



Physik und Sprechen

MICHAEL, WAGNER
MICHAEL.WAGNER@STUD.SBG.AC.AT

Zusammenfassung

Sprechen ist etwas Alltägliches, trotzdem wird in der Schule selten auf die Mechanismen und physikalischen Begebenheiten, die das Sprechen ermöglichen, eingegangen. Im folgenden Beitrag werden drei für das Sprechen relevante Teilbereiche angeführt und erläutert: die linguistische Disziplin der Phonetik, das Phänomen der Resonanz unterstützt von einer Versuchsbeschreibung, und die Analyse von Spektrogrammen. Zu guter Letzt wird die Relevanz dieser Themenbereiche für die Schule diskutiert. Die physikalischen Hintergründe des Sprechens haben zahlreiche Überschneidungen mit vielen Fächern, nicht nur mit dem Fach Physik. Damit lässt sich die Physik der Sprache fächerübergreifend oder auch nur im Physikunterricht analysieren, sodass die Schüler_innen verstehen, welche Faktoren das Sprechen wirklich beeinflussen. So erhalten die Schüler_innen selbst das Wissen, um mit Problemen, wie zum Beispiel Heiserkeit, oder der Betonung eines Englischen „th“, umzugehen.

1 Einführung

Wieso klingen manche Stimmen anders als andere, und wie funktioniert Sprechen eigentlich? Eine oberflächliche Antwort auf diese Fragen scheint im heutigen Schulalltag zu reichen, aber nur, wenn man verstanden hat, wie etwas funktioniert, kann man es auch richtig anwenden. So auch beim Sprechen. Sprechen passiert fast unterbewusst, die Töne und Worte werden automatisch geformt, weil wir es ein Leben lang so gelernt haben. Wäre es nicht auch sinnvoll zu wissen, was wirklich physikalisch passiert, wenn wir sprechen?

Dieses Thema findet in der Schule und im Lehrplan der Physik noch keinen Platz, aber trotzdem überschneidet sich Sprache mit genügend vielen Teilbereichen der Physik, sodass es leicht rechtfertigen ist, das Thema im Unterricht aufzugreifen. Nicht nur das, die Analyse von Spektrogrammen und die Arbeit mit Resonanz führt Schüler_innen zu einem tieferen Verständnis ihrer eigenen Sprache und wie sie funktioniert.

Im folgenden Beitrag wird auf drei relevante Teilbereiche eingegangen: die linguistische Disziplin der Phonetik, das Phänomen der Resonanz unterstützt von einer Versuchsbeschreibung und die Analyse von Spektrogrammen. Zu guter Letzt wird die Relevanz dieser Themenbereiche für die Schule diskutiert.

2 Phonetik, Phonetikos – zur Stimme gehörig

Die Phonetik ist ein Teilbereich der Linguistik, also der Sprachwissenschaft. Was hat dieses Thema also mit Physik oder Schule zu tun? Phonetik ist eine Mischung aus Sprache, Biologie und Physik, und beschäftigt sich unter anderem mit Themen wie Schall, Akustik, Resonanz,

Wellenlänge und Frequenz. Dabei werden viele Graphen und Darstellungsarten verwendet, die auch in der Physik verwendet werden. Eine Darstellungsart, die für diese Arbeit relevant ist, ist das Spektrogramm, eine 2-Achsendarstellung von Zeit und Frequenz.

Weiters ist die Stimme des Menschen ein Instrument, zumindest würden das die meisten Sänger so unterschreiben. Nur welche Art von Instrument ist unsere Stimme? Da das Stimmband wie eine Saite schwingt, könnte man meinen, wir spielen ein Saiteninstrument, wenn wir sprechen. Aber da diese Saite durch einen Luftstrom in Schwingung gebracht wird, liegt auch die Annahme nahe, wir spielten beim Sprechen ein Blasinstrument. Die Lunge bringt Energie ins System und dadurch Luft in Bewegung. Diese Luft wird von den Stimmbändern moduliert – die Stimmbänder geraten in Schwingung und schließen und öffnen sich periodisch, dadurch entsteht der Grundton. Dieser Ton wird im Weiteren von unserem Mund weiter modifiziert und verstärkt, um Töne und Phoneme zu kreieren. In einem Orchester gibt es Holz- und Blechbläser, unsere Stimme verwendet aber weder Holz noch Blech, bei uns erzeugen Haut und Muskulatur den Ton. So gesehen ist unsere Stimme ein „Hautblasinstrument.“

