Kapitel 7: Schwingungserzeugung durch Lufsäulen

Im vorliegenden Kapitel dreht sich alles um die „Blasinstrumente“. Die Musikalische Akustik nennt sie „Luftinstrumente“ (siehe Abbildung 5.1), da der Schwingungserzeuger aus einer durch ein Rohr begrenzten Luftsäule besteht. Der elastischen, eindimensionalen Saite (siehe Kapitel 5) entspricht die elastische, eindimensionale Luftsäule. Wie die Saite ist sie zwar auch dreidimensional, ein Wesen in Raum und Zeit, aber die musikalisch relevante Schwingung ist (nur) als eindimensionale gut berechenbar und vorhersehbar.

Während die Saite ein materiell gut von der sie umgebenden Luft abgegrenztes Gebilde ist, ist eine Luftsäule als Schwingungserzeuger von der sie umgebenden Luft durch ein Rohr abgegrenzt. Das Rohr selbst schwingt nicht oder nur unwesentlich. Dies Rohr ist nicht mit dem Korpus eines Saiteninstruments zu vergleichen! Denn das Rohr ist nur zur Begrenzung der Luftsäule und nicht zur Abstrahlung da. Legt man die Hand auf den Korpus eines Saiteninstruments, so verändert sich sofort die Abstrahlung und der gehörte Klangcharakter, beim Saxophon, bei der Posaune oder beim Alphorn ändert sich durch Handauflegung nichts.

7.1. Grundlegendes zu Schallwellen

Schwingt ein Körper so, dass die Luft zu Schwingungen erregt wird, die auf das menschliche Ohr treffen, um dort Gehörsempfindungen auszulösen, so spricht man von Schall. Die Luft überträgt diesen Schall in Form von Schallwellen. Die Luftmoleküle bewegen sich im Luft-Ruhezustand wild durcheinander, allerdings statistisch gut verteilt. Dies Bewegungsdurcheinander kann man indirekt sehen, wenn Staubpartikel als in „Brown’scher Molekularbewegung“ hin- und hergeschubst in einem Sonnenstrahl erscheinen. Gemessen wird diese interne Bewegung indirekt als Luftdichte oder Luftdruck, der sich mit der Temperatur und der geographischen Lage ändert. Wenn sich die Luft als „Wind“ in eine bestimmte Richtung bewegt, so heißt das, dass das statistische Durcheinander als Gesamtpaket seine Lage im Raum ändert. Abbildung 7.1 soll nochmals verdeutlichen, dass der Blasebalg einer Orgel „Luftdruck“, aber keinen „Wiund“ erzeugt...

Abb. 7.1 Luftdruck- und Tonerzeugung bei der Orgel

Befindet sich in dieser Luft ein schwingender, materieller Körper, der die ihn unmittelbar umgebenden Luftmoleküle anstößt, so breitet sich eine entsprechende Störung aus. Von einem Punkt geht eine kugelförmige Welle aus. Die dadurch hervorgerufenen Schwankungen der Luftdichte bzw. des Luftdrucks an irgendeiner Stelle des Raumes überlagern sich der statistischen Luftmolekülbewegung

und gegebenenfalls auch dem Wind. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Störung bei Windstille ausbreitet, heißt Schallgeschwindigkeit. Sie ist mit ca. 330 m/sec (1200 km/h) relativ hoch und wird von der Windgeschwindigkeit, wie man ja aus dem Alltag weiß, nur mäßig beeinträchtigt .

Luftdruckschwankungen beeinflussen die Schallgeschwindigkeit und damit das Ausbreitungsverhalten. Bei Inversionswetterlagen, wenn zwei Schichten unterschiedlichen Luftdrucks übereinander liegen, wird der Schall an der Übergangsstelle teilweise reflektiert. In der Innenstadt von Oldenburg kann man dann die Autos des Autobahnringes so hören, als ob sie direkt an einem vorbeifahren würden.

Den Vorgang der Ausbreitung einer Schallwelle veranschaulicht Abbildung 7.2:

