

Jonathan Lichtenfeld

2015

Physikalisch-mathematische Grundlagen der Intonation auf
Blechblasinstrumenten

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
2. Physikalische Grundlagen	4
2.1 Tonerzeugung	4
2.2 Obertöne	4
2.3 Tonhöhenänderung	5
3. Stimmungssysteme	6
3.1 Reine Stimmung	7
3.2 Gleichstufige Stimmung	8
4. Ventillose Instrumente	9
5. Ventilinstrumente	9
5.1 Funktionsweise	9
5.2 Problematik bei Ventilkombinationen	10
6. Ansätze zur Lösung des Intonationsproblems	11
6.1 Intonationszüge	11
6.2 Korrektions- und Kompensationsventile	11
6.3 Umstimmhebel	12
7. Weitere Einflussfaktoren	13
7.1 Mensur	13
7.2 Mundstück	14
8. Schlusswort	14
9. Anhang	15
9.1 Interview mit Metallblasinstrumentenbauer Christoph Endres am 29.10.2014	15
9.2 Tabellenanhang	16
9.3 Literaturverzeichnis	17
9.4 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	18

1. Einleitung

Gleich zu Beginn seiner Musikerkarriere lernt ein jeder Trompetenanfänger folgendes: Das d und cis müssen „ausgezogen“ werden, da sie zu hoch sind. „Ausziehen“ bedeutet, dass man die Tonhöhe mit einem Hilfszug nachreguliert. Wenn manche Töne zu hoch oder zu tief klingen, liegt dieser Unsauberkeit in der Intonation aber nicht etwa ein Baufehler zugrunde; aus physikalischer Perspektive kann eine normale Trompete nicht immer richtig intonieren. Bei Nachforschungen kommt außerdem die Frage auf, was denn „richtig intonierend“ bedeutet, da man, ein Bezugssystem benötigt, um die Intonation vergleichen und bewerten zu können.

In dieser Arbeit versuche ich zu erklären, wovon die Intonation, sprich die genaue Festlegung der Tonhöhe, beeinflusst wird. Die bautechnischen und musiktheoretischen Hintergründe werden dargelegt. Dafür ist es unerlässlich, erst einige grundlegende Sachverhalte der Tonerzeugung und Tonregulierung zu erläutern. Im weiteren Verlauf unterscheide ich zwischen den ventillosen Instrumenten wie der Posaune oder auch der historischen Naturtrompete und den Ventilinstrumenten. Bei letzteren wird das Thema Intonation komplex; in einer tabellarischen Übersicht stelle ich zwei Stimmungssysteme der tatsächlichen Intonation auf einer Trompete gegenüber. Die letzten Jahrhunderte lieferten einige Innovationen im Metallblasinstrumentenbau, mit denen man Intonationsfehler auszugleichen versuchte; auch wenn viele heute kaum noch genutzt werden, sollte darauf hingewiesen werden. Schließlich bleibt auch der Einfluss von Mundstück und Mensur auf die Tonhöhe nicht unerwähnt.

Diese Arbeit handelt von physikalischen und mathematischen Zusammenhängen, die in der Praxis nicht immer relevant sind, da man sein Instrument auch ohne Hintergrundwissen gut beherrschen kann. Regelmäßiges Üben ist der effektivste Weg zu besserer Intonation. Dennoch ist die Kenntnis der physikalischen Abläufe im Instrument und der mathematischen Tonbeziehungen auch für Musiker nützlich.

2. Physikalische Grundlagen

2.1 Tonerzeugung¹

Die Funktionsweise von Musikinstrumenten lässt sich stark vereinfacht in die zwei Bereiche Generator und Resonator unterteilen. Der Generator erzeugt eine Schwingung, die vom Resonator verstärkt wird. Bei Streichinstrumenten bilden die Saiten den Generator und der Korpus den Resonator. Im Gegensatz dazu ist der Generator bei den Blechblasinstrumenten kein Bestandteil des Instrumentes, sondern die menschlichen Lippen. Diese öffnen und schließen sich durch den Luftfluss periodisch, wodurch sie Luftstöße in das Rohr schicken. Es bildet sich eine Longitudinalwelle² von abwechselndem Überdruck und Unterdruck, die am Schallbecher reflektiert wird. Wenn sich die hin- und rückläufigen Wellen überlagern, liegen immer an derselben Position Druckmaxima und Druckminima, weswegen man von einer stehenden Welle spricht. Die Punkte mit maximalem Druck werden als Wellen- bzw. Druckbäuche bezeichnet, die Punkte mit minimalem Druck als Wellen- bzw. Druckknoten. Wird der Schalldruck der Welle an die Umgebungsluft abgegeben, hört man einen Ton.³

2.2 Obertöne

Eine sinusförmige Welle erzeugt einen sinusförmigen Ton. Nun gibt es in der Natur aber keinen reinen Sinuston, da sich immer Teilschwingungen im schwingenden Medium ausbilden.⁴ Zusätzlich zur Grundschwingung schwingt die Luftsäule (die Saite, der Stab) zur Hälfte, zu einem Drittel usw. (die Welle hat mehr Wellenknoten und Wellenbäuche); umgekehrt proportional dazu erhöht sich die Frequenz auf das Doppelte, Dreifache usw. Jede dieser Schwingungen, deren Anzahl sich theoretisch bis ins Unendliche fortsetzt, ist ein ganzzahliges Vielfaches der Grundschwingung. Die Gesamtheit der Schwingungen, das Obertonspektrum, ergibt einen Klang.⁵

¹ Zum Folgenden vgl. Hemminger 2003, S. 9f.

² Longitudinalwellen schwingen parallel zu ihrer Ausbreitungsrichtung. Senkrecht dazu schwingende Wellen nennt man Transversalwellen.

³ Streng genommen müsste hier zwischen offenen und einseitig geschlossenen Röhren unterschieden werden. Dies hat jedoch in erster Linie Einfluss auf die spielbaren Naturtöne.

