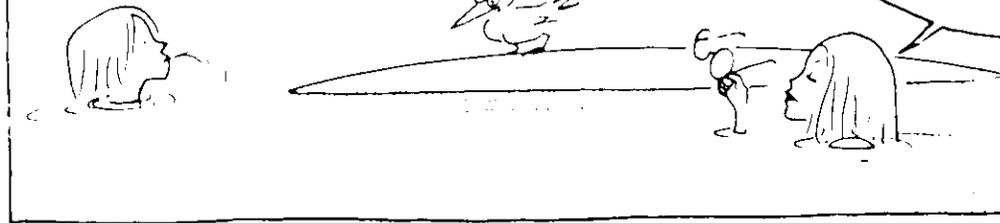
He!



So geht's wohl nicht...

Was soll denn das?

Ach nichts. Auseln hat nur versucht, die Moleküle zu informieren!



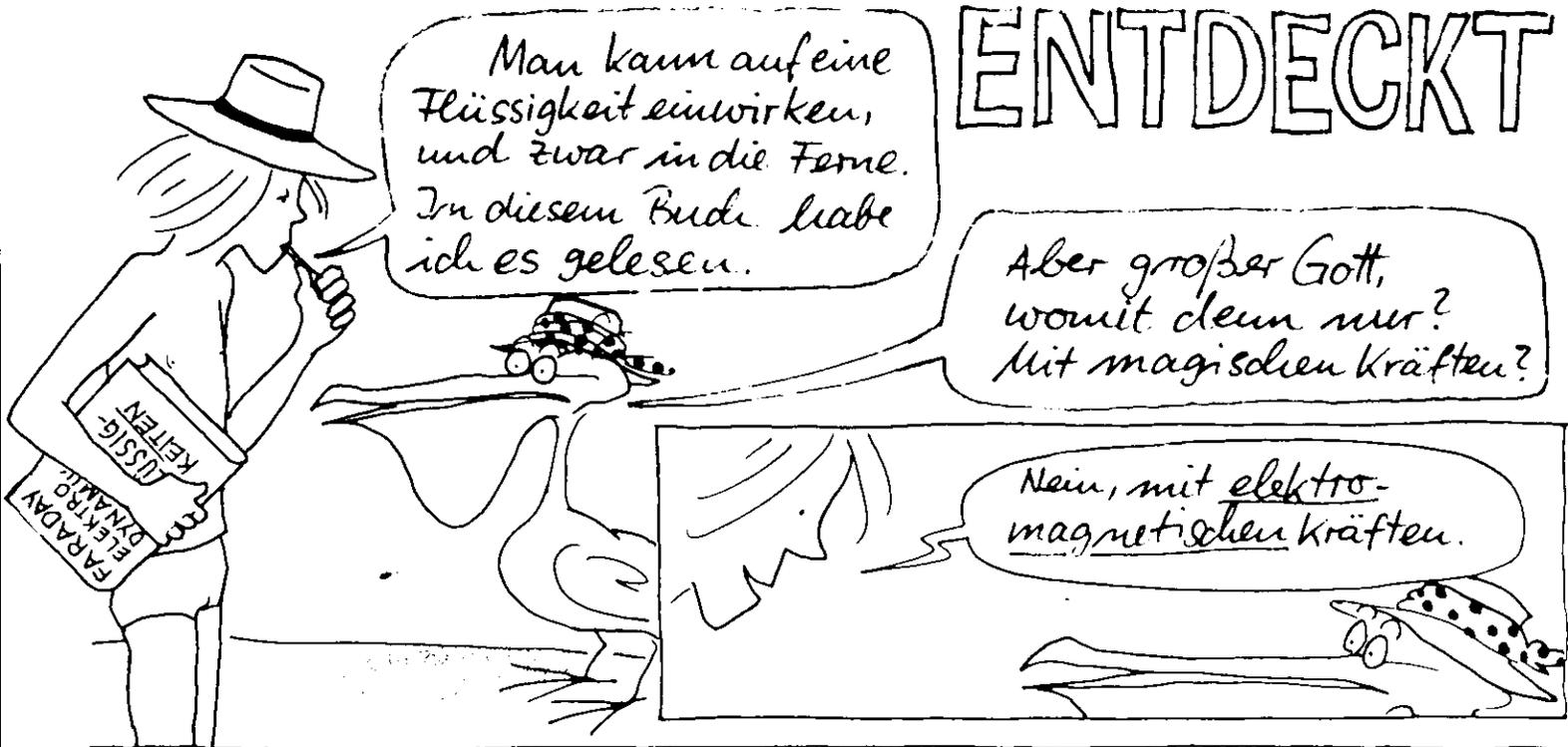
Ich verstehe nicht, was Du Dir erhoffst. Wenn Du die Flüssigkeit "informieren" willst, wie Du es ausdrückst, mußt Du doch wieder einen materiellen Gegenstand stromaufwärts bewegen und dieser erzeugt seinerseits Wellen. Das ist ein Teufelskreis.

Wartet nur ab...

Sophie sagt, das verschiebt nur das Problem.

Sie sagt, Schliffalot ohne Bugwellen ist ein Ding der Unmöglichkeit.

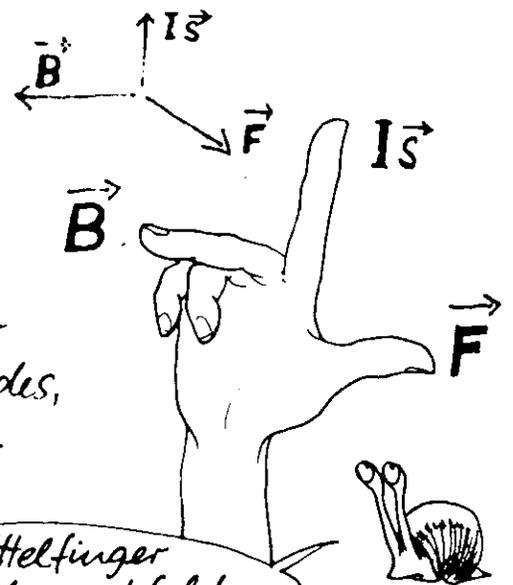
# WIE ANSELM DIE MAGNETOHYDRODYNAMIK ENTDECKT



Erzeugt man in einer Flüssigkeit erstens ein Magnetfeld  $\vec{B}$ , und zweitens einen elektrischen Strom  $I$ , der senkrecht zu  $\vec{B}$  über die Strecke  $\vec{s}$  fließt, so wirkt auf die Flüssigkeit die Lorentzkraft  $\vec{F} = I\vec{s} \times \vec{B}$ , deren

Richtung gegeben ist durch die **DREI-FINGER-REGEL**:

Man bildet mit Daumen, Zeigefinger und Mittelfinger der rechten Hand ein Dreibein. Weist der Zeigefinger in die Richtung des elektrischen Stromes und der Mittelfinger in die Richtung des Magnetfeldes, so zeigt der Daumen die Kraftrichtung an.



Die Direction

Mittelfinger wie Magnetfeld

Ach du meine Güte, was soll denn das darstellen?

Ich habe einen MAGNETOHYDRODYNAMISCHEN WANDLER gebaut, ähnlich wie ihn 1860 der englische Physiker FARADAY erfunden hat.

Wieso Wandler?

Weil er elektrische Energie in BEWEGUNGSENERGIE verwandelt.

Der Magnetfeldvektor  $\vec{B}$  bildet mit der Richtung des elektrischen Stroms und der Achse des Kanals ein rechtwinkliges Dreiein.

Die Spule erzeugt ein Magnetfeld. Ich habe Salz ins Wasser getan, damit es den elektrischen Strom besser leitet. Mit diesem Schiebewiderstand kann ich die Stärke des Stroms verändern, der durch das Wasser fließt.

Durch Verändern der Stromstärke  $I$  und des Magnetfeldes  $B$  kannst Du die Flüssigkeit beliebig beschleunigen oder verzögern.

# DIE KRITISCHE ENERGIE

Mir scheint, das alles geht etwas durcheinander.

Zuerst war mir von Flüssigkeiten und Strömungen die Rede.

Und jetzt geht alles kreuz und quer!

Blödsinn!

Was machen die denn heute wieder?

Ich verstehe nichts mehr.

Ich versuche, die üblichen Bedingungen der Hydrodynamik zu ändern, indem ich zusätzliche Parameter einführe: KRÄFTE, die auf das FLÜSSIGKEITSVOLUMEN, und in die FERNE wirken.

Ich glaube, wir werden uns nicht langweilen.

Aber wer sagt Dir, das diese Kräfte groß genug sind?

Es scheint mir nur eine Frage der ENERGIE zu sein.

Anselm ist heute wirklich in Form.

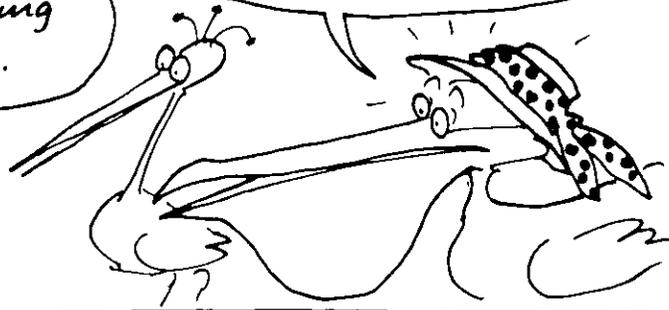
Wie meinen Sie das?

Die Flüssigkeit hat eine bestimmte KINETISCHE ENERGIE. Um die Geschwindigkeit mit Hilfe der Lorentzkraft zu verändern muß man einen Energiebetrag derselben Größenordnung aufwenden: die kritische Energie.

Ich würde noch weiter gehen: Wenn diese Energie, die mit der Lorentzkraft übertragen wird, größer ist als die kinetische Energie der Flüssigkeit, müsste man die Strömung vollständig unter Kontrolle bekommen.



WAS!?!  
Max, Sie erzählen wieder mal Blödsinn!

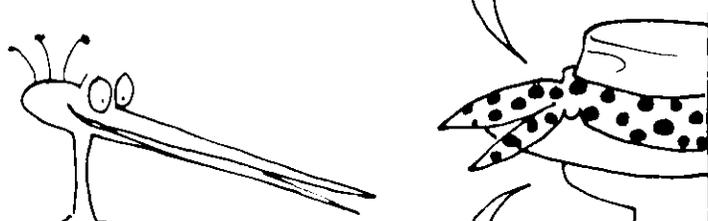


Mein lieber Freund, bei Ihnen gehen merkwürdige Dinge vor.



Ah, hören Sie auf! Sie kennen doch Weißteger. Immer wenn man ihn nicht beaufsichtigt, macht er Usisinn.

Wenn Sophie wenigstens da wäre! Sie scheint am Strand zu sein.

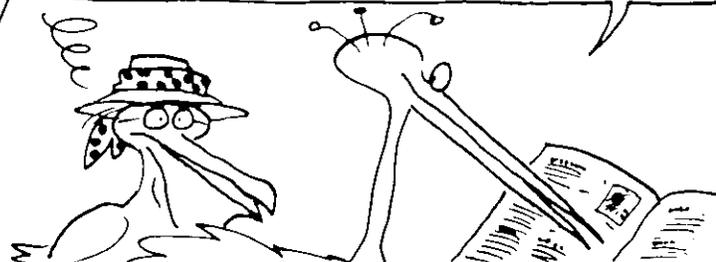


Diese ganze MAGNETOHYDRO-DYNAMIK sagt mir nichts.

Mir scheinen Ihre Befürchtungen unbegründet. Das sind doch niedrige Spannungen. Sie werden doch die Raumzeit nicht mit 40 Volt und 1 Tesla umktempeln.



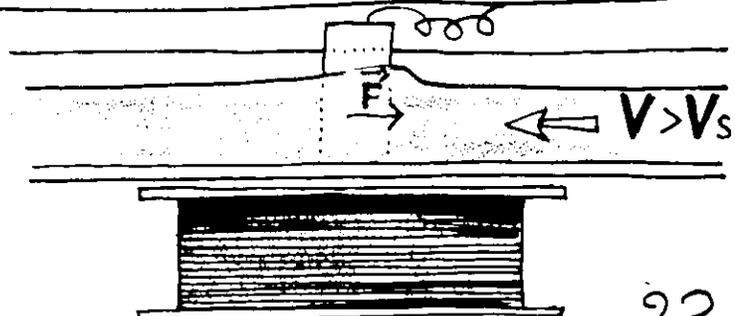
Sieh mal an! MAGNETOHYDRO-DYNAMIK, abgekürzt **MHD**, steht sogar im Lexikon.



He, schelt mal her!



Ich lasse das System als Verzögerer laufen. Wenn ich genügend Energie aufwende, bildet sich eine stationäre Wellenfront. Außer der Lorentzkraft  $\vec{F} = I\vec{s} \times \vec{B}$  gibt es hier kein Hindernis.



Ohne jeden Zweifel

Ja, ... na und?

Das ist doch wohl alles bekannt!

# STAU

Kein Klassische Physik!

In diesem zweiten Kanal baue ich eine Verengung ein.

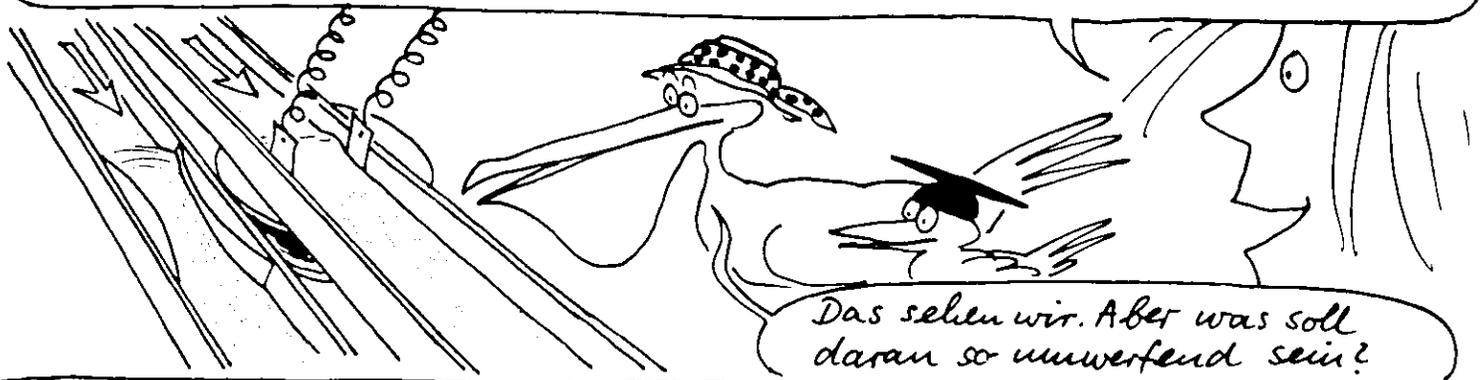
Der Kanal hat weder Elektroden, noch Magnetfeld.

Solange die Verengung nicht zu stark ist, entstehen WELLENFRONTEN, die sich kreuzen.

Bei einer stärkeren Verengung wandern die Fronten stromaufwärts und am Eingang der Verengung baut sich eine Welle auf, die quer zum Kanal steht.

Das Wasser staut sich.

Selbst ihr, daß ich hier einen Stau erzeugt habe, der genauso aussieht, wie der durch die Kanalverengung verursachte?



Das sehen wir. Aber was soll daran so unwerfend sein?

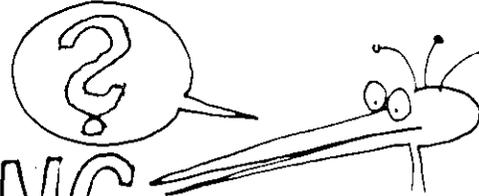
Was halten Sie davon?

Na ja, die jungen Leute amüsieren sich damit, daß sie Wellenfronten mit der Lorentzkraft erzeugen. Jeder amüsiert sich eben auf seine Art.

Wenn Anselm zu seiner Kanalverengung die Lorentzkraft noch linäernäherte, erhielte er einen noch stärkeren Stau.

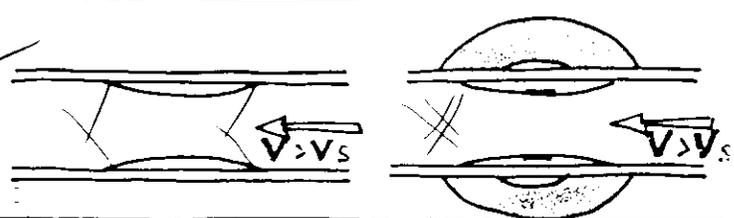
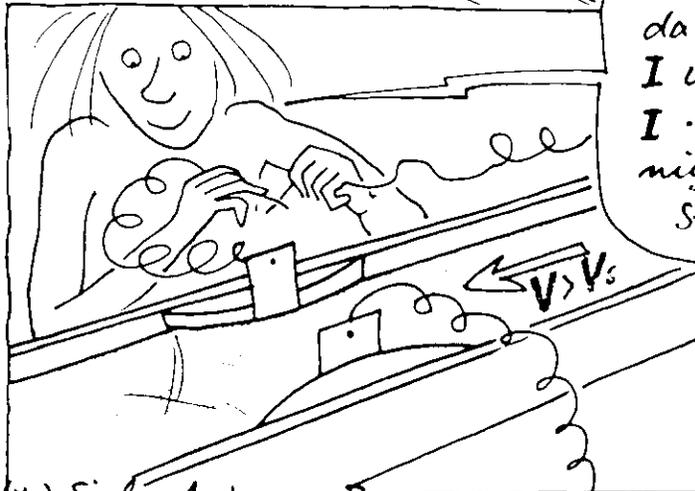
Das ist alles.

Völlig einverstanden. Aber wenn ich nun die Lorentzkraft umkehre?



# AUFLÖSUNG DES STAUS

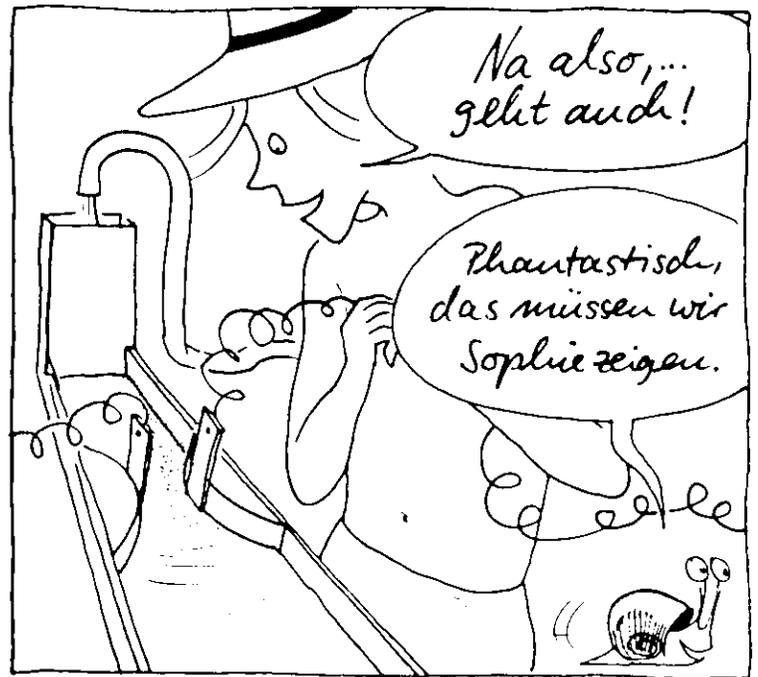
Ich beginne mit einer schwachen Verengung. Um die Kraft umzukehren, kann ich entweder das Magnetfeld  $\vec{B}$  oder den elektrischen Strom  $I$  umdrehen. Seht ihr?! Wenn das Produkt  $I \cdot B$  groß genug ist (\*) bringt die beschleunigende Lorentzkraft die Wellenfront Stromaufwärts zum Verschwinden.