Eine schematische Darstellung dieses Hautblasinstruments zeigt Abb. 1. Wie bei jedem anderen Instrument gibt es eine Kraftquelle (Lunge), die eine Schallquelle anregt (Stimmbänder), und dann einen Resonanzkörper (Mund, Nase), der diese Schallwellen modifiziert. Damit ergeben sich einige Variablen, die von Mensch zu Mensch verschieden sein können. Das Lungenvolumen, und damit der erzeugte Luftdruck beeinflussen die Lautstärke des Instruments. Damit können

Menschen mit lauten „Organen“, also größeren Lungen, auch lautere Töne erzeugen. Das Volumen ist allerdings nicht die einzige Variable, die die Lautstärke beeinflusst – auch die Geschwindigkeit, in der die Lunge komprimiert wird, erhöht die Geschwindigkeit des Luftstroms und damit die Lautstärke. Der Muskel, der die Lunge öffnet und zum Einatmen da ist, ist das Zwerchfell. Nur gibt es hier keinen Gegenmuskel – wir haben keinen Muskel, der unsere Lunge komprimiert, zumindest nicht direkt. Geübte Sänger nutzen die Bauchmuskulatur, die unter der Lunge ist, um Druck auf die Lunge auszuüben und damit kontrollierter und effektiver bestimmen zu können, wie die Lunge komprimiert.

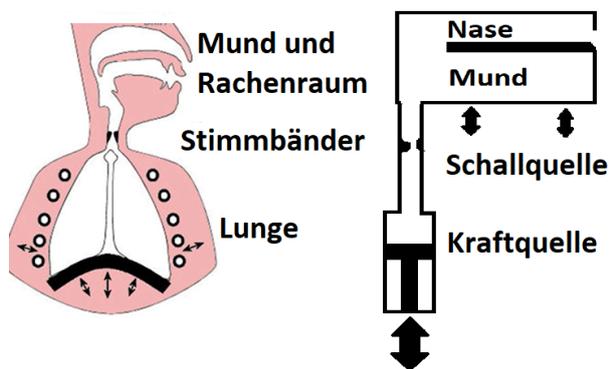


Abb. 1 – Schematische Darstellung der Lunge und ihrer Funktionsweise.

Die Stimmbänder sind für den Grundton zuständig. Hier fließen Länge, Dicke und Spannung der Stimmbänder in den resultierenden Ton ein. Der Kehlkopf kann sich leicht kippen, und damit die Stimmbänder strecken, dadurch kann der Mensch mehrere verschiedene Grundtöne entstehen lassen. Die Länge und Dicke der Bänder sind allerdings nicht beeinflussbar. So sind in der Regel die Stimmbänder von Männern länger und dicker als die von Frauen – sie schwingen also bei derselben Energie langsamer. Als Beispiel: bei einer Frau schwingen die Stimmbänder bei normalem Sprechen circa 200 Mal in der Sekunde. Eine Person, die gerade das hohe F6 singt, wie bei der Arie der Königin der Nacht, schwingen diese Stimmbänder 1397 Mal in der Sekunde, also fast 7-mal so oft wie bei einem durchschnittlichen Gespräch.

3 Resonanz, Resonare - Widerhallen

Physikalisch gesehen ist Resonanz die Reflexion des ganzzahligen Vielfachen einer Wellenlänge. Das setzt voraus, dass es einen Ort gibt, an dem die Schallwellen auch reflektiert werden können – sie werden also nicht absorbiert oder gestreut. Tritt Reflexion auf, ist das eine Form von

konstruktiver Interferenz. Es werden also die Amplituden der verstärkten Frequenz vergrößert und damit lauter. Dieses Prinzip wird bei fast jedem Instrument verwendet, genauso ist es auch im Sprechtrakt des menschlichen Körpers. Beim Menschen setzen die in der Lunge produzierten Druckwellen die Stimmbänder in Schwingung, diese erzeugen dann einen Grundton. Dieser Ton allein ist aber nicht was unsere Sprache ausmacht, erst durch die Modulation und Verstärkung dieses Tones in unserem Mund und im Nasenraum wird aus dem Ton Sprache. Die Schallwelle wird also in unserem Mund reflektiert und bestimmte Frequenzen werden dadurch verstärkt. Diese Verstärkung ist abhängig von den Ausmaßen des Mundes und der zu verstärkenden Frequenz.