⁴ Vogel 1976, S. 45f.

⁵ Obertöne werden auch als Partialtöne bezeichnet. Die Zählweise ist jedoch unterschiedlich: Der 1. Partialton entspricht der Grundschwingung, der 1. Oberton dagegen der 1. Oberschwingung. Vgl. Stauder 1999, S. 27

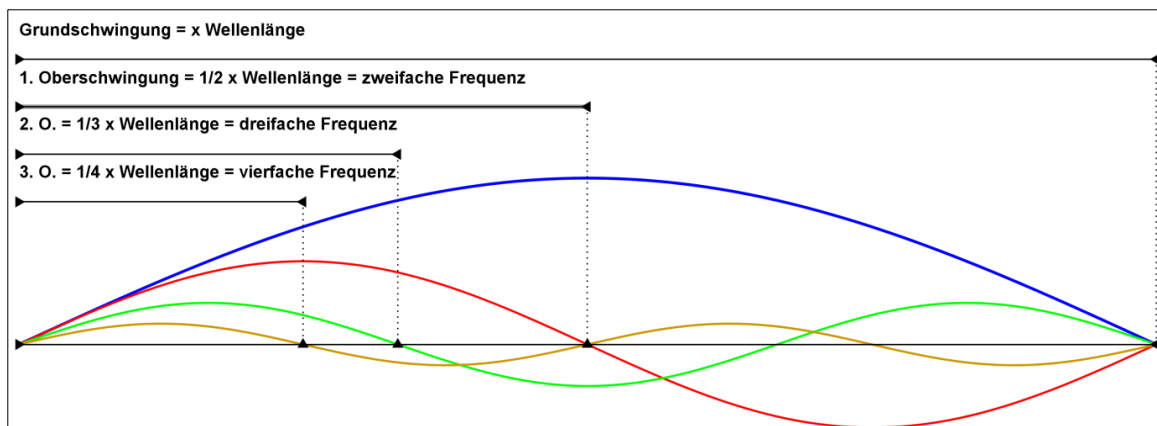


Abb. 1: Welle mit den ersten drei Oberschwingungen

Die Obertöne bilden jeweils ein bestimmtes Intervall zum Grundton. So entspricht die doppelte Grundschwingung der Oktave und die dreifache Grundschwingung der Duodezime (s.u.).

2.3 Tonhöhenänderung

Die Frequenz eines Tones wird mit der Formel $f = \frac{c}{\lambda}$ berechnet, wobei die Konstante c der Schallgeschwindigkeit in der Luft (ca. 343 m/s) und λ der Wellenlänge entspricht. Um die Tonhöhe zu ändern, muss folglich die Wellenlänge geändert werden. Dazu gibt es zwei Möglichkeiten: zum einen das Ausziehen eines Zuges wie bei der Posaune oder das Zuschalten von Ventilen, die die schwingende Luftsäule um die Länge der Ventilzüge erweitern; zum anderen die besonders bei Blechbläsern wichtige Technik des Überblasens. Beim Überblasen wird durch höheren Luftfluss erreicht, dass ein Ton des Obertonspektrums als Grundton erklingt. Die auf einem Instrument hervorgebrachten Obertöne nennt man Naturtöne. Ein Instrument mit Grundton C hat folgende Naturtonreihe:

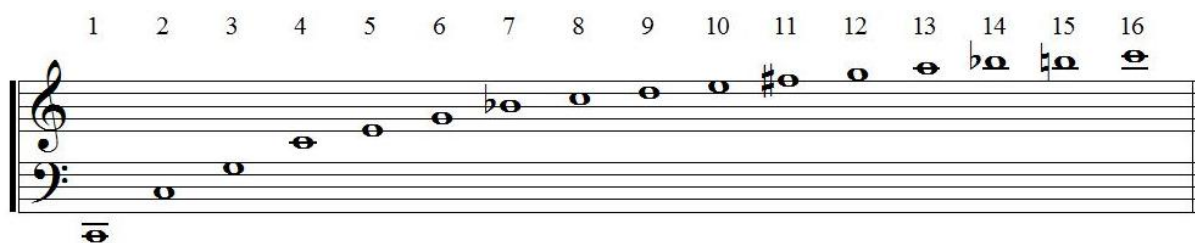


Abb. 2: Naturtonreihe über dem beliebig gewählten Grundton C

Diese Töne können also allein durch höheren Luftdruck und eine erhöhte Lippenspannung hervorgebracht werden. Die in der Abbildung mit Vorzeichen versehenen Töne entsprechen keinem Ton unseres Notensystems (s.u.).

3. Stimmungssysteme

Oft heißt es, ein Ton sei „zu hoch“ oder „zu tief“ bzw. ein Intervall „unsauber“. Dieser Sprachgebrauch ist im Grunde genommen unzutreffend, da es verschiedene Definitionen von „stimmenden“ Intervallen gibt. Der Begriff der musikalischen Stimmung beschreibt „[...] die Festlegung der relativen Tonhöhe, d. h. der Zahlenverhältnisse der Schwingungen der Töne untereinander [...]“.⁶

Seit Jahrtausenden entwickelten Menschen auf der ganzen Welt eine Vielzahl von solchen Stimmungssystemen. Im Folgenden werden die zwei, die für Blechbläser im speziellen und für die heutige Zeit im Allgemeinen am wichtigsten sind, vorgestellt. Vorab ist eine kurze Einführung in das Rechnen mit Intervallen sinnvoll:⁷

In der Musiktheorie gibt man nicht nur die absolute Tonhöhe in Hertz an, sondern verwendet Verhältniszahlen, die die Beziehung zweier Töne eines Intervalls angeben. Hat eine Quinte das Verhältnis $\frac{3}{2}$, so hat der höhere Ton die 1,5-fache Frequenz des tieferen. Die Verhältnisse der Intervalle sind, wie gesagt, je nach Stimmungssystem unterschiedlich, nur die Oktave $\frac{2}{1}$ bleibt in der Regel gleich.