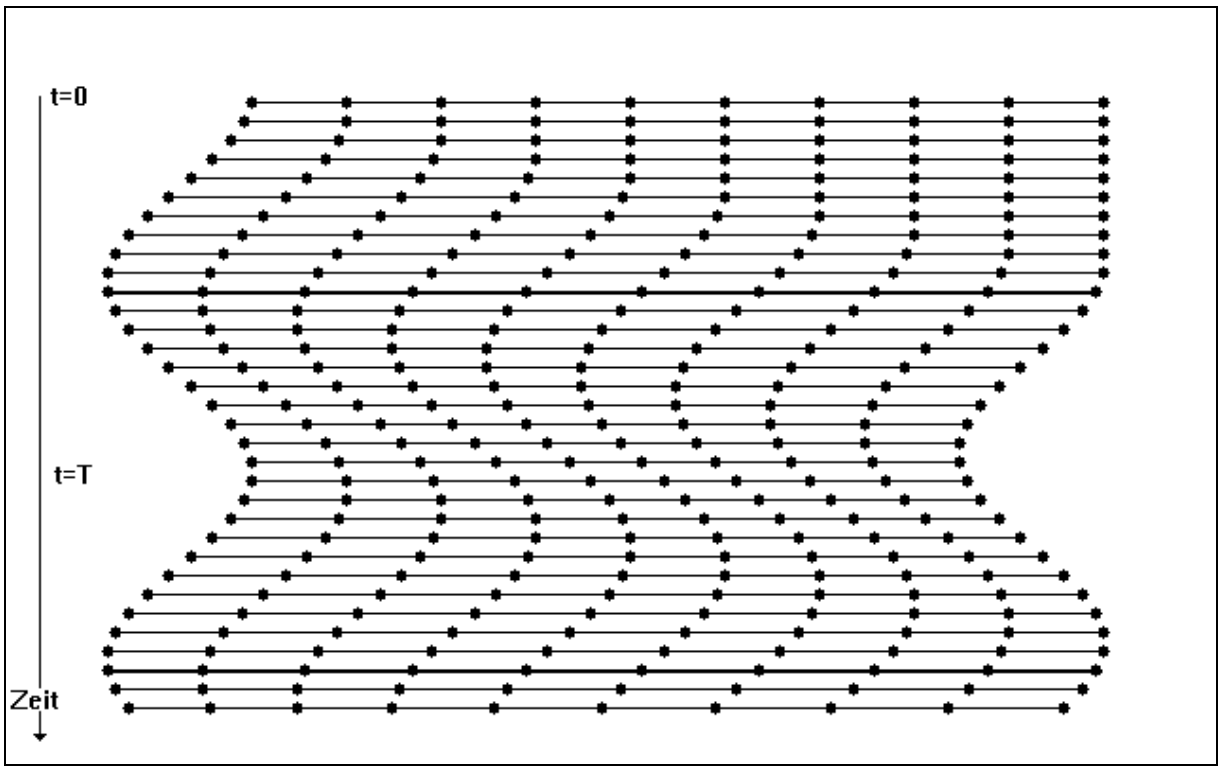


Abb. 7.2 Modell einer (1-dimensionalen) Schallwellenausbreitung

Gezeichnet sind 20 Momentaufnahmen der Moleküllage pro Periode T der anregenden Schwingung. Die statistische Bewegung der Moleküle wird vernachlässigt und wir tun so, als ob alle Moleküle wie Perlen an einer elastischen Schnur nebeneinander aufgereiht wären. Wenn das Molekül linksaußen sinusförmig hin- und herbewegt wird, so ergibt sich die dargestellte „Kettenreaktion“. Da die Moleküle elastisch und nicht entlang einer starren Stange miteinander verbunden sind, überträgt sich die Bewegung des Moleküls linksaußen nicht sofort auf alle anderen Moleküle. Diese folgen vielmehr erst nach einer gewissen Zeit der Bewegung. Hat das Molekül linksaußen eine ganze Periode T zurückgelegt, so ist die „Welle“ um eine Wellenlänge nach rechts gewandert, hat aber noch keineswegs alle Moleküle erreicht.

Es gibt in Abbildung 7.2 - wie bei allen Wellen - zwei Betrachtungsweisen: entweder man betrachtet alle Zustände eines festen Zeitpunkts (hier: die Lage der Moleküle entlang *einer* horizontalen Linie) oder man betrachtet die Bewegung der Moleküle an einem festen Ort (hier die Sinusbewegung in

vertikaler Richtung). Für das menschliche Ohr ist die letztgenannte Betrachtungsweise von Bedeutung. Die Abbildung suggeriert den Tatbestand, dass die Schwingungen an jedem Ort dieselben wie an der Schallquelle sind, dass sie dort aber zu einem anderen (späteren) Zeitpunkt stattfinden. Die Verspätung ist durch die Schallgeschwindigkeit bedingt. Wir können den Vorgang von Abbildung 7.2 überprüfen:

Experiment 7.1 Messung der Schallausbreitung

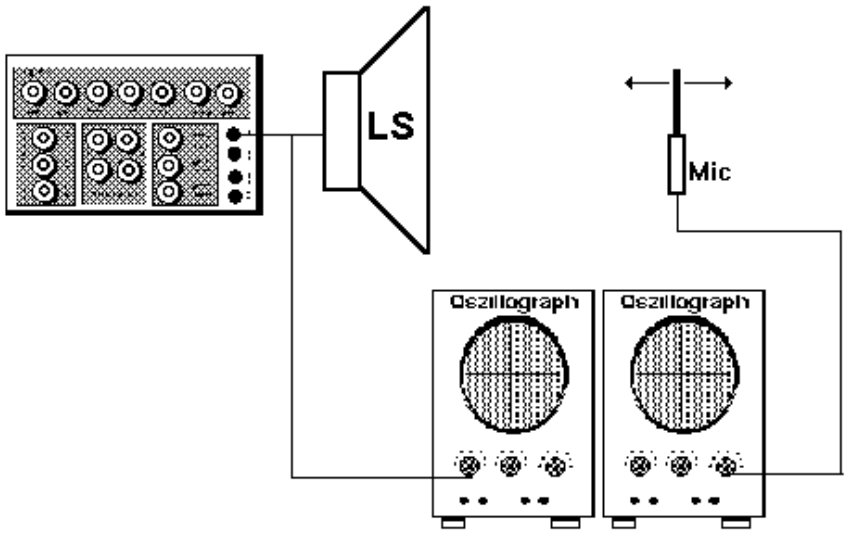


Abb. 7.3 Experiment zur Schallausbreitung

Am linken Oszillographen wird die Schwingung gezeigt, die die Lautsprechermembran vollführt, am zweiten die Schwingung, die an einer bestimmten Stelle in der Luft herrscht. Bewegt man das Sondenmikrofon (das sehr dünn ist und die Schallwelle wenig beeinflussen soll) von links nach rechts, so wandert am zweiten Oszillografen das Schwingungsbild. Man kann ausmessen, wie groß der Abstand zwischen zwei Stellungen des Sondenmikrofons ist, bei denen die beiden Schwingungen übereinstimmen. Dieser Abstand ist dann eine Wellenlänge.

Einige weitere Ergebnisse des Experiments:

- Die Form der Schwingung ändert sich nicht zwischen Lautsprecher und Mikrofon und auch nicht zwischen den unterschiedlichen Stellen des Raumes. Lediglich die Amplitude wird kleiner.
- Die Wellenlänge ist umgekehrt proportional der Frequenz. Sie ist von der Temperatur (und damit von der Schallgeschwindigkeit) abhängig. Dies ist nach Abbildung 7.2 auch logisch - genauer: zwischen Schallgeschwindigkeit c, Wellenlänge λ und Periode T (bzw. Frequenz f) besteht die Beziehung $c = \lambda/T = \lambda f$.
- Die Schallgeschwindigkeit ist unter den hier herrschenden Bedingungen nicht erkennbar von der Frequenz und der Schwingungsform abhängig.