(\*) Siehe Anhang B



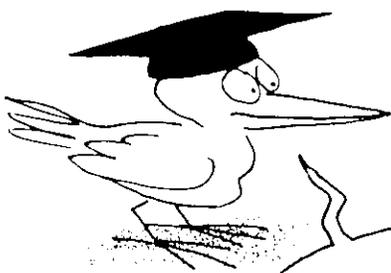
Jetzt versuche ich's mal mit einer stärkeren Verengung.



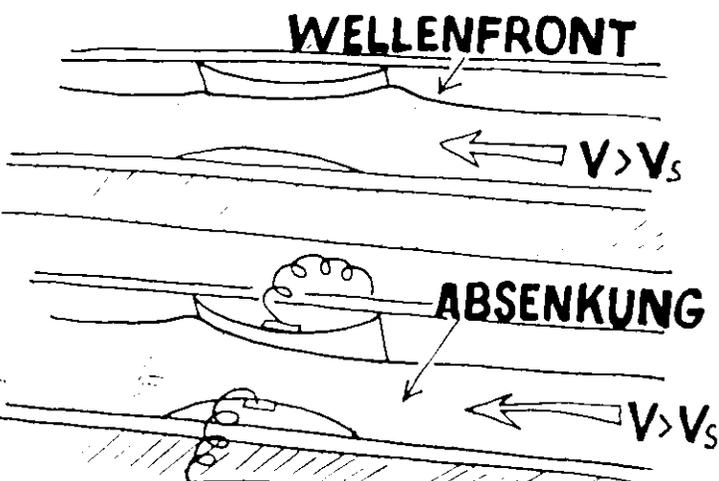
Na also, ... geht auch!

Phantastisch, das müssen wir Soplhie zeigen.

Die Frontwelle wird unterdrückt.

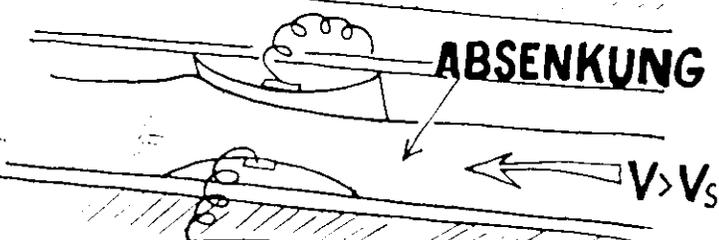


### STAU



### AUFLÖSUNG DES STAUS

mit Hilfe einer beschleunigenden Lorentzkraft



Durch Verstärken der Lorentzkraft schafft es Anselm sogar, das Wasser wegzusaugen, so daß der Wasserspiegel stromaufwärts unter das Normalniveau sinkt.

Soplhie! Anselm hat etwas ganz Unmögliches entdeckt!



Tiresias!  
Du bist ja ganz außer Atem.  
Bist du geraunt?

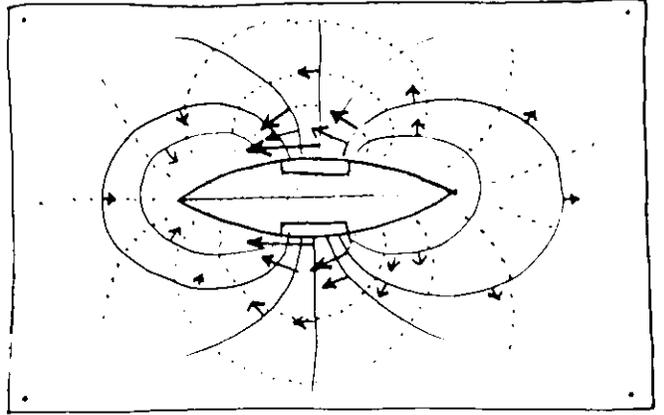




# UNTERDRÜCKUNG DER BUGWELLE

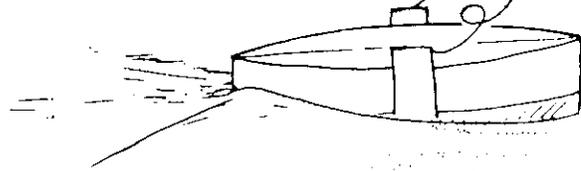
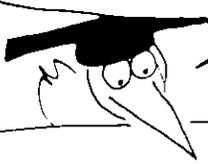


Die Dreifingerregel liefert mir das Kraftfeld, dem die Flüssigkeit ausgesetzt ist.

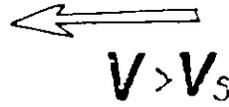


Heiliger Vektor!

In drei Teufels Namen-Anselm hat die BUGWELLE weggebracht!



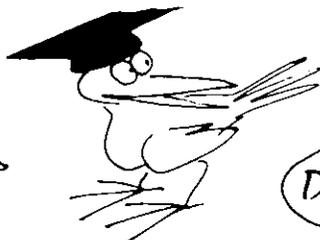
WAS?



Was der noch alles erfindet!



Ich darf darauf hinweisen, daß die Heckwelle nach wie vor vorhanden ist...



Das ist wohl bekannt, nicht wahr?

Nein, das ist nicht bekannt!  
Und ich frage mich, woher  
er das hat!

Sind Sie denn in der Lage,  
dies allgemein zu erklären?...

Ich verstehe nichts mehr.

Wenn man in der  
Wissenschaft etwas allgemein  
beschreibt, das noch gar nicht  
bekannt ist, wissen Sie, wie  
man das nennt?

Das nennt man WISSENSCHAFTLICHE FORSCHUNG.

Sehen Sie, ich hatte doch recht.

Ach!

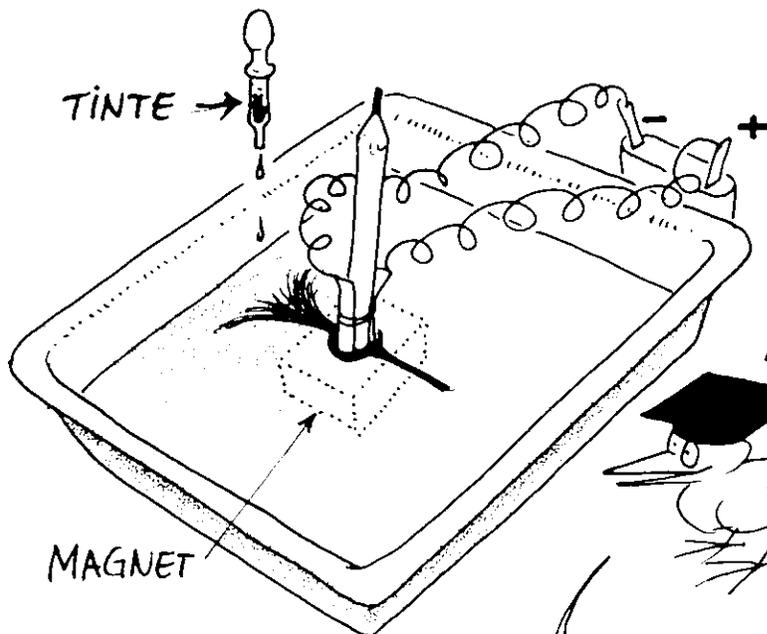
Also von einem breiteren  
Gegenstand löst sich die  
Frontwelle ab.

# EIN MHD-GENERATOR ZUM SELBSTBAUEN

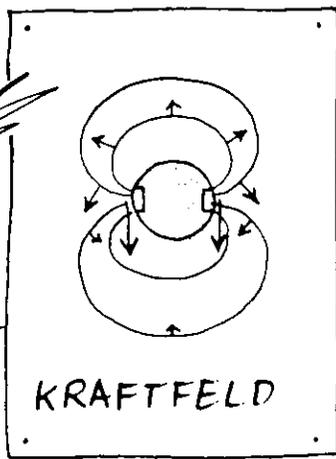
Im Grenzfall könnte der Gegenstand  
einfach ein Zylinder sein.

Ich befestige einfach  
zwei Kupferelektroden an einem  
Bleistift.

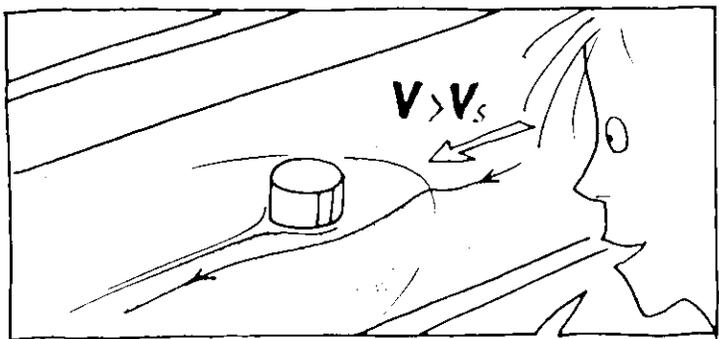
In einer Schüssel mit Salz-  
wasser, unter der sich ein Magnet  
befindet, kann man den Pump-  
effekt der Lorentzkraft  
sichtbar machen.



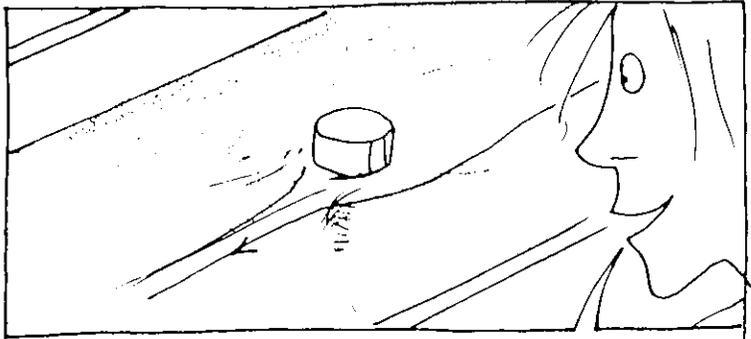
Der Magnet unter der Schlüssel erzeugt ein senkrechttes Magnetfeld. Den Pumpeneffekt macht man mit Tinte sichtbar.



Schon mit einem kleinen Dauermagneten und einer Flachbatterie kann man den Pumpeneffekt zeigen. Um aber so stark auf die Flüssigkeit einzuwirken, daß die Struktur der Wellenfronten verändert wird, braucht man etwa zehnfach größere Lorentzkräfte.



Ich stelle diesen Zylinder in meinen Versuchskanal und drehe die Kraft langsam hoch. Am Kielwasser gibt es zunächst noch keine Turbulenz; die Frontwelle verformt sich nach und nach.



Ich drehe höher. Die Frontwelle verschwindet, statt dessen sinkt die Wasseroberfläche.

So, nun zur praktischen Anwendung!

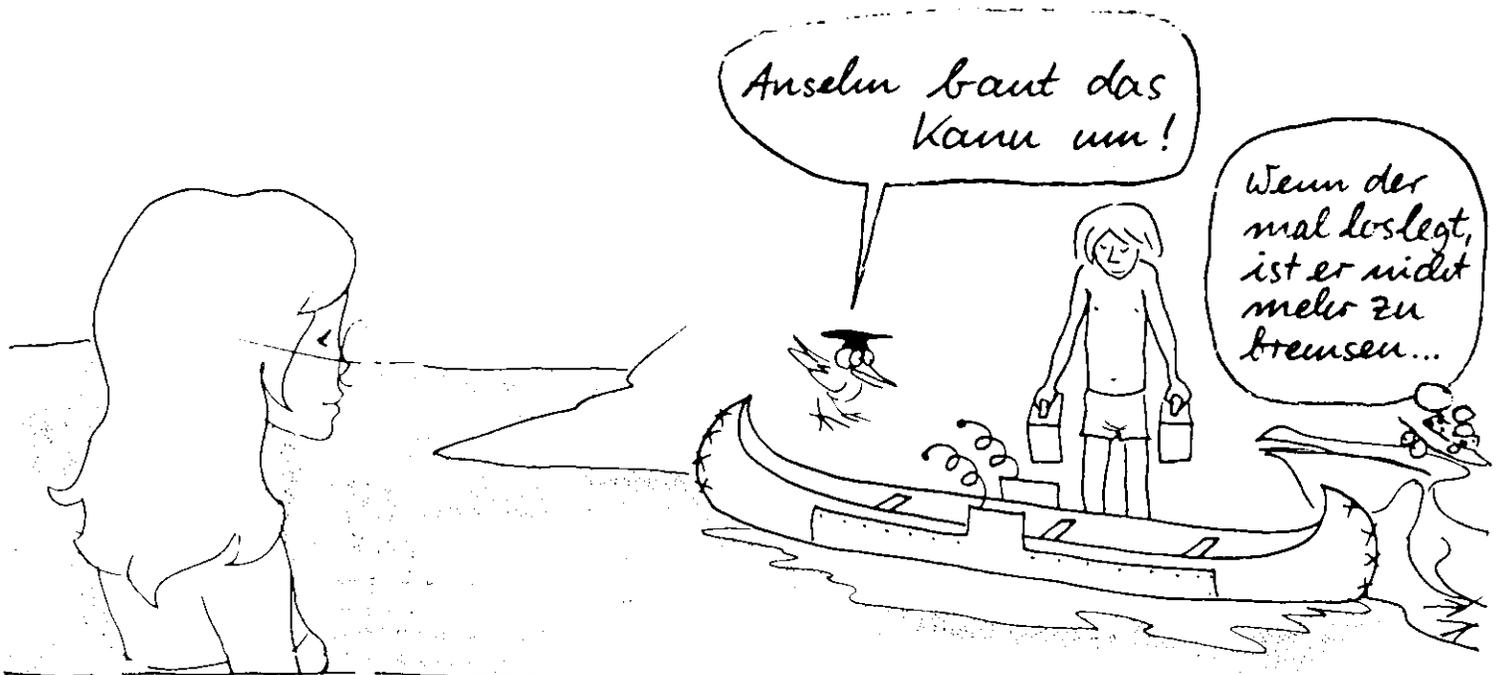
Was hältst Du davon?



Warte auf mich, Anselm!

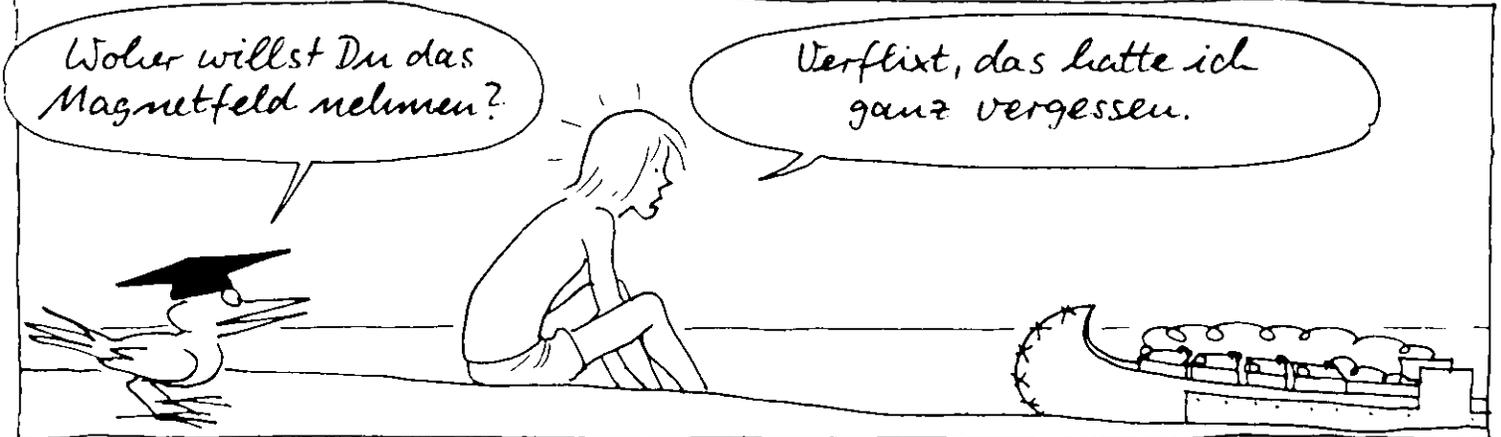


Die Lorentzkraft wirkt IN DIE FERNE. Anselm scheint eine Methode gefunden zu haben, die Flüssigkeit stromaufwärts zu „informieren“!



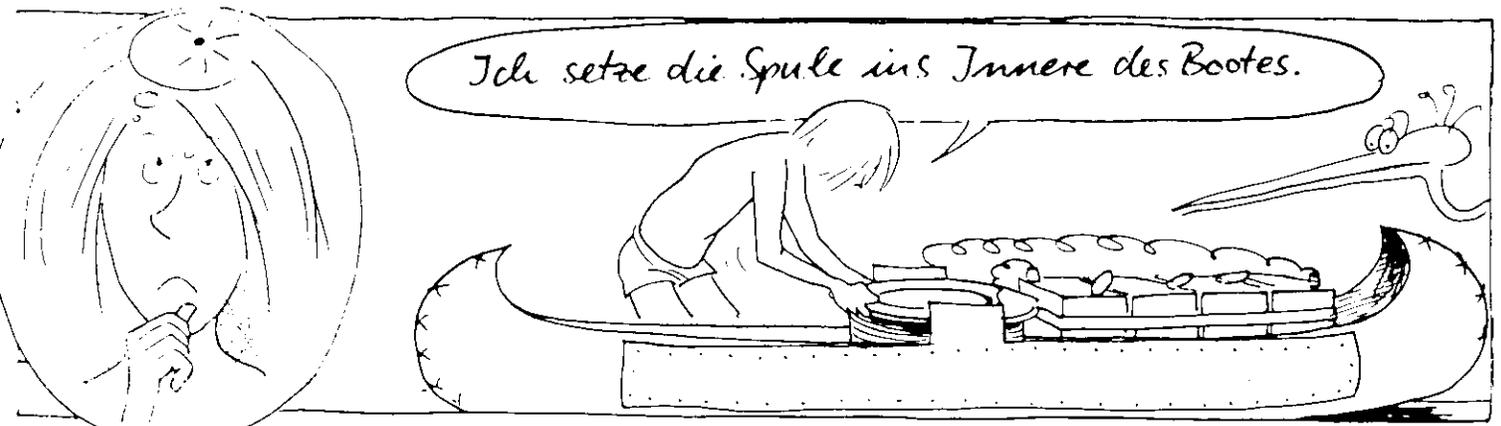
Anselm baut das Kanu um!

Wenn der mal loslegt, ist er nicht mehr zu bremsen...