Bei einem durchschnittlichen Mann ist die Grundfrequenz der Stimmbänder 120 Hz, bei einer Frau durchschnittlich 200 Hz, somit ist die durchschnittliche Grundfrequenz des Menschen wohl circa bei 160 Hz. Mithilfe der folgenden Formel der Frequenz, kann man die Wellenlänge der Grundfrequenz berechnen:

$$f = \frac{c}{\lambda} \rightarrow \lambda = \frac{c}{f} \rightarrow \frac{343}{160} = 1,87\text{m}$$

Unsere Münder müssten 1,87m tief/lang/oder breit sein, um diese Frequenz effektiv verstärken zu können. Offensichtlich sind unsere Resonanzkörper nicht groß genug, um die Grundfrequenz zu verstärken. Aber was wird dann verstärkt? Die folgende Abbildung zeigt zunächst den Grundton, dann den Resonanzraum des Mundes und zu guter Letzt die resultierende Schallwelle. Man erkennt also, dass viele Obertöne mit dem Grundton mitschwingen. Diese werden dann von unseren Mündern verstärkt. Somit kann man mit demselben Grundton trotzdem unterschiedliche Vokale, wie hier /A/ und /i/, formen.

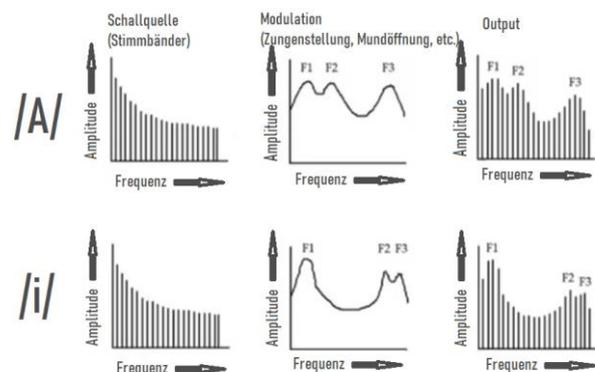


Abb. 2 – Grundschwingung, Resonanz und resultierendes Frequenzspektrum der Phoneme /A/ und /i/.

Nun überprüfen wir zum Beispiel den 3ten Formanten, also eine der prägnantesten Frequenzen, von /i/ mit der Formel von oben. Dieser schwingt bei circa 2400 Hz.

$$F3: \lambda = \frac{c}{f} \rightarrow \frac{343}{2400} = 0,143 \text{ m}$$

Die Wellenlänge ist also circa 14cm lang. Dieses Ergebnis lässt sich leicht rechtfertigen, denn vom Kehlkopf bis zu den Zähnen ist diese Wellenlänge enthalten. Die Zunge kann dann den richtigen Ort im Mund finden, an dem genau diese Wellenlänge verstärkt wird.

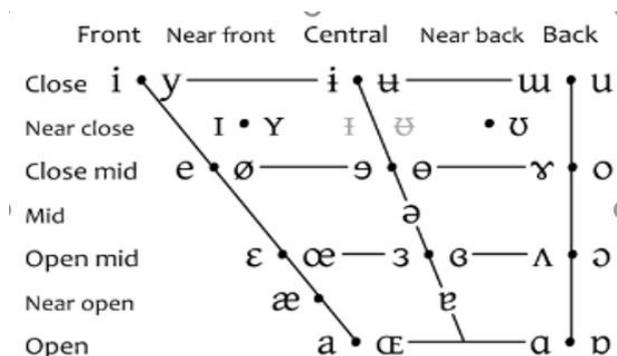


Abb. 3 – IPA Vokaltabelle. Davenport, Mike and S. J. Hannahs. 1998. *Introducing Phonetics and Phonology*. London: Arnold

