

Jearl Walker **Der fliegende  
Zirkus der Physik**

Antworten

Oldenbourg

# Der fliegende Zirkus der Physik

Antworten

04-4  
W2

7862591

Der fliegende zirkus der  
physik.

五字	李俊	79.12.10	80.7.0
五字	李俊	80.7.0	81.5.25
五字	李俊	81.5.25	
五字	李俊		

Jearl Walker  
Dept. of Physics  
Cleveland State University

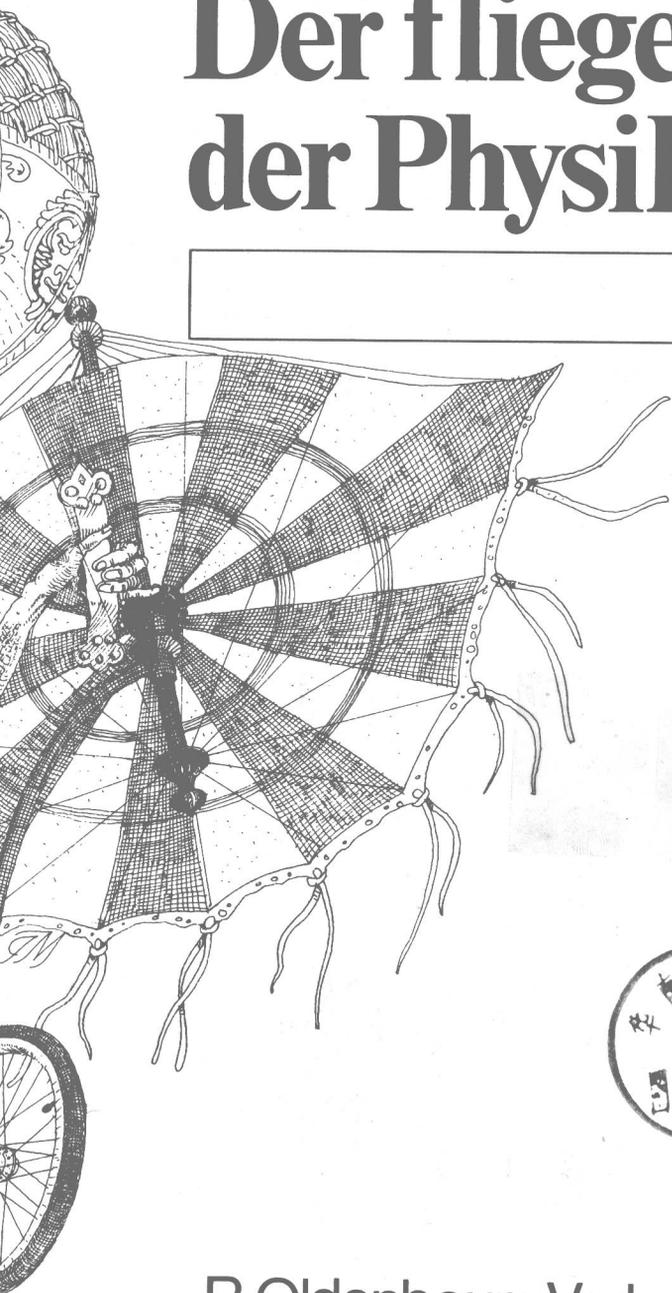


04-4  
W2

7862591

# Der fliegende Zirkus der Physik

Antworten



E7862591



R. Oldenbourg Verlag München Wien 1977

Autorisierte Übersetzung der englischsprachigen Ausgabe,  
die bei John Wiley & Sons unter dem Titel  
*The flying Circus of Physics with Answers*  
erschienen ist.

Copyright © 1977, by John Wiley & Sons, Inc.  
All Rights Reserved

Übersetzt von Uta Weichert und Professor Dr.-Ing. Lothar Weichert

#### **CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek**

**Walker, Jearl**

Der fliegende Zirkus der Physik. – München,  
Wien : Oldenbourg.

Antworten. – 1. Aufl. – 1977.

Orig.-Ausg. u.d.T.: Walker, Jearl: The flying  
circus of physics with answers.  
ISBN 3-486-21481-0

© 1977 R. Oldenbourg Verlag GmbH, München

80 79 78

5 4 3 2

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege sowie der Speicherung und Auswertung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben auch bei auszugsweiser Verwertung vorbehalten. Werden mit schriftlicher Einwilligung des Verlages einzelne Vervielfältigungsstücke für gewerbliche Zwecke hergestellt, ist an den Verlag die nach § 54 Abs. 2 Urh.G. zu zahlende Vergütung zu entrichten, über deren Höhe der Verlag Auskunft gibt.

Druck und Bindearbeiten: E. Rieder, Schrobhausen

ISBN 3-486-21481-0

## Kurze Antworten

Zum "Fliegenden Zirkus" Antworten, insbesondere kurze Antworten zu schreiben, birgt verschiedene große Gefahren in sich. Zuerst besteht die Gefahr, daß mein physikalisches Verständnis Lücken aufweist und daß mein Quellenmaterial Fehler enthält.

Das mag vor allem dort der Fall sein, wo sich Fragen mit Themen beschäftigen, deren experimentelle und theoretische Untersuchung noch nicht abgeschlossen ist, so zum Beispiel ist es beim Kugelblitz, über den immer wieder neue Veröffentlichungen erscheinen. Alles was ich über meine Antworten sagen kann, ist, daß ich versucht habe, mit der mir zugänglichen Literatur und im Rahmen des verfügbaren Platzes das Beste daraus zu machen.

Betrachten Sie diese Antworten als die Spitze eines Eisberges:

Es ist in der Tiefe noch viel Physik verborgen. Nehmen Sie die kurzen Erläuterungen auch nicht als der Weisheit letzten Schluß, betrachten Sie sie vielmehr als neuen Ansatz für weitere Über-

legungen und zum Studium neuerer Literatur oder Fachaufsätze.

