

21 Sprache und Gehör

Vertiefung und Kompetenzüberprüfung

Martin Apolin (Stand August 2011)

Stimme und Stimmbänder

A1 a In Abb. 1 siehst du das Obertonspektrum des englischen Vokalklangs „who’d“, der von einem Opernsänger sowohl gesprochen als auch gesungen wurde. Was macht den wesentlichen Unterschied zwischen Sprechen und Singen aus?

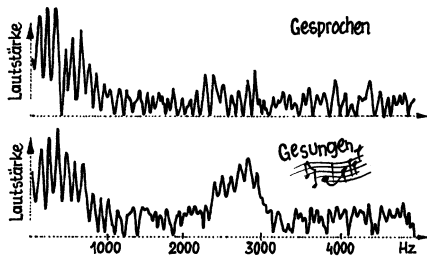


Abb. 1: Frequenzspektrum beim Sprechen und Singen des Vokalklanges „who’d“ (Grafik: Janosch Slama).

b Warum kann ein einziger Sänger ein ganzes Orchester übertönen? Um wie viel Dezibel übertönt er das Orchester? Versuche in Abb. 2 nachzumessen.

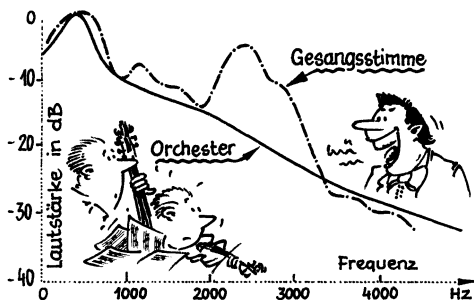
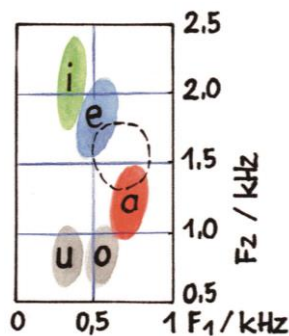


Abb. 2: Durchschnittliche Energieverteilungen im Klang eines Orchesters und eines Tenors (Grafik: Janosch Slama).

A2 a Was passiert beim Flüstern mit den Stimmbändern? Halte dabei deine Finger an den Kehlkopf. Was kannst du spüren?

Abb. 3 zu A2 b: In diesen Bereichen müssen die ersten beiden Formanten liegen, damit wir die Vokale erkennen können (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 21.9, S. 67).



b Was passiert bei Heiserkeit? Welchen Einfluss hat diese auf die Erzeugung hoher Frequenzen? Welche Vokale werden bei Heiserkeit als erste bei der Aussprache beeinflusst? Sie dir dazu Abb. 3 an.

c Die Stimmen von Frauen sind etwa eine Oktave höher als die der Männer. Was bedeutet das für die Grundfrequenz? Wie sieht es mit den Frequenzen bei den Formanten aus (siehe Tab. 1)? Wie lassen sich diese beiden Tatsachen unter einen Hut bringen?

		a	e	i	o	u
F1	m	730 Hz	530 Hz	270 Hz	570 Hz	300 Hz
	f	850 Hz	610 Hz	310 Hz	590 Hz	370 Hz
	Diff.	16 %	15 %	15 %	4 %	23 %
F2	m	1090 Hz	1840 Hz	2290 Hz	840 Hz	870 Hz
	f	1220 Hz	2330 Hz	2790 Hz	920 Hz	950 Hz
	Diff.	12 %	27 %	22 %	10 %	9 %

Tab. 1: Durchschnittliche Frequenzen und Differenzen des 1. und 2. Formanten bei Frauen und Männern.

A3 Die Klangfarbe einer Stimme bezeichnet man als Timbre. Wie kommt es zu Stande? Warum ist es quasi der akustische Fingerabdruck eines Menschen? Verändert sich das Timbre, wenn man einen gesprochenen Text rückwärts abspielt? Verändert es sich, wenn du die Abspielgeschwindigkeit um 10 % erhöhst?

A4 Wenn du Helium einatmest und sprichst, klingt deine Stimme wie die von Mickey Maus. Kannst du dir vorstellen, warum?



Abb. 4 (Grafik: Janosch Slama)

A5 Warum klingt deine eigene Stimme so seltsam, wenn du sie in einer Aufzeichnung anhörst? Klingt sie eher höher oder tiefer? Was bedeutet das für die Obertonfrequenzen? Versuche in deiner Antwort den Begriff Timbre zu verwenden!

A6 Was passiert beim Jodeln? Reden Bauchredner wirklich mit dem Bauch? Und ist es möglich, dass eine Person so singt, dass man den Eindruck von zwei gleichzeitigen Tönen hat?



Abb. 5 (Grafik: Janosch Slama)

A7 Der Eindruck der Vokale entsteht durch die gezielte Verstärkung von Obertönen (siehe Abb. 3). Aber wie erzeugst du eigentlich Konsonanten?

A8 Bei Handy und Funk werden in der Praxis meistens Frequenzen bis 4,5 kHz übertragen. Warum kann man deshalb alle Vokale gut unterscheiden (siehe Abb. 3)? Warum kann man Konsonanten nicht gut unterscheiden, vor allem Zischlaute wie „s“ oder „f“? Warum klingt die Stimme durch ein Handy oder Walkie-Talkie seltsam? Begründe mit Hilfe von Abb. 6.