Das Phänomen der endlichen Schallgeschwindigkeit gibt es nicht nur in Luft, sondern in allen Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern. In Festkörpern ist die Schallgeschwindigkeit ca. 10 Mal, in Flüssigkeiten ca. 5 Mal so groß wie in Gasen. Da Schall stets reflektiert wird, wenn Substanzen unterschiedlicher Geschwindigkeit aufeinander stoßen, spielen die Unterschiede der Schallgeschwindigkeit verschiedener Hölzer oder Metalle eine große Rolle für die Praxis des Instrumentenbaus. Hier eine Übersicht über einige **Schallgeschwindigkeiten**:

Substanz	*Temp. in*	*sonstiges*	*c in m/sec*
Luft	-100	1 at	263
	-10		325,3
	0		331,8
	10		337,8
	20		343,8
	30		349,8
	100		387,2
	1000		717
H_2	18	1 at	1301
O_2	0	1 at	315,4
H_2O (Seewas-	0	1 at	1440
	15	1at	1498
	0	in 3000 m Tiefe	1467
	15	in 3000 m Tiefe	1522
Eis	-4^0 C		3232
Buche		Stäbe	3400
Eiche		Stäbe	4310
Tanne		Stäbe	5260
Eisen		Stäbe	5170
Silber		Stäbe	2640

Die Wellenlängen bei Zimmertemperatur (20 Grad) und kalter Außentemperatur (-10 Grad) verhalten sich wie 343,8 : 325,3 = 1,05687. Als „Intervall“ gesehen ist dies Verhältnis fast das eines temperierten Halbtons von 1,05946 oder des reinen Halbtons 16:15 = 1,0667. Die Auswirkungen dieses Sachverhalts auf das „Kurrendeblasen“ an Weihnachten sind fatal, weil Choräle, die im „divertissanten und prächtigen“ B-Dur eingeübt wurden, urplötzlich im „mehr zu klagenden und traurigen Personen neigenden“ A-Dur erklingen (Angaben nach Mattheson/Wustmann).

Schallwellen benötigen einen *materiellen Träger*, zum Beispiel Luft oder Holz. Im Vakuum kann sich kein Schall ausbreiten. Daher hört man nichts von der Sonne oder den Pulsaren. Die Pulsare senden periodische elektromagnetische Strahlung in einem Frequenzbereich zwischen 0,25 und 625 Hz aus. Fängt man diese Schwingungen über Teleskope/Kameras ein und setzt sie in akustische Schwingungen um, so kann man diese „kosmische Musik“ real hören. Elektromagnetische Wellen (zu denen Licht- Radio-, Röntgen- usw. Wellen gehören) benötigen, um sich auszubreiten, keine Materie.

Während die Schallgeschwindigkeit in der Luft bei 340 m/sec liegt, liegt die Geschwindigkeit elektromagnetischer Wellen (= Lichtgeschwindigkeit) bei ca. 300 000 km/sec. Anwendung: Sieht man bei Gewitter den Blitz und hört 2 sec später den Donner, so war der Blitzeinschlag 2 X 340 m entfernt. Das Licht ist „sofort“ da, der Donner braucht länger. Die Wellenlängen der Schallwellen kann man nach der bereits zitierten Formel aus der Frequenz berechnen: $\lambda = c/f$. Sie liegen also zwischen 340/16 = 21,25 m und 340/16000 = 0,02125 m.

7.2. Eigenschaften von Luftsäulen als Schwingungserzeuger

Experiment 7.2

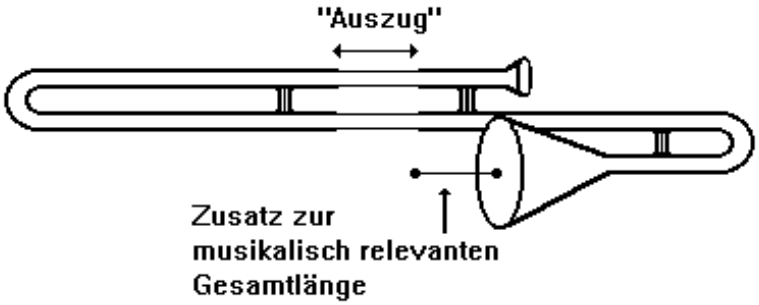


Abb. 7.4 Längenverhältniss an der Posaune

Wie in Abschnitt 5.2 beginnen wir mit einem Black-Box-Experiment. Wir nehmen eine Zugposaune zur Hand und messen den „Auszug“ für einige musikalische Intervalle. Die gesamte Verlängerung des Rohres einer Posaune ist 2 Mal der „Auszug“. Hier die Messergebnisse:

Längenunterschied ge-	***gehörtes Intervall***	***Frequenzverhältnis***	***ΔL/(I - 1) berechnet***
2 x 48 = 96 cm	Quart	4:3	288 cm
2 x 36 = 72 cm	gr. Terz	5:4	288 cm
2 x 29 = 58 cm	kl. Terz	6:5	290 cm

Die Größe $\Delta L/(I - 1)$ der letzten Spalte gibt die Länge der Grundschwingung an. Nennen wir diese L_0, so gilt ja $(L_0 + \Delta L) : L_0 = I$ und nach L_0 aufgelöst $L_0 = \Delta L/(I - 1)$. Die Posaune ist 278 cm lang, die hier ermittelte Länge beträgt 290 cm. Wir deuten das Ergebnis so, dass der Saitenlänge aus dem Monochord-Experiment annähernd die Länge der Posaune entspricht, genau genommen aber eine um 12 cm längere Größe. Die Länge der musikalisch relevanten Luftsäule ist ein bißchen größer als die Länge der Posaune. - Dies ist, anschaulich, ein vernünftiges Ergebnis, denn im Gegensatz zur Saite, die an den beiden Enden relativ exakt begrenzt ist, geht die Luftsäule im Innern des Instruments kontinuierlich in die Außenluft über. Es ist also nicht zu erwarten, dass die schwingende Luftsäule genau mit dem Trichter des Instruments endigt.

Bezeichnen wir mit „Länge“ die Länge der musikalisch relevanten Luftsäule, so gilt wie bei der Saite die wichtige Beziehung:

$$\textbf{Länge}_1 : \textbf{Länge}_2 = \textbf{Frequenz}_2 : \textbf{Frequenz}_1$$

Bei der Posaune sind die Längenänderungen am einfachsten. Andere Blechblasinstrumente haben Klappen oder Ventile, mit denen sie die effektive Länge des Instruments entsprechend einem Halbton, einem Ganzton oder einer kleinen Terz verändern können. Ein Quartventil vergrößert die effektive Länge auf 4/3 der ursprünglichen.