Intervalle werden addiert, indem man ihre Frequenzverhältnisse multipliziert

$$\text{Oktave} + \text{Quinte} = \frac{2}{1} \times \frac{3}{2} = \frac{3}{1},$$

und subtrahiert, indem man ihre Frequenzverhältnisse dividiert

$$\text{Oktave} - \text{Quinte} = \frac{2}{1} \div \frac{3}{2} = \frac{4}{3}.$$

Alternativ kann man Intervalle in Cent angeben. Eine Oktave ist auf 1200 Cent festgelegt. Davon werden logarithmisch alle übrigen Intervalle berechnet. Eine kleine Terz $\frac{6}{5}$ hat $1200 \times \log_2 \frac{6}{5} \approx 316 \text{ Cent}$, die Quinte $1200 \times \log_2 \frac{3}{2} \approx 702 \text{ Cent}$. Das Centsystem hat den Vorteil, dass rein additiv gerechnet wird: $\text{Oktave} - \text{Quinte} = 1200 \text{ Cent} - 702 \text{ Cent} = 498 \text{ Cent}$. Angaben in Cent „[...] sind keine Verhältnismaße, sondern Größenmaße.“⁸

⁶ Art „Stimmung“, in: Der Große Brockhaus 1984, Bd. 21, S. 97

⁷ Vgl. zum Folgenden Stauder 1999, S. 181, sowie S. 190f. ebd.

⁸ Kunitz 1960, S. 13

3.1 Reine Stimmung⁹

Setzt man die bereits eingeführten Obertöne in eine Oktavlage, so erhält man vom Grundton ausgehend Intervalle mit relativ kleinen ganzzahligen Brüchen, die in unseren Ohren sehr angenehm und sauber klingen. Es ergeben sich folgende Verhältnisse:

Oktave	Quinte	Quarte	Große Terz	Kleine Terz	Großer Ganzton	Kleiner Ganzton	Diatonischer Halbton
$\frac{2}{1}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$

Tabelle 1: Aus der Obertonreihe abgeleitete Intervalle¹⁰

Indem man Quinte und große Terz kombiniert verwendet, erhält man nach Oktavieren in die richtige Lage ein System mit reinen Intervallen, auf dem die sogenannte didymische¹¹ Skala beruht. Das d_1 z. B. entsteht durch Addition zweier Quinten abzüglich einer Oktave:

$$\left(\frac{3}{2}\right)^2 \div \frac{2}{1} = \frac{9}{8}$$

Folgende Tabelle zeigt die didymische diatonische¹² Skala in C-Dur:

c_1	d_1	e_1	f_1	g_1	a_1	h_1
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$

Tabelle 2: Frequenzverhältnisse der didymischen Skala in C-Dur

Die Moll-Skala gebraucht die Terz $\frac{6}{5}$, die Sexte $\frac{8}{5}$ und die Septime $\frac{9}{5}$.¹³ Die Töne, die weder in C-Dur noch in c-moll enthalten sind, können aus den Skalen, die auf die Töne der C-Skalen aufbauen, entnommen werden. Somit erhält man eine zwölfgeteilte Oktave in chromatisch-reiner Stimmung:

C-Dur/c-Moll chromatisch	c_1	des_1	d_1	es_1	e_1	f_1	fis_1	g_1	as_1	a_1	b_1	h_1
Frequenzverhältnis zum Grundton	1	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{45}{23}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{8}{5}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{9}{5}$	$\frac{15}{8}$

Tabelle 3: Erweiterte reine Skala von C-Dur und c-moll

⁹ Vgl. zum Folgenden Levy 1997, Kapitel „Die natürliche Stimmung“, sowie Stauder 1999, S. 184f

¹⁰ Vgl. Litzow 2007, S. 27f

¹¹ Benannt nach dem griechischen Musiktheoretiker Didymos aus Chalkenteros (65 v. Chr. – 10 n. Chr.), ebd.

¹² Diatonik bezeichnet einen „[...] spezifische[n] Wechsel von Ganz- und Halbtonstufen [...]“, dtv-Atlas Musik, S. 85

¹³ Frosch 1993, S. 103

Das Spielen mit reinen Intervallen war und ist das Ziel vieler Musiker und Instrumentenbauer, obgleich die obige Skala nicht fehlerlos war - rechnerisch lassen sich „Ungenauigkeiten“ zwischen den Intervallen feststellen. Vier Quinten entsprechen (nach dem Oktavieren) nämlich nicht, wie man es vom Klavier gewohnt ist, der großen Terz: $\frac{3^4}{2} \times \frac{1^2}{2} = \frac{81}{64}$ anstelle von $\frac{5}{4}$. Deren Differenzverhältnis $\frac{81}{64} \div \frac{5}{4} = \frac{81}{80}$ nennt man das syntonische Komma, die Differenz des großen und kleinen Ganztons beträgt ebenfalls ein syntonisches Komma. Wegen ihrer Abhängigkeit von der Obertonreihe kann ein Instrument mit festgelegten Tonhöhen immer nur für eine Tonart verwenden. Denn bei einem Wechsel des Grundtons wechselt auch die dazugehörige Obertonreihe und man erhält womöglich für ein und denselben Ton unterschiedliche Werte, je nach dem, von welchem Grundton ausgegangen wird. Für das Modulieren¹⁴ gilt: „Bei einer Modulation in eine Nachbarart (Dur oder Moll) ändern sich zwei Töne, einer davon erkennbar mit Vorzeichenwechsel, der andere geringfügig um ein syntonisches Komma.“¹⁵ So schön die reine Stimmung auch klingt, so schwierig ist ihre praktische Durchsetzung; auf Instrumenten mit genau festgelegten Tonhöhen ist sie nur in einer Tonart realisierbar. Es gibt viele mehr oder weniger komplizierte Stimmungsvarianten, die die reinen Intervalle auf unterschiedliche Art abändern, so dass mehr Tonarten akzeptabel klingen. Bei einem Versuch, der reinen Stimmung so nahe wie möglich zu kommen, wurde sogar eine Temperatur entwickelt, die 171 Töne innerhalb einer Oktave beinhaltet¹⁶. Natürlich ist dergleichen nur für die Theorie interessant.