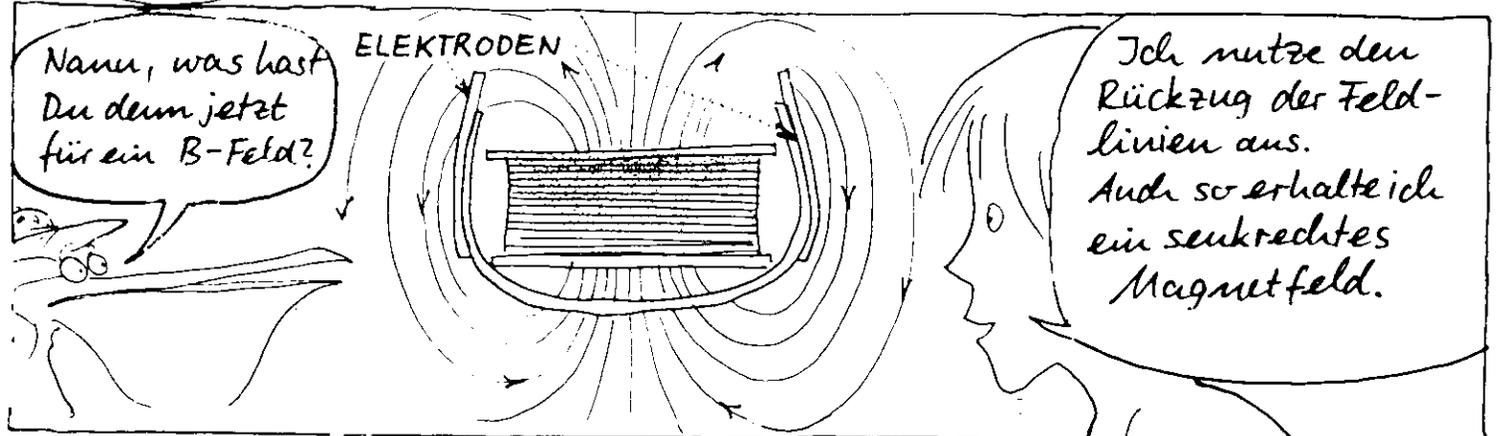


Woher willst Du das Magnetfeld nehmen?

Verflixt, das hatte ich ganz vergessen.



Ich setze die Spule ins Innere des Bootes.



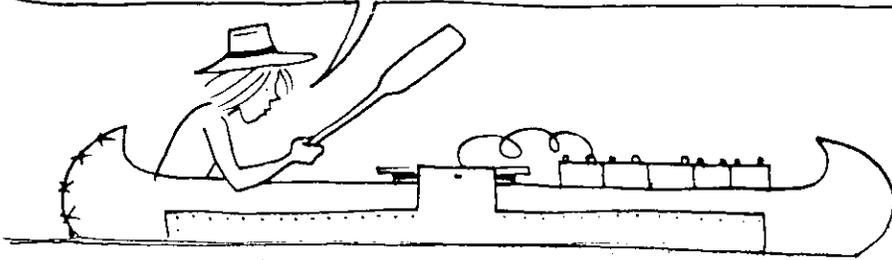
Nanu, was hast Du denn jetzt für ein B-Feld?

ELEKTRODEN

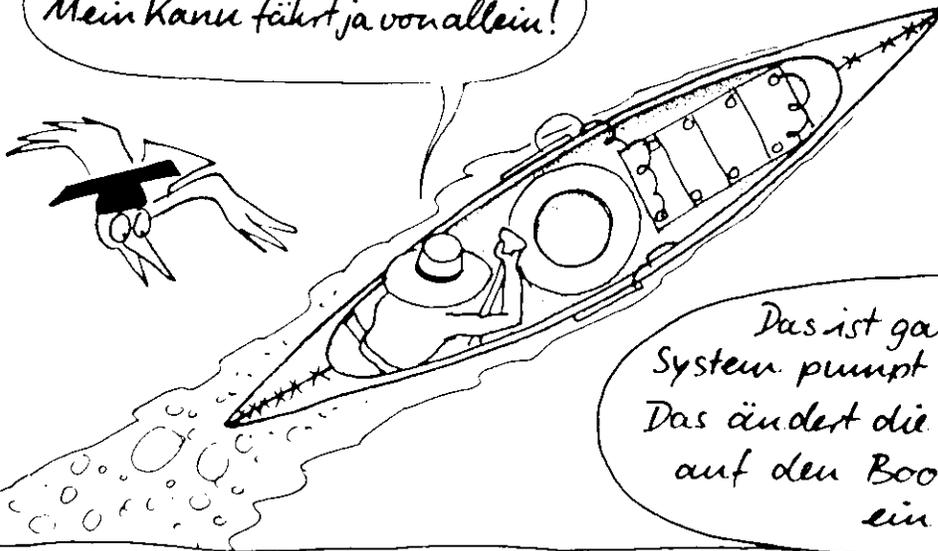
Ich nutze den Rückzug der Feldlinien aus. Auch so erhalte ich ein senkrechtes Magnetfeld.

# DER MHD-ANTRIEB

So, ich habe meinen Bugwellenvernichter eingeschaltet. Jetzt muß ich nur noch rudern, damit das Kanu eine Geschwindigkeit  $V$  bekommt, die größer als die Geschwindigkeit  $V_s$  der Oberflächenwellen ist.



Was ist denn nun los!  
Mein Kanu fährt ja von allein!



Das ist ganz normal: Das **MHD**-System pumpt das Wasser nach hinten. Das ändert die Verteilung des Druckes auf den Bootskörper, und es entsteht ein **SCHUB**.



Sieh mal,  
das Ding hat  
ein Leck.

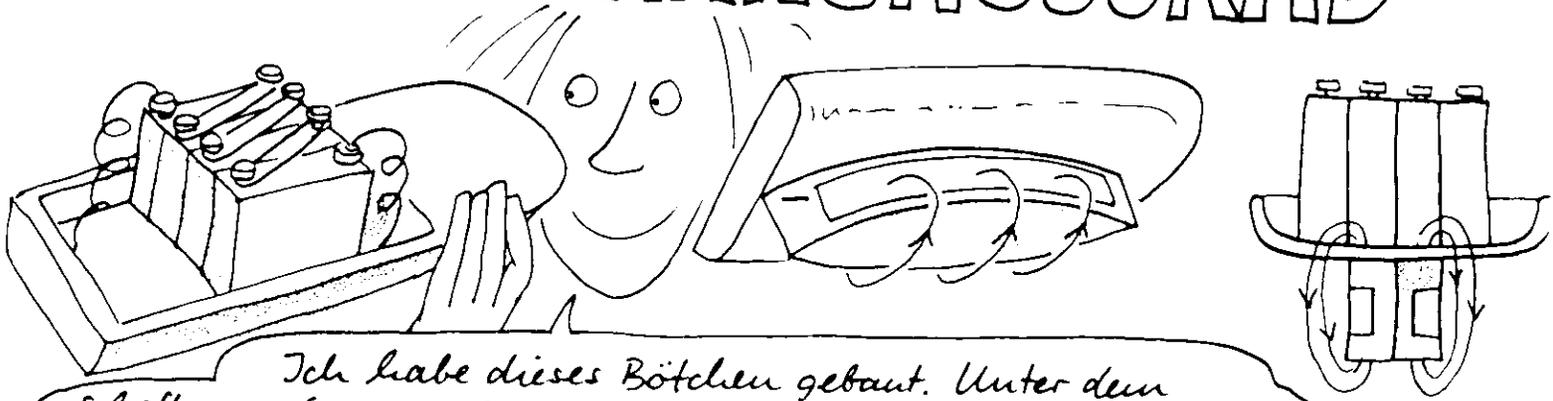
Aber nein,  
das kommt von  
der Elektrolyse  
des Wassers.



Verdammt!  
Die Batterien sind leer.  
Die Spule verbraucht  
irrsinnig viel Energie.  
Ich baue lieber  
ein kleines Modell  
mit Dauer-  
magneten.



# DER MHD-WIRKUNGSGRAD



Ich habe dieses Bötchen gebaut. Unter dem Schiffsrumpf ist ein Dauermagnet befestigt, und die Elektroden sind an eine Batterie angeschlossen.

Gelut sehr langsam ... schade!  
Nur 1 Pond. Schub...

Sehr gemütlich!

... und ein Energieverbrauch  
wie ein Bügeleisen (\*).

Wenn ich  
dieselbe Energie einem  
gewöhnlichen Elektromotor  
zuführe



Wie der Teufel!

Hilfe!

Was stimmt hier nicht?

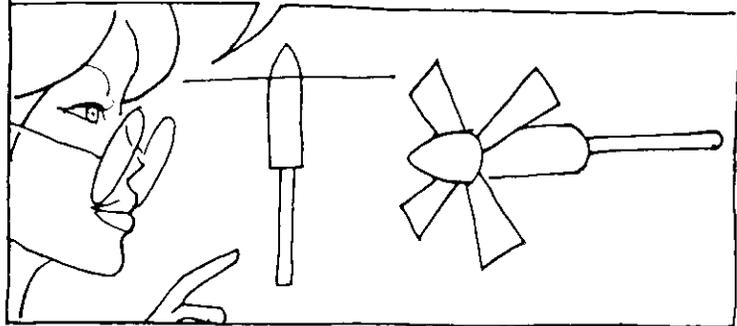
Dein Magnetfeld  
ist zu schwach. Der Wirkungs-  
grad des Antriebs ist  
verschwindend gering.

(\* ) siehe Anhang C.

Wie meinst Du das?

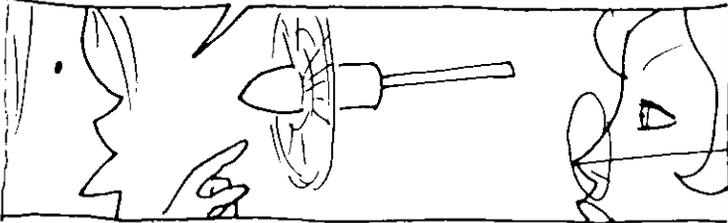


Was würdest Du zu einem Propeller sagen, dessen Flügel nur um Bruchteile eines Grades geneigt sind?



Er wäre unwirksam. Nur ein winziger Bruchteil der Leistung würde dem Antrieb zu Gute kommen. Der größte Teil würde durch die Reibung als Wärme verbraucht.

Siehst Du, dasselbe passiert bei Deinem MHD-ANTRIEB. Der Strom  $I$  entspricht der Drehzahl des Propellers und das Magnetfeld  $B$  dem Winkel der Flügel.



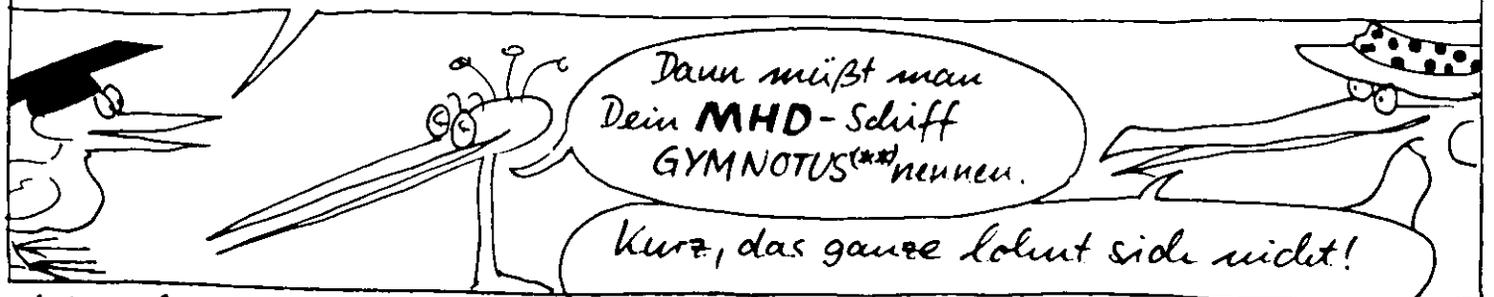
Dein Winkel ist zu klein, und Du erwärmst nur das Wasser...

Mit Deinem Dauermagneten kannst Du einen Wirkungsgrad von höchstens einigen Millionstel (\*) erhoffen. Damit ein MHD-Antrieb im Meerwasser lohnte, bräuchte man ein zweihundertmal stärkeres Magnetfeld: mindestens 20 bis 25 Tesla.



Aber man kann doch Felder dieser Stärke erzeugen, oder?

Angenommen wir hätten diese 25 Tesla. Je größer das Schiff wäre, desto größer wäre der Abstand zwischen den Elektroden. Bei einem Abstand von 10 m bräuchte man eine Spannungsquelle von 10.000 Volt.



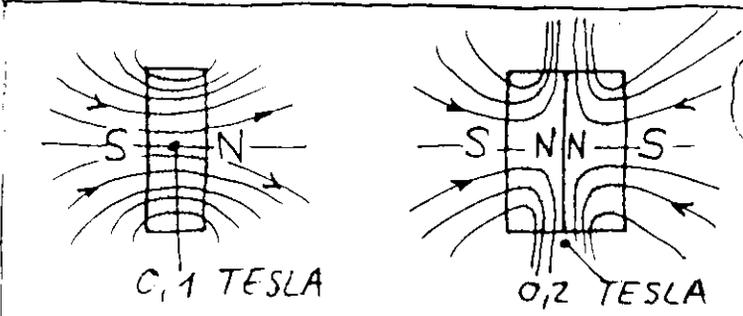
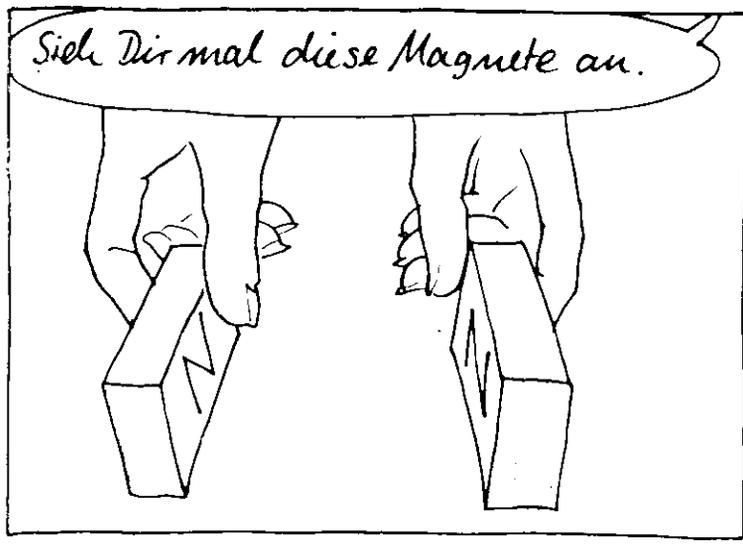
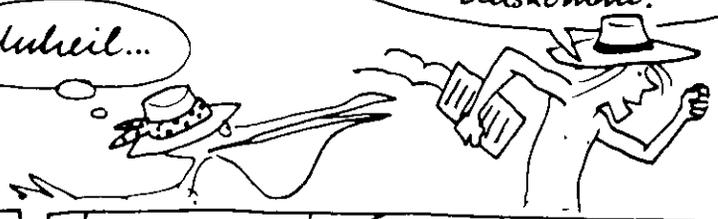
(\*) siehe Anhang C

(\*\*) Der GYMNOTUS ist ein , der elektrische Schläge von 300 Volt ausstößt.

# BESCHLEUNIGER- BATTERIEN

Sophie, ich habe es raus, wie man mit niedrigen Spannungen auskommt.

Unheil...

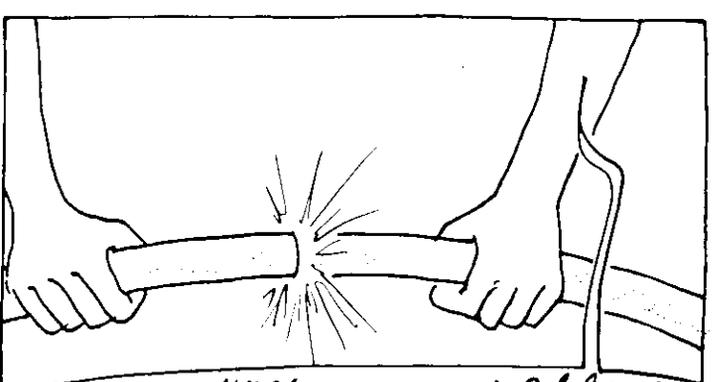
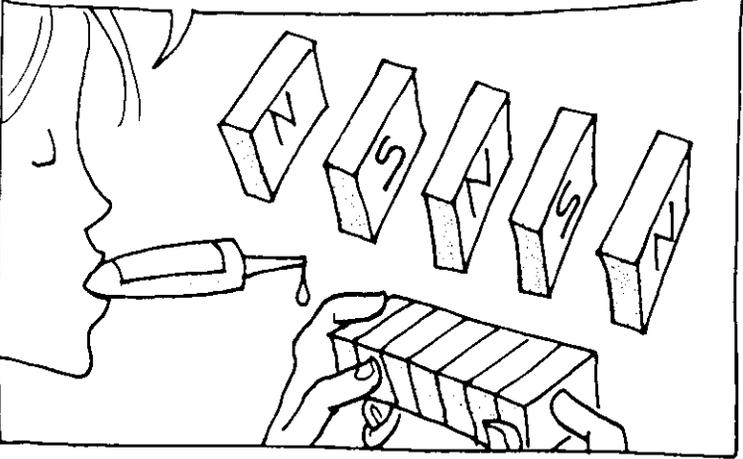


Ja, sehr lustig. Da das Magnetfeld auf die Berührungsebene konzentriert ist, hat sich die Feldstärke praktisch verdoppelt.

Eine Art Tube, die ihr Magnetfeld ausspuckt.

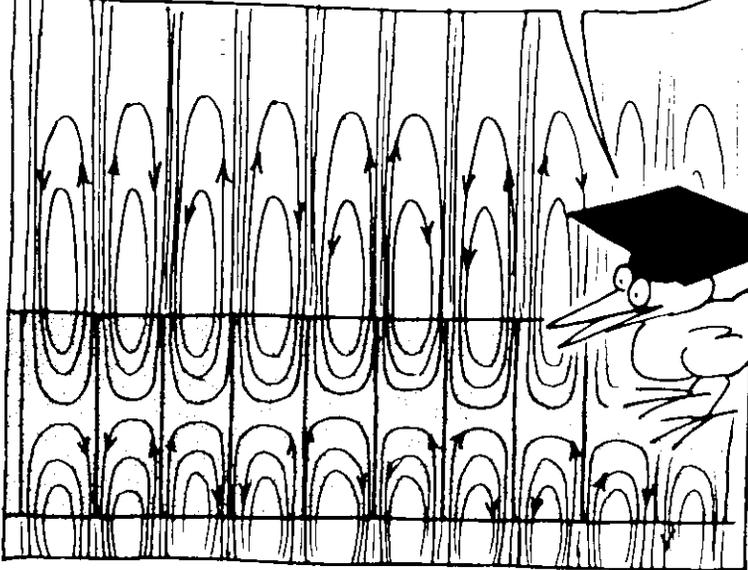


Hier habe ich einen ganzen Satz von Magneten aneinandergeliebt - Nordpol an Nordpol und Südpol an Südpol.



Hält man zwei Schläuche gegeneinander ohne den Wasserstrom zu vermindern, so spritzt das Wasser fettig nach allen Seiten auseinander.

So sehen die  $\vec{B}$ -Feldlinien aus.

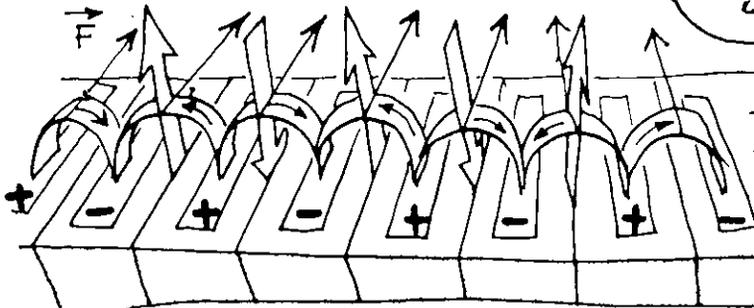


Wenn die Magnete die Dicke  $d$  haben, kühlt das Feld alle  $d$  um seine Richtung um, ...