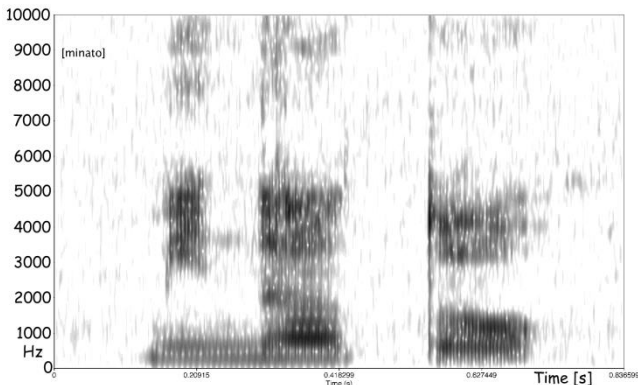


Abb. 6: Spektrogramm des japanischen Wortes „minato“; x-Achse: Zeit, y-Achse vorkommenden Frequenzen (Grafik: Ish Ishwar, Quelle: Wikipedia)

Schallausbreitung und Schallwahrnehmung

A9 Bei der Ausbreitung einer Schallwelle in Luft sind folgende drei Geschwindigkeiten beteiligt: die Schallgeschwindigkeit, die Geschwindigkeit durch die thermische Bewegung (verwende dazu Abb. 7) und die so genannte Schallschnelle, also die Geschwindigkeit, mit der die Luftmoleküle schwingen. Reih diese Geschwindigkeiten von der niedrigsten zur höchsten.

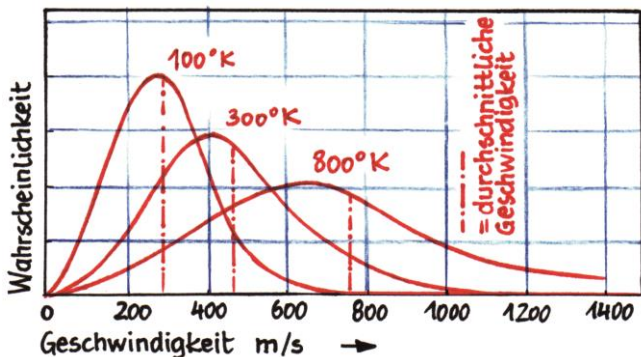


Abb. 7: Maxwell-Geschwindigkeitsverteilung der N₂-Moleküle der Luft bei verschiedenen Temperaturen (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Kap. 14, Abb. 14.4, BB5).

A10 a Was versteht man eigentlich unter einer Oktave? Verwende bei deiner Erklärung den Begriff Frequenz.

b Wie viele Oktaven hört der Mensch? Nimm dazu an, dass die tiefsten Töne, die wir hören, bei etwa 20 Hz liegen und die höchsten bei rund 20.000 Hz – zumindest, solange wir noch jung sind.

c Wie viele Oktaven kann man sehen und was ist mit dieser Frage eigentlich gemeint? Hilf dir mit Tab.2.

	relative Photonenenergie	Wellenlänge in 10 ⁻⁷ m	Frequenz 10 ¹⁴ Hz
rot	1–1,2	6,5–7,5	4,0–4,6
grün	1,3–1,5	4,9–5,8	5,2–6,1
blau	1,5–1,8	4,2–4,9	6,1–7,1
UV-A	1,9–2,3	3,2–4,0	7,5–9,38
UV-B	2,3–2,7	2,8–3,2	9,38–10,7

Tab. 2: Relative Photonenenergie von sichtbarem und ultraviolettem Licht (siehe auch Tab. 30.1, BB7).

A11 In den Agentenfilmen machen Pistolen mit Schalldämpfern (Abb. 8) immer eine leises „Plopp“. Entspricht das den Tatsachen? Wodurch wird eigentlich der typische Pistolenschuss verursacht?



Abb. 8: Halbautomatische Pistole Ruger MK II mit Schalldämpfer (Bild GMan52; Quelle: Wikipedia).

A12 a Die Töne einer Grille kann man im Extremfall bis zu 800 m weit hören! Dieses kleine Insekt bringt daher die Luft in einer Halbkugel mit dem Durchmesser von 1.600 m zum Schwingen. Das entspricht einer unglaublichen Masse von 1 Milliarde kg! Wie kann so ein winziges Tier so viel Masse bewegen?

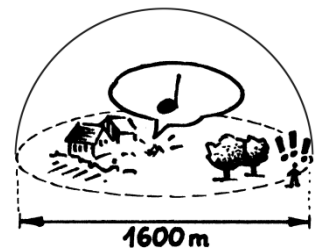


Abb. 9 (Grafik: Janosch Slama)

b Welche Leistung muss eine Grille beim Zirpen mindestens aufbringen, damit man sie in 800 m Entfernung gerade noch hören kann? Überlege mit Hilfe von Abb. 10 (siehe dazu auch Kap. 17.2, S. 72).

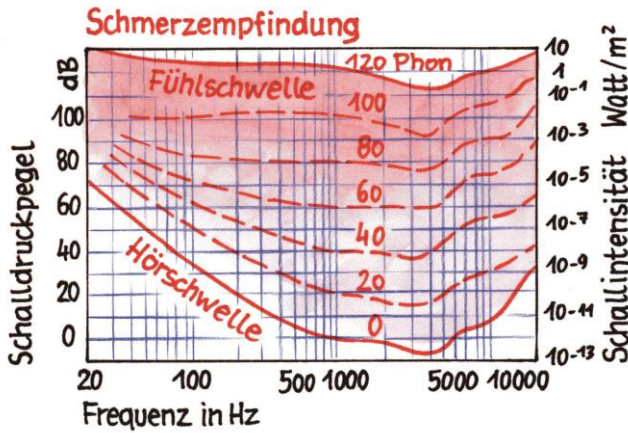


Abb. 10: Der Hörbereich des Menschen. Die Schallintensität gibt an, wie viel Energie pro Sekunde durch eine Fläche von 1 m² transportiert wird (1 W = 1 J/s). Entlang einer Phon-Kurve hört man alles gleich laut (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 21.10, S. 68).

A13 Warum ist die Reichweite des Schalls an kühlen Tagen größer als an warmen? Warum ist seine Reichweite über ruhigem Wasser oder einem gefrorenen See besonders groß? Und warum ist sie in der Wüste deutlich geringer? Ein Tipp: es hat mit der Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur zu tun und mit der Brechung von Wellen.