Bemerkenswert ist auch, dass es drei Formanten für eine Stellung im Sprechtrakt gibt. Dies lässt sich durch die dreidimensionale Reflexion im Mund erklären. F1 ist bei den meisten Tönen gleich, da sich diese Reflexionen in der Breite des Mundes/Halses zeigen. Diese ist schwer zu modifizieren, da das Kiefer nicht weit nach links/rechts beweglich ist. F2 beschreibt die Tiefe, also in der Skizze bei Abb.2 die X-Achse der Reflexion. Ein /i/ wird weit vorne, bei den Zähnen geformt, während /a/ hingegen weit hinten, fast im Rachen gesprochen wird. F3 beschreibt die Höhe, also die vertikale Achse im Mund. Diese ist hauptsächlich auf die Zungenposition zurückzuführen.

4 Versuch zur Resonanz

Fast jeder hat bereits selbst Versuche zur Resonanz durchgeführt, wenn auch unbewusst. In einem Bad, am besten einem gefliesten, klingt die eigene Stimme viel imposanter und voller, aber warum nur? Die Antwort liefern Resonanz und konstruktive Interferenz. So findet man durch Ausprobieren schnell eine Stimmlage, die perfekt zum Badezimmer oder der Toilette passt. Im Physikunterricht ist es auch möglich, bestimmte Resonanzfrequenzen für das Klassenzimmer zu errechnen. Wie in Kapitel 3 beschrieben, reicht die einfache Gleichung $\lambda = \frac{c}{f}$ und das Wissen,

dass Resonanz bei einer Raumlänge, die ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge λ ist, auftritt.

Leider funktioniert diese Rechnung nur in kleinen Räumen und freien, reflektierenden Wänden wirklich gut. Ein Klassenzimmer absorbiert und streut in der Regel die Schallwellen zu stark, um hörbare Resonanzeffekte zu erzeugen.

Eine etwas komplexere Rechnung ist die Resonanzfrequenz einer Aluminiumdose. Ein mit Gas gefüllter Körper mit nur einer Öffnung, wie etwa eine Coladose, resoniert bei einer bestimmten Frequenz, wenn Luft in sie geblasen wird. Den Ton der Dose kann man durch Ausprobieren finden, aber man kann ihn auch berechnen.

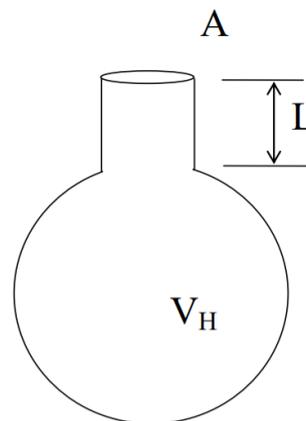


Abb. 4 – Schematische Darstellung eines Helmholz-Resonators.

Eine solche Dose verhält sich wie ein sogenannter Helmholz-Resonator. Dieser setzt das kompressible Gasvolumen in einem Behälter einer schwingenden Feder gleich, und kann damit die Schwingungsfrequenz berechnen. Die allgemeine Formel lautet wie folgt:

$$f = \frac{1}{2\pi} c * \sqrt{\frac{A}{V_H(L + \frac{\pi R}{2})}}$$

c ... Schallgeschwindigkeit

A ... Fläche der Öffnung

V_H ... Volumen des Resonanzkörpers

L ... Mündungslänge

Auf den ersten Blick wirkt diese vielleicht etwas komplex, aber bei einer Aluminiumdose ist die Mündungslänge L = 0. Somit muss man nur noch die Fläche A der Öffnung abschätzen, und das Volumen der Dose in Meter umrechnen. Die Trinköffnung hat circa 2 cm Durchmesser, das Volumen der Dose ist 0,25 Liter, c ist die Schallgeschwindigkeit. Schon erhält man folgende Gleichung:

$$f = \frac{1}{2\pi} 343 * \sqrt{\frac{0,01^2 * \pi}{0,00025 * (0 + \frac{\pi * 0,5}{2})}}$$

Ein Vereinfachungsschritt und eine Rechnung geben uns

$$f = 54 * \sqrt{\frac{0,0003}{0,00025 * \frac{\pi}{4}}}$$

und schlussendlich:

$$f = 54 * 1,23 = 66 \text{ Hz}$$

Die Resonanzfrequenz einer 0,25L Aluminiumdose ist also bei 66Hz – das entspricht dem C2 am Klavier.