Eine zweite Gefahr erscheint mir noch viel größer und läßt mich ernstlich zögern, überhaupt Antworten zu schreiben:

Es kann leicht sein, daß Sie viel zu schnell zum Antwortteil greifen und damit der eigentliche Denkanstoß der Frage verlorengeht. Wenn Sie sich nämlich nicht ernsthaft mit den Fragen auseinandersetzen, sich u. U. bis zur Frustration hin damit befassen, dann hat dieses Buch seinen Zweck nicht erreicht.

Das Vermögen, die Welt, in der wir leben, auf ihre physikalischen Zusammenhänge hin zu befragen und zu untersuchen, wird durch den ersten Teil dieses Buches wesentlich stärker gefördert als durch den zweiten. Deshalb richte ich die herzliche Bitte an Sie:

Beschäftigen Sie sich solange wie irgend möglich mit den Fragen und fordern Sie sich eine eigene Antwort ab, ehe Sie zum Antwortband greifen.

Jearl Walker

## Inhalt

1. Unter einer Decke verborgen den Ungeheuern zuhören . . . . .	6
2. Das Walroß spricht über klassische Mechanik . . . . .	16
3. Fieberphantasien und andere Alpträume der Nacht . . . . .	28
4. Seeschlacht in der Teetasse . . . . .	48
5. Die Modifarben der Saison . . . . .	68
6. Der verrückte Roboter und der Zauberring . . . . .	96
7. Das Walroß hat das letzte Wort und hinterläßt uns ausgesuchte Leckerbissen . . . . .	108

# 1 Unter einer Decke verborgen den Ungeheuern zuhören



<p>1.1 Das quietschende Geräusch in den beschriebenen Situationen ergibt sich durch "Haften und Gleiten". So haftet z. B. die nicht richtig gehaltene Kreide zunächst an der Tafel; doch wenn der Schreibende die Kreide schräg genug hält, beginnt sie plötzlich zu gleiten und zu vibrieren, wobei sie von Zeit zu Zeit an der Tafel haften bleibt und dabei ein quietschendes Geräusch erzeugt. Sobald die Schwingungen abnehmen, nimmt die Reibung zwischen Kreide und Tafel zu, bis die Kreide wiederum zu haften beginnt.</p>	<p>bedürfte es einer Schwingungsweite der Nadel, die sie in die benachbarten Rillen treiben würde.</p>
<p>1.2 Der Finger regt longitudinale Schwingungen an, d. h. Schwingungen längs des Umfangs des Randes. Der Rand selbst schwingt dabei auch transversal, also senkrecht dazu. Diese zweite Schwingungsart setzt die Flüssigkeit in Bewegung, denn es ist eine Bewegung zur Flüssigkeit hin und von ihr weg. Die Schwingungsbäuche der transversalen Schwingungen und somit auch der Flüssigkeitsbewegung sind um <math>45^\circ</math> gegen die Schwingungsbäuche der longitudinalen Schwingungen versetzt. Befindet sich der Finger an einer Stelle mit maximaler longitudinaler Bewegung und somit an einem longitudinalen Schwingungsbauch, muß die Bewegung der Flüssigkeit <math>45^\circ</math> hinter ihrem Finger einen Schwingungsbauch haben.</p>	<p>1.5 und 1.6 In beiden Fällen stammt das Geräusch offensichtlich von der Schwingung des Sandes, wenn sich Teile davon unter Scherkräften bewegen. Unter einem Fuß wird der Sand nach unten gedrückt; bei einer Sanddüne verursacht eine kleine Lawine, daß Sand über Sand gleitet. Man kann sich die Entstehung des Geräusches nicht erklären; festgestellt wurde es bislang nur bei Sand mit hauptsächlich runden Körnern gleicher Größe.</p>
<p>1.3 Stellen Sie sich vor, eine Seite der Trommel schwingt und die andere nicht. Die schwingende Seite regt nun die andere an, indem sie die Luft zwischen ihnen in Bewegung setzt. Sobald jedoch die zweite Membran zu schwingen beginnt, erweist sich die Luft als Hindernis für die Schwingungen der ersten Membran und beginnt sie zu dämpfen. Inzwischen hat die Luft die Schwingungen der zweiten Membran zum Höhepunkt, die der ersten jedoch zum Stillstand gebracht. Die Ausgangslage ist vertauscht, und der Vorgang verläuft in umgekehrter Reihenfolge.</p>	<p>1.7 Durch das Streichen des Geigenbogens am Rand der Scheibe wird sie in Schwingungen versetzt. Die Schwingungsmuster bzw. die Stellen maximaler und minimaler Amplituden hängen von der Form der Scheibe ab und von ihrer Lagerung. An dieser Stelle können keine Schwingungen auftreten. Während des Streichens mit dem Bogen wird der Sand, der sich ursprünglich in einem Gebiet maximaler Schwingung (Schwingungsbauch) befand, in ein Gebiet ohne Schwingung (Schwingungsknoten) geworfen und sammelt sich in der Form des Schwingungsmusters. Bei feinem Staub ist es genauso, doch wird er von dem Luftzug getragen, der durch die Schwingung hervorgerufen wurde. Da sich dieser Luftzug von den Knoten zu den Bäuchen bewegt und von dort nach oben, wird der Staub zu den Bäuchen getragen und dort abgelagert.</p>
<p>1.4 Um den Baß mit derselben Intensität wie die höheren Frequenzen auf Schallplatten zu pressen,</p>	<p>1.8 Da das Banjo mit einem Fingernagel oder mit einem scharfen Pick angeschlagen wird, werden mehr höhere Frequenzen angeregt als bei einem Zupfen mit den Fingern. Diese höheren Frequenzen geben dem Klang des Banjos einen näselnden Ton.</p>
	<p>1.9 Ihre Stimme bringt die Dose zum Schwingen und diese wiederum den Faden. Die Wellen des Fadens erregen die zweite Dose in umgekehrter Weise, so daß die Stimme gehört werden kann. Die Dose spricht nicht auf die niedrigen Fre-</p>