An Orgeln oder bei Panflöten (siehe ganz unten Abbildung 7.11) können Längenmessungen mit sehr guten Ergebnissen durchgeführt werden. Hier stimmt die musikalisch relevante Länge oft bis auf wenige Millimeter mit der tatsächlichen Länge des Rohres überein. Bei Luftinstrumenten mit Löchern ist die musikalisch relevante Luftsäule *ungefähr* so groß wie der Abstand vom Mundstück bis zum ersten geöffneten Loch, sofern keine „Gabelgriffe“ vorkommen, die die Überlegungen verkomplizieren. Abbildung 7.4 zeigt das Ergebnis von Messungen, die an unterschiedlich großen Löchern von Arthur H. Benade durchgeführt worden sind (aus: Spektrum der Wissenschaften: Die Physik der Musikinstrumente, S. 25). Je größer das Loch, um so genauer stimmen Lochabstand und musikalisch relevante Länge miteinander überein.

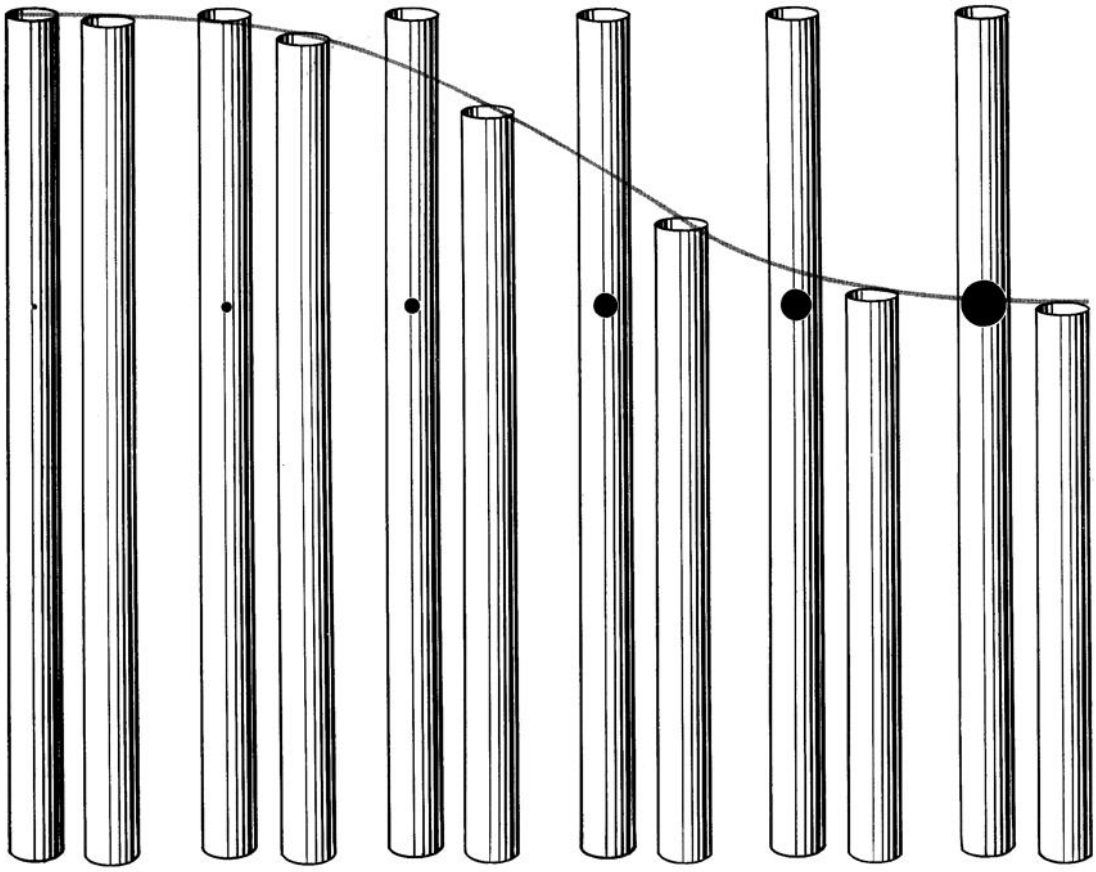


Abb. 7.5 Effektive Rohrlängen abhängig von der Größe des Loches

7.3. Im Innern der „Black Box“ Luftsäule

Im vorliegenden Abschnitt beantworten wir zwei Fragen aus dem Innern der Black Box Luftsäule:

- wie wird die Schwingung der Luftsäule erregt,
- wie funktioniert die Schwingung der Luftsäule „im Innern der Black Box“ physikalisch?

Für die **Schwingungserregung** ist das **Mundstück** zuständig. Es erzeugt, oft in Verbindung mit den Lippen, eine Schwingung, die mit dem Schnarren der menschlichen Stimmbänder vergleichbar ist:

diese Schwingung soll die Luftsäule zu Eigenschwingungen anregen, braucht selbst aber nicht schön zu sein. Im Gegenteil, je schnarrender der „Ton“ des Mundstücks ist, umso mehr Obertöne hat er und umso mehr hat er der Luftsäule anzubieten. Mundstücke produzieren ihre Schwingungen wie kleine Energieschalter, die schnelle periodische Luftstöße oder Luftwirbel von sich geben. Es gibt vier Grundtypen solcher „Schalter“:

- einfaches Rohrblatt (Prototyp Klarinette, Saxophon): ein bewegliches Blatt bewegt sich über einer festen Unterlage hin und her, die Luftstöße erfolgen wie bei einer Rechteckschwingung „auf-zu-auf-zu“ usw.;
- doppeltes Rohrblatt (Prototyp Oboe, Schalmei, Dudelsack); zwei bewegliche Blätter klappen in schneller Abfolge auf und zu und hacken dadurch einen Luftstrom ab;
- menschliche Lippen (Prototyp Trompete usw., Alphorn): die Lippen werden durch ein stabiles Kesselmundstück wie Stimmbänder gespannt, der hindurchtretende Luftstrom wird zerhackt und verwirbelt;
- Luftstrom über Schneide (Prototyp Flöten und Pfeifen aller Art): ein Luftstrom wird durch eine Schneide in zwei Hälften gespalten, die periodische Wirbel hervorrufen. Bei Blockflöten und Pfeifen wird der Luftstrom durch einen Spalt des Mundstücks sauber geführt, bei Quer- oder Panflöte müssen die Lippen der SpielerIn die Führung übernehmen.

Abb. 7.6 Griechishe Aulos = Doppeloboe. Der Spieler trägt eine Lippenbinde.