3.2 Gleichstufige Stimmung

Die gleichstufige Stimmung teilt die Oktave in zwölf gleichgroße Teile. Jeder der zwölf Halbtöne beträgt $\frac{12\sqrt[12]{2}}{1} \approx 1,059$ oder 100 Cent. Eine chromatische Skala über eine Oktave ist in Tabelle 4 dargestellt:

Ton	c ₁	cis/ des ₁	d ₁	dis/ es ₁	e ₁	f ₁	fis/ ges ₁	g ₁	gis/ as ₁	a ₁	ais/ b ₁	h ₁
Frequenzverhältnis	1	$\frac{1}{2^{1/12}}$	$\frac{2}{2^{1/12}}$	$\frac{3}{2^{1/12}}$	$\frac{4}{2^{1/12}}$	$\frac{5}{2^{1/12}}$	$\frac{6}{2^{1/12}}$	$\frac{7}{2^{1/12}}$	$\frac{8}{2^{1/12}}$	$\frac{9}{2^{1/12}}$	$\frac{10}{2^{1/12}}$	$\frac{11}{2^{1/12}}$
Centwert	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100

Tabelle 4: Frequenzverhältnisse und Centwerte der gleichstufigen Skala in C

¹⁴ Modulation = Tonartwechsel

¹⁵ Wikipedia, Artikel „Modulation bei reiner Stimmung“ http://de.wikipedia.org/wiki/Modulation_bei_reiner_Stimmung (Stand: 1.11.2014)

¹⁶ Eine Darstellung des 171-tönigen Systems findet sich bei Vogel 1975, S. 335.

Wegen der einheitlichen Intervalle sind alle Tonarten in gleicher Qualität spielbar und „[...] können enharmonisch vertauscht werden[...]“¹⁷, darum auch die doppelten Halbtonbezeichnungen in der Tabelle. Im Gegenzug besitzt die gleichstufige Stimmung außer der Oktave gar kein reines Intervall mehr (siehe Tabelle 2); diese Abweichungen sind der Preis für die einfache Handhabung. Heutzutage werden Tasteninstrumente überwiegend gleichstufig gestimmt.

4. Ventillose Instrumente

Als Naturtrompeten werden Trompeten ohne Klappen, Löcher oder Ventile bezeichnet, wie es sie noch bis um 1700 ausschließlich gab.¹⁸ Naturtrompeten steht nur die Naturtonreihe zur Verfügung, weshalb diatonische Melodien „[...] erst etwa vom c_2 an möglich [...]“¹⁹ sind. Die spielbaren Töne sind zwar insofern „rein“, dass sie im Obertonspektrum enthalten sind, doch wie Abb. 2 zeigt, stimmen u.a. der 7., 11. und 13. Naturton nicht mit den uns bekannten Tönen überein. Sie stellen ein neues Intervall dar, das nicht aus den bisher bekannten Intervallen zusammensetzbar ist und finden in der herkömmlichen abendländischen Musik quasi kaum Verwendung.²⁰ Die Abweichung zum gewünschten Ton musste mit dem Ansatz korrigiert werden, was zu einer Verschlechterung der Klangqualität führt. Naturtrompeten gab es für gewöhnlich in den Grundstimmungen B, D und F; durch austauschbare Bögen verschiedener Länge ließen sich noch manche andere Stimmungen erreichen.²¹

Die Posaune basiert ebenfalls auf der Naturtonreihe, jedoch kann die Länge der Luftsäule, sprich der Grundton, mit dem Zug reguliert werden. Das Ausziehen des Zuges vertieft den Grundton und damit auch alle Naturtöne. Das ermöglicht eine stufenlose Intonation.

5. Ventilinstrumente

5.1 Funktionsweise

Die Erfindung des Ventils um 1814²² erlaubte es, auch in tieferen Lagen chromatisch zu spielen. In weiterentwickelter Form kommt es heute in Trompeten, Waldhörnern, Tuben etc. zum Einsatz. Ein gedrücktes Ventil verlängert die Luftsäule, wodurch der Ton tiefer wird. Meistens gibt es drei Ventile, deren Ventilschleifen ungefähr folgende Längen besitzen:

¹⁷ Litzow 2007, S. 29

¹⁸ Vgl. Keim 1999, S. 16

¹⁹ Heyde 1987, S. 83

²⁰ Solch ein neues Intervall findet man bei jedem „primzahligen“ Naturton: dem 11., 13., 17., 19., 23. usw. (Vogel 1975, S. 21f.)

²¹ Vgl. Keim 1999, S. 49

²² Dtv-Atlas Musik, S. 51

Das 1. Ventil $\frac{1}{8}$ (Ganzton),
das 2. Ventil $\frac{1}{15}$ (Halbton) und
das 3. Ventil $\frac{1}{5}$ (eineinhalb Töne) der Grundlänge.²³

Diese Maße entsprechen den reinen Intervallen (siehe Kapitel 3.2). Durch Kombination der Ventile kann der gespielte Ton bis um eine übermäßige Quarte erniedrigt werden. Diese füllt den Raum zwischen dem zweiten und dritten Naturton, so dass eine vollständige chromatische Tonleiter ermöglicht wird.

5.2 Ventilkombinationen

Wie jeder Trompeter weiß, sind Töne, die mit den Ventilkombinationen 1+3 oder 1+2+3 gegriffen werden, zu hoch. Warum das so ist, geht aus dieser kleinen Rechnung hervor: Der Ton einer Trompete mit der Rohrlänge 1300 mm soll mit dem ersten und dritten Ventil um eine reine Quarte erniedrigt werden. Das erste Ventil verlängert um $\frac{1}{8} = 162,5 \text{ mm}$. Jetzt beträgt die Gesamtlänge 1462,5 mm. Das dritte Ventil bräuchte nun eine Länge von $\frac{1}{5} \times 1462,5 \text{ mm} = 292,5 \text{ mm}$. Es wurde aber so abgemessen, dass es einem Fünftel der ursprünglichen Grundlänge entspricht, also $\frac{1}{5} \times 1300 = 260 \text{ mm}$. Folglich ist es um 32,5 mm zu kurz.