<p>quenzen Ihrer Stimme an, dadurch fehlen sie am anderen Ende: es klingt "dünn".</p>	<p>räumen. Wenn der Schnee dichter liegt, ist die Schallabsorption geringer.</p>
<p>1.10 Der Bogen berührt abwechselnd die Saiten und gleitet dann von ihnen weg. In der Zwischenzeit schwingen die Saiten.</p>	<p>1.16 Jede periodische Bewegung kann Schallwellen erzeugen. Durch ein periodisches, heftiges Ziehen beim Zerreißen eines Stoffes entstehen Schallwellen, die Sie hören können.</p>
<p>1.11 Die Frequenz eines schwingenden Fadens hängt von seiner Dichte, Länge und Spannung ab. Wird der Faden gespannt, bleiben Dichte und Länge gleich, und die erhöhte Spannung erhöht die Frequenz der Schwingung. Wird jedoch ein Gummiband gestreckt, ändern sich alle drei Kenngrößen so, daß die Frequenz im großen und ganzen gleich bleibt.</p>	<p>1.17 In der Flüssigkeit, die Ihre Fingergelenke umgibt, befinden sich winzige Gasblasen. Ziehen Sie an den Fingern, wird der Flüssigkeitsdruck vermindert und die Blasen zerplatzen mit dem bekannten Geräusch. Es dauert einige Minuten, bis das Gas wieder resorbiert ist und man den Vorgang wiederholen kann.</p>
<p>1.12 Das erste Geräusch entsteht, wenn der Boden des Wassertopfes erhitzt ist und sich dort kleine Blasen bilden. Jede Blase erzeugt ein schnalzendes Geräusch, zusammengenommen ergibt es ein Summen. Bei weiterem Erhitzen lösen sich die Blasen vom Boden, steigen auf in das kühle Wasser und vergehen, wobei ein lauterer Geräusch entsteht. Dieses dauert an, bis das Wasser so heiß ist, daß die Blasen bis zur Oberfläche aufsteigen und zerplatzen. Nun kocht das Wasser, und das Geräusch der zerspringenden Blasen an der Wasseroberfläche ist ein leises Plätschern.</p>	<p>1.18 Dieses Geräusch entsteht dadurch, daß Luft aus den Flocken entweicht, sobald sie sich mit Milch vollgesaugt haben und zerplatzen.</p>
<p>1.13 Teilweise stammt das Geräusch des Baches von den Blasen, die sich im bewegten Wasser bilden. Wenn eine Blase entsteht, wird nur wenig Geräusch erzeugt; durch die Schwingungen der bewegten Wassermenge und das Zerplatzen einer Blase wird viel mehr Lärm hervorgerufen.</p>	<p>1.19 Wenn sich Eis erwärmt, unterliegt es einer thermischen Beanspruchung und dabei entsteht das Knacken. Das "Brutzeln" jedoch wird durch winzige Luftblasen erzeugt, die im Eis eingeschlossen waren und nun an der Oberfläche der Flüssigkeit zerplatzen. Eis ohne solche Luftblasen erzeugt beim Schmelzen nur ein Knacken.</p>
<p>1.14 Wenn der Boden sehr kalt ist (<math>-25^{\circ}\text{C}</math> oder tiefer), kann das Eis unter Ihren Füßen durch Ihr Gewicht nicht mehr schmelzen und beginnt zu knirschen (siehe auch 3.46 bis 3.49).</p>	<p>1.20 Es ist nicht von Bedeutung, daß die Schallgeschwindigkeit im Boden größer ist als in der Luft, da sich die Pferde sehr viel langsamer fortbewegen als der Schall. Der Hauptgrund, warum die Indianer ihr Ohr an den Boden pressen, ist der, daß sich hier weniger Hindernisse befinden, die den Schall ablenken und dämpfen.</p>
<p>1.15 Die kleinen Zwischenräume im Schnee absorbieren den Schall, so wie die schalldämmenden Wandverkleidungen in vielen modernen Büro-</p>	<p>1.21 Die Resonanzfrequenzen der Mundhöhle hängen (wie bei jedem anderen Gasvolumen, das sich in Resonanz befindet) direkt von der Schallgeschwindigkeit des Gases darin ab. Die Schallgeschwindigkeit im Helium ist größer als in Luft, darum erhält Ihre Stimme einen höheren Ton.</p>
	<p>1.22 Die im Pulver eingeschlossene Luft wird frei, sobald sich das Pulver löst. Da die Schall-</p>