5 Spektroskopie, Spektrum – Bild, Erscheinung

In Abb. 5 wird das Spektrogramm des Wortes minato (Japanisch für Hafen) von mir gesprochen dargestellt. Gewählt wurde dieses Wort nicht nur, weil es gut zum Veranschaulichen von vielen Aspekten der Spektroskopie dient, sondern auch, weil die Transkription dieses Wortes in IPA, also in das Internationale Phonetische Alphabet, keine zusätzlichen Symbole benötigt. Die Grafik entsteht aus 2 Ebenen: auf der horizontalen X-Achse ist die Zeit in Sekunden aufgetragen, auf der vertikalen Achse die Frequenz in Hertz. Dunklere Stellen bedeuten, dass zu diesem Zeitpunkt und diesem Frequenzpunkt etwas gemessen wird, je dunkler die Stelle, desto stärker ist die Intensität, also die Lautstärke, an dem Punkt.

Somit ist diese Darstellungsart eigentlich eine 3-Dimensionale, obwohl nur zwei der Achsen beschriftet sind.

Das Wort minato besteht aus 6 Buchstaben, aber auch aus 6 Phonemen, also Tönen. Diese sind in IPA in derselben Reihenfolge: /m/, /i/, /n/, /a/, /t/ und /o/. Bei nasalen Lauten wie /m/ und /n/ wird der Luftstrom nicht durch den Mund, sondern durch die Nase geleitet. Bei /m/ sind beide Lippen geschlossen, bei /n/ schließt die Zunge den Mund. Beide Nasale sind allerdings stimmhaft und tragen daher bereits Informationen der darauffolgenden Vokale mit sich, trotzdem erkennt man beim Übergang von /m/ auf /i/ einen sehr viel eindeutigeren Unterschied als bei /n/ auf /a/. Sehr klar erkennt man das explosive /t/, das kurz nach der Pause im gesamten Frequenzbereich explodiert. Das gesamte Spektrogramm zu erläutern, würde den Rahmen dieser Veranschaulichung sprengen, daher konzentrieren wir uns nun lediglich auf die fünf rot markierten Bereiche.

1 – Der markierte Bereich ist der nasale Teil des Phonems /m/, und gerade im markierten Bereich erkennt man den Unterschied zwischen dem /m/ und dem darauffolgenden /i/. Im niedrigen Frequenzbereich (<2000 Hz) sind beide Töne gleich. Die Zunge ist in beiden Phonemen an derselben Stelle, das bedeutet, dass die Flächen zwischen 3000 Hz und 5000 Hz rein durch den Resonanzraum im Nasenraum entstehen. In