Das Problem besteht darin, dass sich die Ventillängen statisch auf die Grundlänge des Instruments beziehen und somit einzeln gedrückt die richtige Länge haben, bei Kombinationen aber sich nicht der neuen Länge anpassen. Je mehr Ventile gedrückt sind, desto stärker fällt dieser Effekt ins Gewicht. Deshalb wird bei mehreren Griffmöglichkeiten die mit den wenigsten Ventilen gewählt.

Tabelle 5 (siehe Anhang) vergleicht die tatsächliche Tonhöhe einer B-Trompete, d. h. diejenige, die auf einem idealisierten Instrument mit angegebenen Zuglängen erklingen würde, mit der Tonhöhe der reinen und gleichstufigen Stimmung. Daraus geht hervor, dass die Ventilschleifenlängen $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{15}$ und $\frac{1}{5}$ weder der einen noch der anderen gerecht werden: Zwar ist die Naturtonreihe rein, doch die mit Ventilen erzielten Töne sind es nicht. Die gleichstufige Stimmung wird schon durch die reine Quinte und Terz der Naturtonreihe verhindert. Deshalb ist sie „[...] auf Blechblasinstrumenten, die nach heutiger Art mit 3 oder 4 Ventilen ausgerüstet sind, [...] nicht erreichbar.“²⁴ Metallblasinstrumentenbauer sprechen sich wegen der Naturtonreihe der Instrumente für die reine und gegen die gleichstufige Stimmung aus.²⁵

²³ Vgl. Bahnert 1958, S. 115

²⁴ Vogel 1961, S. 97

²⁵ Vgl. Interview mit Christoph Endres am 29.10.2014

6. Ansätze zur Lösung des Intonationsproblems

Den Nachteil von Ventilkombinationen könnte man umgehen, indem für jede Kombination ein eigenes Ventil verbaut wird. So wäre eine Tonart rein spielbar. Natürlich wäre solch ein schweres Instrument schlecht zu handhaben und in der Herstellung zu aufwändig. Im 19. Jahrhundert bemühten sich viele Instrumentenbauer, mit neu entwickelten Vorrichtungen der schlechten Intonation der Blechblasinstrumente entgegenzuwirken. Der Großteil dieser teils sehr komplexen Erfindungen setzte sich nicht durch, nur wenige fanden praktische Verwendung und wurden von den Musikern akzeptiert. So hat heute fast jede Trompete einen Schleifzug an der 3. Ventilschleife, Kompensations- und Doppelventile sucht man dagegen vergeblich.

6.1 Intonationszüge

Die einfachste Methode zur Feinjustierung der Tonhöhe sind ausziehbare Stimmzüge, die je nach Situation angepasst werden können. Bei Trompeten ist es üblich, dass die dritte und zum Teil auch die erste Ventilschleife mit einem Ring oder Sattel für den Ringfinger bzw. Daumen versehen ist, damit man sie beim Spielen leicht ein- und ausziehen kann. Dadurch können unsaubere Griffkombinationen gezielt korrigiert werden. Vereinzelt werden diese Schleifzüge auch über einen Hebel (engl. „Trigger“) betätigt, wobei der Schleifzug entweder mittels einer Arretierung dauerhaft oder nur bei Hebeldruck ausgezogen wird. Durch eine Feder kehrt er wieder in die Ausgangsposition zurück. Je nach Instrument können mehrere Millimeter bis Zentimeter ausgezogen werden, was einer Tonhöhenkorrektur von bis zu einem Halbton entspricht. Während einzelne Töne somit sehr sauber intonierbar sind, bereiten Passagen mit schnellem Wechsel von reinen und unreinen Tönen jedoch Probleme. Zur Änderung der Grundstimmung dient der Hauptstimmzug, den jedes Blechblasinstrument besitzt. Aber auch die einzelnen Ventilschleifen sind in der Regel ausziehbar, so dass man „Voreinstellungen“ für bestimmte Griffe treffen kann.

6.2 Korrektions- und Kompensationsventile

Bald nach der Erfindung der Ventile gab es Versuche, die zu hoch erklingenden kombiniert gegriffenen Töne dadurch auszugleichen, „daß[!] sich beim gleichzeitigen Gebrauch mehrerer Ventile die fehlenden Zusatzlängen automatisch miteinschalteten“²⁶. Solche Mechaniken ermöglichten annähernd reine Stimmung, waren aber oft aufwändig, störungsanfällig und nicht zuletzt teuer.

²⁶ Vogel 1961, S. 41ff.

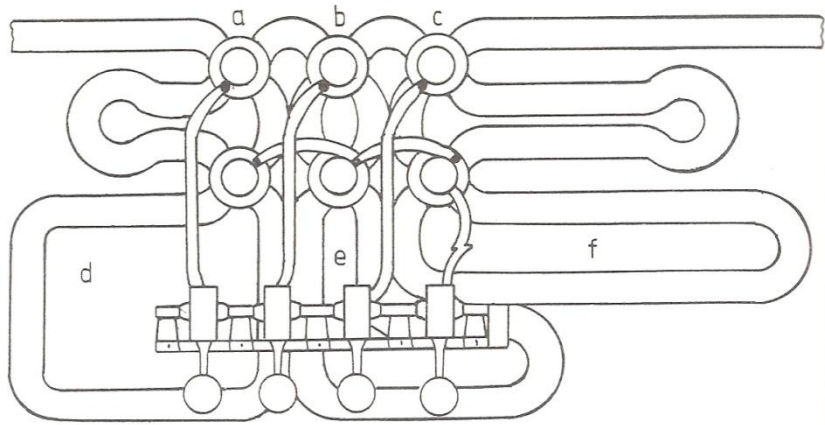


Abb. 3: Maschine mit Korrektionsventilen

Die Ventilschleifen d, e und f in Abb. 3 können über den 4. Hebel zugeschaltet werden. So kommen Ventilkombinationen zustande, die um 4, 5 und 6 Halbtöne erniedrigen. Mit den Standardlängen der ersten drei Schleifen, 1, 2 und 3 Halbtöne, ist eine reine Skala möglich.²⁷