A14 Eine gezupfte Saite (Abb. 11) klingt viel härter als eine gestrichene. Welchen Grund könnte das haben? Hilf dir mit den Infoboxen *Fourier-Synthese* (Kap. 18.7, S. 43) und *Schwingung – Welle* (Kap. 19.4, S. 52).

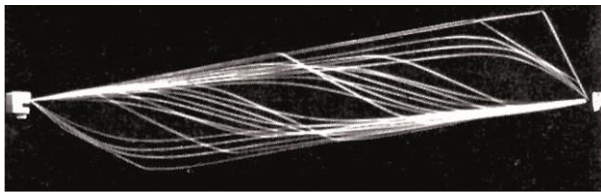


Abb. 11: Stroboskopaufnahme einer schwingenden, gezupften Saite. Man sieht, wie „eckig“ die Welle ist.

A15 Warum klingen offene und geschlossene Orgelpfeifen ziemlich unterschiedlich, auch wenn sie genau dieselbe Tonhöhe erzeugen? Sieh dir dazu Abb. 12 an und schau in Kap. 19.5 nach.

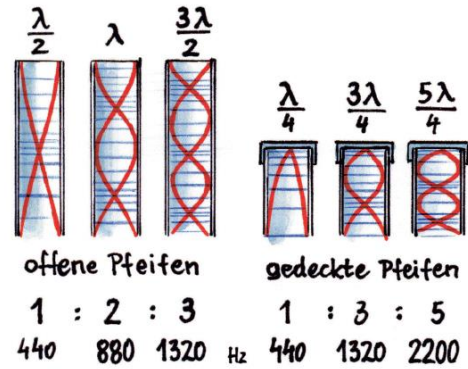


Abb. 12: Grund- und Oberwellen in offenen und gedeckten Orgelpfeifen am Beispiel eines Grundtons mit 440 Hz (Kammerton a). Die Schwingungen sind longitudinal, aber zur besseren Übersicht ist auch die Schwingungsamplitude eingezeichnet (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 15.29, S. 54).

A16 Versuche qualitativ folgende Fragen zu begründen: Warum kannst du jemanden im Nebenraum sprechen hören, auch wenn du ihn nicht siehst? Warum kannst du dich selbst sprechen hören? Warum kannst du Geräusche auch mit abgewandtem Ohr hören? Welche Eigenschaft der Schallwellen ist dafür verantwortlich? Verwende für deine Erklärungen die Abb. 13 und 14.

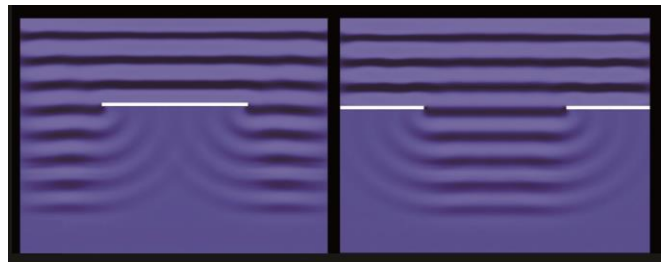


Abb. 13: So läuft eine Welle nach einem Hindernis weiter (Grafik: Martin Apolin).

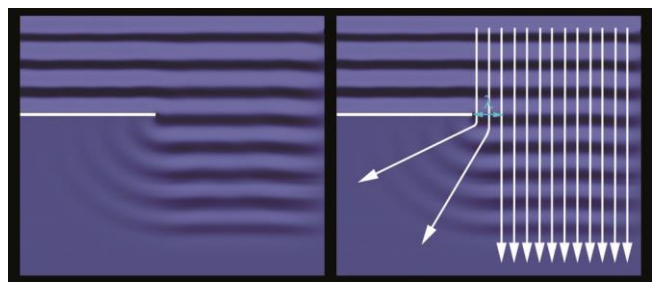


Abb. 14: Eine Welle läuft gegen eine Kante. Es wird nur der Teil der Welle gebeugt, dessen Abstand zum Hindernis innerhalb der Wellenlänge liegt (Grafik: Martin Apolin; siehe auch Abb. 20.21, S. 61).

A17 In einem Film siehst du eine Maus, die so brüllt wie ein Löwe. Kann das sein? Und wenn nicht, warum nicht?

A18 Nimmst du die beiden Klänge in Abb. 15 gleich wahr oder unterschiedlich? Die beteiligten Töne haben in beiden Fällen dieselbe Frequenz. Versuche deine Antwort mit Situationen aus dem Alltag zu begründen.

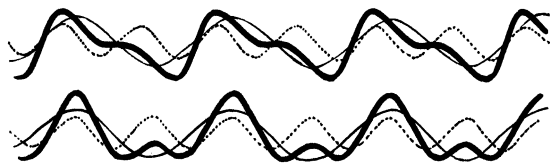


Abb. 15 (Grafik: Janosch Slama)

A19 Warst du schon einmal in einer Flüstergalerie? Warum kann man dort in so großer Entfernung noch das leise Flüstern des Gegenübers verstehen?

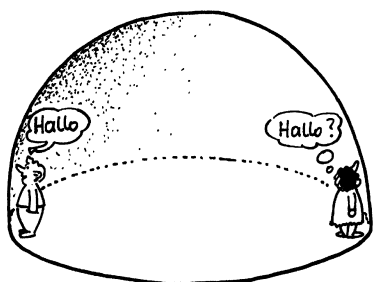


Abb. 16 (Grafik: Janosch Slama)

A20 Denk mal darüber nach, wie du in der Lage bist, die Richtung eines Geräusches zu lokalisieren!

A21 In Abb. 17 siehst du den Zusammenhang zwischen der Schallintensität und dem Schalldruckpegel in dB, in einer nicht-logarithmischen Darstellung. Was fällt dir auf? Um wie viel Mal lauter hörst du eine Person, wenn sie nicht flüstert, sondern schreit? Warum ist es für uns von Vorteil, dass die Kurve so verläuft und nicht etwa linear?