<p>geschwindigkeit in Luft geringer ist als in Wasser, ist sie auch in einem Luft-Wassergemisch geringer als in reinem Wasser. Während die Luft entweicht, sind die Resonanzfrequenzen des Wassers, die direkt von der Schallgeschwindigkeit abhängen, ebenfalls niedriger. Wenn sich das Kaffeepulver ganz gelöst hat, so ist der Ton am höchsten.</p>	<p>nun zuerst die höheren Frequenzen (mit kürzeren Wellenlängen), dann immer tiefere Frequenzen.</p>
<p>1.23 Da die Resonanzfrequenzen bei Blasinstrumenten direkt von der Schallgeschwindigkeit abhängen, nehmen diese Frequenzen zu, sobald der Spieler das Instrument mit seinem Atem erwärmt hat und dadurch die Schallgeschwindigkeit erhöht wird. Durch Reibung erwärmt sich ein Streichinstrument, und die Saiten dehnen sich aus. Das verringert die Spannung der Saiten, und die Resonanzfrequenzen der Saitenschwingungen nehmen ab.</p>	<p>1.26 Wird ein deutliches Echo gewünscht, darf der reflektierte Schall nicht mehr als 50 Millisekunden hinter dem direkten Schall kommen. Wände ohne Reflexionen würden die akustische Klangfülle eines Raumes erheblich vermindern. Die Wände sollten so konstruiert sein, daß sich der Schall im ganzen Raum ausbreiten kann. Die Streuung an den Wänden muß sowohl für die kurzen Wellenlängen (hohe Frequenzen) als auch für die langen Wellenlängen (tiefe Frequenzen) möglich sein. Die gestreuten Schallwellen sollten sich so im Raum ausbreiten, daß "schalltote" Stellen durch auslöschende Überlagerung ausgeschaltet werden.</p>
<p>1.24 Einige Meter über dem Boden kann sich das direkt vom Flugzeug kommende Geräusch der Schallreflexion vom Boden überlagern und so bestimmte Frequenzen verstärken. Die Höhe, bei welcher eine verstärkende Überlagerung auftreten kann, hängt von der Wellenlänge des Schalls ab. Je näher der Boden ist, desto kürzer sind die Wellenlängen, für die sich eine Verstärkung ergibt. So können Sie in der Nähe des Bodens mehr von den Geräuschen mit kurzen Wellenlängen hören und damit mehr hohe Frequenzen. Je höher Sie sich befinden, desto tiefere Frequenzen werden Sie hören.</p>	<p>1.27 Schallwellen, die von einem Brennpunkt eines elliptischen Raumes ausgehen, kreuzen sich wie Lichtstrahlen im zweiten Brennpunkt. Sie machen dort eine Unterhaltung im ersten Brennpunkt hörbar.</p>
<p>1.25 Der Schall, der bei seinem Weg durch die Röhre verstärkt wird, muß unter einem bestimmten Winkel von den Wänden reflektiert werden. Der Winkel hängt von der Wellenlänge des Schalls ab. Eine Verstärkung ergibt sich für die längeren Wellen, wenn sie unter einem größeren Winkel reflektiert werden als die kürzeren. Sie legen deshalb zwischen den einzelnen Reflexionen kürzere Strecken entlang der Röhre zurück und haben damit insgesamt den längeren Weg. Der Zuhörer am anderen Ende hört</p>	<p>1.28 Der Schall breitet sich in warmer Luft schneller aus als in kalter Luft. Wenn die Lufttemperatur mit zunehmendem Abstand vom Boden abnimmt, wird der obere Teil einer sich ursprünglich in horizontaler Richtung ausbreitenden Schallwelle langsamer werden als der untere Teil. Dadurch verliert sich der Schall nach oben. Bei einer normalen Temperaturverteilung, so wie oben beschrieben, kann der Schall deshalb in Bodennähe sehr weit reichen. An einem kalten Tag kann die Lufttemperatur in der Höhe zunehmen, besonders über einer großen Wasseroberfläche, so wird der Schall nach unten und nicht nach oben abgelenkt und seine Reichweite ist in Bodennähe größer.</p>
	<p>1.29 Die Schallgeschwindigkeit in der Luft steigt mit der Lufttemperatur. Erreicht eine Schallwelle die immer wärmer werdende Luft in der Stratosphäre, so wird sich der obere Teil der Welle</p>

<p>schneller ausbreiten als der untere Teil. Der Weg des Schalls wird dadurch nach unten gelenkt. Dort, wo diese reflektierte Welle auf dem Boden auftrifft, ist der Lärm zu hören. Gleichzeitig breitet sich auch der Schall direkt von der Quelle in horizontaler Richtung aus, bis er von den Hindernissen in den Boden gestreut und absorbiert wird. Die horizontale Ausbreitung reicht dadurch in manchen Fällen nicht bis dorthin, wo der reflektierte Schall den Boden trifft – es entsteht eine Zone des Schweigens. Bei starker Reflexion am Boden kann sich der Vorgang wiederholen.</p>	<p>sehr klangvolles Echo entstehen. Die Frequenz des Tones ist umgekehrt proportional zum Zeitintervall zwischen den Reflexionen benachbarter Latten.</p>
<p>1.30 Die Streuung des Schalls an Gegenständen, die klein sind im Vergleich zur Wellenlänge des Schalls, ist umgekehrt proportional zur vierten Potenz der Wellenlänge. Die kürzeren Wellenlängen (höhere Frequenzen) werden deshalb mehr gestreut als die längeren Wellenlängen (tiefere Frequenzen). Das Echo eines Schreies hat deshalb einen höheren Ton, weil die höheren Frequenzen stärker reflektiert werden.</p>	<p>1.13 Der Schall kann nicht durch den Tornadotrichter nach innen dringen, da er von der hohen Windgeschwindigkeit um den Trichter herum zu stark abgelenkt wird. Ein anderer Grund für die Stille im Innern eines Tornadotrichters kann sein, daß beim plötzlichen Übergang in ein Gebiet niedrigen Druckes die Hörfähigkeit herabgesetzt wird. (Beim Fliegen treten ebenfalls Schwierigkeiten beim Hören auf, so lange, bis die Ohren die Druckschwankungen beim Start und bei der Landung ausgeglichen haben.)</p>
<p>1.31 Da die Schallwellen ununterbrochen von den Wänden der Kuppel reflektiert werden, werden sie in einem schmalen Bereich längs der Wand verstärkt. Wenn sich der Zuhörer in diesem Bereich befindet, kann er das Flüstern hören. Etwas weiter von der Wand entfernt nimmt die Schallverstärkung jedoch ab, und das Flüstern ist nicht mehr hörbar. In geflüsterten Worten sind mehr hohe Frequenzen enthalten, und so können sie besser wahrgenommen werden als normal gesprochene Worte. Der Bereich, in dem man gut hören kann, ist für hohe Frequenzen breiter.</p>	<p>1.34 Bis jetzt wurde hierauf noch keine Antwort gefunden. Im Fall der Brücke könnte der eine oder der andere Effekt dominieren, es könnten aber auch beide in gleicher Weise daran beteiligt sein.</p> <p>1.35 Der Schall breitet sich mit Rückenwind schneller aus, nicht weil die Dämpfung geringer ist, sondern weil die Schallwellen in dieser Richtung nach unten gebrochen werden. Bei Gegenwind werden sie nach oben gebrochen. Die Hindernisse auf dem Boden bewirken, daß die Windgeschwindigkeit normalerweise mit der Höhe zunimmt. Der obere Teil einer ursprünglich horizontal mit dem Wind laufenden Welle wird sich mit größerer Geschwindigkeit ausbreiten als der untere Teil, was zur Folge hat, daß die Welle nach unten gebrochen wird. Aus derselben Überlegung ergibt sich, daß eine Schallwelle bei Gegenwind nach oben gebrochen wird.</p>
<p>1.32 Stellen Sie sich vor, Sie stünden vor einem Lattenzaun. Der von Ihnen ausgehende Schall wird von einer bestimmten Latte auf Ihrer linken Seite reflektiert und kehrt ein kleines bißchen eher zu Ihnen zurück als der Schall, der von einer etwas weiter links stehenden Latte kommt. So trifft der reflektierte Schall von den näherstehenden Latten früher ein und nach und nach von den weiter entfernten; hierbei kann ein</p>	<p>1.36 Das Dröhnen in der Atmosphäre stammt höchstwahrscheinlich von einer unregelmäßigen Schallausbreitung (siehe 1.29), wobei die fern und nicht sichtbaren Schallquellen verschiedensten Ursprung haben können: Explosionen, Donner usw.</p>