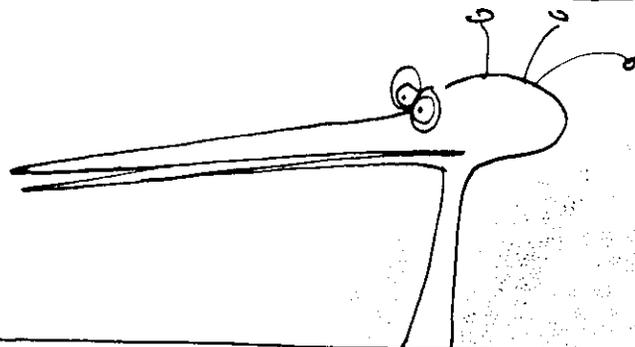
... und im Abstand  $d$  von der Ober- und der Unterseite ist das Feld praktisch Null.

Schalt mal hier! Ich habe noch Elektroden hinzugefügt, Plus- und Minuspol immer abwechselnd. Wenn ich jetzt die DREI-FINGER-REGEL anwende, sieht man, daß sich in der Nähe der Wand, bis zu einem Abstand  $d$ , ein Kraftfeld erzeugt, und alle Kräfte sind parallel und weisen in dieselbe Richtung.

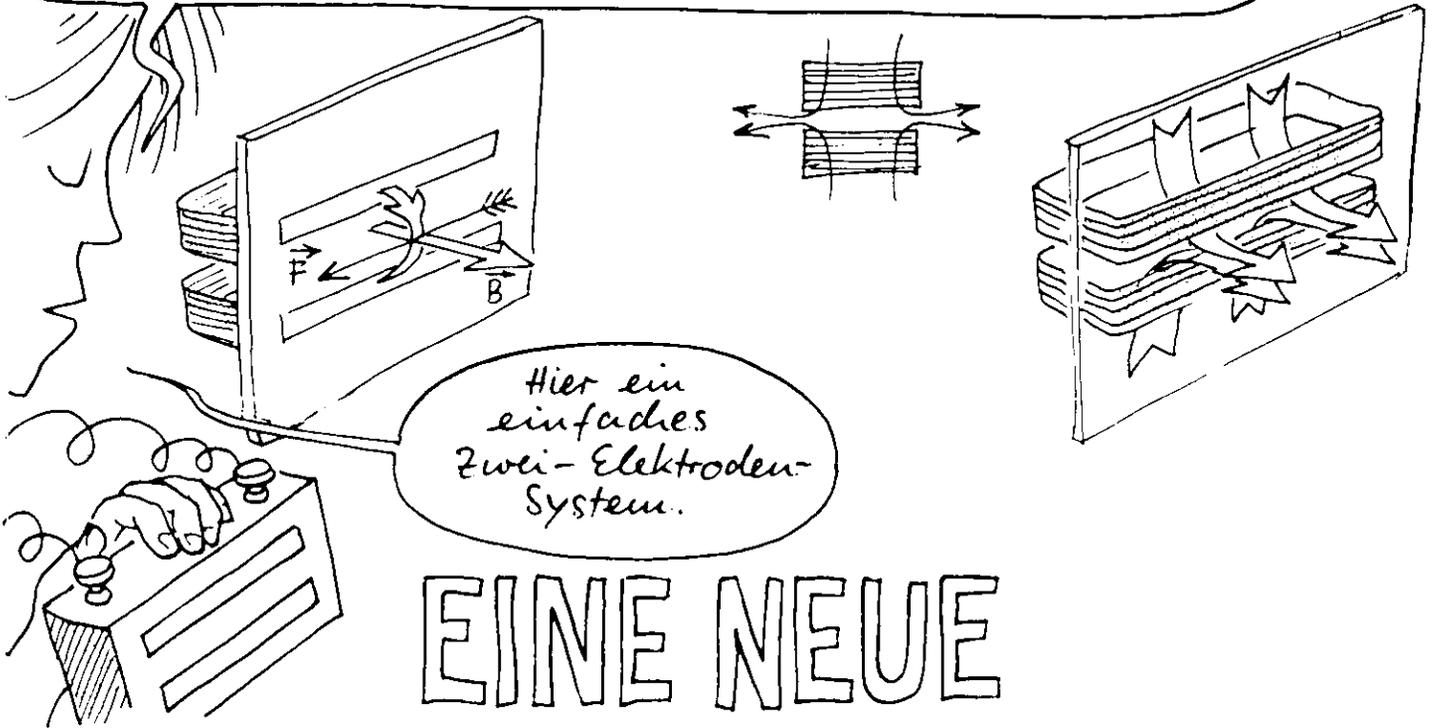


Hier wird die Geometrie Komplize der Physik.

Um ein Magnetfeld zu erzeugen, braucht man Energie. Dadurch, daß Du das Magnetfeld auf eine dünne Schicht in der Nähe der Oberfläche begrenzt, vermindert Du das zu magnetisierende Volumen, und damit die hierfür nötige Energie, denn die Energie ist zum Volumen proportional.



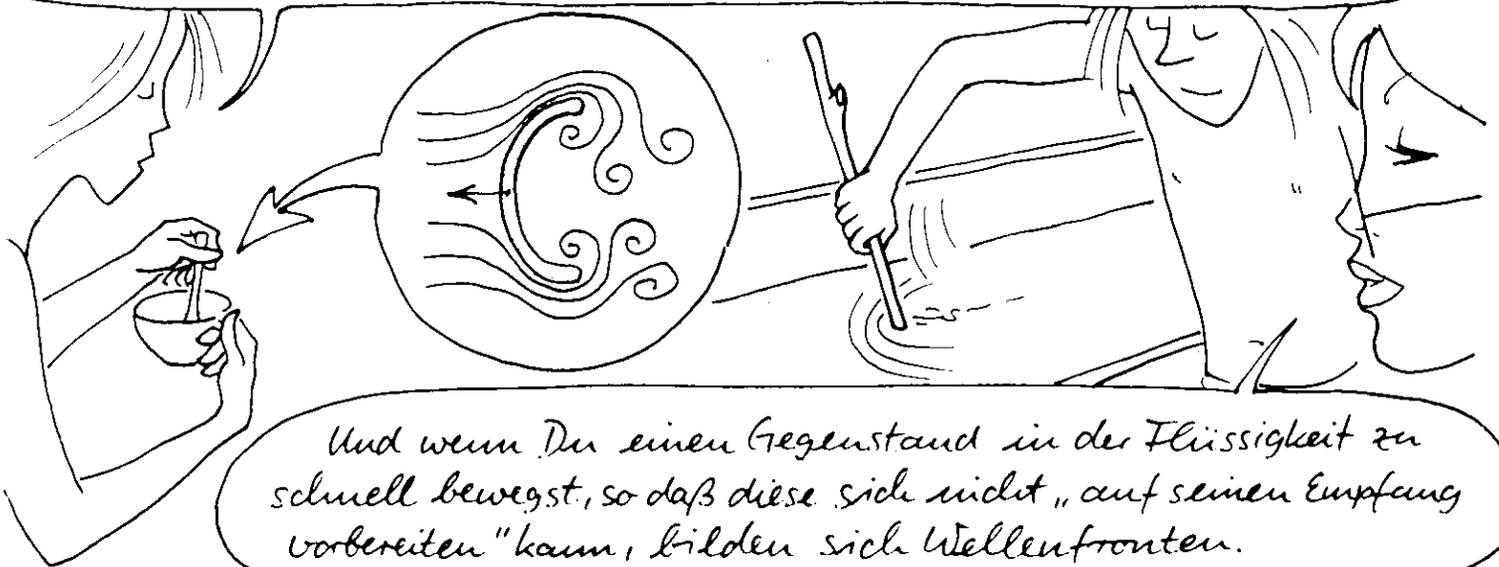
Ich kann die Magnete natürlich auch durch Spulen ersetzen.



Hier ein einfaches Zwei-Elektroden-System.

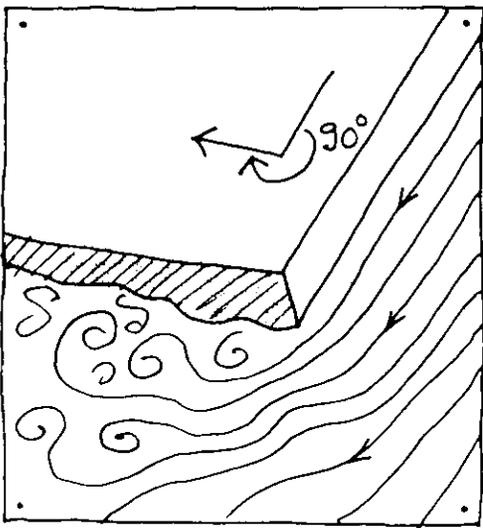
# EINE NEUE HYDRODYNAMIK

Sobald man eine Flüssigkeit veranlaßt, etwas zu tun, was ihr nicht gefällt, reagiert sie. Bei einer zu abrupten Umleitung zum Beispiel löst sie sich ab.

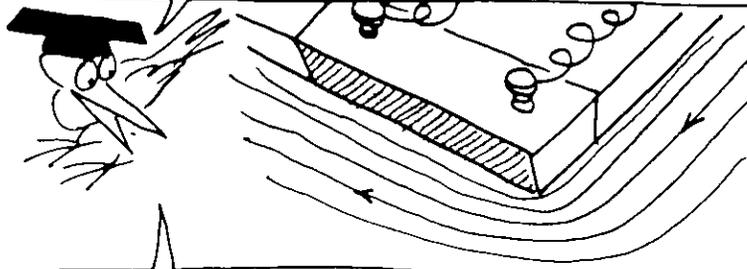


Und wenn Du einen Gegenstand in der Flüssigkeit zu schnell bewegst, so daß diese sich nicht „auf seinen Empfang vorbereiten“ kann, bilden sich Wellenfronten.

So war es wenigstens, solange man die Flüssigkeit machen ließ, was sie wollte. Das alles wird durch die Magnetohydrodynamik total verändert.

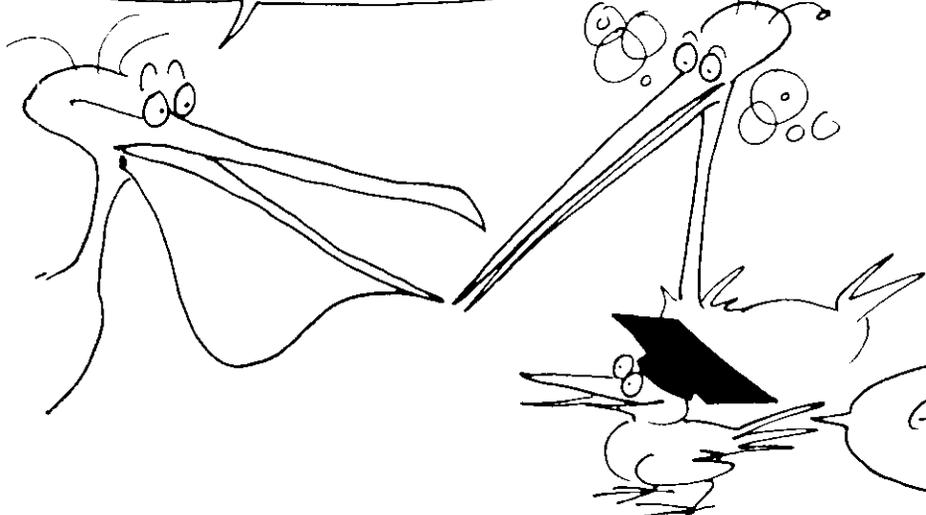


Hier zum Beispiel: In der klassischen Hydrodynamik verursacht eine scharfe Kante ein Ablösen, und damit eine TURBULENZ.



Ein kleiner MHD-Eingriff und schon ist alles repariert.

Aber was soll das ganze? Das ist doch alles bekannt, oder nicht?



Man gewinnt dabei in jedem Fall!

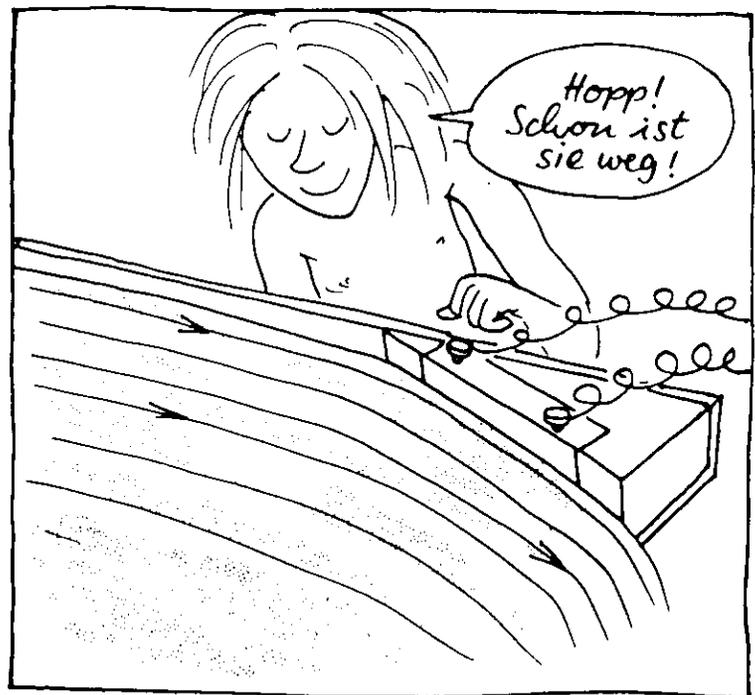


Diese ganze Geschichte hat etwas Irrsinniges an sich.

Erinnert Ihr Euch an diese Geschichte mit der Wellenfront an der Verengung?



Hopp! Schon ist sie weg!



Selbst ihr, es scheint möglich zu sein, Strömungen zu zähmen. Dort wo die Flüssigkeit langsamer werden will, beschleunigt man, und wo sie verrückt spielt, bremsst man.

Nichts zu finden...

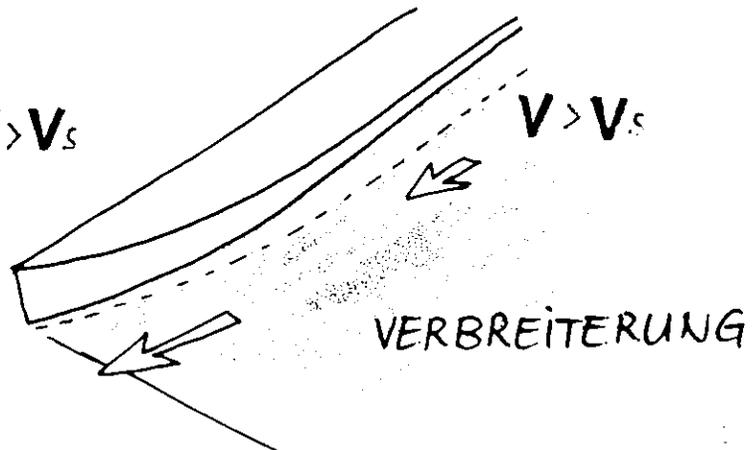
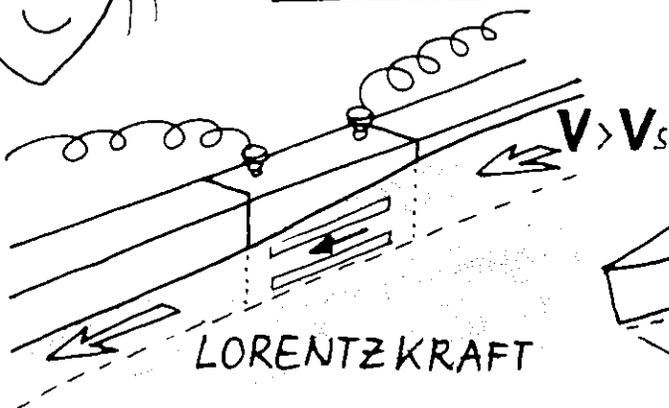
Schluck!

# BUGWELLEN-HECKWELLEN

NAVIER & STOKES  
HYDRODYNAMIK

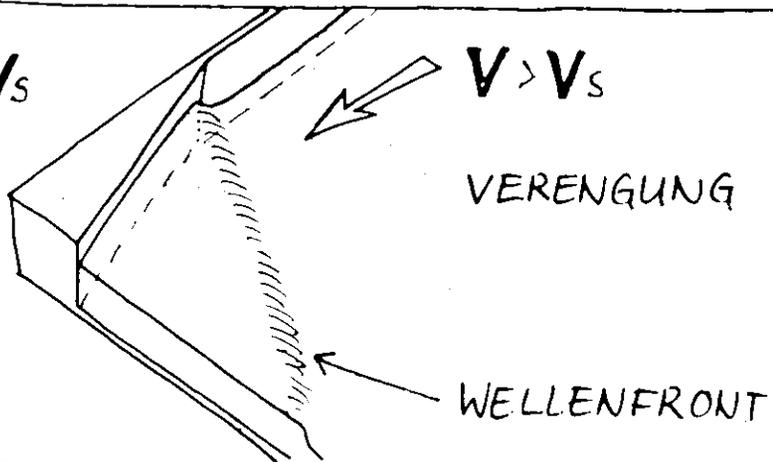
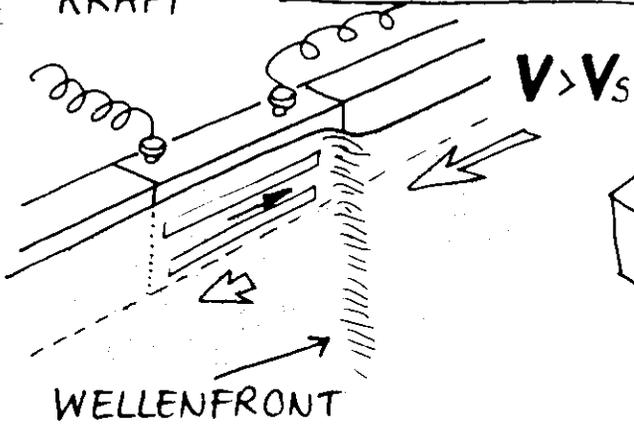
Warte doch, Leo, Du wirst schon noch verstehen. Du nimmst mir doch ab, daß die Änderung der Richtung einer Wand eine Erhöhung oder eine Absenkung des Wasserspiegels bewirkt, falls  $V > V_s$  ist. Nun sieh mal her: Das MHD-System hat ABSOLUT DIESELBE WIRKUNG.

Ein MHD-Beschleuniger oder eine Verbreiterung des Kanals verursachen ein Absinken des Wasserspiegels.



Ein MHD-Verzögerer oder eine Verengung verursachen ein Ansteigen des Wasserspiegels.

LORENTZ-KRAFT

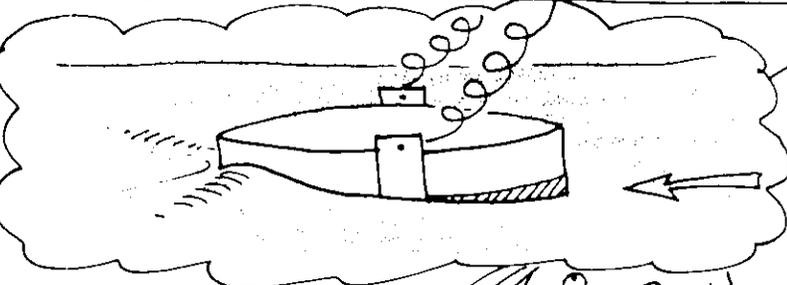


Man kann also erreichen, das sich das „natürliche“ Ansteigen und Absinken, das durch die Form der Wände verursacht wird, und das „künstliche“, durch die Lorentzkraft hervorgerufene gerade ausgleichen.