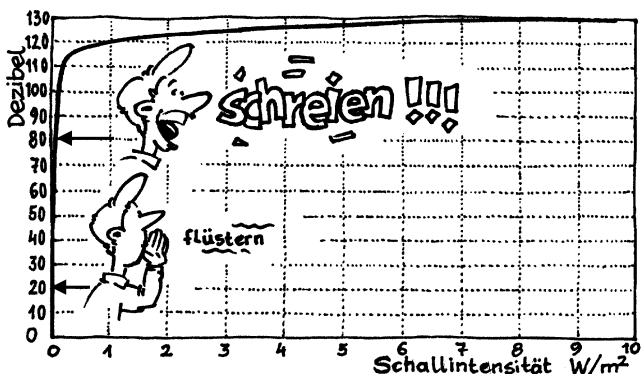


Abb. 17: Zusammenhang zwischen Schallintensität und dem Schalldruckpegel (siehe auch Abb. 10).

A22 Die Umrechnung zwischen der Schallintensität I (W/m^2) und dem Schalldruckpegel L (Dezibel) lautet: $L = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$. I_0 ist die Intensität bei der Hörschwelle und wird mit $10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2$ angenommen.

a Überprüfe diese Formel an Abb. 10 exemplarisch bei 60 und 100 dB.

b Es gilt: $\log(a) - \log(b) = \log(a/b)$. Leite mit dieser Gleichung und jener für den Schalldruckpegel oben eine neue Gleichung ab, mit der du ΔL in dB berechnen kannst, wenn du zwei verschiedene Schall-Intensitäten in W/m^2 gegeben hast.

c Zeige mit Hilfe deiner Formel aus A22 b, dass die Verdopplung der Schallintensität, also etwa zwei bellende Hunde statt einem, immer eine Erhöhung um 3 dB bedeutet.

d Wie viele Orchester wären notwendig, damit diese lautstärkenmäßig mit einem Sänger im Bereich des Gesangsformanten gleichziehen können? Schätze dazu die größte Differenz in dB in Abb. 2 ab und verwende dann deine Gleichung aus A22 b.

Hilfe zu A1 a: Der Unterschied zwischen Sprechen und Singen ist wesentlich geringer als du wahrscheinlich denkst. Zwischen den beiden Spektren in Abb. 1 besteht eigentlich kaum ein Unterschied – mit Ausnahme des Bereichs knapp unter 3000 Hz. Dort gibt es eine zusätzliche Energiespitze, die auch als Gesangs-Formant bezeichnet wird. Wie er entsteht, war lange Zeit ein Rätsel. Es dürfte aber so sein, dass er durch das Absenken des Kehlkopfes beim Singen zustande kommt. Dadurch erweitert sich der oberhalb der Stimmbänder gelegene Raum. Dieser Bereich wird gewissermaßen akustisch entkoppelt und weist dann eine Eigenresonanz zwischen 2500 und 3500 Hz auf.

Hilfe zu A1 b: Der Gesangs-Formant (siehe A1 a) erklärt, warum ein guter Sänger gegen ein ganzes Orchester ankommen kann. Im Bereich des Gesangsformanten hat das Orchester nicht mehr sehr viel zu bieten. An einer Stelle beträgt der Lautstärkeunterschied sogar etwa 15 dB. Man bräuchte über 30 Orchester, um lautstärkenmäßig mit

dem Sänger gleichzuziehen (siehe A22 d). Ist das nicht sehr erstaunlich?

Hilfe zu A2 a: Beim Flüstern schwingen die Stimmbänder nicht. Das kannst du mit den Fingern auf deinem Kehlkopf spüren - besser gesagt nicht spüren. Nur ein kleiner Spalt in der Stimmritze bleibt offen, das „Flüsterdreieck“. Die Schallwellen werden dann nur durch die Luftverwirbelungen erzeugt, die sich beim Ausströmen der Luft ergeben.

Hilfe zu A2 b: Heiserkeit kann verschiedene Ursachen haben, aber es treten in jedem Fall bei der Tonerzeugung zusätzliche Geräusche auf. Bei leichter Heiserkeit sind diese in einem Bereich um 3000 Hz und können daher vor allem das „i“ beeinflussen (siehe Abb. 3). Bei einer sehr starken Heiserkeit können die Störfrequenzen aber bis auf 500 Hz absinken und sogar die ersten Formanten von „a“ und „o“ beeinflussen.

Hilfe zu A2 c: Die Stimmen von Frauen sind etwa eine Oktave höher als die der Männer. Eine Oktave höher bedeutet doppelte Tonhöhe beziehungsweise eine Erhöhung der Sprechfrequenz um 100 %. Eine solche Erhöhung könnte man daher auch für die Formantenfrequenzen erwarten. Diese sind bei Frauen aber nur rund 10 % höher als bei Männern (siehe Tab. 1). Du darfst Obertöne und Formanten nicht verwechseln (siehe Abb. 21.8, Kap. 21.1, S. 67).

Hilfe zu A3: Jede Stimme hat ihren eigenen Klang, weil kein Mensch dem anderen gleicht und somit auch kein Stimmband und kein Vokaltrakt völlig gleich sind. Die Klangfarbe der Stimme hängt von den Obertönen und Formanten ab, also von der „Bauart“ der Stimmbänder und des Vokaltraktes, und ist quasi der akustische Fingerabdruck eines Menschen. Wie sehr das Erkennen einer Stimme vom Obertonspektrum abhängt, zeigt folgendes Beispiel: Du kannst eine Stimme erkennen, wenn ein gesprochener Text rückwärts abgespielt wird. Aber das Timbre wird undeutlich, wenn du die Abspielgeschwindigkeit um mehr als 10 % veränderst. Warum? Weil sich dann das Obertonspektrum zu stark verändert.