<p>1.37 Die Schallwellen werden von den Zwischenräumen zwischen den Stapeln gebeugt und auf diese Weise in die Zone hinter den Stapeln gelenkt. Die Winkelöffnung des Brechungsmusters (das ist der Winkel, unter dem sich der Schall hinter den Hindernissen ausbreitet) ist bei längeren Wellenlängen größer. Bei Tönen tieferer Frequenz würde sich das Mówenge-schrei weiter ausbreiten.</p>	<p>desto größer, je enger die Öffnung ist. So kann sich der Schall durch eine schmale Öffnung weiter ausbreiten; auch sollte er in horizontaler Richtung orientiert sein, wie im Bild gezeigt.</p>
<p>1.38 Die Schallwellen eines Blitzschlages werden durch die wärmere Luft in Bodennähe nach oben gebrochen (siehe 1.28 und 1.29). Über einen Bereich von ungefähr 25 km hinaus wird der Schall so stark gebrochen, daß er nach oben ausweicht und dann am Boden nicht mehr gehört werden kann.</p>	<p>1.43 Sie werden vielleicht denken, das käme von der Reflexion des Schalls an nahegelegenen Hindernissen. Aber auch ohne Reflexionen wäre die Sprache, allein durch die Beugung der Schallwellen, hörbar. Die längeren Wellen werden stärker um den Kopf gebeugt (siehe 1.72). Ingeflüster-ten Tönen sind jedoch mehr hohe Frequenzen (kurze Wellenlängen) enthalten, deshalb kann Flüstern schlechter gehört werden als normales Sprechen.</p>
<p>1.39 Hier findet eine ähnliche Brechung von Schallwellen statt, die durch eine Temperaturänderung, abhängig von der Wassertiefe, bedingt ist. Normalerweise nimmt die Wassertemperatur mit zunehmender Tiefe ab. So wird eine horizontal ausgesandte Schallwelle nach unten umgebogen, da sich ihr oberer Teil im wärmeren Wasser schneller ausbreitet als der untere Teil im kälteren Wasser. Die Brechung des Schalls kann so extrem sein, daß der ganze Schall nach unten und vom U-Boot weggeleitet wird.</p>	<p>1.44 Die wirksame Länge des Rohres ist größer als die reale Länge. Sie wird an jedem offenen Ende um etwa ein Drittel des Rohrdurchmessers vergrößert. Diese Verlängerung vergrößert die Wellenlänge der Oberschwingungen des Rohres (und vermindert dadurch die Resonanzfrequenzen). Für uns hörbar wird dieser Effekt erst bei Röhren mit großem Durchmesser.</p>
<p>1.40 Auch hier wird der Schall durch einen Spalt gebeugt (siehe 1.37). Obwohl die Tür fast geschlossen ist, breitet sich der Schall durch die verbliebene Öffnung im ganzen Raum aus.</p>	<p>1.45 Schall von niedriger Frequenz kann Ihren Brustkorb in Schwingung versetzen, denn die Luftdruckänderungen erfolgen so langsam, daß der Körper ihnen folgen kann. Innere Blutungen können dadurch hervorgerufen werden, daß Organe beim Schwingen aneinander reiben. Sind die Schwingungen weniger intensiv, tritt vielleicht nur ein Schwindelgefühl und Übelkeit auf. Möglicherweise ist auch das Übelkeitsgefühl beim Autofahren auf den vom Wagen erzeugten Infraschall zurückzuführen.</p>
<p>1.41 Der Schall aus dem Lautsprecher des Gitarristen wird von seiner Gitarre aufgenommen, wieder verstärkt und dann, kurze Zeit später, vom Lautsprecher wiedergegeben. Die Frequenz des Pfeifens ist umgekehrt proportional zu der Zeit zwischen dem ersten Aussenden des Schalls und der Wiederaufnahme durch die Gitarre.</p>	<p>1.46 Fließt ein stärkerer Wasserstrahl durch verengte Querschnitte der Wasserleitung, kann eine Wirbelbildung auftreten, die zu einer Kavitation (Blasenbildung) führt. Die Schwingungen der Luftblasen können vom Rohr, von den Wänden, Decken und Fußböden, die die Rohre berühren, verstärkt werden.</p>
<p>1.42 Die Winkelöffnung des Beugungsmusters (das ist der Winkel, unter dem sich der Schall ausbreitet, wenn er durch die Öffnung tritt) ist</p>	<p>1.47 Die Schwingungen des Messingstabes erzeugen eine stehende Schallwelle in der Röhre. Der</p>