Um die Strömung um den Schiffsrumpf herum zu beruhigen, muß man die Veränderungen der Wasserspiegelhöhe so weit wie möglich ausgleichen. Wo sich eine Wellenfront bilden will, beschleunige ich, und um ein zu starkes Absinken zu vermeiden bremsen ich.

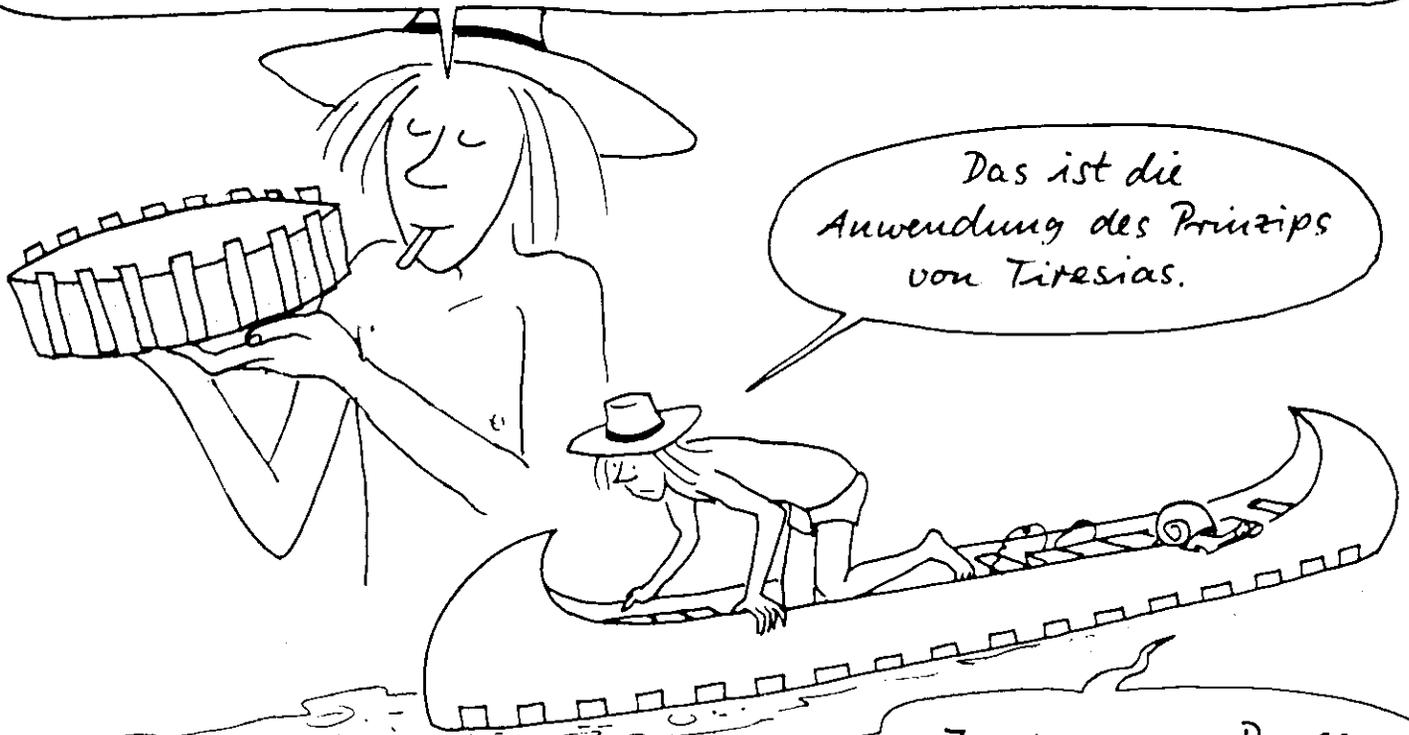
Dies ist schlicht und einfach eine Anwendung meines Prinzips: VERLASSEN SIE DIE FLÜSSIGKEIT SO, WIE SIE SIE VORGEFUNDEN HABEN.



Ich habe es auf Seite 28 geschafft, die Bugwelle zu unterdrücken. Die Heckwelle dagegen war geblieben. Sie ist sogar stärker geworden.

Die Heckwelle hat ihre Existenzberechtigung erst richtig erhalten, weil Du durch Dein Beschleunigen den Wasserspiegel so stark gesenkt hast.

Du hast recht. Das Entscheidende ist wohl, den Wasserspiegel konstant zu halten; auf der Höhe des normalen Flüssigkeitsniveaus. Zu diesem Zweck installiere ich eine ganze Reihe Elektroden, je nach Bedarf zur Beschleunigung oder Verzögerung.



Das ist die Anwendung des Prinzips von Tiresias.

Ja, ja, wenn Du es irgendwie schaffst, das Wasser so zu lassen, wie es vorher war, brauchen wir keine Heckwelle mehr.

Na schön. Und mit 20 Tesla am Bord gleitet Anselmus kann übers Meer - ohne Wellenfront und Turbulenz und ohne Landestege zu zerstören ... Na und?

Würde es nicht genügen, sich weit vom Strand zu halten? Gibt es denn nicht Dringenderes zu untersuchen?



Da bin ich anderer Meinung. Ich finde man sollte Auselms Idee weiterverfolgen, vor allem die Beschlennigerbatterie. Ein Schiff zieht eine Wirbelstraße wie einen Schweif hinter sich her, verursacht durch die Reibung zwischen Wasser und Schiffsrumpf. Wellenfronten verändern die Verteilung des Druckes auf den Schiffsrumpf, und damit zieht das Schiff außerdem einen WELLEN SCHWEIF hinter sich her, der mit zunehmender Geschwindigkeit sehr schnell wächst. Vor allem dieser Wellenschweif begrenzt die Geschwindigkeit des Schiffes.



Wir wissen, wieviel Energie man ungefähr braucht um die Entstehung von Wellenfronten zu vermeiden (\*). Die Arbeit der Lorentzkraft muß mindestens gleich der kinetischen Energie der ankommenden Flüssigkeit sein.

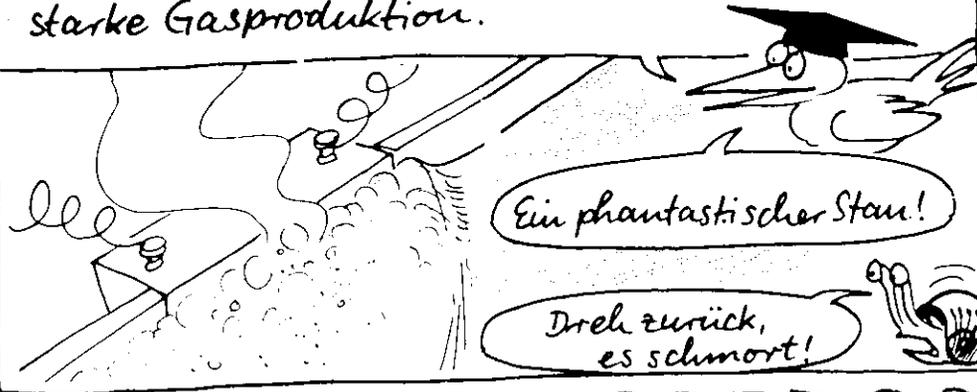


Hat das Schiff eine bestimmte Geschwindigkeit, so muß die Lorentzkraft eine bestimmte Schwelle überschreiten (\*).

(\* ) siehe Anhang B

Man sollte also ein möglichst starkes Magnetfeld haben. Wenn man bei schwachem  $B$  und großem  $I$  arbeitet ist erstens der Wirkungsgrad schlecht, und zweitens verursacht die Elektrolyse eine starke Gasproduktion.

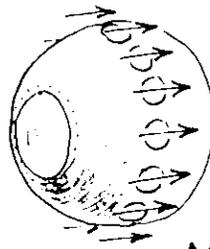
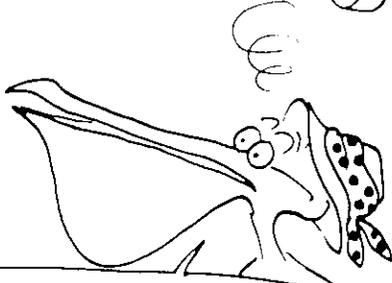
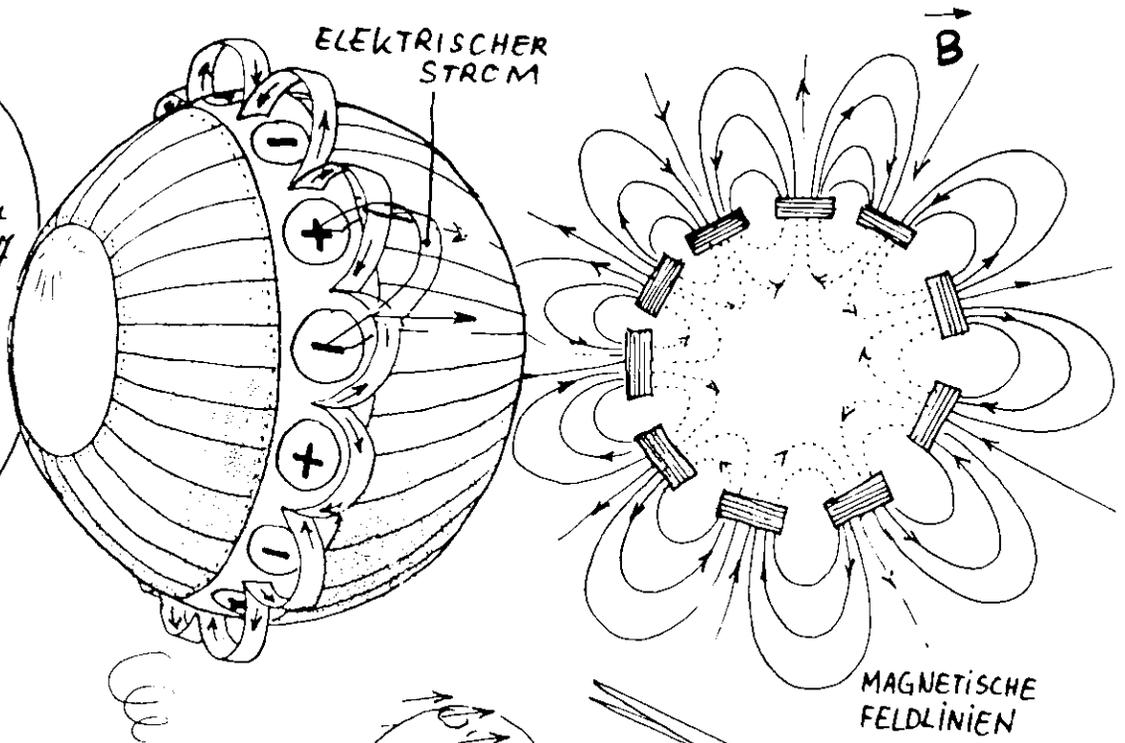
Aber sollte man nicht sagen, daß dieser elektromagnetische Antrieb unserem derzeitigen technischen Stand etwas voraussetzt?



# EIN UNTERSEEBOOT OHNE SCHRAUBE

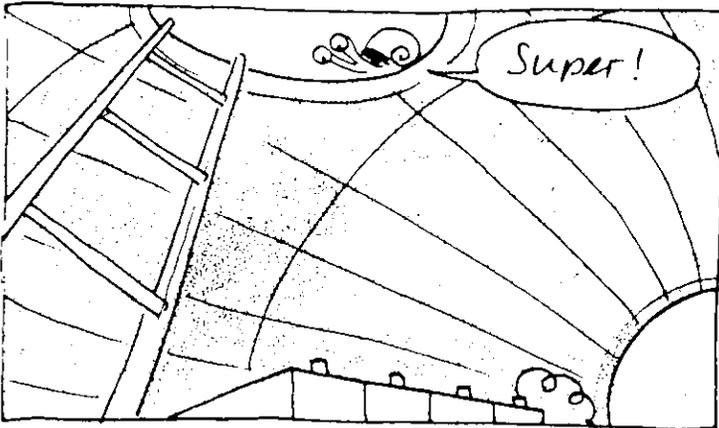


Wenn Du die Drei-Finger-Regel anwendest, stellst Du fest, daß sich das Schiff mit einem Feld von Lorentzkraften umgibt. Diese treiben das Schiff vorwärts.

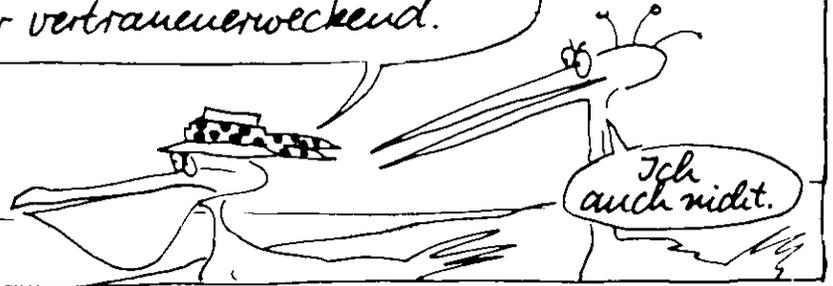


Sie werden doch wohl da nicht mit einsteigen.

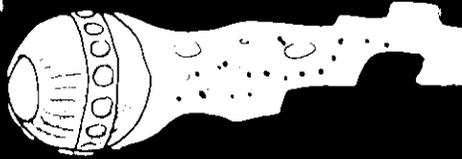
AUF DAS WASSER WIRKENDE KRÄFTE



Ich weiß nicht, was Sie darüber denken, aber ich finde das ganze nicht sehr vertrauensweckend.

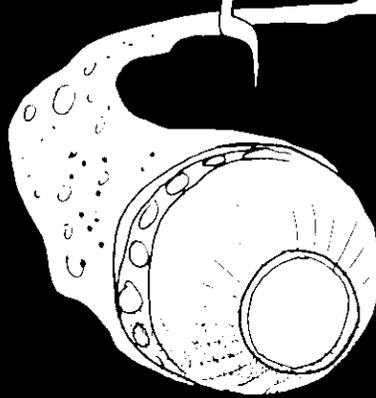


Wie steuerst Du denn das Ding?

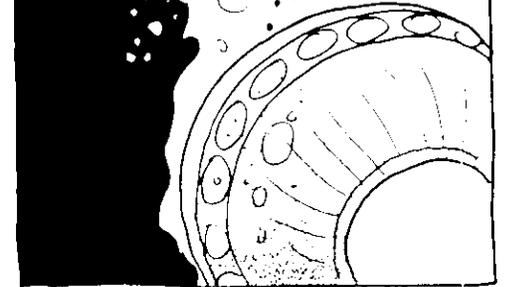


Ganz einfach: durch Verändern der Stromstärke an den einzelnen Elektroden

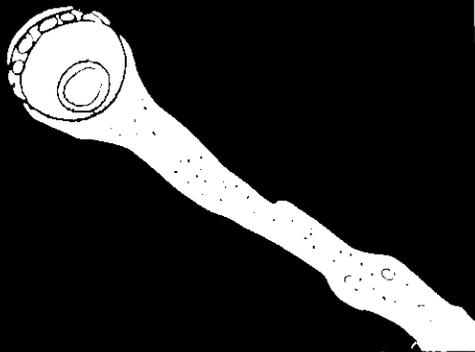
Backbord...



... Stop!

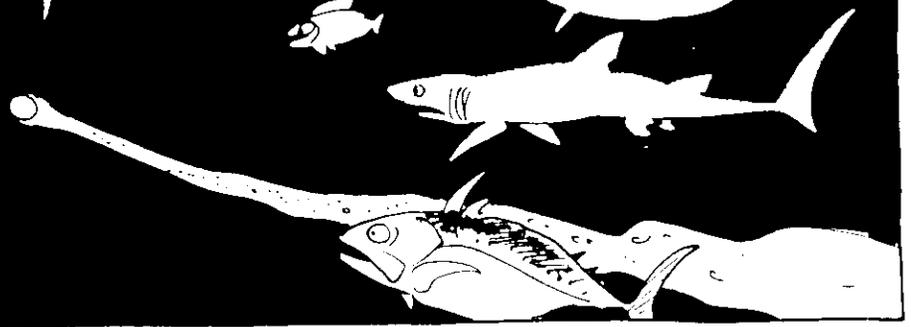


Volle Kraft voraus!



Ein MHD-Unterseeboot könnte sehr schnell und absolut geräuselos sein.

Schande!

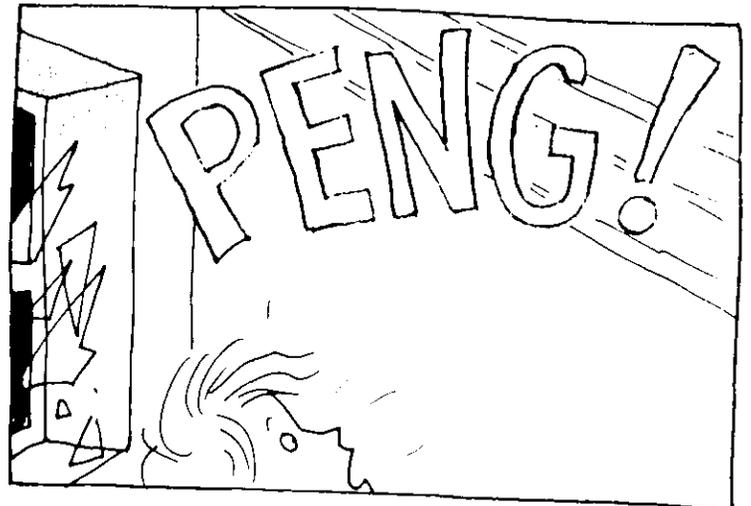
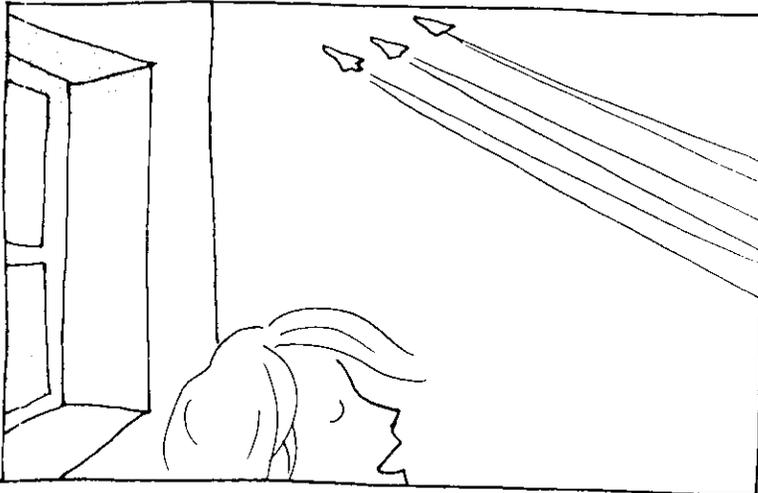
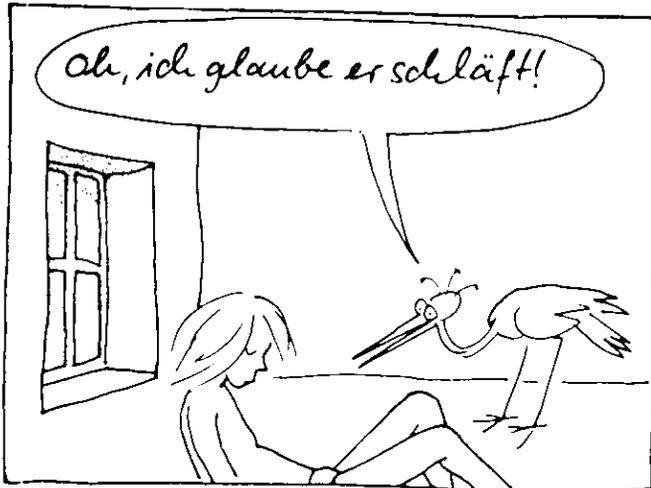
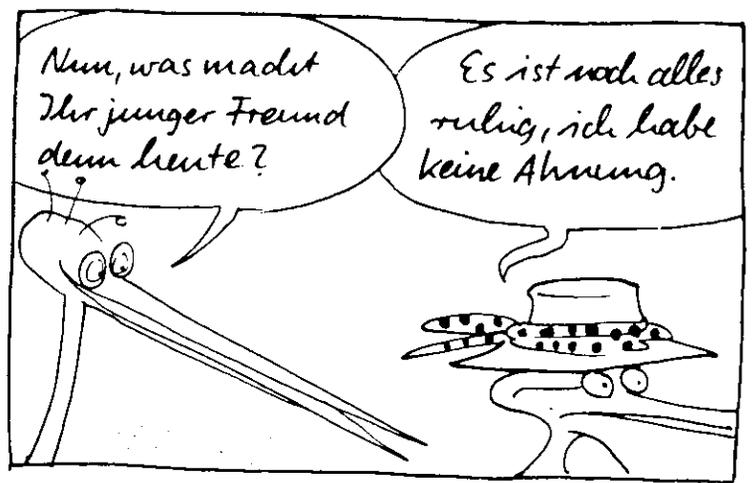
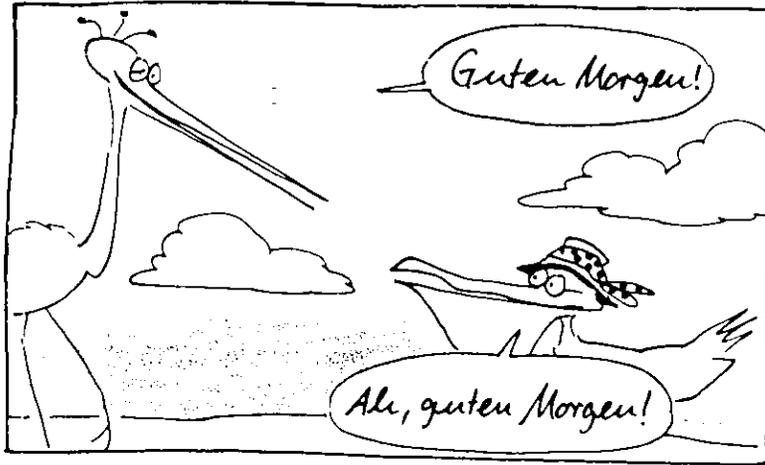


Siehst Du, lieber Leo. Wenn wir erst einmal sehr leistungsfähige supraleitende Magnete (\*) haben und elektrische Generatoren mit einem hohen Wirkungsgrad, werden die Schiffe keine Wellen mehr machen, aber dafür die Unterseeboote Blasen.