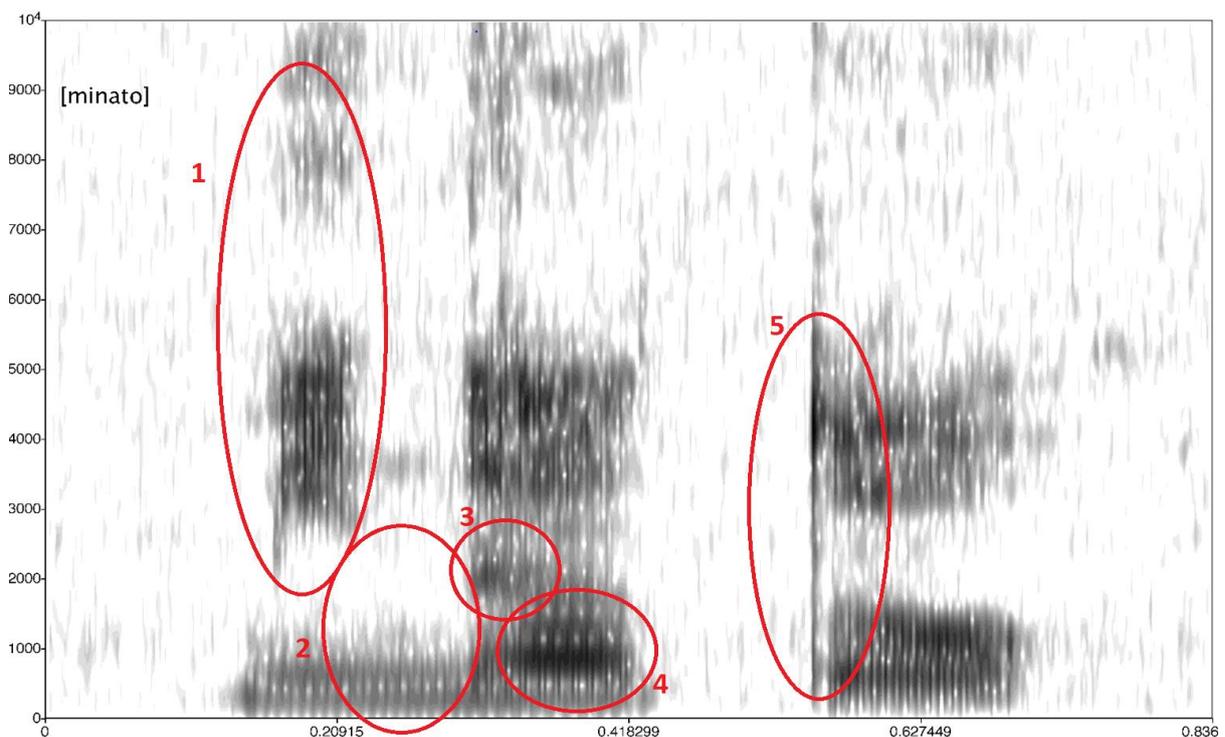


Abb. 5 – Spektrogramm des Wortes [minato], erstellt in WASP.

dem Moment, in dem die Lippen sich öffnen, und der Luftstrom nicht mehr durch die Nase fließt, verschwindet also auch dieser Resonanzraum und das /i/ wird klar hörbar.

2 – Dieser Bereich ist das /i/. Bei genauer Betrachtung des Spektrums erkennt man zwei Bänder in den Bereichen zwischen 0 – 500 Hz und 500 – 1000 Hz. Dazu kommt noch ein drittes, schmales Band bei circa 3500 Hz, dieses ist auch in Abb. 4 zu sehen. Damit hat der Vokal /i/ drei Formanten, die ihn von anderen Vokalen unterscheiden.

3 – Dieser Bereich beschreibt einen weiteren nasalen Ton, das /n/. Im Spektrum sieht es dem anderen Nasal ähnlich, hat aber eine größere Bandbreite: von 0 – 5000 Hz. Bemerkenswert ist hier der etwas intensivere Streifen in drei bei circa 2000 Hz, denn dieser verschwindet bei der Bewegung zum darauffolgenden /a/.

4 – Wie bereits erwähnt, unterscheiden sich die beiden Phoneme /n/ und /a/ hauptsächlich durch die Verschiebung eines Formanten von 2000 Hz (/n/) nach circa 1000 Hz (/a/). Dies ist auf die Vergrößerung des Resonanzraumes im Mund zurückzuführen. Die Zungenspitze bewegt sich hier vom Velum, in zur Mitte des Mundes, dadurch wird der Resonanzraum im Mund vergrößert, der gesamte Resonanzraum in der Nase wird allerdings nicht mehr genutzt, damit fallen die höheren Frequenzen über 7000 Hz weg.

5 – Viel eindeutiger zu erkennen ist das /t/, da es einer Pause (circa 0,1 Sekunde) folgt. Bei diesem Plosiv ist in einer sehr kurzen Zeit (<0,01 Sekunde) ein sehr breites Frequenzband (0-7000 Hz) zu sehen. Fast explosionsartig wird hier der aufgebaute Druck im Mund freigelassen, so entsteht dieses breite Spektrum. Sofort danach entsteht eine, nun sehr viel kürzere, Pause, bevor das /o/ realisiert wird. Diese Pause lässt sich dadurch erklären, dass die Zunge genau diese Zeit braucht um von der Position des /t/ zu der des /o/ zu wandern.