Die physikalischen Vorgänge bei den verschiedenen Arten von Mundstücken sind recht kompliziert und nicht mit so einfachen Dingen wie Zupfen, Schlagen und Streichen von Saiten zu vergleichen. Die genaue Beschreibung der Vorgänge, wie periodische Energiestöße durch Mundstücke ausgelöst werden, gehört ins Reich der Chaostheorie und der Theorie dynamischer Systeme. Ein interessantes Modell hat „Physical Modeling“ entwickelt (Abbildung 10.13). Es bestehen Wechselwirkungen zwischen den Blasvorgängen im vorderen Mundbereich und dem Mund-Rachenraum (also dem Stimmapparat) bis hinunter in Lunge und Zwerchfell einerseits und der schwingenden Luftsäule im Instrument andererseits. Erwähnenswert sind einige Beobachtungen aus der musikalischen Praxis, die direkte Rückschlüsse auf akustische Vorgänge zu ziehen erlauben:

1. Der Dudelsack „spielt“ auf Pfeifen, die wie eine Oboe aufgebaut sind. Die Doppelrohrblätter befinden sich in einem Druckbehälter. DudelsackspielerInnen üben auf „Hornpipes“, die eine einfache Druckkammer aus Holz mit Mundöffnung besitzen. Mit dem Mund wird der zur Erregung des Doppelrohrblatts notwendige Luftdruck in der Kammer aufrecht erhalten. Das Besondere ist, dass das Doppelrohrblatt-Mundstück *nicht* mit den Lippen zusammengedrückt wird und der Mundvorderraum *nicht* die „Druckkammer“ bildet. Das heißt: Lippen und Lippendruck

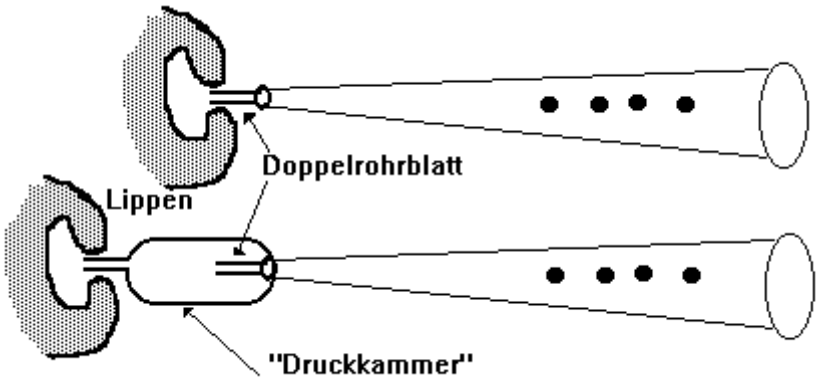


Abb. 7.7 Doppelrohrblatt benötigt die Lippen eigentlich nicht. Unten Dudelsackpfeife.

sind nicht zwingend notwendig für die Erzeugung von Doppelrohrblatt-Schwingungen.

2. Die Rohrblätter der Mundstücke schwingen, was man mit den Fingern leicht überprüfen kann. Kontaktmikrofone nehmen an den Mundstücken von Rohrblattinstrumenten Schwingungen auf und ab. Berührt man aber das Kesselmundstück eines Blechblasinstruments, so spürt man nichts, und auch ein Kontaktmikrofon bleibt stumm. Es schwingen nur die Lippen im Innern des Kessels, während der massive Metallkessel die stabile Halterung für diese Lippenbewegungen darstellt. - Dem Musikerjargon ist das Mundstück wichtiger als das Instrument, denn ein Alphorn (aus Holz mit Kesselmundstück) zählt zu den Blechblasinstrumenten.
3. Besonders bekannt geworden ist in den letzten Jahren das australische Didgeridoo (Didjeridu), bei dem es kein besonderes Mundstück gibt. Die Lippen schwingen am einen Ende eines vollkommen zylindrischen Rohrs und erregen dasselbe zu einer Oberschwingung. Das Didgeridoo zeigt, dass bei den „Lippen"-Luftinstrumenten gar kein Mundstück nötig ist, um das Rohr in sonore Schwingung zu versetzen. Allerdings ist das bei den Blechbläsern so beliebte „Überblasen" (siehe unten) beim Didgeridoo nur sehr schwer möglich.
4. Mundstücke erzeugen periodische Energiestöße und regen dadurch Luftsäulen zu Schwingungen an. Bisweilen genügt sogar ein einziger Energiestoß, um eine Luftsäule zu musikalisch verwertbaren Schwingungen anzuregen. Beispielsweise läßt sich die „Eigenschwingung" einer Weinflasche bereits dadurch feststellen, dass man mit der flachen Hand einmal auf die Flaschenöffnung schlägt: man hört einen klaren, kurzen Ton. (Bläst man über den Flaschenhalsrand, so erzeugt man periodische Luftwirbel wie bei Querflöte oder Qeña.)
5. Mundstücke sind austauschbar. So können Rohrblattmundstücke zur Erregung der Luft in Blechblasinstrumenten herangezogen werden und umgekehrt. Ein Saxophon- oder Posaunenmundstück kann auch die Luft in dem Hohlraum zwischen beiden Handflächen in musikalisch interessante Schwingung versetzen. Das Öffnen und Schließen der Handflächen erzeugt dann Wah-wah-Effekte. Es kann auch mit bloßen Lippen ohne Kesselmundstück auf Blechblasinstrumenten gespielt werden. Der Kessel dient nur dem effektiveren Einsatz der Lippen.