Hilfe zu A4: Es sind hier zwei Effekte am Werk. Helium hat erstens eine geringere Viskosität als Luft, ist also nicht so „zähflüssig“. Dadurch schwingen die Stimmbänder bei gleichem Atemdruck und Muskelspannung

schneller. Zweitens ist die Schallgeschwindigkeit in Helium viel größer als in Luft. Zusätzlich hängt die Klangfarbe einer Stimme von der Lage der Formanten im Mundraum ab (siehe Kap. 21.9, S. 67). Formanten sind diejenigen Frequenzbereiche, die am stärksten durch Resonanzwirkung verstärkt werden. Diese Formanten hängen aber auch von der Schallgeschwindigkeit im entsprechenden Medium ab. Beträgt zum Beispiel die Lage der ersten drei Formanten in Luft 220, 2270 und 3270 Hz, so ändert sich dies in Helium zu 320, 3900 und 5500 Hz. Dadurch ergibt sich ein anderes Stimmbild, und die Stimme erschien insgesamt höher, auch wenn die Höhe des Stimmtones selbst durch das Edelgas unverändert bliebe.

Hilfe zu A5: Du hörst deine Stimme nicht nur durch Beugung über die Luft, sondern auch durch deinen Schädelknochen. Dieser überträgt aber fast nur tiefe Frequenzen bis etwa 300 Hz, und dieser zusätzliche tieffrequente Schall verleiht deinem Timbre einen fülligen Klang. Vom Aufzeichnungsgerät, das natürlich nur den Luftschall aufnimmt, hörst du deine Stimme mit normalem Timbre, also höher und dünner – aber eben so, wie dich alle anderen Menschen hören.

Hilfe zu A6: Die Stimme hat zwei so genannte Register. Bei der Bruststimme (sie macht etwa die unteren 2/3 des Stimmumfangs aus) schwingen die Stimmbänder normal. Bei der Kopfstimme ist ein Großteil der Stimmlippen straff gespannt und nur noch die Ränder bewegen sich. Was bedeutet das? Weil dadurch eine kleinere Masse schwingt, können höhere Frequenzen erzeugt werden. Weil sich die Stimmbänder nicht ganz schließen, klingt diese hohe Stimme aber anders, sie ist also unser oberes Register. Das plötzliche Umschlagen von Brust- in Kopfstimme wird beim Jodeln ausgenutzt. Bei Sängern sollten die Register aber möglichst nahtlos ineinander übergehen (= Registerausgleich), und das erfordert jahrelanges Training der Kehlkopfmuskulatur und des Atems.

Ein Bauchredner erzeugt nur dann einen Ton mit dem Bauch, wenn sein Magen knurrt. Er erzeugt seine Stimme genauso im Vokaltrakt wie du, aber er verändert diesen dabei sehr stark. Zum Beispiel liegt die Zunge weit hinten, die Gaumenbögen und Stimmbänder sind stärker gespannt. Dadurch ergibt sich der seltsame Klang der Stimme. Das Wesentliche sind aber die fehlenden oder nur minimalen Mundbewegungen. Deshalb muss der Bauchred-

ner oft schummeln, denn wie will er einen Lippenlaut wie „p“ ohne Hilfe der Lippen erzeugen? Wichtig ist auch das optische Drumherum, etwa die Handpuppe. Vom Tonband verlieren die meisten Bauchredner-Effekte nämlich sehr stark.

Man kann tatsächlich zwei laute Töne gleichzeitig singen. Diese Technik nennt man Obertonsingen. Im Beispiel unten links erzeugt der Sänger einen Grundton mit etwa 130 Hz und gleichzeitig den 2. bis 4. Oberton. Wie ist es möglich, so gezielt nur einen einzigen Oberton zu verstärken? Die Formantenresonanz ist ja sehr breit! Das gelingt, indem der Obertonsänger den Vokaltrakt sehr starr macht. Dadurch wird der Resonanzbereich schmal, und es können gezielt einzelne Obertöne verstärkt werden, so wie zum Beispiel in Abb. 18 rechts der 3. Oberton.

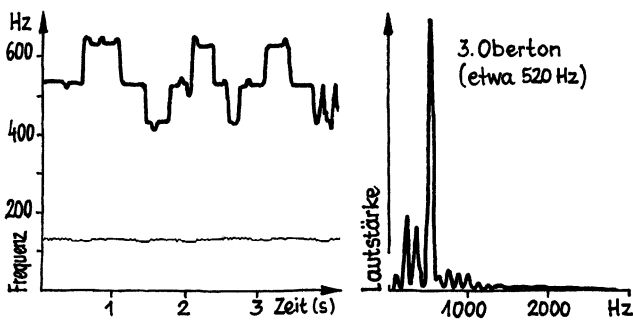


Abb. 18: Frequenz (links) und Frequenzspektrum (rechts) beim Obertonsingen (Grafik: Janosch Slama).

Hilfe zu A7: Von der Vielzahl der Möglichkeiten, Konsonanten zu erzeugen, sehen wir uns nur einige an. So gibt es stimmlose Konsonanten, die entweder durch Strömungsgeräusche erzeugt werden (f, s oder sch) oder durch explosionsartiges Ausströmen der Luft (p, t und k). Bei ihnen schwingen die Stimmbänder nicht mit. Dann gibt es Konsonanten, bei denen auch der Klang der Stimmbänder dazukommt, etwa bei b, d oder g und bei m und n, bei denen ein Teil der Luft durch die Nase strömt. Der Übergang zu den Vokalen ist auf jeden Fall nicht scharf abzugrenzen. Aus den Myriaden an Kombinationen von Vokalen und Konsonanten ergeben sich hörbare, aber messtechnisch praktisch nicht erfassbare Unterschiede, die die bunten, regionalen Färbungen von Sprachen und Dialekten ausmachen.