Die Analyse eines gesamten Spektrums oder Wortes verlangt viel Vorwissen, man kann diese Spektroskopien aber auch anders nutzen. Es folgen zwei Spektrogramme, das erste ist die Aufnahme einer akustischen Kick-Drum eines Schlagzeugs, das andere ist ein Beatboxer, der versucht diese Kick-Drum mit seinem Mund zu reproduzieren. Beide Aufnahmen fanden im selben Raum mit demselben Gesangsmikrofon statt. Idealerweise würde man hier noch ein Mikrofon nehmen, das tiefere Frequenzen höher auflöst. Nichtsdestotrotz erkennt man auch hier bereits die wichtigen Unterschiede.

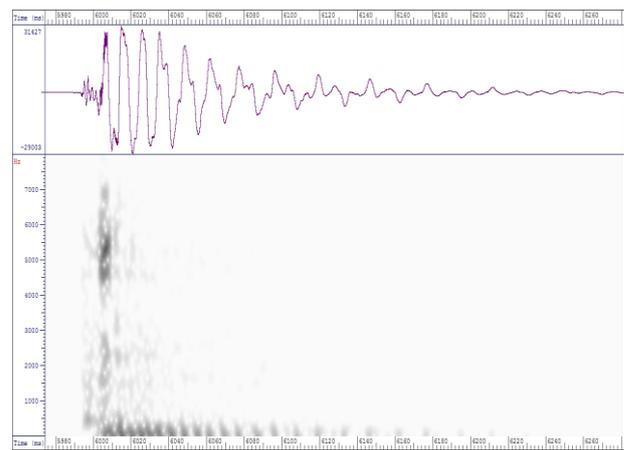


Abb. 6 – Spektrogramm einer akustischen Kick-Drum.

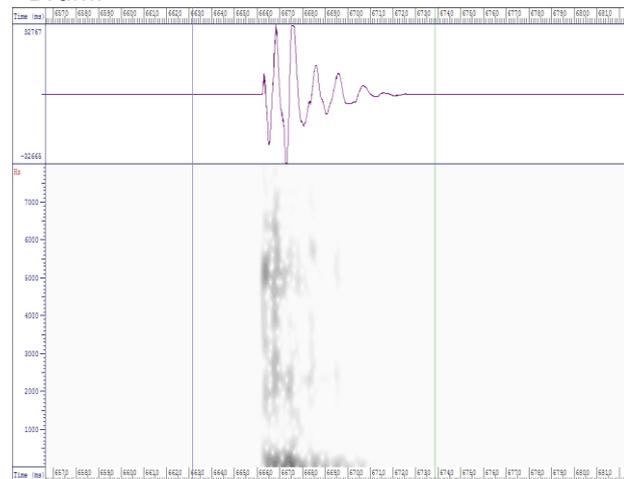


Abb. 7 – Spektrogramm eines Beatboxers, der eine Kick-Drum emuliert.

Auf den ersten Blick sind sich beide Spektren sehr ähnlich, der intensivste Streifen befindet sich bei <300 Hz, aber schwächere Spektren zeigen sich bis zu 7000 Hz. Der größte Unterschied zwischen den beiden ist in Abb. 6 zu sehen; hier zeigt sich regelmäßig und periodisch ein Frequenzband bei <300 Hz. Diese periodische Schwingung findet sich bei der menschlichen Reproduktion nicht. Diese Nachschwingung ist das Schwingen des Trommelfells am Schlagzeug, diese konnte der Beatboxer nicht reproduzieren, auch wenn der eigentliche Schlag sehr ähnlich kling und aussieht.

Diese Erkenntnis lässt auf die Beschaffenheit eines Schlagzeugs (ergo: Trommelfelle) und eines menschlichen Sprechtrakts schließen. Auch veranschaulicht dieser Vergleich, wie hilfreich es sein kann das Spektrogramm zu lesen. Bei einem Englischlernenden, zum Beispiel, könnte ein ähnlicher Vergleich des „th“ Phonems eines Muttersprachlers mit dem des Lerners aufzeigen, wo genau ein möglicher Fehler liegt.