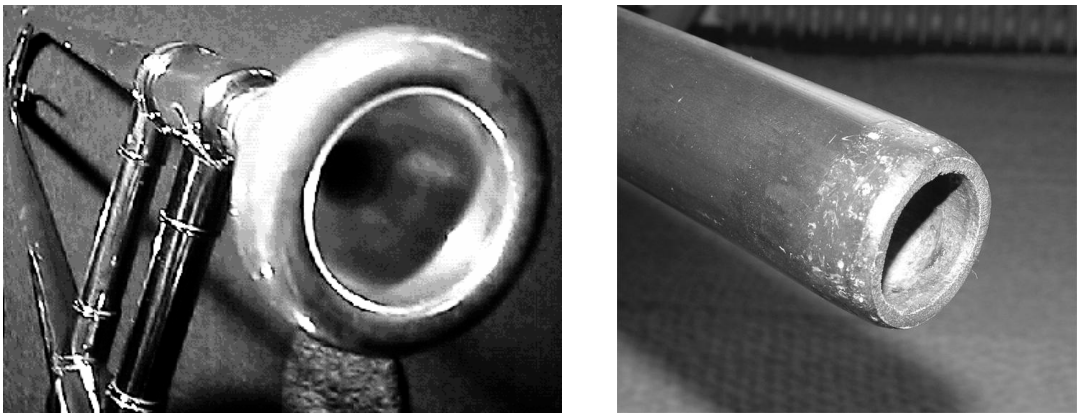


Abb. 7.8 Ein Posaunenmundstück und das mundstückfreie Ende eines Didgeridoos

Die zweite eingangs gestellte Frage betraf den physikalischen Mechanismus, nach dem die Schwingungserzeugung durch die Luftsäule abläuft. Es gibt hierfür zwei einander ergänzende Erklärungen:

Die *erste Erklärung* verläuft genauso wie bei den Saiten, es ist die Erklärung durch „**stehende Wellen**“. Abbildung 5.8 zeigte, wie sich eine Störung durch die Saite hindurch fortpflanzt, am Ende reflektiert wird und dann zu stehenden Wellen mit Knoten und Bäuchen führt. Die Störung der Saite verläuft quer zur Ausbreitungsrichtung derselben, daher spricht man auch von „Querwellen“. Bei der Luft breitet sich eine „Störung“ des Luftdrucks oder der Luftdichte kugelförmig im Raum aus - ist die Luft in eine Rohr eingesperrt, so breitet sich die Störung wie bei der Saite in nur einer Richtung aus. Am Ende des Rohres ändern sich schlagartig die Druckverhältnisse (sowohl dann, wenn das Rohr offen, als auch dann, wenn das Rohr zu ist). Diese Änderung gibt Anlaß dazu, dass ein Teil der jetzt etwas vornehmer „Schallwelle“ genannten Störung reflektiert, der andere Teil nach außen abgestrahlt wird. Der reflektierte Teil bildet mit den neu vom Mundstück nachgeschickten Störungen dann wie bei der Saite eine stehende Welle. In einem offenen Rohr haben stehende Wellen den Typ der Abbildung 7.9a, in einem geschlossenen Rohr den von Abbildung 7.9b. „Knoten“ sind hier Stellen, an denen die Luftmoleküle keine Bewegungs-Schallenergie haben d.h. die Bewegung der Ausgangswelle und der reflektierten sich gegenseitig aufheben, „Bäuche“ sind Stellen, wo maximale Bewegungsenergie vorliegt.

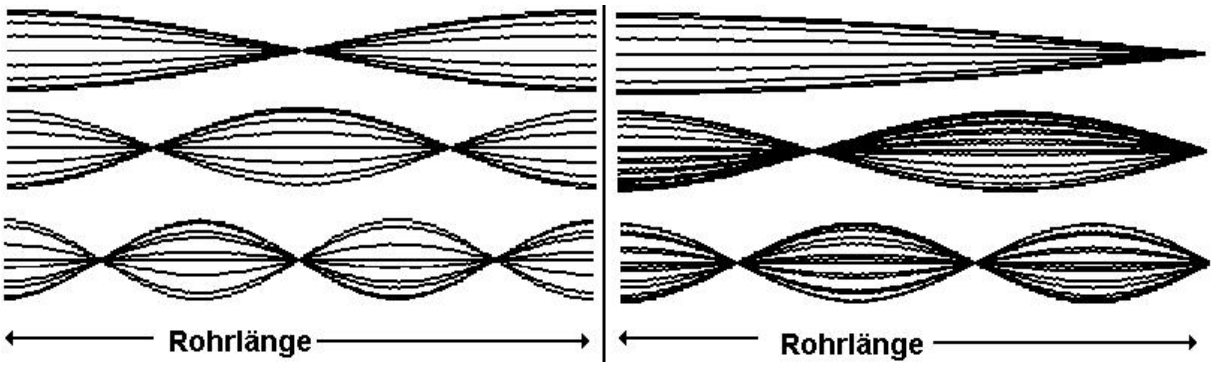


Abb. 7.9 Stehende Wellen (a) im offenen Rohr, (b) im geschlossenen (gedeckten) Rohr

In beiden Fällen ist die Wellenlänge λ einer stehenden Welle (z.B. der doppelte Abstand zwischen zwei Knotenpunkten) ein ganzzahliges Vielfache der halben oder Viertel Rohrlänge L. Wie bei der schwingenden Saite kann diese Beobachtung auch umgekehrt werden: ein Rohr kann nur in eine der hier abgebildeten Zustände gebracht werden, es erzeugt also eine Schwingung mit der zu diesen Zuständen und damit zu diesen Wellenlängen gehörenden Frequenz. Die Möglichkeiten zeigt folgende Tabelle:

offenes Rohr Gesamtlänge L	*mögliche Wellenlänge λ*	*geschlossenes Rohr Gesamtlänge L*	*mögliche Wellenlänge λ*
$L = \lambda/2$	$\lambda = 2\ L$	$L = \lambda/4$	$\lambda = 4L$
$L = \lambda$	$\lambda = 2/2\ L$	$L = 3\ \lambda/4$	$\lambda = 4/3\ L$
$L = 3\lambda/2$	$\lambda = 2/3\ L$	$L = 5\lambda/4$	$\lambda = 4/5\ L$
$L = 4\lambda/2 = 2\ \lambda$	$\lambda = 2/4\ L$	$L = 7\lambda/4$	$\lambda = 4/7\ L$
$L = 5\ \lambda/2$	$\lambda = 2/5\ L$	$L = 9\lambda/4$	$\lambda = 4/9\ L$

Der tiefstmögliche Ton, der „Grundton“ des Rohres (Instruments) liegt im Falle eines offenen Rohrs bei einer Wellenlänge, die der doppelten Rohrlänge entspricht, im Falle eines geschlossenen Rohrs bei der 4-fachen Rohrlänge. „Gedackte“ Pfeifen (= geschlossene Orgelpfeifen) sind daher nur halb so lange wie „offene“ Pfeifen. Wir berechnen die Standardlängen von Pfeifen und Instrumenten nach der Gleichung für die Schallgeschwindigkeit $c = \lambda f$. Es ist $\lambda = c/f$ und somit $2L = c/f$ oder $L = c/2f$ für offene und $4L = c/f$ oder $L = c/4f$ für geschlossene Rohre.