(\*) Bestimmte Materialien leiten den elektrischen Strom, ohne Wärme zu erzeugen, wenn man sie auf sehr niedrige Temperaturen (einige Kelvin) abkühlt.

# AM NÄCHSTEN MORGEN:



# ÜBERSCHALL-STRÖMUNGEN

- Diese STÖßWELLE ähnelt der BUGWELLE, die Deinen Landesteg zerstört hat.
- Du meinst... Flugzeuge... machen Wellen?
- In gewisser Weise, ja. Aber statt Oberflächenwellen erzeugen sie SCHALLWELLEN, die sich mit SCHALLGESCHWINDIGKEIT ( $v_s$ )<sup>(\*)</sup> ausbreiten.

Bewegt sich ein Schiff mit einer Geschwindigkeit  $v$ , die größer ist als  $v_s$ , erzeugt es eine WELLENFRONT.

Wenn sich ein Flugzeug mit einer Geschwindigkeit  $v$  bewegt, die größer als die Schallgeschwindigkeit  $v_s$  ist, erzeugt es eine STÖßWELLE.

- Aber wie denn? Es gibt doch hier keine freie Oberfläche.

- Hier spielt die DICHTe des Gases die Rolle der Höhe des Wasserspiegels. Die Oberflächenwellen versuchen, das Wasserniveau konstant zu halten. Die SCHALLWELLEN versuchen, die DICHTe KONSTANT zu halten. Die Stoßwellen sind Fronten, in denen Dichte, Druck und Temperatur erhöht sind.



Wir können die Moleküle mit diesen Männchen vergleichen. Ihre Augen sind verbunden und sie laufen mit einer Geschwindigkeit  $v_s$  völlig ungeordnet auf einem Platz umher. Dabei stoßen sie ständig gegeneinander (Stöße zwischen Molekülen). Ein Gegenstand, der in ein Gas eindringt ist vergleichbar mit diesem Autobus, der mit der Geschwindigkeit  $v$  in die Menschenmenge eindringt. Ist  $v < v_s$ , kann die Information „stromaufwärts“ gelangen, und die Männer werden vor der Ankunft des Fahrzeuges gewarnt, bevor dieses bei ihnen eingetroffen ist. Sie können ihm ausweichen. Dies ist das Bild einer Unterschallströmung.

(\*) Siehe Anselm Wüßtegers Abenteuer „Warum kann ich nicht fliegen?“

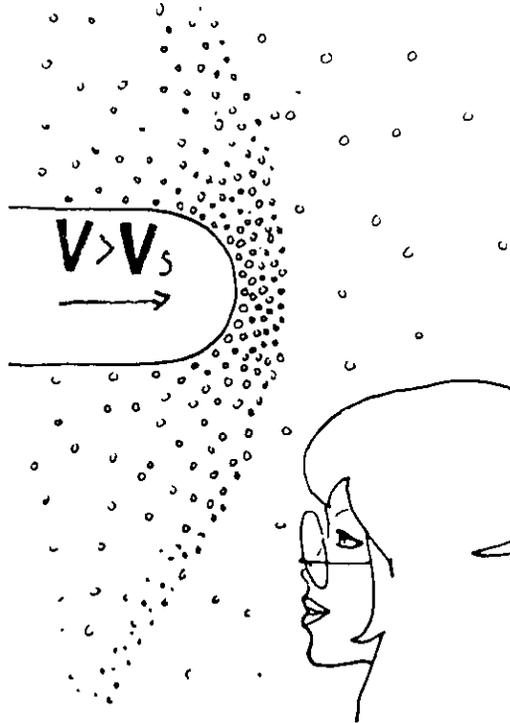
WAS PASSIERT ABER, WENN  $V > V_s$  IST ?



Die Männer, d. h. die Moleküle, können dem Gegenstand nicht mehr ausweichen, um die Dichte konstant zu halten, bevor er bei ihnen eingetroffen ist. Das Gas wird sich daher vor dem Gegenstand ansammeln, es bildet eine Art Wulst, seine Dichte steigt hier schlagartig an.

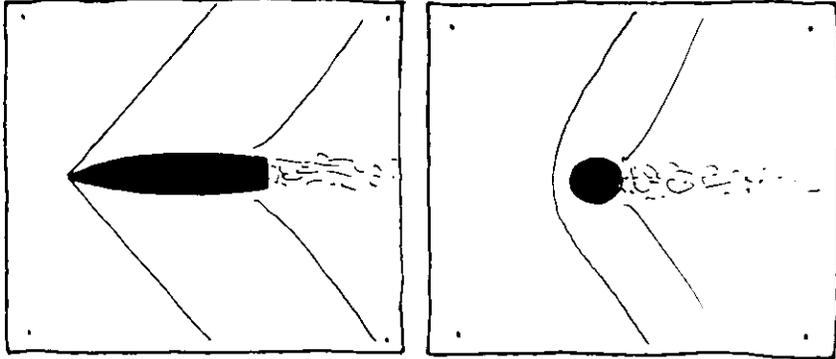


# DIE STOßWELLE



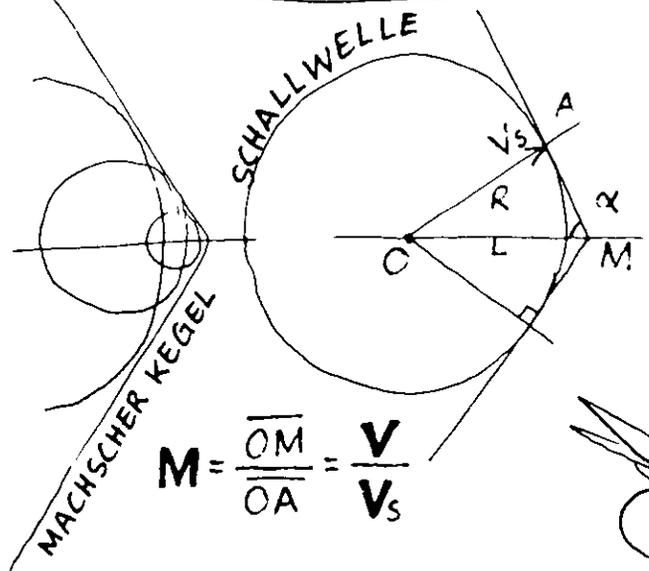
Man nennt diese Erscheinung eine STOßWELLE. Anstelle der Oberflächenwellen stehen jetzt die Schallwellen. Sonst ist aber alles genauso wie mit der Bugwelle. Es bildet sich eine Front, in der Dichte, Druck und Temperatur erhöht sind. Die Stoßwelle entsteht, sobald die Geschwindigkeit  $V$  größer als die Schallgeschwindigkeit  $V_s$  ist.

Und Du meinst, jedesmal, wenn diese Spinner sich mit ihren Diisenjägere amüsieren, kann ich alle Fensterscheiben im Haus ersetzen?



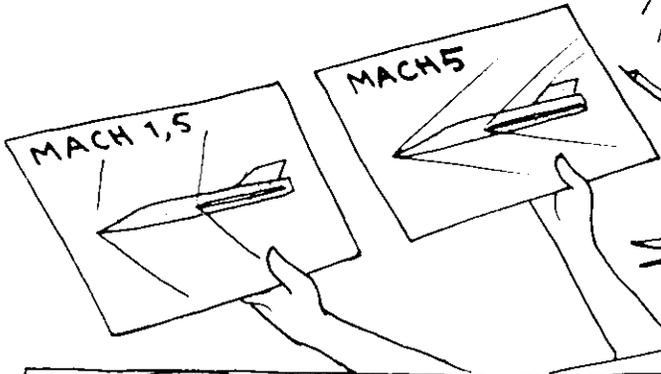
Trotzdem, bei jedem Gegenstand, der sich mit Überschallgeschwindigkeit bewegt, hast Du zwei Stoßwellen: die Kopf und die Schwanzwelle. Links siehst Du ein Gewehrsgeschoss, rechts eine Kugel.

Jedes Objekt, selbst ein Sandkorn, erzeugt einen Stoß, wenn es mit  $v > v_s$  geworfen wird. Das Verhältnis  $M = v/v_s$  nennt man die MACHZAHL. Da die Stoßwellen kegelförmig sind, nennt man sie auch Machsche Kegel (\*).



(\* Siehe Anhang A

Sagt mal, die Strömungen von Flüssigkeiten mit einer freien Oberfläche sehen den Überschallströmungen von Gasen aber sehr ähnlich.



Zwischen den beiden Weltkriegen gab es noch keine Computer. Daher simulierte man die Form der Stoßwellen in Wasserbecken.

Großartig! Ein hydromechanischer Analogrechner!



Auch zwischen den mathematischen Gleichungen, die die beiden Systeme beschreiben, besteht eine große Ähnlichkeit. In ihnen entspricht die Höhe des Wasserniveaus der Dichte des Gases.



Um das alles zu untersuchen, müsste man ein **ÜBERSCHALLGEBLÄSE** bauen.

Das wird lustig!

Das machst Du aber hoffentlich diesmal nicht in der Küche.

Ein Gebläse, ... das ist schon komplizierter.

Man braucht große Kompressoren und viel Energie!

Einen Haufen Geld, wie für den neuen Beschleuniger bei CERN.

# DIE SCHALLMAUER DIE HITZEMAUER

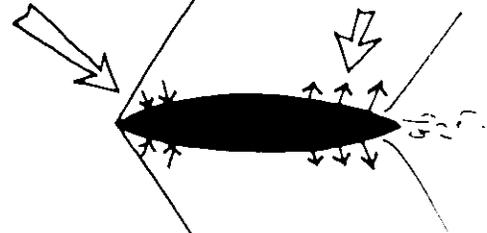
Mit einem Überschallgebläse könnte man tatsächlich eine Reihe interessanter Erscheinungen sichtbar machen. So ist der Durchbruch durch die Schallmauer ( $V = V_s$ ) begleitet von einer Zunahme des Strömungswiderstandes. Zum Wirbelschweif kommt nämlich jetzt der Wellenschweif hinzu.



Wie meinen Sie das?

ÜBERDRUCK

UNTERDRUCK



$V > V_s$

In der Hydrodynamik verändert das Auftreten von Wellenfronten die Verteilung des Druckes auf den Schiffsrumpf und zwar so, daß das Schiff gebremst wird. In der Überschall Aerodynamik ist es genauso.



Das macht Lärm (Schallwellen), ist zu nichts nütze und frißt Energie (\*).

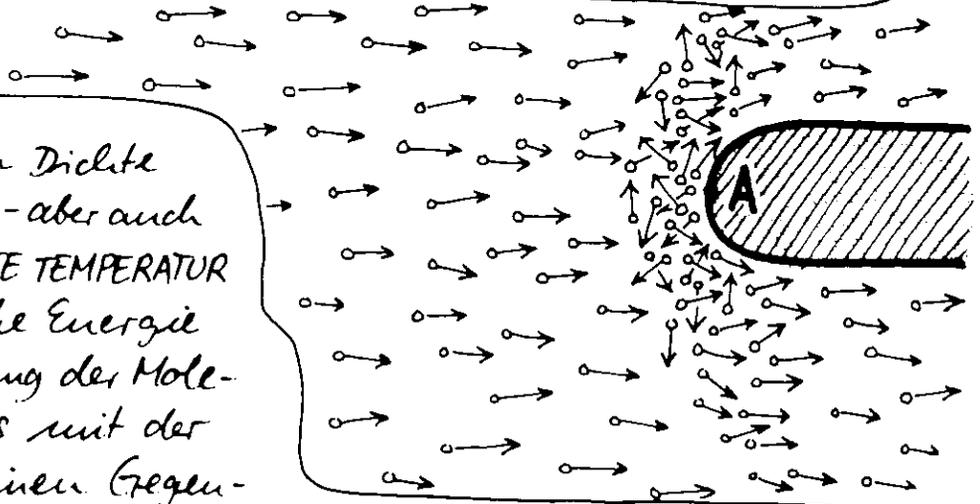
Trotz ihrer schlanken Form, durch die dieser Wellenzug möglichst klein gehalten werden soll, verbraucht die Concorde 40% ihrer Energie zur Erzeugung der Stoßwelle.

(\*). Siehe Anhang D

Wenn man eine bewohnte Gegend in geringer Höhe mit MACH 5 oder 6 überfliegt, zerstört die Stoßwelle sogar die Dächer.



Genauso wie die Bugwelle den Landesteg zerstört hat.



In einer Stoßwelle steigen Dichte und Druck schlagartig an - aber auch die TEMPERATUR. Die ABSOLUTE TEMPERATUR ist ein Maß für die kinetische Energie  $\frac{1}{2} m v^2$  der Wimmelbewegung der Moleküle. Wenn nun das Gas mit der Geschwindigkeit  $V$  auf einen Gegenstand „fällt“, so wird der Stoßpunkt **A** seine ganze kinetische Energie zu kinetischer Energie der Wimmelbewegung. Daher ändert sich die Temperatur im Punkt **A** mit dem Quadrat der Geschwindigkeit  $V$ .

Wo sind meine Schuhe, schnell!



Die Erscheinung, daß sich die Nase eines Flugzeugs erhitzt, macht sich unter Mach 2 nur wenig bemerkbar. Darüber stellt diese HITZEMAUER eine wesentliche Beeinträchtigung dar.

Bei gegebener Geschwindigkeit ist die Erhitzung um so größer, je dichter die Luft ist.



Woraus folgt, daß man in geringer Höhe nicht mit Mach 5 fliegen kann!



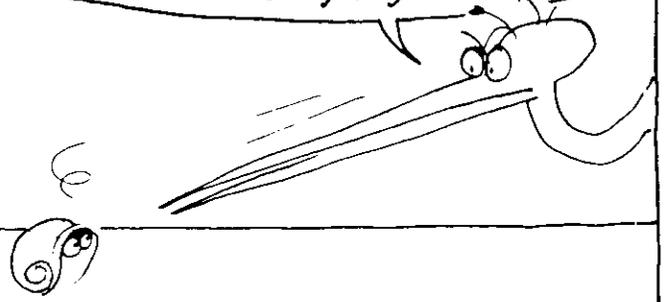
Mach 2 scheint allerdings möglich zu sein, wie man sieht...! Könnte man nicht Überschallflugzeuge erfinden, die keine Fensterscheiben kaputt machen?



Das müßten Maschinen sein, die keine Stoßwellen erzeugen.



Das aber, mein Lieber, ist absolut unmöglich. Sonst hätte man es nämlich schon längst gemacht!



Mal sehen... Wenn sich der Stoß bildet... das ist doch dasselbe wie bei der Bugwelle; das liegt daran, daß man nicht mehr auf die Moleküle stromaufwärts einwirken kann, damit sie den Weg freigeben. Sie schieben sich also zusammen und bilden einen Wulst, den man **STOßWELLE** nennt.



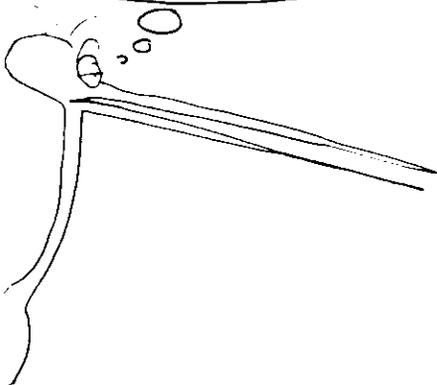
Wenn man mit Hilfe der Lorentzkraft stromaufwärts wirkt, müßte logischerweise das Problem der Stoßwelle in einem ganz neuen Licht erscheinen.



Tiresias, sieh Dir mal dieses Photo der MHD-Strömung um den Zylinder von Seite 30 an. Siehst das nicht vorne wie ein Saugeffekt aus?



Blödsinn...



Richtig, in Deinen hydrodynamischen Experimenten hattest Du es geschafft, das Wasser vorne wegzusaugen, so daß ein Unterdruck entstand.

Ich frage mich, wie weit diese Analogie reicht...



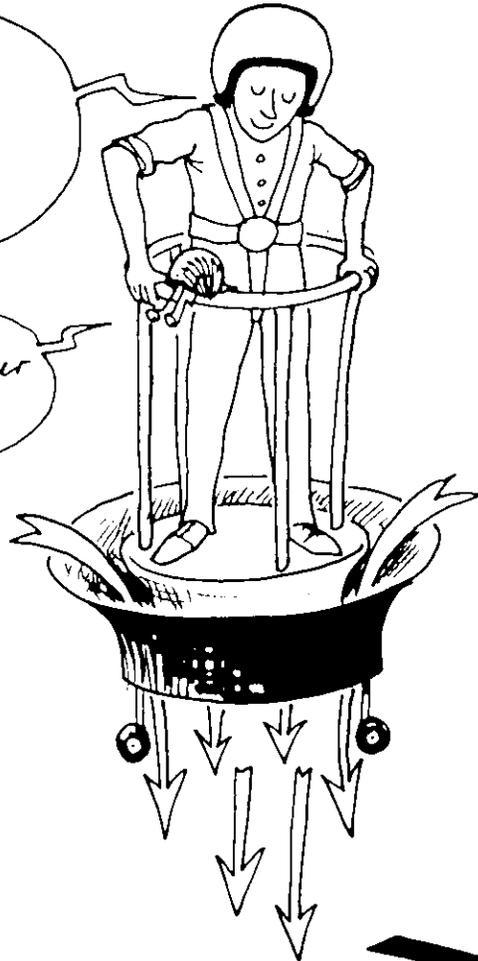
Wenn die hydrodynamische Analogie anwendbar wäre, müßte es drei Arten des Fliegens geben.