6.3 Umstimmhebel²⁸

Um eine andere Grundstimmung zu erreichen, kann der Hauptstimmzug des Instruments verwendet werden. Zieht man diesen allerdings weit ein oder aus, so stimmen die Ventilschleifenlängen nicht mehr überein. Ein Umstimmhebel löst dieses Problem, indem er die Schleifen verhältnismäßig gleich auszieht. Dieser Hebel ist an allen Ventilschleifen, dem Hauptstimmzug und einem Drehpunkt befestigt; die richtigen Befestigungspunkte werden mithilfe des Strahlensatzes berechnet. Die 4-ventilige Basstrompete in Abb. 3 ist in b gestimmt; wenn der Hebel betätigt wird, d. h. die Ventilschleifen und der Hauptstimmzug ausgezogen sind, erhält man ein a-Instrument. Solch eine Vorrichtung erlaubt also das Transponieren von einer Grundstimmung in die andere, da die Schleifenlängen sich proportional zur Grundlänge verhalten. Auch beim Umstimmen auf einen anderen Kamerton, zum Ausgleich von Temperaturschwankungen oder Anpassen an extreme Lautstärken (bei denen die Töne höher oder tiefer intonieren) erweist sich der Umstimmhebel als vorteilhaft. Nach Vogel ist „die reine Stimmung [...] auf Blechblasinstrumenten mit Stimmhebel voll durchführbar.“²⁹

²⁷ Vgl. Heyde 1987, S. 100

²⁸ Vgl. zum Folgenden Vogel 1961, S. 73ff.

²⁹ Ebd., S. 75

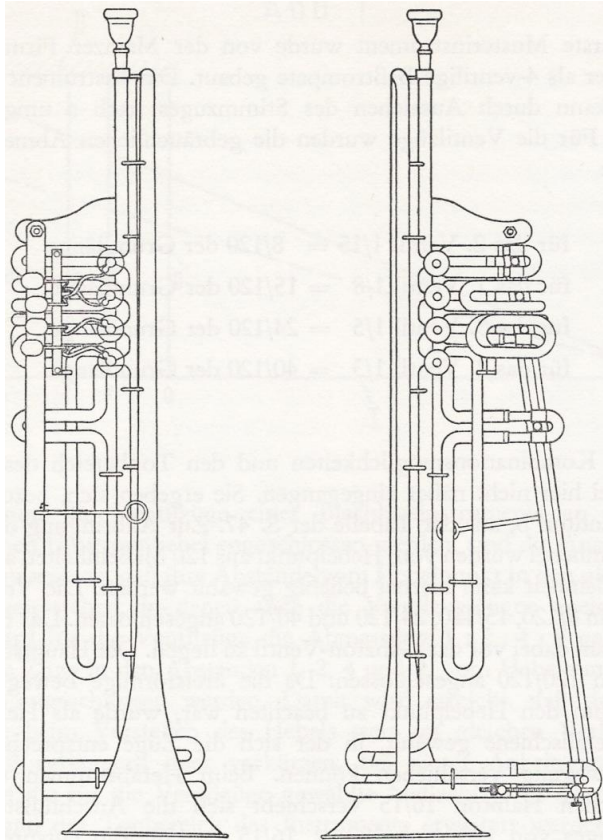


Abb. 4: 4-ventilige Basstrompete mit Umstimmhebel

7. Weitere Faktoren

7.1 Mensur

Zur Veranschaulichung der in Kapitel 2.1 eingeführten stehenden Wellen wurde ein einfaches zylindrisches Rohr betrachtet. In der Praxis spielt dagegen die Mensur, das „Maßverhältnis [...] von Länge und Weite des Rohres [...]“³⁰, eine Rolle. Sie beeinflusst das Obertonspektrum insofern, dass eine bei enger Mensur die höheren Obertöne stärker ausgeprägt sind und bei weiter Mensur die tieferen.³¹ Folglich klingen Trompeten heller und schärfer als Hörner. Blechblasinstrumente sind aus zylindrischen und sich konisch öffnenden Rohrabschnitten zusammengesetzt. Zylindrische Rohrsegmente haben bei hohen Instrumenten einen höheren Anteil, „[...] da die Eigenschwingungen beim konischen Rohr aus physikalischen Gründen stärker bedämpft sind als beim zylindrischen [...]“³².

Von der „[Veränderung des] Durchmesser[s] des Instruments während der ersten drei Viertel der Gesamtlänge [...]“³³ hängt außerdem die Reinheit der Naturtonreihe ab: Konische Rohrsegmente ändern das Ausbreitungsverhalten der Schallwelle und so die Positi-

³⁰ Art. „Mensur“, in: Der Große Brockhaus, Bd. 14, S. 197

³¹ Vgl. Stauder 1999, S. 79f.

³² Hemminger 2003, S. 18

³³ Ebd., S. 36

on der Druckpunkte.³⁴ Infolgedessen ist eine reine Intonation nicht mehr möglich. Ein gutes Instrument erkennt man u.a. an der reinen Naturtonreihe.