6 Schulbezug

Hat dieser Themenbereich Platz in der Schule? Resonanz ist im Physiklehrplan der AHS verankert, aber der menschliche Sprechtrakt wird nicht explizit erwähnt. Der grundsätzliche Aufbau des Sprechtraktes, also Lunge, Kehlkopf, Mund, wird im Biologieunterricht erläutert, selten wird aber auf die wirkliche Funktionsweise, vor allem die Resonanzverstärkung im Mund, eingegangen. Hier könnten Programme wie WASP oder eSection weiterhelfen, und damit können fächerübergreifend Musik, Biologie, Informatik, Fremdsprachenunterricht und eben auch Physik zusammenarbeiten und diese Thematik erarbeiten. Gerade die Verknüpfung und Anwendung des Gelernten ist in der modernen, kompetenzorientierten Schulphilosophie verankert, genau das würde die Bearbeitung dieser Thematik erlauben.

Nicht zu vergessen ist auch der wissenschaftliche Aspekt der Methodik. Ähnliche Programme werden von Forschern in modernen Universitäten verwendet. Die möglichen Fragestellungen erlauben den Lernenden auch einen realistisch-wissenschaftlichen Zugang zur Thematik. Des Weiteren erlaubt eine Behandlung von Spektrogrammen einen Einblick in moderne Spracherkennungssysteme, die fast alltäglich geworden sind. Siri, Alexa, Google und andere Haushaltsgeräte verwenden genau diese Informationen, um zu funktionieren. Damit könnte man auch mit dem Informatikunterricht verknüpft lernen. Nicht zu vergessen ist auch der spielerische Anteil dieser Methodik. Lernende können in ihrem eigenen Tempo und in ihrer eigenen Sprache ihre eigenen Fragestellungen bearbeiten und erforschen. Die Spektroskopie erlaubt einen erforschend spielerischen Zugang zu echten physikalischen Phänomenen.

Sprache ist alltäglich, und im Sprachunterricht wird auf grammatische Strukturen und Bausteine eingegangen. Wichtig wäre es aber auch, zu verstehen wie der Ton der Sprache eigentlich entsteht. Dadurch können Lernende eine andere Perspektive auf ihre eigene Sprache erhalten und damit Unterschiede auf explizite und konkrete Faktoren zurückführen. Ein Wissen darüber, wie ein Handwerkszeug oder ein Musikinstrument funktioniert, ist für Handwerker und Musiker essenziell, genau dasselbe gilt für den Menschen und sein Instrument: Sprache.

7 Zusammenfassung

Die physikalischen Hintergründe von Sprache sind nicht nur für Linguisten relevant, sondern

auch für Schüler_innen. Die drei in diesem Beitrag behandelten Bereiche, Phonetik, Resonanz und Spektrogramme, sind allesamt im Kontext Schule anwendbar. Nicht nur das, sie bieten den Lernenden viele Möglichkeiten, sich aktiv mit etwas Alltäglichem wie Sprache wissenschaftlich auseinander zu setzen.

Aktiv zu wissen, wie und wo Töne im Mund entstehen und sich bewusst zu machen, welche Faktoren einen Einfluss auf das Sprechen haben, ist relevant für jeden Menschen. In der Schule können hier viele Verknüpfungen zu anderen Fächern, wie zum Beispiel Fremdsprachen, Biologie und Musik geschaffen werden. Auch das Thema Resonanz ist vor allem in der Musik relevant. Hier können Veranschaulichungen, wie die Berechnung der Resonanzfrequenz einer Dose, zu tieferem Verständnis des Konzeptes führen. Gerade die Resonanz ist das, was unser Sprechen zu dem macht, was es ist. Spektroskopien erlauben eine Veranschaulichung der Schallwellen, und geben damit einen Einblick in die Physik, die hinter dem Sprechakt steht. Mit Programmen wie WASP, die gratis angeboten werden, kann man schnell und einfach Aufnahmen starten und analysieren.

8 Literatur

- Benade, A. H. (1976) Fundamentals of musical acoustics, London: Oxford University Press.
- Davenport, Mike and S. J. Hannahs. 1998. Introducing Phonetics and Phonology. London: Arnold
- Howard, D. (2014) The Science of Singing. <https://www.youtube.com/watch?v=lfCCli1NFuU> (22.02.2020)
- Friedrich Schiller Universität Jena. (2020) Akustische Hohlraumschwingungen. <https://www.physik.uni-jena.de/Studium/Praktika/+H%C3%B6rsaal/Physikalisches+Grundpraktikum/Versuche/Mechanik+%28100%20125%29/121.html>