Nämlich?

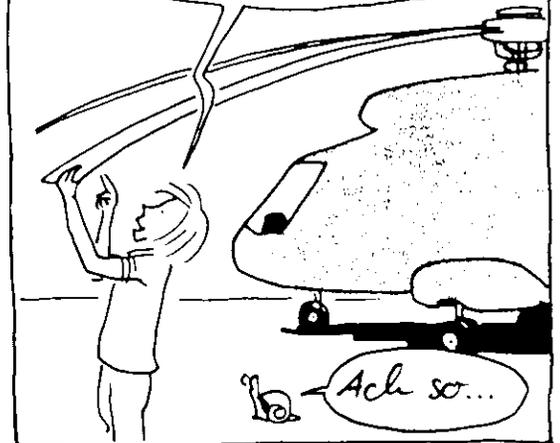
Wie man's auch ausstellt: Man muß in jedem Fall die Gasmoleküle veranlassen, sich von oben nach unten zu bewegen.

Erstes System:  
Ich erzeuge einen Gasstrom mit Hilfe eines Flügelprofils.

Wo ist denn hier ein Flügel? Ich sehe nur zwei gegenläufige Rotoren..



Was bist du dumm!  
Ein Rotor ist nichts anderes als ein sich drehender Flügel



Auf diese Art kann man die Luft auch von oben nach unten bewegen!



Zweites System: Ein Gas beschleunigen, das man selbst erzeugt.



Und das dritte System?



Man müßte die LUFT OBEN ANSAUGEN mit Hilfe von Lorentzkraften..

Haben Sie das gehört?

Ah... Anselm und Tiresias zusammen... ein schönes Gespann!

Die fangen an zu spinnen, das kann man wohl sagen!

Und Sophie ist natürlich wieder am Strand!

Ah... Wenigstens bleibt Max noch etwas vernünftig.

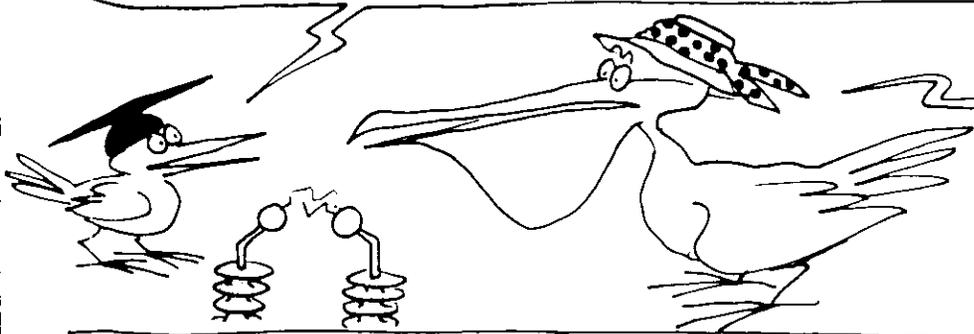
Was ist Ihr Problem?

Anselm faßt ins Auge, ich weiß nicht... ich glaube er will elektrisch fliegen.

Ich äußerte bereits vorher Leo gegenüber, daß das unmöglich ist... daß die Luft den elektrischen Strom nicht leitet.

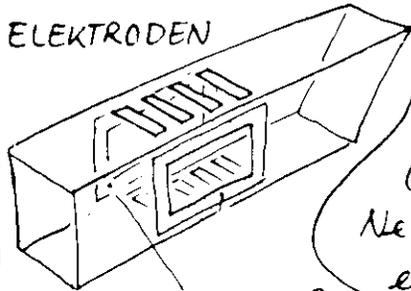
Luft ist ein NICHTLEITER.

Nicht so schnell! Das hängt doch von der Stärke des ELEKTRISCHEN FELDES ab, das Sie anlegen! D.h. vom Verhältnis der Spannung zwischen den Elektroden zu ihrem Abstand!!! Wenn Sie 3000 Volt pro Millimeter anlegen, wird es ganz schön knallen.

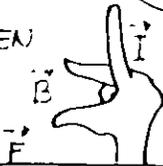


So... warum ist es denn soweit mit der elektrischen CONCORDE?

ELEKTRODEN



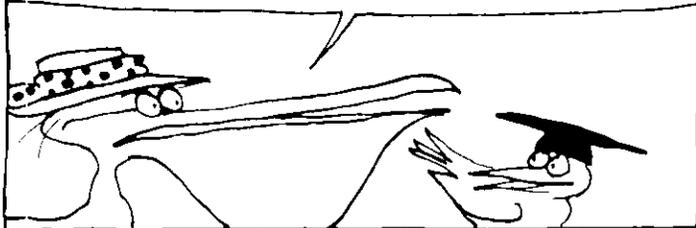
SPULEN



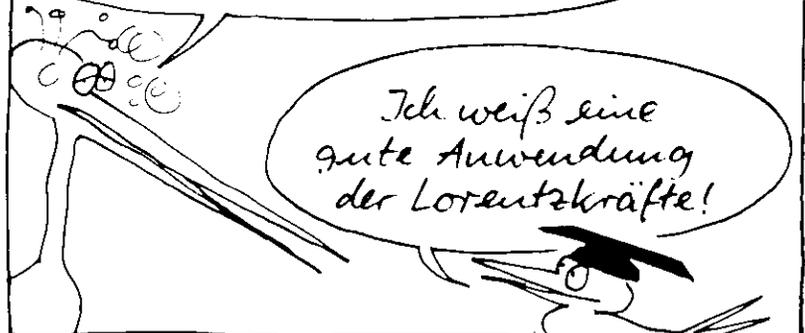
Mal sehen... mit einem Magnetfeld von 4 Tesla<sup>(\*)</sup> und einer Stromdichte von 1 Ampere pro Quadratzentimeter (10.000 A/m<sup>2</sup>) bekommt man eine Lorentzkraft von 40.000 Newton pro Kubikmeter, also 4 Tonnen pro m<sup>3</sup>. Wenn der Motor ein Wasservolumen von 1 m<sup>3</sup> ausnutzt, macht das 4 Tonnen.

VIER TONNEN!

Nun fangen Sie nicht an zu träumen! 3000 Volt pro Millimeter, das macht immerhin ein paar Millionchen pro Meter!



Sagen Sie mal, die Lorentzkräfte, rütteln die nicht?



Ich weiß eine gute Anwendung der Lorentzkräfte!

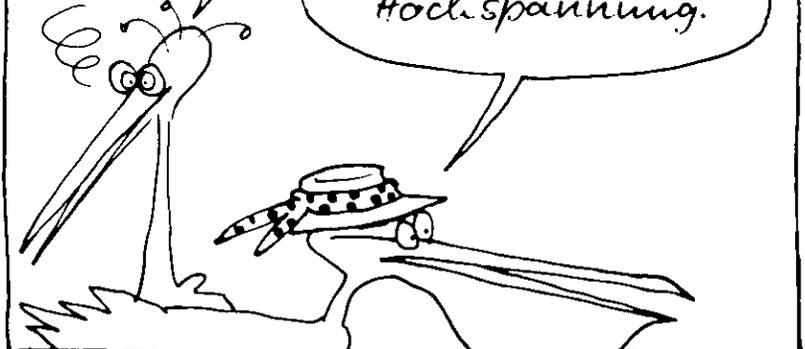
Nämlich?



Der Donner.

Der Donner?

Das ist doch wieder Hochspannung.



Sophie, komm mal schnell!  
Wir erfinden gerade mit Anselm ein  
wahnsinniges Ding: wie man elektrisch  
fliegen kann!

Ach Gott,  
ich komme  
ja schon.



Siehst Du denn, wie komplex das ist? Du brauchst an Bord ein  
System zur Erzeugung sehr tiefer Temperaturen für die Supra-  
leiter, und einen elektrischen Generator von einigen Hundert  
Megawatt. Das alles hat ein irrsinniges Gewicht!

Da kamst  
Du gleich versuchen,  
ein Kernkraftwerk  
fliegen zu lassen.

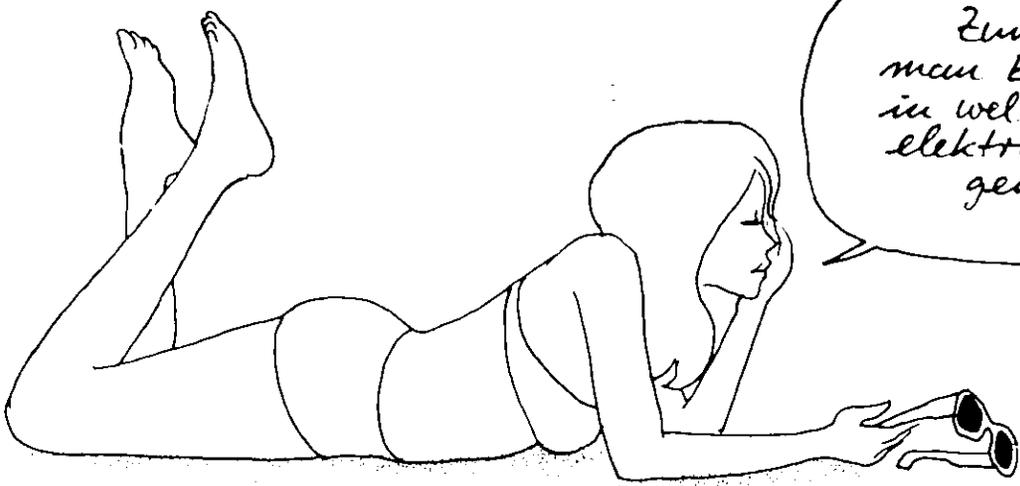
Elektrisch fliegen ist unmöglich.

So! Und wie fliegt  
diese Maschine dort?

Das ist was  
anderes, die hat  
doch einen  
Propeller...

Und sie hat Solarzellen!...

Aber was ist denn ein MHD-Antrieb anderes als  
eine Art ELEKTROMAGNETISCHER PROPELLER?

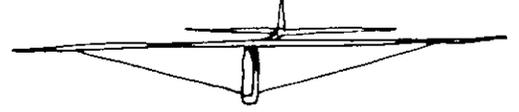


Zum Fliegen braucht man ENERGIE, gleichgültig in welcher Form: chemisch, elektrisch ... solange nur genug davon da ist.



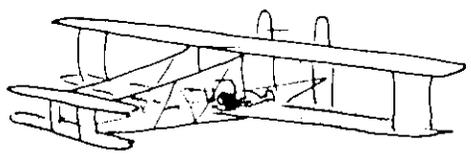
Genau genommen ist Fliegen eine Frage des VERHÄLTNISSSES ZWISCHEN ENERGIESTROM UND GEWICHT FÜR EINE GEGEBENE GESCHWINDIGKEIT

40 km/h TRETFLUGZEUG (ODER MIT SOLARZELLEN)



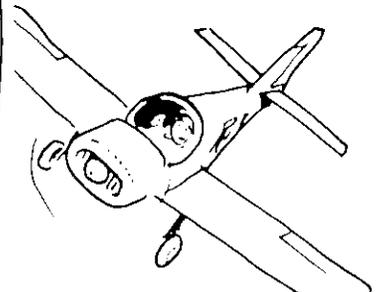
10 Watt pro kg

60 km/h FLUGZEUG DER GEBRÜDER WRIGHT



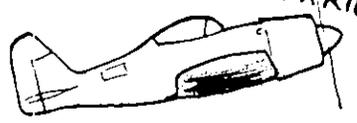
100 Watt pro kg

250 km/h SPORTFLUGZEUG



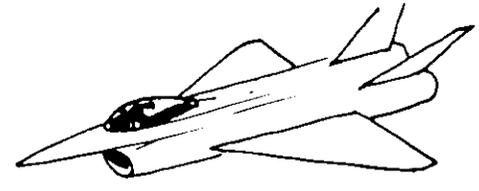
300 Watt pro kg

700 km/h JAGDFLUGZEUG DES LETZTEN WELTKRIEGES



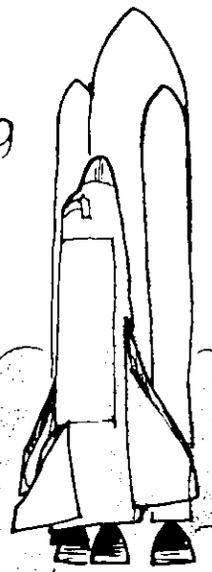
800 Watt pro kg

2700 km/h JAGDFLUGZEUG DES NÄCHSTEN WELTKRIEGES



500 Watt pro kg

20.000 Watt pro kg



Das Space-Shuttle !!!



Verstehe ich das richtig: Wenn ein Kernkraftwerk ein Kilowatt pro Kilogramm produzierte, müßte es sich spontan in die Luft erheben?!

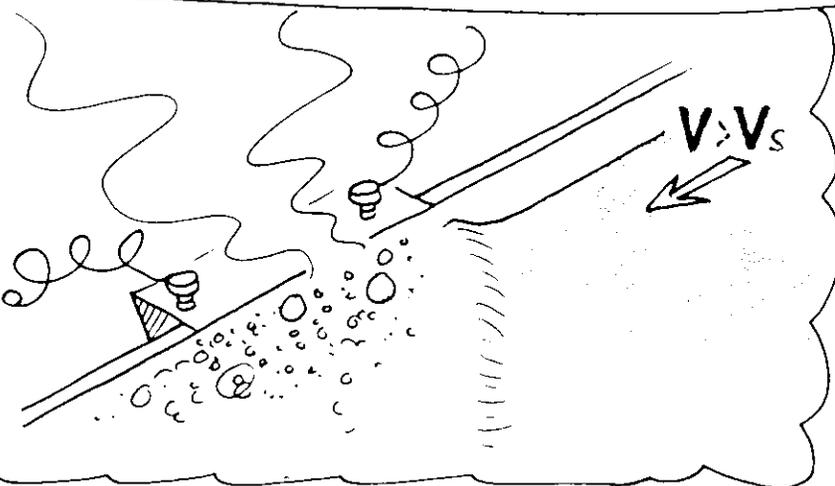
Hundert Tonnen für hundert Megawatt,... unmöglich!

Na, Sophie, was gibts?

Schon ein toller Bursche, der Wißteger! Es sieht wirklich so aus, als könnte man alles, was man über Flüssigkeitsströmungen herausgebracht hat, auf Gase anwenden: DIE KRITISCHE ENERGIE, DEN MHD-WIRKUNGSGRAD. Da muß doch irgendwo der Wurm drin sein...

Nun?

In dem Experiment auf Seite 43 verursachte eine ZU GROSSE ENERGIEZUFUHR einen STAU.

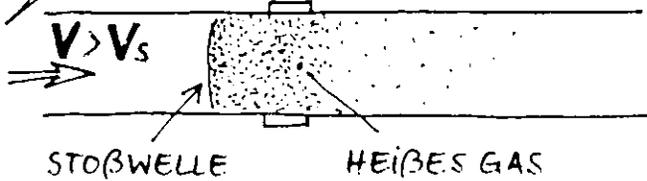


# DER THERMISCHE STAU

Könnte ein analoges Phänomen die MHD-Wirkung in Gasen beeinträchtigen?



Richtig... man kann die Überschallströmung eines Gases mit Hilfe der Wärme stauen: In einer rein elektrischen Entladung (ohne Magnetfeld) verhält sich das heiße Gas wie ein Pfropfen, und es entsteht eine Stoßwelle.



Also sind Anselms Versuche zum Mißerfolg verurteilt?

Das ist der thermische Stau.



Nicht unbedingt. Das hängt noch von der ELEKTRISCHEN LEITFÄHIGKEIT der Luft ab (die man auf verschiedene Arten beeinflussen kann). Ist sie hinreichend groß (\*), so bleibt die Wärmeentwicklung mäßig, und es entsteht kein Stau.

(\*) Siehe Anhang E

Oh, sehen Sie mal Aussehen...

Das überrascht mich...

Er ist eingeschlafen.



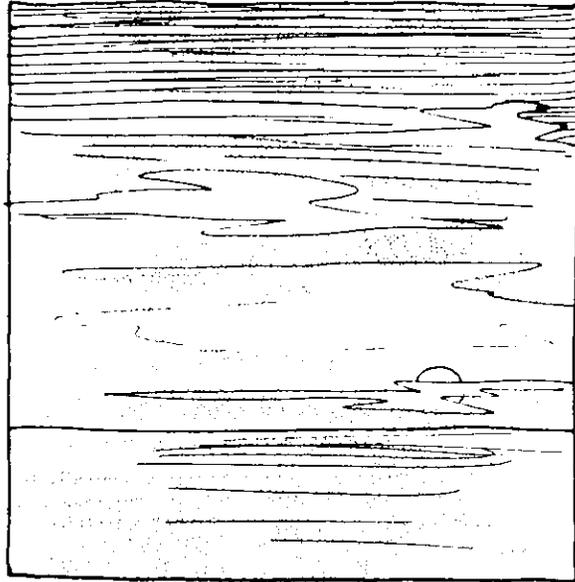
Was halten Sie von alledem?

In Anbetracht der Tatsache, daß MHD-Luftschiffe einer Technologie entsprechen, die wir frühestens in 100 Jahren haben werden, kann man sich fragen, ob es der Mühe wert ist, sich jetzt schon mit diesem Problem zu befassen.

Könnte es denn wenigstens grundsätzlich interessant sein?



Ach wissen Sie, das Grundsätzliche...



Pfff... das war ein Tag



Schlaf Dich mir aus, mein Schatz!



# ANSELMS TRAUM



Bist ich hier richtig bei Herrn Wüßteger? Sie hatten doch einen 200-Megawatt-Generator bestellt - sowie einen 10 Megawatt-Mikrowellensender, eine Rolle supraleitenden Draht, alles zusammen mit einem Gewicht von 10 Tonnen...

Ah... hm... ja



Bitte hier unterschreiben!



Uah...

Das ist doch gutes Material! Los Anselm...

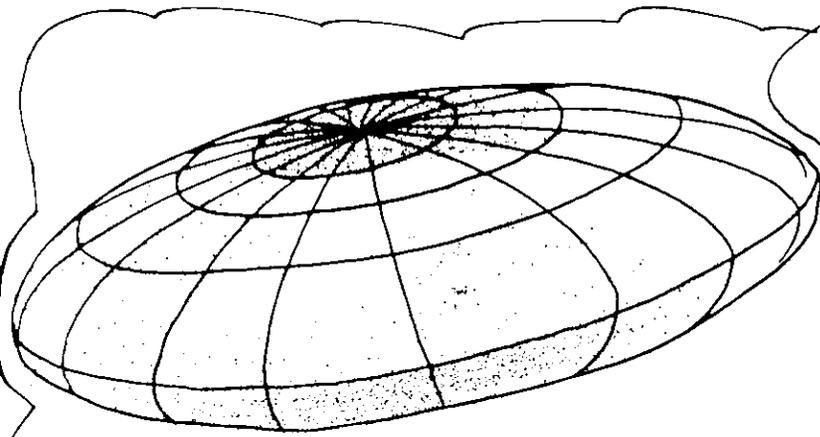


Einen komischen Lastwagen hat der Typ... hast Du das gesehen?