Hilfe zu A8: Um Vokale unterscheiden zu können, muss man die ersten beiden Formanten übertragen, also bis etwa 2500 Hz. Wenn die Übertragungsfrequenz 4,5 kHz

(4500 Hz) beträgt, kann man alle Vokale gut unterscheiden. Zischlaute erzeugen aber auch viele höhere Frequenzen. Deshalb kann man übers Handy schwer „s“ und „f“ unterscheiden, weil sich diese beiden Konsonanten vor allem im höherfrequentigen Bereich unterscheiden. Generell kommen beim Sprechen Frequenzen bis mindestens 10000 Hz vor (siehe Abb. 6). Wenn man daher bei der Übertragung bei 4500 Hz abschneidet, fehlen die hohen Obertöne, und das Timbre der Stimme verändert sich.

Hilfe zu A9: Die Teilchengeschwindigkeit von Stickstoff, der rund 80 % der Luft ausmacht, liegt bei Zimmertemperatur bei knapp 500 m/s (siehe Abb. 7) und ist somit die größte Geschwindigkeit. Die Schallgeschwindigkeit, mit der sich die Kompressionswellen ausbreiten, ist für Luft von der Temperatur abhängig und steigt mit deren Erhöhung an. Bei Zimmertemperatur beträgt sie etwa 340 m/s (siehe Kap. 19.3, S. 50). Zu guter Letzt gibt es noch die maximale Schwingungsgeschwindigkeit der Luftmoleküle, die sogenannte Schallschnelle, die im Extremfall bloß noch winzige 0,1 mm/h beträgt.

Hilfe zu A10 a: Unter einer Oktave versteht man die Verdoppelung der Frequenz eines Tones. Zwei Töne im Abstand einer Oktave erscheinen sehr ähnlich, fast wie ein Einklang, also eine Prime.

Hilfe zu A10 b: Die mathematisch einfache Variante ist, die Frequenz so lange zu verdoppeln, bis 20.000 Hz erreicht sind.

20 Hz	Grundton	
40 Hz	1. Oktave	20 Hz · 2
80 Hz	2. Oktave	20 Hz · 4 = 20 Hz · 2 ²
160 Hz	3. Oktave	20 Hz · 8 = 20 Hz · 2 ³
320 Hz	4. Oktave	20 Hz · 16 = 20 Hz · 2 ⁴
640 Hz	5. Oktave	20 Hz · 32 = 20 Hz · 2 ⁵
1280 Hz	6. Oktave	20 Hz · 64 = 20 Hz · 2 ⁶
2560 Hz	7. Oktave	20 Hz · 128 = 20 Hz · 2 ⁷
5120 Hz	8. Oktave	20 Hz · 256 = 20 Hz · 2 ⁸
10240 Hz	9. Oktave	20 Hz · 512 = 20 Hz · 2 ⁹
20480 Hz	10. Oktave	20 Hz · 1024 = 20 Hz · 2 ¹⁰

Tab. 3

Tab. 3 zeigt, dass man auf jeden Fall 9 Oktaven hören kann, in jungen Jahren sogar knapp 10. Die elegante Variante lässt sich in einem Aufwasch berechnen. Allgemein gilt $20 \cdot 2^n \leq 20000$ Hz. Daraus folgt $2^n \leq 1000$ und $n \leq \log_2 1000 = 9,97$.

Hilfe zu A10 c: Die Frequenz des sichtbaren Lichts liegt im Bereich zwischen 4 und $7,1 \cdot 10^{14}$ Hz, das entspricht also einer knappen Oktave.

Hilfe zu A11: Der Knall einer Pistole hat drei Ursachen: 1) die Explosion des Schießpulvers, 2) den Austritt der Gase, wenn die Kugel den Lauf verlässt (vergleichbar mit dem Austritt eines Sektorkens aus einer Flasche) und 3) den Überschallknall des Projektils. Ein Schalldämpfer beeinflusst nur Ursache Nummer 2. Dadurch wird der Lärm von 150 dB auf etwa 120 dB reduziert, und das ist immer noch ein Höllenlärm. Pistolen mit Schalldämpfer machen also nicht ein leises „Plopp“, wie das in den Filmen immer vorgegaukelt wird.

Hilfe zu A12 a: Dieses Beispiel demonstriert eindrucksvoll, dass sich eine Störung ausbreitet. Die Luftmasse schwingt ja nicht gleichzeitig. Nach jedem Zirpen breitet sich die Störung kugelförmig in alle Richtungen aus. Es schwingt immer nur der Teil der Moleküle, an dem gerade die Welle vorüberstreicht.

Hilfe zu A12 b: Nehmen wir an, dass sich das Zirpen gerade an der Hörschwelle befindet (0 dB; siehe Abb. 1), so dass du die Grille in sonst ruhiger Umgebung gerade noch hören kannst. In diesem Fall transportiert die Welle größenordnungsmäßig 10^{-12} W pro Quadratmeter. Der Schall breitet sich von der Grille kugelförmig aus (Anm.: In der Realität ist es natürlich eine Halbkugel, wenn die Grille am Boden sitzt, aber man darf natürlich den vom Boden absorbierten Schall in der Bilanzrechnung nicht vernachlässigen). Eine Kugel mit dem Radius 800 m hat eine Oberfläche von $O = 4\pi r^2 = 8 \cdot 10^6 \text{ m}^2$. Durch jeden dieser Quadratmeter fließt eine Leistung von 10^{-12} W. Die gesamte Leistung im Inneren der Kugel muss daher $10^{-12} \text{ W/m}^2 \cdot 8 \cdot 10^6 \text{ m}^2 = 8 \cdot 10^{-6} \text{ W}$ sein. Das ist eine erstaunlich geringe Leistung und der Grille durchaus zuzutrauen.