<p>Staub an den Schwingungsbäuchen der bewegten Luft im Rohr wird nach und nach zu den Schwingungsknoten getragen, wo er sich zu größeren Erhebungen sammelt (siehe Bild). Geht das sehr rasch vor sich, bilden sich Luftwirbel. Die kleineren Riffelungen des Staubes bilden sich dort, wo zwei benachbarte Wirbel zusammen auf- oder absteigen.</p>	<p>sen im Luftstrom hervorgerufen werden, und von den Resonanzfrequenzen der Mund- und Nasenhöhle.</p>
<p>1.48 Die Frequenzen des Gießgeräusches, die die Luftsäule in der Flasche zu Resonanzschwingungen anregen, werden bevorzugt verstärkt und hörbar. Dabei ist die lauteste Frequenz die niedrigste, und die Tonhöhe hängt vom Volumen der Luftsäule ab. Je größer das Volumen, desto niedriger ist die Frequenz. So nimmt die hörbare Resonanzfrequenz beim Ausgießen des Wassers aus der Flasche immer mehr ab.</p>	<p>1.51 Wenn Sie im Freien singen, können Sie die Töne nur im Augenblick ihres Entstehens hören. In einem Duschaum wird jeder Ton viele Male von den nahen Wänden reflektiert und dadurch der "Kunstgenuß" verlängert. Das längere Andauern der hohen Frequenzen verleiht Ihrem Singen Glanz, das längere Andauern der tiefen Frequenzen verleiht ihm Fülle.</p>
<p>1.49 Die Geräusche aus der Umgebung, sogar das leichte Wispern einer Brise, die an der Muschel vorbeistreicht, erregen die Resonanzfrequenzen der in der Muschel enthaltenen Luft. Das Kommen und Gehen dieser Resonanzfrequenzen gibt dem Hörer die Illusion ankommender und vergehender Meereswellen.</p>	<p>1.52 Ein Glas beginnt bei bestimmten Resonanzfrequenzen zu schwingen. Wenn ein Sänger einige Sekunden lang einen Ton mit einer dieser Frequenzen singt, können sich die Schwingungen des Glases bis zu einer Höhe aufschaukeln, bei der das Glas zerspringt.</p>
<p>1.50 Durch die Länge und Spannung der Stimmbänder ist die menschliche Stimm Lage festgelegt. Wenn der Luftdruck in der Luftröhre zunimmt, werden die Stimmbänder plötzlich auseinandergedrückt, um dann wieder ihre alte Lage einzunehmen. Ein anhaltendes Schwingen der Stimmbänder erzeugt Druckschwankungen, die Resonanzschwingungen in Mund- und Nasenhöhle anregen. Gewöhnlich ist eine Männerstimme tiefer als eine Frauenstimme; ein Mann hat meistens dickere und längere Stimmbänder, die mit niedrigeren Frequenzen schwingen. Junge Burschen erleben einen "Stimmbruch" in der Zeit, in der ihr Kehlkopf sehr schnell wächst. Ihre Stimmbänder, die erst kurz und dünn waren, werden nun die eines Mannes. Beim Flüstern wird der Luftstrom durch Entspannen des Kehlkopfes an den Stimmbändern vorbeigeleitet. Die Schallfrequenz hängt nun von den Schwingungen ab, die von anderen Hindernis-</p>	<p>1.53 Der Wind beginnt zu heulen, wenn er durch elektrische Leitungen und kahle Bäume (siehe 1.55) pfeift oder wenn er an Dachkanten oder anderen scharfen Hindernissen Schneidetöne (siehe 1.56) erzeugt.</p>
	<p>1.54 Die Luft fließt von dem Ende des Rohres, an dem es gehalten wird, zu dem Ende, das herumgewirbelt wird, denn hier vermindert die schnelle Bewegung den Luftdruck. Der Luftdruck am gehaltenen Ende dagegen ist atmosphärischer Druck. Sobald die Luft durch das Rohr und über die Riffelungen fließt, beginnt sie zu schwingen. Die Frequenz dieser Schwingungen wird durch die Abstände der Riffelungen und die Geschwindigkeit des Luftstroms bestimmt. Aus dem kleinen Bereich der Schwingungen, die bei einer bestimmten Drehgeschwindigkeit erzeugt werden, wird die Frequenz verstärkt, die Resonanzschwingungen anregen kann. Das ergibt dann den Ton, den Sie hören. Bei einer höheren Drehgeschwindigkeit bewegt sich der Bereich der Luftschwingungen zu höheren Frequenzen hin, und eine Oberschwingung des Rohres wird angeregt und hörbar.</p>
	<p>1.55 Streicht der Wind durch elektrische Leitungen und durch das kahle Geäst eines Baumes,</p>

kann der Luftstrom instabil werden. Luftwirbel bilden sich hinter den Hindernissen, z. B. abwechselnd an der Ober- und Unterseite einer Telefonleitung. Diese Wirbel sind die Ursache für die Druckschwankungen, die unser Ohr erreichen und gehört werden. Ist der Wind sehr stark, kann die Druckdifferenz an den beiden Seiten der Leitung diese zum Schwingen bringen, doch ist es für die Entstehung des Geräusches nicht notwendig, daß die Leitung schwingt. Da die Luftwirbel durch die Druckdifferenz auf beiden Seiten der Leitung entstehen, muß sich die Leitung senkrecht zum Luftstrom bewegen.

1.56 Bei der Anordnung mit Keil breiten sich Luftwirbel von der Kante aus, sobald ein Luftstrom sie berührt. Die Rückstoßkraft der Kante erzeugt nun den Ton, den wir hören. Ein Teil des Schalls kehrt zur Quelle des Luftstroms zurück und erzeugt Instabilitäten. Dadurch bilden sich weitere Wirbel in der Strömung. Wenn sie die Kante erreichen, wird der Ton wieder verstärkt usw. Bei der Anordnung mit Lochblende ändert der Schall, der zur Quelle des Luftstroms zurückkehrt, die Geschwindigkeit des Luftstroms, wodurch sich ringförmige Luftwirbel bilden (so ähnlich wie bei den Rauchringen). Wenn diese Ringe das Loch erreichen, wird wieder der Ton verstärkt usw.