Habe noch nie so einen Lastwagen gesehen... na ja, egal...

Los! Los!



Warum baust Du den Aerodyn so flach?



Um den UNTERDRUCK davor und den ÜBERDRUCK dahinter besser auszunutzen.



Immer wenn man von einem Stab zum nächsten geht, kehrt der Strom seine Richtung um.



Man erhält ein Magnetfeld, dessen Richtung alle  $d$  mm wechselt.

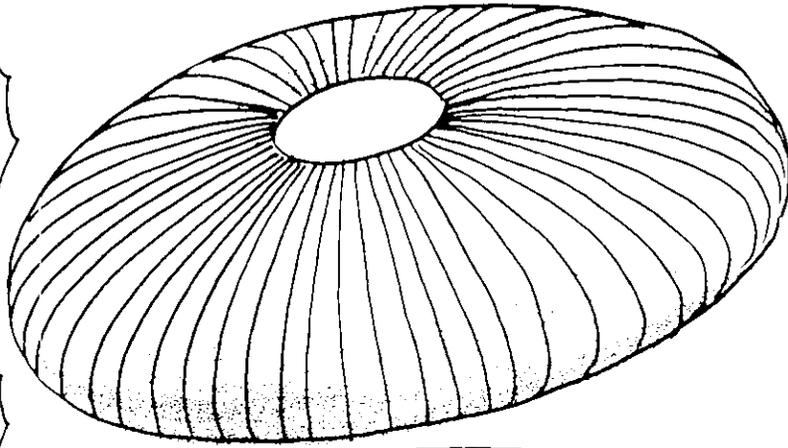
Die Stäbe sind hohl und werden durch flüssiges Helium, das durch sie hindurchfließt, auf sehr niedriger Temperatur gehalten.



Die Stäbe liegen wie die Längskreise des Schiffes.

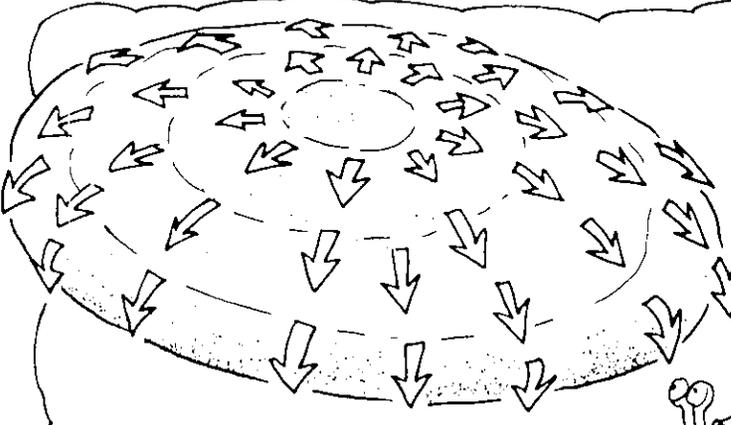
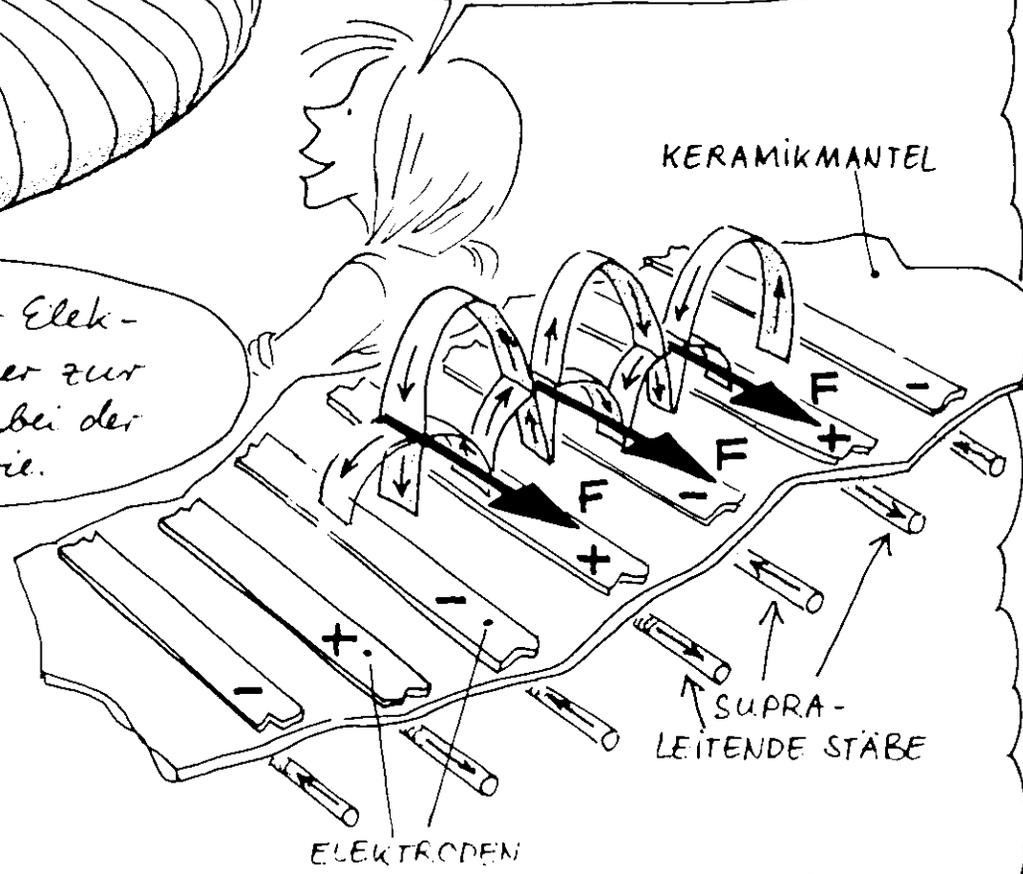
Ich verkleide sie mit einer dünnen Keramik-Schicht.

- ⊗ Stromrichtung in die Zeichenebene hinein
- ⊙ Stromrichtung aus der Zeichenebene heraus



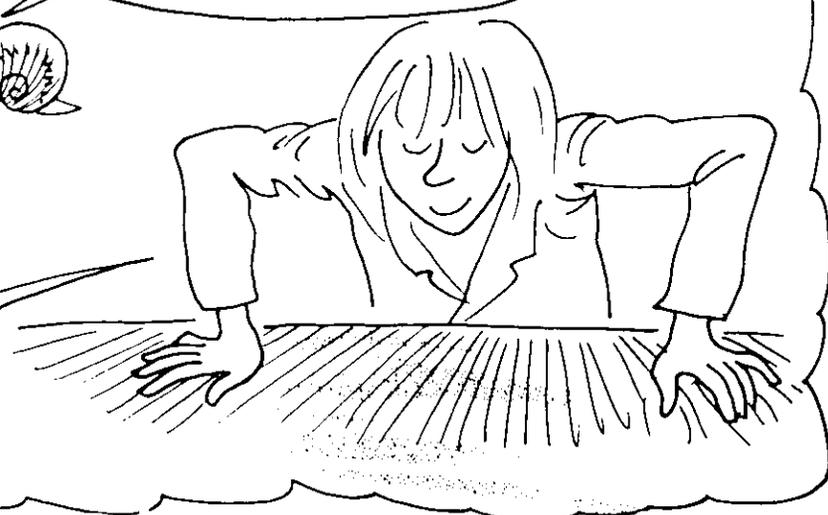
Auf die Keramikschicht bringe ich meine Elektroden auf - auch in Richtung der Längskreise.

Und die Polarität der Elektroden wechselt von einer zur nächsten, genauso wie bei der Beschleunigerbatterie.



So sieht das KRAFTFELD aus, das dadurch entsteht.

Stäbe und Elektroden sitzen möglichst dicht nebeneinander, das hat mehrere Vorteile.



Erstens komme ich dann mit einer niedrigen Spannung zwischen den Elektroden aus.

Zweitens ist das Volumen, das mit dem Magnetfeld gefüllt werden muß, klein: praktisch die Oberfläche des Schiffes multipliziert mit dem Abstand zwischen den Stäben.

Drittens braucht nur eine sehr dünne Luftschicht ionisiert zu werden.

So sieht der Luftstrom aus, der dabei entsteht.

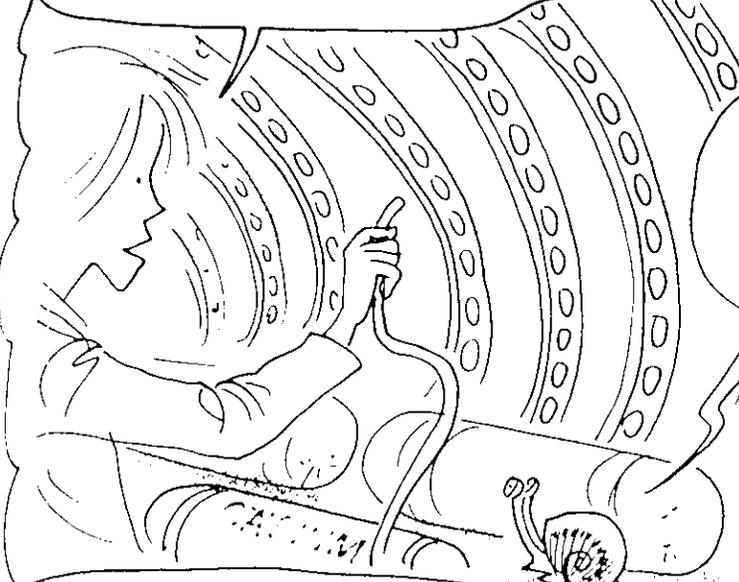
... eine Art elektromagnetischer Hubschrauber.

Das einzige Problem, das noch bleibt: Wie bewerkstellige ich die IONISATION, wie erzeuge ich genügend viele FREIE ELEKTRONEN?

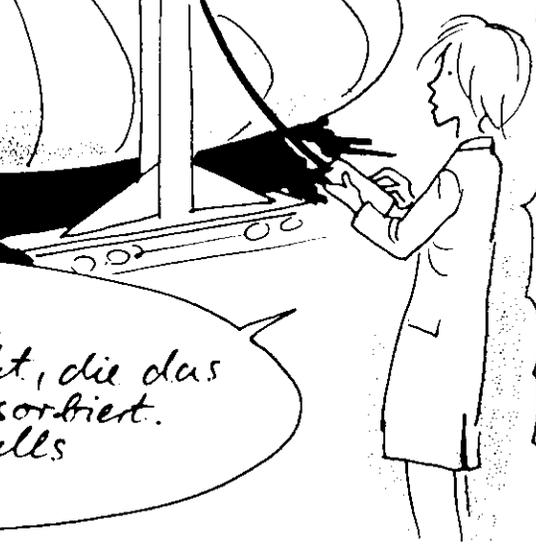
Wenn der Abstand zwischen den Elektroden nur 1 mm ist, genügen 1000 Volt, um aus den Atomen Elektronen herauszureißen und zu befreien: So kommt der Strom gut durch.

# DAS IONISATIONS- PROBLEM

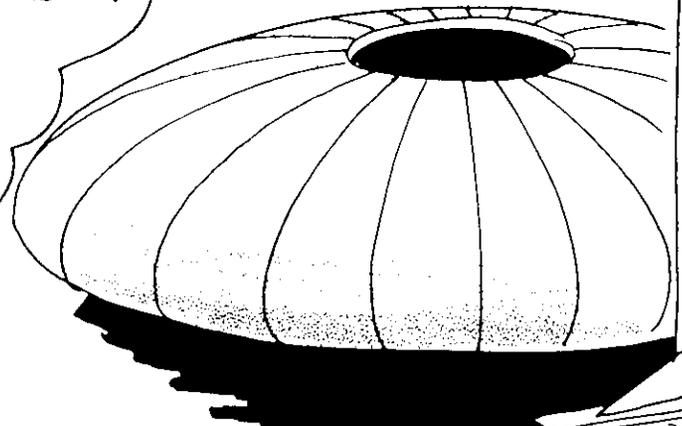
Was in der Luft die Ionen liefert, ist weder der Sauerstoff, noch der Stickstoff, sondern das Stickoxid  $\text{NO}$ .  
Ich will jetzt die Luft einfach mit einem Stoff anreichern, der leichter Elektronen abgibt:  
Cäsium oder Natrium.



Du versiehst also den Keramikmantel mit feinen Poren, durch die während des Fluges kleine Mengen Cäsium-Dampfes austreten.



Anselm hat noch einen Mikrowellensender an Bord installiert.  
Dieser erzeugt ein elektrisches Wechselfeld in der angrenzenden Luft.



Die Mikrowellen werden in der Luftschicht, die das Schiff umgibt, schnell absorbiert.  
Dabei entstehen ebenfalls freie Elektronen.

PLASMA-  
SCHICHT

WEG EINES  
GASMOLEKÜLS

IONISATION

REKOMBINATION  
(= DEIONISATION) BEGLEITET VON  
LICHEMISSIONEN

So, alles ist fertig. Auf  
der Außenwand sitzen Mikro-  
femselkameras, so daß wir hier  
drin auch sehen können wo  
wir sind.

Soll ich  
starten?

Was ist denn nun  
wieder los?

Ionisation!

Um Gottes Willen! Leo und  
sein Freund sind draußen...

Die kriegen  
unsere Mikro-  
wellen ab!

Das Ding  
leuchtet ja...  
rötlich...

Am besten, wir verschwinden schnell!

Ich habe das Fakir-  
gestell eingeholt.

Lustig... das Ding  
läßt sich wie ein Hub-  
schrauber steuern.

!?

Sopslie!

Nur veränderst Du  
statt des Rotorwinkels  
die Stromstärken.

Was ist denn den beiden zugestoßen? Sieht  
aus, als wären sie dem Leibhaftigen  
begegnet.

Merkwürdig.  
Als hätten sie einen elektrischen  
Schlag bekommen.

Der MHD-Aerodyn setzt seinen Flug fort und hinterläßt einen langen Schweif aus brennendem Cäsium.



Dreh noch etwas höher!

Mit zunehmender Stromstärke ähneln das Schiff schließlich einem Kometen.



Wir haben eine unglaubliche Geschwindigkeit drauf! Vier- bis fünffache Schallgeschwindigkeit !!!

Sag mal, Anselm, da wir den Gasstrom voll unter Kontrolle haben, müßten wir doch ohne Turbulenz und ohne Stoßwelle fliegen, nicht wahr?

Schon möglich...

Also auch GERÄUSCHLOS?!

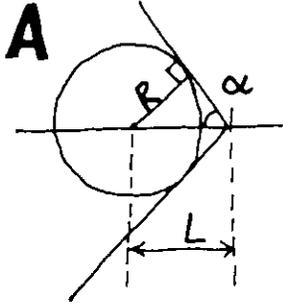
Es gibt die SCHALLMAUER, dann die HITZEMAUER, und jetzt habe ich den Eindruck, daß wir eine Mauer der Stille durchstoßen haben...



**DIE MAGNETISCHE SCHALLMAUER**

**ENDE**

# WISSENSCHAFTLICHER ANHANG



In der Zeit  $t$  läuft eine Welle radial nach außen bis zum Abstand  $R = v_s t$  vom Emissionsort, während sich der Gegenstand um die Strecke  $L = Vt$  bewegt. Es ist also:

$$\frac{V}{v_s} = \frac{L}{R} \quad \sin \alpha = \frac{v_s}{V} = \frac{R}{L}$$

$\alpha$  nennt man den Machschen Winkel.

**B** Man beeinflusst ein Wellensystem, wenn die von einem Volumenelement aufgenommene Energie  $E_B = (\vec{j} \times \vec{B}) \cdot \vec{l}$  (Arbeit pro Volumen =

Lorentzkraft pro Volumen mal Wechselwirkungslänge  $l$ ) größer ist als die kinetische Energie Dichte  $E_{kin} = \frac{1}{2} \rho V^2$ .

Im Salzwasser ist die Stromdichte  $j$  maximal  $1 \text{ A/cm}^2$  ( $10^4 \text{ A/m}^2$ ). Es sei  $V = 8 \text{ cm/s}$ , die Wechselwirkungslänge gleich der Elektrodenbreite  $l = 3 \times 10^{-3} \text{ m}$  und die Dichte  $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$ .

Mit  $B = 1 \text{ Tesla}$  wird der Wechselwirkungsparameter  $\frac{E_B}{E_{kin}} = \frac{2jBl}{\rho V^2} = 10$

Die BUGWELLE wird also unterdrückt.

**C** Der Schub des Bootes beträgt  $1 \text{ Pond}$ , d.h.  $10^{-2} \text{ Newton}$ . Es bewegt sich mit  $0,1 \text{ m/s}$ . Die Leistung beträgt also  $10^{-3} \text{ Watt}$ . Die Batterien liefern  $25 \text{ Volt}$  und  $20 \text{ Ampere}$ , d.h.  $500 \text{ Watt}$ . Damit beträgt der Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{10^{-3}}{500} = 2 \cdot 10^{-6}$$

Die Flüssigkeit durchströmt den Beschleuniger in der Zeit  $t$ . Die Antriebsleistung (pro Volumen) ist also  $\frac{jBl}{t}$ .  $\frac{L}{t}$  ist aber

die Geschwindigkeit  $V$ . Außerdem ist die pro Volumen dissipierte Leistung  $j^2/\sigma$ , wo  $\sigma$  die elektrische Leitfähigkeit ist. Der Wirkungsgrad ist demnach  $\eta = \frac{jBV}{jBV + j^2/\sigma}$

Mit  $\sigma = 10/(\Omega \text{ m})$  erhält man

$B = 25 \text{ Tesla}$	$\eta = 0,33$
$V = 20 \text{ m/s}$	
$j = 10^4 \text{ A/m}^2$	Der Wirkungsgrad wächst mit $V$ .

**D** Der Überdruck vor dem Flugkörper ist näherungsweise  $E_{kin} = 1/2 \rho V^2$ , wo  $\rho$  die Dichte der Luft ist ( $1,3 \text{ kg/m}^3$ ) und  $V$  die Geschwindigkeit, mit der sich der Flugkörper bewegt. Bei einer effektiven frontalen Fläche von  $A = 1 \text{ m}^2$  ist die zur Erzeugung des Wellenschweifs erforderliche Leistung  $P = E_{kin} AV = 1/2 A \rho V^3$ .

Für  $V = 700 \text{ m/s}$  ist  $P = 220 \text{ MW}$   
für  $V = 1500 \text{ m/s}$  ist  $P = 2200 \text{ MW}$

**E** Die Leistungsdichte (Leistung durch Volumen) eines MHD-Beschleunigers ist  $jBV$ . Mit  $j = 10^4 \text{ A/m}^2$ ,  $B = 4 \text{ Tesla}$  und  $V = 1000 \text{ m/s}$  erhält man  $jBV = 40 \text{ MW/m}^3$ . Erreicht die Leitfähigkeit der Luft  $10/(\Omega \text{ m})$ , d.h. die vom Salzwasser, so wird pro Volumen ein Energiestrom  $j^2/\sigma = 10 \text{ MW/m}^3$  dissipiert, ein vernünftiger Wert.

Es wäre zweckmäßig, große Magnetfelder ( $20 \text{ Tesla}$ ) zu benutzen und die elektrische Leitfähigkeit künstlich zu vergrößern (Zugabe von Alkalimetalldampf durch poröse Wände oder durch Absorption von Mikrowellen).