7.2 Mundstück

Das Mundstück, die „Schnittstelle“ zwischen Mensch und Instrument ist von besonderer Bedeutung für „[...] Ansprache, Leichtbläsigkeit, Tonreinheit als auch Lautstärke, Klangfarbe und Intonation [...]“³⁵. Die zwei vorherrschenden Formen sind die Kesselmundstücke von Posaunen und Trompeten sowie die Trichtermundstücke von Hörnern. Der weite Innenwinkel der Bohrung bei Kesselmundstücken fördert die Ausbildung der hohen Obertöne und somit einen scharfen, hellen Klang.³⁶ Gut ausgeprägte Obertöne bzw. Naturtöne sind außerdem besser mit dem Ansatz zu ändern, da man nicht so leicht in eine andere Überblaslage „rutscht“. Doch die Intonation wird auch direkt beeinflusst. So heißt es bei Bahnert: „Durch Änderung der Kesseltiefe wird auch die Stimmung des Instruments geändert. In beschränkter Weise kann damit demnach die Tonhöhe geändert werden.“³⁷

8. Schlusswort

Beim Lesen von Kapitel 6.3 kommt womöglich die Frage auf, warum man noch nie ein Instrument mit Umstimmhebel gesehen hat, wenn diese doch perfekt rein intonieren. Tatsächlich sind diese Vorrichtungen äußerst selten.³⁸ Denn für den Amateurbereich reichen die herkömmlichen Modelle aus, die wenigsten Hobbymusiker machen sich beim Spielen Gedanken über die Stimmung, nach der sie intonieren. Außerdem können kleine Stimmungsmängel mit dem Ansatz und Intonationszügen mehr oder weniger befriedigend korrigiert werden. Vogel kommt zu dem Schluss, dass Musiker automatisch die reinen Intervalle anstrebten, da sie gar keine Vorstellung von temperierten (gleichstufigen) Intervallen hätten. Auch im Zusammenspiel mit dem Orchester, für welches die gleichstufige Stimmung ohnehin eine theoretische Fiktion bliebe, wäre die reine Stimmung anzustreben.³⁹ Abschließend lässt sich sagen, dass für Ventilinstrumente, in erster Linie bedingt durch die Naturtöne, die reine Stimmung das Ideal darstellt. Während Tasteninstrumente von der Gleichstufigkeit profitieren, ist diese auf Ventilinstrumenten kaum zu realisieren. Ein Instrument schließlich entgeht den meisten der besprochenen Stimmungsprobleme: Die Posaune ist frei intonierbar und ihre Intonation somit besonders vom geschulten Gehör des Musikers abhängig.

³⁴ Vgl. Interview mit Christoph Endres am 29.10.2014

³⁵ Heyde 1987, S. 243

³⁶ Vgl. Brüderlin 1999, S. 57f.

³⁷ Bahnert 1958, S. 215f.

³⁸ Vgl. Interview mit Christoph Endres am 29.10.2014

³⁹ Vogel 1961, S. 12ff.

9. Anhang

9.1 Interview mit Metallblasinstrumentenbauer Christoph Endres (Nürnberg) am 29.10.2014

Haben Sie als Instrumentenbauer oft mit Umstimmhebeln und Kompensationsventilen zu tun?

Ein Instrument mit Umstimmhebel habe ich noch nicht gesehen. Kompensationsventile, die bei Betätigung zusätzliche Schleifen zuschalten, sind dagegen nach wie vor im Einsatz. Ich selbst verbaue sie an meinen Flügelhörnern, die dadurch in B und F spielbar sind.

Werden sie auch für Trompeten verwendet?

Da die zusätzlichen Schleifen lang sind, würde das die Handhabung von Trompeten stören. Auch das Gewicht ist nicht unwesentlich. Im Allgemeinen sind Trigger an Trompeten ausreichend. Das heißt aber nicht, dass es solche Modelle nicht gibt: Gerade in letzter Zeit erlebe ich ein steigendes Interesse an solchen Spezialkonstruktionen.

Welche Stimmung halten Sie für die beste bei Blechblasinstrumenten?

Natürlich ist es wichtig, die Vorgaben der Naturtonreihe zu berücksichtigen. Deshalb ist die enharmonisch-reine Stimmung erstrebenswert.

Die Mensur kann die Stimmung verändern. Wie funktioniert das?

In einem zylindrischen Rohr liegen die Druckpunkte in gleichmäßigem Abstand. Wird der Rohrendurchmesser weiter, so ändert sich auch die Ausbreitung der Schallwelle. Diese schwingt also kürzer oder weiter: Es verschieben sich die Druckpunkte. Dass die schwingende Luftsäule über das Schallende hinaus verläuft, ist auch möglich. Die Tonhöhe entspricht also nicht immer der Rohrlänge und die Naturtonreihe nicht den exakten mathematischen Vielfachen des Grundtons.

Welches Blechblasinstrument bringt die beste Stimmung mit sich?

Aus den genannten Gründen stimmen überwiegend zylindrische Instrumente meist besser. Zu diesen gehören die Trompeten und Posaunen, die bis auf das Schallstück überwiegend zylindrisch verlaufen. Bei Hörnern, die ja stark konisch mensuriert sind, muss beim Bau die veränderte Position der Druckpunkte besonders beachtet werden.

Vielen Dank für das Gespräch.