Bei einem normalen Teekessel finden wir eine Anordnung mit Lochblende. In der auf dem Kessel aufgesetzten Kappe befinden sich zwei kleine Löcher und dazwischen ein Hohlraum. Wenn nun die Luft aus dem Kessel das erste Loch passiert, wird es zur Quelle des Luftstroms für das zweite Loch. Zunächst ist der Luftstrom noch zu langsam für die nötige Instabilität der Luft, die das Geräusch am zweiten Loch hervorrufen kann. Erreicht das Wasser jedoch Siedetemperatur, bewegt sich die Luft schneller. Luftwirbel bilden sich am zweiten Loch, und der uns allen bekannte Pfeifton wird hörbar.

1.57 Flaschen und Flöten sind Pfeifen anderer Art als die vorher beschriebenen (siehe 1.56). Sie haben einen zusätzlichen Resonanzhohlraum,

anschließend an die Kante oder das Loch, wo die Instabilität erzeugt wird. Von den Frequenzen des Schalls, der an der Kante oder dem Loch entsteht, verstärkt der Hohlraum seine Resonanzfrequenz, die dann hörbar wird.

1.58 Der in die Pfeife geblasene Luftstrom erzeugt Schneidentöne, von denen der anschließende Hohlraum seine Resonanzfrequenz verstärkt. Die Kugel im Hohlraum verschließt von Zeit zu Zeit die Luftlöcher und bringt so die Pfeife zum Trillern.

1.59 Beim normalen Pfeifen mit den Lippen scheint es sich um ein Pfeifen mit Lochblende (siehe 1.56) mit einem anschließenden Hohlraum (dem Mund) zu handeln. Welche Kenngrößen dabei eine Rolle spielen ist jedoch noch nicht erforscht.

1.60 Der Trichter und die darin enthaltene Luft stellen einen Widerstand dar, gegen den die Membran arbeiten muß. Er verwandelt die schnelle Bewegung einer kleinen Fläche in die langsame Bewegung einer größeren Fläche. Ein langes, enges Rohr würde die Energie in Form von stehenden Wellen speichern und nur seine Resonanzfrequenzen wiedergeben. Eine frei im Raum schwingende Membran ohne Trichter könnte nur einen relativ kleinen Anteil ihrer Schwingungsenergie an die Luft übertragen.

1.61 Der Schall wird offensichtlich durch Druckschwankungen in den instabilen Luftwirbeln hervorgerufen, die von der Mitte der Pfeife ausgehen.

1.62 Für den Größenunterschied gibt es zwei Gründe. Erstens kann ein großer Papiertrichter nicht schnell genug auf hohe Frequenzen ansprechen; er wird nur bestimmte Teilbereiche abstrahlen. Deshalb wird für den Hochfrequenzbereich ein kleinerer Trichter verwendet. Zweitens soll der Lautsprecher den Schall in einem weiten Winkel über den Raum verteilen und ihn füllen. Die Verteilung im Raum hängt von der Wellenlänge im Vergleich zur Größe des Lautsprecher-

trichters ab. Die kurzen Wellenlängen (hohen Frequenzen) eines großen Trichters werden wenig gestreut und deshalb gebündelt in den Raum gesandt. So müssen die kurzen Wellenlängen aus einem kleinen Lautsprecher kommen, um sich gut im Raum zu verteilen.

1.63 Normalerweise wird der direkt vom Mund ausgehende Schall so gebeugt, daß er sich nahezu gleichmäßig in alle Richtungen ausbreitet. Eine Flüstertüte mit einer großen Öffnung bewirkt eine wesentlich geringere Beugung, denn das offene Ende ist größer als die Wellenlängen des gesprochenen Wortes. So wird der Schall in Richtung des Trichters verstärkt.

1.64 Auch wenn keine Baßtöne vom Lautsprecher ausgehen, werden sie im Ohr erzeugt. Treffen zwei verschiedene Frequenzen auf das Ohr, werden durch sein nichtlineares Verhalten Schwingungen erzeugt, deren Frequenzen gleich der Summe oder Differenz der einfallenden Frequenzen sind; sie können auch die Summe oder Differenz von Vielfachen dieser Frequenzen sein. In den meisten Fällen wird der gehörte Baßton von der Differenzfrequenz herrühren.

1.65 Der Zuhörer vernimmt eine Frequenz, die von der relativen Geschwindigkeit zwischen Hörer und Schallquelle abhängt. Solch eine Verschiebung in der gehörten Frequenz, bezogen auf die von der Schallquelle ausgesandte Frequenz, nennt man Dopplereffekt. Nähert sich ein Rennwagen einem stillstehenden Zuhörer, werden die Frequenzen des Geheuls nach oben verschoben; entfernt sich der Wagen, werden die Frequenzen nach unten verschoben.

1.66 Man weiß noch nicht genau, wie sich eine Fledermaus mit Hilfe ausgesandter Signale Informationen holt. Einige Fledermäuse senden kurze Töne von konstanter Frequenz aus, die zum Tier zurückkommen und ihm das Vorhandensein eines Zieles anzeigen. Die Frequenz des zurückkehrenden Tones gibt ihm Auskunft über die Geschwindigkeit des Zieles (siehe 1.65, Doppler-

effekt). Andere Fledermäuse senden frequenzmodulierte Töne aus. Die Frequenz des zurückkommenden Signales wird ausgewertet und zeigt dem Tier die Form, Größe und Oberflächenbeschaffenheit des Zieles sowie seinen Abstand an. Da sich die Frequenzmodulation des Signales über einen weiten Frequenzbereich erstreckt, kann die Fledermaus sie nicht mit Hilfe des Dopplereffekts zur Geschwindigkeitsbestimmung des Zieles benutzen. So gibt es auch einige Fledermäuse, die eine Kombination von beiden Signalformen aussenden, um alle möglichen Informationen über das Ziel zu erhalten.

1.67 Die Druckänderungen am Trommelfell sind nicht groß genug, um hörbar zu werden. Auch wenn die Brownsche Molekularbewegung noch stärker wäre, würden wir sie wahrscheinlich nicht wahrnehmen, denn unser Gehirn reagiert nicht auf gleichmäßiges Rauschen.