Hilfe zu A12: Ist die Luft in Bodennähe wärmer, dann ist dort die Schallgeschwindigkeit größer (weil $v \sim \sqrt{T}$). Die Schallwelle wird daher vom Boden weg gebrochen und verliert sich nach oben (siehe Abb. 19 links). Dieser Effekt ist in der Wüste und auch bei uns an warmen Tagen besonders stark. Unter bestimmten Bedingungen, etwa wenn der Boden sehr kalt ist, kann es zur Temperaturumkehr kommen. Die Luft ist dann in Bodennähe kälter. In diesem Fall wird die Schallwelle zum Boden hin gebrochen, dort reflektiert, wieder zum Boden gebrochen und

so weiter – in Abb. 19 rechts übertrieben dargestellt. Besonders gut reflektieren glatte Flächen wie Seen oder Eisschichten, und deshalb kann man dort so weit hören.

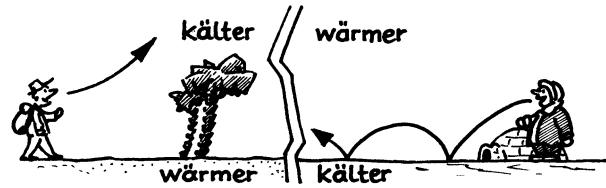


Abb. 19 (Grafik: Janosch Slama)

Hilfe zu A14: Eine gezupfte Saite schwingt viel eckiger als eine gestrichene, hat also quasi einen scharfen Knick. Weil für „eckige“ Schwingungen hohe Frequenzen nötig sind, sind auch für eckige Wellen, wie bei einer gezupften Saite, hohe Frequenzen nötig. Daraus folgt, dass bei einer gezupften Saite wesentlich mehr hohe Frequenzen beteiligt sein müssen als bei einer gestrichenen, und das hört sich dann ziemlich hart im Klang an.

Hilfe zu A15: In einer offenen Pfeife können sich alle Obertöne ausbilden, in einer gedeckten aber nur die ungeradzahigen. Nachdem der Klang eines Instruments nur vom Obertonspektrum abhängt, erzeugen die beiden Pfeifentypen sehr unterschiedliche Klänge.

Hilfe zu A16: Alle Effekte sind eine Folge der Beugung von Schallwellen an Hindernissen. Schall kann also auch ums Eck gehen oder um ein Hindernis herum und so in deine Ohren gelangen. Das ist deshalb möglich, weil Schallwellen im Bereich von Dezimetern und Metern liegen und daher von alltäglichen „Hindernissen“ wie dem eigenen Kopf, Türen oder Kanten von Wänden nennenswert gebeugt werden – im Gegensatz zu Lichtwellen. Siehe dazu die Abbildungen 13 und 14 an.

Hilfe zu A17: Der Grundton einer Luftsäule hängt von ihrer Länge ab und ob sie gedeckt ist oder nicht (siehe Abb. 12). Auch für stehende Wellen gilt die Gleichung $v = f \cdot \lambda$ (siehe Kap. 15.3). Eine Maus kann niemals so brüllen wie ein Löwe! Selbst wenn sie völlig hohl wäre, würde nur eine Viertelwelle in sie hineinpassen. Die tiefste Frequenz, die sie dann verstärken kann, wenn sie z. B. 8 cm lang ist, ist rund 1070 Hz. Auch eine Hohlmaus hätte also eine Fistelstimme.

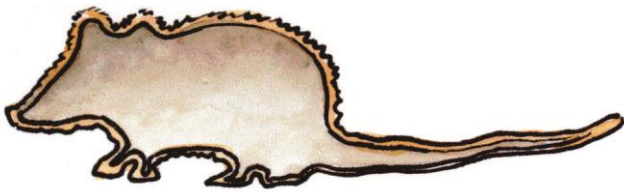
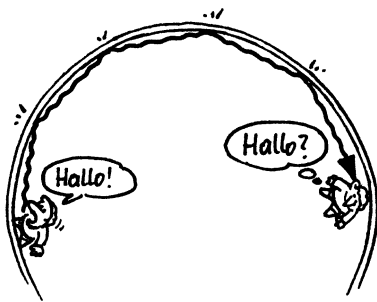


Abb. 20: In einer Hohlmaus kann sich über die ganze Länge eine stehende Welle ausbilden (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 19.30, S. 54).

Hilfe zu A18: Deine Ohren sind perfekte Fourier-Analysatoren! Sie zerlegen Geräusche und Klänge wieder in ihre einzelnen Bestandteile. Die Phasenlage der Wellen, also wie die Wellenberge und -täler zueinander liegen, ist ihnen dabei aber egal. Deshalb nimmst du diese beiden Klänge gleich wahr, weil sie aus den gleichen Tönen bestehen. Das ist auch gut so, denn sonst würde dir zum Beispiel der Klang einer Band aus verschiedenen Richtungen unterschiedlich vorkommen, weil sich die Entfernung zu den Musikern ändert und somit auch die Phasenlage.

Hilfe zu A19: Lord Rayleigh war der erste, der die geheimnisvolle Flüstergalerie in der Kuppel der St. Pauls-Kathedrale in London erklärte. In dieser riesigen Galerie kann man geflüsterte Worte besonders gut verstehen. Der Effekt ist umso besser, je näher beide Personen an der Wand stehen. Wieso? Es ist ähnlich wie über dem Eis in Abb. 19: Die Schallwellen werden an der Wand zigmal reflektiert und laufen so ganz knapp an dieser um die Kuppel herum. Wenn sich der Zuhörer in diesem Bereich befindet, kann er das Flüstern hören.



Hilfe zu A20: Es stehen uns verschiedene Mechanismen zur Richtungsbestimmung zur Verfügung, zunächst einmal der Zeitunterschied und die Phasenlage eines Signals. Beide haben miteinander zu tun. Ist ein Ohr weiter von der Schallquelle entfernt, dann trifft die Welle später ein und ist auch verschoben (siehe Abb. 22). Die Zeitdifferenz spielt nur am Anfang und am

Ende eines Geräusches eine Rolle, dazwischen ist die Phasenlage wichtig.