Tonhöhe (Frequenz)	*Instrument*	*musikalisch relevante Rohrlänge*
CC (32 Hz)	Orgelpfeife offen	5,3 m
CCC (16 Hz)	Orgelpfeife geschlossen	5,3 m
F (44 Hz)	Alphorn	3,86 m
B (58 Hz)	Posaune (offen)	2,93 m
b (116Hz)	Klarinette (geschlossen)	0,73 m
a’ (440 Hz)	Stimmpfeife (geschlossen)	0,19 m

Eine *zweite Erklärung* beschreibt die harmonische Art, in der Luftsäulen schwingen, durch „**Resonanzeffekte**“. Danach hat ein Hohlraum, insbesondere der Raum innerhalb des Rohres, bestimmte Resonanzfrequenzen, die sich empirisch feststellen lassen:

Experiment 7.3

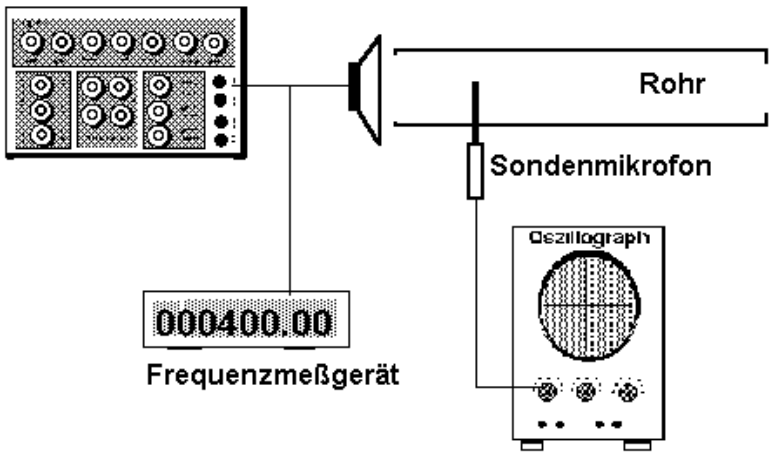


Abb. 7.10 Resonanzexperiment am Rohr

Wir senden über einen Kleinen Lautsprecher (z.B. die Muschel eines Kopfhörers) in ein Rohr eine beliebige Schwingung. Die Frequenz f dieser Schwingung ist veränderbar. Im Rohr ist ein Loch für ein Sondenmikrofon. Wir kontrollieren über ein Oszilloskop die Schwingung im Rohr und messen über ein Frequenzmeßgerät die jeweilige Frequenz.

Beobachtungsergebnis:

- Bei Vielfachen der halben Frequenz der die Luft im Rohr anregenden Schwingung beobachten wir sehr starke Schwingungen derselben Frequenz der Luft im Rohr. Dies sind die Resonanzfrequenzen des Rohrs.

- Die Resonanzfrequenzen sind dieselben Frequenzen, die sich auch durch die Erklärung mittels stehender Wellen ergeben. Für den Zusammenhang von Rohrlänge und Resonanzfrequenz gilt also beim offenen Rohr $f_{Resonsnz} = c/2L$ (= c/λ).
- Die Schwingungsform im Rohr ist überwiegend sinusförmig, unabhängig davon, welche Form die anregende Schwingung gehabt hat. Die Resonanz spricht offensichtlich auf Obertöne der anregenden Schwingung an.

Schlußbemerkung: Die beiden Erklärungen des Schwingungsmechanismus einer Luftsäule - durch stehende Wellen und Resonanz - sind im Grunde zwei Arten, dasselbe Phänomen zu beschreiben und zu benennen. Die „stehenden Wellen" erklären, warum es Resonanzen gibt, und das Resonanzverhalten ist eine makroskopisch-ganzheitliche Folge der stehenden Wellen.

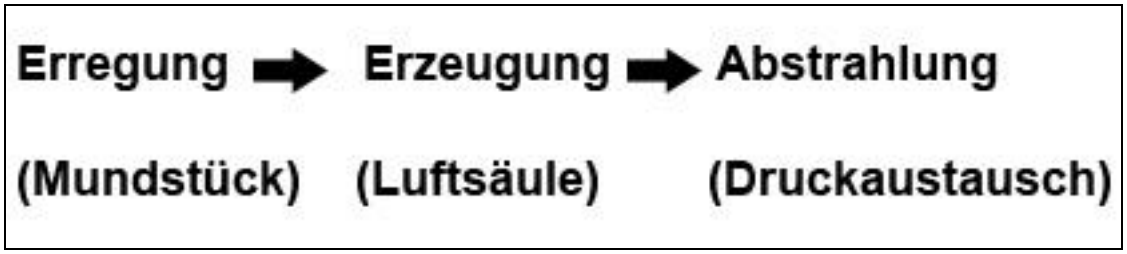
7.4. Funktion des Instrumentenkorpus und spieltechnische Eigentümlichkeiten von Luftinstrumenten

Wie schon angedeutet, hat der Instrumentenkorpus der Luftinstrumente eine andere Funktion als der der Saiteninstrumente. Während der Korpus dort nicht nur der „Halterung" der Saiten, sondern auch der Abstrahlung der Schwingung diente, hat hier der Korpus wenig mit der Abstrahlung zu tun. Im Gegenteil: ein „guter" Korpus hält die Luftsäule fest zusammen, schwingt also selbst nicht und strahlt daher auch nicht ab. Die Abstrahlung erfolgt bei den Luftinstrumenten vielmehr durch einen ziemlich diffusen (und chaotischen) Austausch zwischen Luft im Innern des Instruments und Außenluft. Dieser Austausch findet am „Schalltrichter", der primären Öffnung des Rohrs, an den Schallöchern (falls vorhanden) und am Mundstück (falls möglich) statt. dass die Abstrahlung „diffus" ist, weiß man aus der musikalischen Praxis, die sich oft schwer akustisch exakt erklären läßt:

- Ein Trompetendämpfer „verstopft" die vollständige Abstrahlung und ändert dadurch die Klangfarbe (den Obertongehalt). Er ändert aber kaum die Tonhöhe, d.h. die musikalisch relevante Rohrlänge. Ein vergleichbarer, nicht einmal zu krasser Vorgang ist das „Stopfen" des Waldhorns, bei dem die SpielerIn die Hand in den Schalltrichter einführt: hier ändert sich auch die Tonhöhe (was bei Naturhörnern zu Mozarts Zeiten der Zweck des Stopfens war).
- Klarinette und Saxophon haben dasselbe Mundstück, die Rohre sind aber unterschiedlich geformt (Klarinette zylindrisch, Saxophon parabolisch). In der Klarinette entstehen stehende Wellen wie am geschlossenen Rohr, beim Saxophon wie im offenen Rohr: eine Klarinette, die gleich lang ist wie ein Saxophon klingt eine Oktav tiefer. Wie strahlen beide Instrumente ab, wenn beim einen ein Geschwindigkeitsknoten, beim andern ein Geschwindigkeitsbauch am Schalltrichter ist? Und warum ist das so?
- Die Abstrahlung erfolgt bei Trompete und Posaune für Frequenzen bis ca. 500 Hz in alle Richtungen (= 360^0), während sie bei höheren Frequenzen gebündelt nur noch einen engen Winkelbereich erreicht. Dies zeigt, dass die Hauptabstrahlung nicht durch das Blech, sondern den Schalltrichter erfolgt. Bis 500 Hz gehen die Schallwellen „um die Ecke", weil sie länger als 68 cm, und somit größer als das Instrument sind.

Die Luftsäule kann theoretisch *alle* stehenden Wellen ausbilden, die im Rohr Platz haben. Bei der Saite ergaben alle stehenden Wellen zusammen die Grundschwingung, die ja aus Obertönen zusammengesetzt ist. Wie aber durch den Trick des flageoletts (siehe Abschnitt 6.1) eine Saite sprungartig in eine einzelne Oberschwingung springen konnte, so kann auch ein Rohr durch Öffnen eines Loches an geeigneter Stelle sprunghaft „überblasen" werden. Die Tatsache, dass aber auch *ohne* Öffnung

geeigneter Löcher allein durch eine Änderung des Anblasedrucks oder der Lippenstellungen ein „**Überblasen**“ möglich ist und die dabei entstehende Schwingung auch nicht - wie beim flageolett - sinusförmig, sondern sehr obertonreich ist, gehört wieder zu den vielen „chaotisch-diffusen“ Fähigkeiten der Luftinstrumente. Erklärbar ist das Überblasen ohne Zuhilfenahme eines Loches nur durch die Tatsache, dass es zwischen der Schwingung des Mundstücks und des Rohres eine intensive Wechselwirkung gibt. Dies geht so weit, dass einige Akustiker bei den Luftinstrumenten nicht das im vorliegenden Scriptum entwickelte Modell



vertreten, sondern das Mundstück als Schwingungserzeuger betrachten, der das Rohr in Resonanzschwingungen versetzt. Die vom Mundstück erzeugte Frequenz muß dann auf die Resonanzfrequenzen des Rohrs „sorgfältig abgestimmt“ werden (Walther Krüger im „neuen“ MGG aus dem Jahr 1996, Band 5, Spalte 215).

Wie dem auch sei, alle Luftinstrumente können nicht nur ihren Grundton, sondern auch durch Überblasen weitere Obertöne, genannt „**Naturtöne**“ erzeugen. Oft, wie bei der Posaune oder der Bachtrompete, liegt der Grundton so tief, dass er musikalisch gar nicht genutzt und spieltechnisch kaum erzeugt werden kann. Die meisten Luftinstrumente funktionieren wie offene Rohre und erzeugen daher Naturtöne der Wellenlängen L/2, L, 3L/2, 4L/2, 5L/2, usw. Die Wellenlänge des Grundtons ist daher die halbe musikalisch relevante Länge des Instruments. Lediglich die Klarinette (und analog gebaute Instrumente) funktionieren wie ein geschlossenes Rohr und erzeugen Naturtöne der Wellenlängen L/4, 3L/4, 5L/4, 7L/4 usw. Die Wellenlänge des Grundtons ist ein Viertel der musikalisch relevanten Länge des Instruments und es kann nur in die ungeradzahligen Obertöne überblasen werden. Ein Beispiel:

- Eine B-Posaune mit Grundton BB (58 Hz) ist 2,93 m lang und kann die Naturtöne BB-B-f-b-d’-f’-as’-b’-c“-d“ usw. hervorbringen..)
- Eine B-Klarinette mit Grundton b ist nicht halb, sondern nur ein Viertel so lange wie die Posaune, also 73 cm. Sie erzeugt die Naturtöne b-f“-d^3-as^3 usw.

Ohne Klappen oder Ventile kann ein Luftinstrument nur Naturtöne spielen. Betrachtet man die Obertonreihe (Abbildung 6.4 und 7.10) und geht davon aus, dass ein solches „Naturinstrument“ die untersten 12 Naturtöne hervorbringt, so wird deutlich, warum (Natur-)Trompeten- oder Fanfaren-Musik nach Dreiklangsbrechung und Quartsprüngen klingt. Wollte kurz vor der Erfindung der Klappen/Ventile für die Blech-Luftinstrumente ein Komponist dennoch ganze diatonisch oder chromatische Melodien auf Trompeten spielen lassen, so mußte er

- den Grundton der Trompete so tief wie möglich legen,
- die Mensur des Instruments und das Mundstück so eng machen, dass möglichst hohe Naturtöne hervorgebracht werden können, und
- von den Trompetern noch eine gewisse Fähigkeit im Tricksen verlangen,
- sofern er nicht ein kleines Hilfsloch ins Blech bohren wollte.

Betrachten wir eine Fragmente aus einer prototypische Naturtrompetenstimme:

Abb. 7.11 Fragmente aus der Trompetenstimme des 2. Brandenburgischen Konzerts von J. S. Bach

Diese Passage soll auf einer Bachtrompete gespielt werden, denn sie ist auch von Bach komponiert. Die Trompete ist in F gestimmt und kann - theoretisch - folgende Naturtöne erzeugen:

Bachs *Blue Notes*!

Abb. 7.12 Welche Töne der Trompete im 2. Brandenburgischen Konzert von Bach sind Blue Notes? In welcher Richtung muss ein Trompeter modulieren, damit das Konzert nicht nach Jazz klingt?