1.68 Stellen Sie sich vor, Sie unterhalten sich mit jemandem in einem Festsaal. Sie hören nun seine Stimme einmal direkt von vorne und außerdem gestreut durch die Reflexion des Raumes. Finden hier noch weitere Unterhaltungen statt, so hat der Raum einen gewissen Geräuschpegel, und die Stimme Ihres Bekannten muß damit konkurrieren. Die Stärke des Hintergrundgeräusches hängt von der Größe des Raumes und von der Schallabsorption der Wände und anderer Gegenstände im Raum ab; sie wird auch beeinflusst von der freien Weglänge des Schalls zwischen den Wänden und von der Anzahl der verschiedenen Gespräche. Bei einer bestimmten Zahl wird das Hintergrundgeräusch lauter als die Stimme Ihres Bekannten. Er wird nun lauter sprechen – aber alle anderen auch! Das geht so lange weiter, bis eine Unterhaltung unmöglich wird.

1.69 Da die Geschwindigkeit der Raketen die Schallgeschwindigkeit übersteigt, kann der Knall ihrer Explosion am Boden früher gehört werden als das Geräusch ihres Fluges durch die Luft.

1.70 Eine "live"-Unterhaltung während eines geräuschvollen Festes hat zumeist einen Vorteil

vor einer Aufzeichnung auf Band: die direkte Zuwendung zum Gesprächspartner. Sie können bestimmte Worte vor einem lauten Hintergrund verstehen, wenn die Richtung, aus der die Worte kommen, durch normales Hören mit beiden Ohren erkennbar wird.

1.71 Ein großer Teil des Schalls Ihrer Stimme, den Sie hören können, besonders der Anteil der niedrigen Frequenzen, wird durch Schalleitung im Kopf übertragen. Die anderen Menschen hören Ihre Stimme ohne diese niedrigen Frequenzen, die ihr Fülle verleihen, aber nur in Ihren eigenen Ohren. Wenn Sie Ihre Stimme auf einem Tonband von guter Qualität hören, wird sie Ihnen fremd vorkommen: Es ist die Stimme, die die anderen von Ihnen hören.

1.72 Auf dreierlei Weise können Sie die Richtung, aus der ein Schall kommt, feststellen: Sie vergleichen die Intensität, die Phasenlage oder die Zeiten des Eintreffens des Signals an Ihren beiden Ohren. Ein Intensitätsunterschied hilft Ihnen nur bei einem Schall mit kurzer Wellenlänge, denn lange Wellenlängen werden um Ihren Kopf herum gebrochen, so daß die Schallintensität an beiden Ohren etwa gleich ist. Schall mit langen Wellenlängen erreicht die beiden Ohren jedoch mit unterschiedlicher Phasenlage. Die Größe des Phasenunterschieds hängt davon ab, wie weit sich die Schallquelle seitlich von Ihnen befindet. Bei mittleren Wellenlängen, so um 400 Hz, ist die Bestimmung der Schallrichtung schwieriger, da hier keines der eben beschriebenen Verfahren gute Ergebnisse liefert.

1.73 Wenn ein Flugzeug die Schallgeschwindigkeit, die der Luftdichte bei seiner Flughöhe entspricht, überschreitet, bildet die komprimierte Luft eine Schockwelle. Diese breitet sich hinter dem Flugzeug kegelförmig aus. Dort, wo der Kegel auf den Boden auftrifft, entsteht zunächst ein Druckanstieg, dann ein Druckabfall, danach wieder ein Druckanstieg, bis wieder normaler Luftdruck herrscht. Das zweite Ansteigen wird durch das Flugzeugheck ausgelöst. Dann wird ein Doppelknall hörbar; manchmal ist kein zweiter Druck-

anstieg feststellbar. Es gibt Schockwellen, die niemals die Erde erreichen; das ist dann der Fall, wenn sie von der wärmeren Luft, die sie bei ihrem Abstieg passieren, genügend gebrochen werden. (Eine ähnliche Brechung der Schallwellen durch unterschiedliche Lufttemperatur wird bei 1.28 und 1.29 beschrieben.)

1.74 Es werden laufend Untersuchungen über die Entstehung des Donners und seine Eigenheiten durchgeführt. Die enorme Erwärmung durch die Blitzentladung dehnt die Luft sehr schnell aus. Dadurch entsteht eine zylindrische Schockwelle, die die eigentliche Ursache des Donners ist. Neben diesem Geräusch kann auch ein Zischen gehört werden, das wahrscheinlich durch eine Koronaentladung hervorgerufen wird (siehe 6.46); das Klicken, das auch manchmal hörbar wird, kann durch eine sich am Blitzstrahl nach oben bewegende Entladung ausgelöst werden (siehe 6.32). Das nachfolgende Rollen und Rumpeln des Donners kann das Echo des ursprünglichen Schalls aus der Umgebung sein.

1.75 Die Schalldämpfung durch die Atmosphäre (auf Grund der Viskosität und der thermischen Leitfähigkeit) ist so stark, daß ein Schall aus etwa 70 km Höhe oder mehr die Erde nicht mehr erreichen kann. Wenn der Ursprung der Geräusche ein Zusammenprallen der Eiskristalle im menschlichen Atem wäre, müßte die Temperatur mindestens  $-40^{\circ}\text{C}$  betragen.

1.76 Die Schockwellen der Artilleriegeschosse verursachen diese dunklen Schattenbänder, da sich am Ort der Schockwelle der Brechungsindex der Luft ändert. Durchlaufen sie eine Wolke oder eine Nebelwand, kann es hier zu einer kurzzeitig verstärkten Kondensation kommen (siehe 3.27).

1.77 Das Knallen einer Peitsche kann dadurch entstehen, daß das Schnurende gegen die Schnur schlägt oder daß eine Schockwelle entsteht, wenn das Schnurende die Schallgeschwindigkeit übersteigt.

2

## Das Walroß spricht über klassische Mechanik