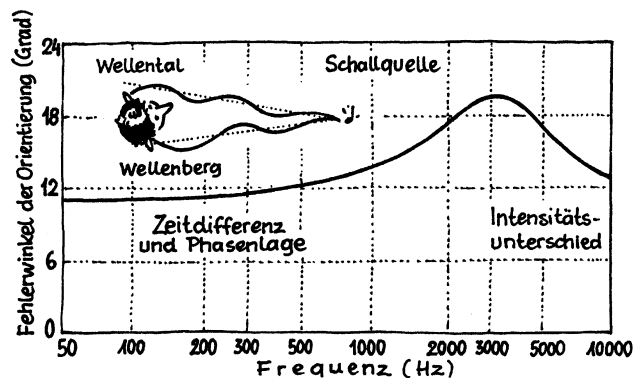


Abb. 22 (Grafik: Janosch Slama)

Diese beiden Mechanismen funktionieren vor allem im unteren Frequenzbereich. Warum? Weil nur diese Wellen lang genug sind, dass sie um den Kopf herum gebeugt und mit beiden Ohren gleich laut gehört werden. Liegen die Frequenzen höher, dann tritt eine merkliche Abschattung durch den Kopf ein. Daher wird bei höheren Frequenzen vor allem der Intensitätsunterschied gemessen. Die Bereiche dieser Messmethoden überlagern sich nicht vollständig, und deshalb ist unsere Richtungsorientierung im Bereich um 3000 Hz am schlechtesten. Paradoxiertweise können wir gerade die Richtung der Töne, die wir am besten hören, am schlechtesten bestimmen (vgl. mit Abb. 10). Schließlich spielen auch noch die Ohrmuscheln eine große Rolle. Wenn alle Vertiefungen mit Wachs ausgefüllt sind, dann wird das Richtungshören sehr schwer oder sogar unmöglich. Das liegt an der asymmetrischen Form der Ohrmuscheln. Ändert sich die Richtung einer Schallquelle, so entsteht aus diesem Grund ein geringer Klangfarbenwechsel, den du aus Erfahrung als Richtungswechsel umzudeuten gelernt hast.

Hilfe zu A21: Du musst bedenken, dass deine Ohren etwa 13 Zehnerpotenzen an Schallintensitäten unterscheiden können. In Abb. 17 sind Intensität und Dezibel nicht logarithmisch gegenübergestellt. Du siehst, dass die Kurve sehr steil ansteigt und sich dann abflacht. Das bedeutet, dass im unteren Bereich schon winzige Änderungen der Schallintensität große Lautstärkenänderungen hervorrufen. Warum ist das ein sehr schlauer Trick der Natur? Es ist für uns nicht wichtig, unterscheiden zu können, ob gerade 1000 oder 1001 Hunde bellen. Laut ist laut! Den riesigen Unterschied von 1 bis 10 W/m² nehmen wir nur

mehr als Verdopplung der Lautstärke wahr, nämlich von 120 auf 130 dB. Es ist für uns aber zum Beispiel sehr wichtig, dass wir Lautstärkenänderungen der menschlichen Stimme sehr gut unterscheiden können. Schreien (80 dB) nehmen wir 64-mal so laut wahr wie Flüstern (20 dB). Der Unterschied der Schallintensitäten beträgt dabei weniger als $1/10.000 \text{ W/m}^2$. Warum hören wir das Schreien 64-mal so laut wie das Flüstern? Weil es von 20 dB auf 80 dB sechs Zehnerschritte sind. Die Lautstärke verdoppelt sich somit 6-mal.

Die Natur hilft sich also, indem sie einen riesigen Wahrnehmungsbereich so komprimiert, dass der im Alltag interessante niedrige Teil gewaltig an Unterscheidungs-schärfe gewinnt. Das nennt man das Weber-Fechner'sche Gesetz. Es gilt beim Menschen auch für das Unterscheiden von Helligkeiten und von Gewichten.

Hilfe zu A22 a:

$$L = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{10^{-6}}{10^{-12}}\right) \text{ dB} =$$

$$10 \cdot \log(10^6) \text{ dB} = 10 \cdot 6 \text{ dB} = 60 \text{ dB}$$

$$L = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{10^{-2}}{10^{-12}}\right) \text{ dB} =$$

$$10 \cdot \log(10^{10}) \text{ dB} = 10 \cdot 10 \text{ dB} = 100 \text{ dB}$$

Hilfe zu A22 b: Es gilt

$$\Delta L = 10 \cdot \log\left(\frac{I_2}{I_0}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{I_1}{I_0}\right) =$$

$$10 \cdot \log\left(\frac{I_2}{I_1}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{I_2}{I_1}\right).$$

Hilfe zu A22c: Bei einer Verdopplung der Schallintensität gilt $I_2 = 2I_1$. Nun setzen wir in die Formel aus A22 b ein:

$$\Delta L = 10 \cdot \log\left(\frac{I_2}{I_1}\right) = 10 \cdot \log(2) \text{ dB} =$$

$$10 \cdot 0,3 \text{ dB} = 3 \text{ dB}.$$

Hilfe zu A22 d: Die größte Differenz zwischen der Schallintensität des Sängers und des Orchesters liegt mit etwa 15 dB bei etwa 2500 Hz. Es gilt $\Delta L = 15 \text{ dB} =$

$$10 \cdot \log\left(\frac{I_2}{I_1}\right). \text{ Daraus folgt } 1,5 = \log\left(\frac{I_2}{I_1}\right) \text{ und } 10^{1,5} =$$

$$31,6 = \frac{I_2}{I_1}. \text{ Es wären daher 32 Orchester nötig, um mit}$$

dem Sänger gleichzuziehen!