9.1 Tabellenanhang

Ton	Griff	tatsächliche Tonhöhe [Hz]	Tonhöhe in reiner Stim- mung [Hz]	Differenz tat- sächliche/ rei- ne Tonhöhe [Cent]	Tonhöhe in gleichstufiger Stimmung [Hz]	Differenz tat- sächliche/ gleichstufige Tonhöhe [Cent]
fis/ges	1+2+3	189,6	185,5	+11,3	186,6	+8,4
g	1+3	199,1	197,9	+3,3	197,7	+3,9
gis/as	2+3	208,3	211,1	-6,9	209,4	-2,8
a	1+2	221,4	219,9	+3,6	221,9	-1,1
ais/b	1	234,5	237,5	-6,5	235,1	-1,2
h	2	247,4	247,4	0,0	249,0	-3,5
c₁	0	263,8	263,8	0,0	263,8	0,0
cis/des ₁	1+2+3	284,4	281,4	+5,4	279,5	+9,0
d ₁	1+3	298,7	296,8	+3,3	296,2	+4,4
dis/es ₁	2+3	312,4	316,6	-6,9	313,8	-2,2
e ₁	1+2	332,1	329,8	+3,6	332,4	-0,5
f ₁	1	351,8	351,8	0,0	352,2	-0,6
fis/ges ₁	2	371,0	371,0	0,0	373,1	-2,9
g ₁	0	395,8	395,8	0,0	395,3	+0,6
gis/as ₁	2+3	416,6	422,2	-6,9	418,8	-2,8
a ₁	1+2	442,8	439,7	+3,6	443,7	-1,1
ais/b ₁	1	469,1	474,9	-6,5	470,1	-1,2
h ₁	2	494,7	494,7	0,0	498,1	-3,5
c₂	0	527,7	527,7	0,0	527,7	0,0
cis/des ₂	1+2	553,5	562,9	-8,7	559,1	-5,2
d ₂	1	586,3	593,7	-6,5	592,3	-5,3
dis/es ₂	2	618,4	633,2	-12,4	627,5	-7,7
e ₂	0	659,6	659,6	0,0	664,9	-4,1
f ₂	1	703,6	703,6	0,0	704,4	-0,6
fis/ges ₂	2	742,1	742,1	0,0	746,3	-2,9
g ₂	0	791,5	791,5	0,0	790,6	+0,6
gis/as ₂	2+3	833,2	844,3	-6,9	837,7	-2,8
a ₂	1+2	885,6	879,5	+3,6	887,5	-1,1
ais/b ₂	1	938,1	949,8	-6,5	940,2	-1,2
h ₂	2	989,4	989,4	0,0	996,2	-3,5
c₃	0	1055,4	1055,4	0,0	1055,4	0,0

Tabelle 5: Vergleich der von tatsächlichen, reinen und gleichstufigen Tonhöhen auf einer herkömmlichen B-Trompete von fis/ges bis c₃.

Die Berechnung der tatsächlichen Werte erfolgte mit diesen Maßen (entnommen aus Bahnert 1958, S. 115, 134):

Rohrlänge der Trompete 1,3m; 1. Ventilschleife $\frac{1}{8}$, 2. Ventilschleife $\frac{1}{15}$, 3. Ventilschleife $\frac{1}{5}$ der Grundlänge. Dabei wurde der Einfluss der Mensur auf die Obertonreihe und der des Mundstücks außer Acht gelassen.

Die Tonhöhen in reiner Stimmung wurden mittels der Verhältnismaße aus Tabelle 1 vom hervorgehobenen Grundton c_1 (tatsächliche Tonhöhe) ausgehend errechnet; die enharmonischen Verwechslungen bei den Tonbezeichnungen sind für die tatsächlichen und gleichstufigen Werte gedacht. Letztere ergeben sich, indem derselbe Grundton c_1 mit dem Faktor $2^{\frac{1}{12}}$ multipliziert (aufwärts) bzw. dividiert (abwärts) wird.

9.3 Literaturverzeichnis

Buchverzeichnis

Bahnert/ Herzberg/ Schramm: Metallblasinstrumente, Leipzig 1958

Brüderlin, René: Akustik für Musiker, 6. Auflage, Kassel 1999

dtv-Atlas Musik, München 2001

Frosch, Reinhart: Mitteltönig ist schöner! : Studien über Stimmungen von Musikinstrumenten, 2. Auflage, Bern 1993

Hemminger, Wolfgang: Eine kleine Physik der Blechblasinstrumente, erschienen im Selbstverlag 2003

Heyde, Herbert: Das Ventilblasinstrument, Leipzig 1987

Keim, Friedel: Das Trompeter-Taschenbuch, Mainz 1999

Kunitz, Hans: Die Instrumentation. Teil 1: Akustik, Wiesbaden 1960

Levy, Moshe H.: Die Tonsysteme, Lappersdorf 1997

Litzow, Werner: Die Physik in der Musik, Aachen 2007

Stauder, Wilhelm: Einführung in die Akustik, 4. Auflage, Wilhelmshaven 1999

Vogel, Martin: Die Intonation der Blechbläser. Neue Wege im Metallblas-Instrumentenbau, Düsseldorf 1961

Vogel, Martin: Die Lehre von den Tonbeziehungen, Bonn 1976

Art. „Mensur“ und „Stimmung“, in: Der Große Brockhaus. Kompaktausgabe in 26 Bd., Bd. 14 und 21, 18. Auflage, Wiesbaden 1984

Internetquellen

Wikipedia, Artikel „Modulation bei reiner Stimmung“
http://de.wikipedia.org/wiki/Modulation_bei_reiner_Stimmung (Stand: 22.10.2014)

9.4 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungen

Abb. 1: „Welle mit den ersten drei Oberschwingungen“, erstellt vom Verfasser

Abb. 2: „Naturtonreihe über dem beliebig gewählten Grundton C“, erstellt vom Verfasser

Abb. 3: „Maschine mit Korrekptionsventilen“

Heyde 1987, S. 100

Abb. 4: „4-ventilige Basstrompete mit Umstimmhebel“

Vogel 1961, S. 74

Tabellen

Tabelle 1: „Aus der Obertonreihe abgeleitete Intervalle“

Litzow 2007, S. 27

Tabelle 2: „Frequenzverhältnisse der didymischen Skala in C-Dur“

Stauder 1999, S. 186

Tabelle 3: „Erweiterte reine Skala von C-Dur und c-moll“

Wikipedia, Artikel „Reine Stimmung“

http://de.wikipedia.org/wiki/Reine_Stimmung (Aufruf vom 22.10.2014)

Tabelle 4: „Frequenzverhältnisse und Centwerte der gleichstufigen Skala in C“

erstellt vom Verfasser

Tabelle 5: „Vergleich der von tatsächlichen, reinen und gleichstufigen Tonhöhen auf einer herkömmlichen B-Trompete von fis/ges bis c_3 “

erstellt vom Verfasser