

# Stimmung und Intonation bei Blechblasinstrumenten

## Teil 1: Musikalische Grundlagen, Stimmungssysteme, Ventile und deren Auswirkungen im Ensemblespiel

**Eine Vorbereitungslektüre zu:  
Mensuränderungen und deren Auswirkung bei Trompeten.**

Projektstand 24.11.2024, Revision 20.0

Eine jeweils aktuellste Version der Dokumente finden Sie auf der Projektseite:  
<http://www.preisl.at/brassissima/>

Begleitende Dokumentation zum Projekt / Thema.  
Development, Work, Calculation and Copyright:



("Brass Instrument Scanning System – Impedance Measurements & Analysis")



Hermann Preisl

Altwaidhofen 45  
3830 Waidhofen/Thaya, Austria

[brassissima@preisl.at](mailto:brassissima@preisl.at)

P.S.: Wer systematische Fehler, Schwachsinn oder falsche Behauptungen findet:

Bitte diese **nicht !!** behalten,  
sondern bitte um kurze Info an mich, das hilft mir sehr weiter, danke!

<b>Inhalt:</b>	<b>Seite:</b>
Motivation & Vorwort	4
<b>Eine simple Einführung in akustische Grundlagen:</b>	
Schall – Definition	5
Schallgeschwindigkeit	
Berechnung der Schallgeschwindigkeit in Luft	6
Lautstärke	
Tonhöhe	7
Resonanz – Definition	
Überschlägige Berechnung der Resonanz bei Blechblasinstrumenten	8
Berechnung der Resonanz bei Blechblasinstrumenten	
Partialtöne und Obertöne	9
Unterschied zwischen Partialtönen und Obertönen	
Ein kurzer Abstecher zu Holzblasinstrumenten	10
Ein kurzer Abstecher zum Orgelbau und Mensur	
Mensur bei Blechblasinstrumenten und etwas Geschichte	11
<b>Psycho-physische Grundlagen kurz umrissen:</b>	
Schwebungen und Kombinationstöne	12
Das Gehörsystem des Menschen	13
Wie funktioniert hören?	
Schwelle der Erkennbarkeit	14
Absolutes Gehör	
Frequenzbänder	
Das „Zurechthören“	15
<b>Musikalische Grundlagen und abendländische Stimmungssysteme:</b>	
Die Einteilung in Tonleitern	16
Das 12-Tonsystem	17
Intervalle unseres 12-Tonsystems	18
Die Entwicklung unseres Zwölftonsystems	
Der Unterschied zwischen Ton- und Stimmungs-Systemen	19
Stimmungs-System des Mittelalters	
Pythagoräische Stimmung – Die Berechnung	20
Just Intonation – Die „Reine“ ? Stimmung	22
Der Anpassungsvorteil und Probleme durch Flexibilität	24
Die gleichschwebende Stimmung – Equal Tuning	
Die Berechnung der Halbtöne in 12-Ton Equal-Temperament	25
Die Einheit „CENT“	
Vergleich der vorgestellten Stimmungs-Systeme mit „CENT“	26
Der Kammerton und Stimmtöne	27
Der Stimmtön und die Praxis des Einstimmens in Ensembles	28

**Naturtöne und fiktive Rohrlängen von Blechblasinstrumenten:**

Zusammenfassung der bisher erläuterten Grundlagen	
Das Prinzip von Resonanz und Rohrlänge	30
Berechnung von Grundschiwingung und fiktiver Rohrlänge	32
<b>Ventile</b>	<b>33</b>
Das etablierte 3-Ventilsystem bei Blechblasinstrumenten	
Die Berechnung von Verlängerungsfaktoren für Ventilschleifen	34
Problembereich Teil A: Mathematischer Art, + ist nicht *	
Problembereich Teil B: Verschiedene Stimmungssysteme als Grundlage	35
Problembereich Teil C: Geänderte Mensur durch andere Längen	36
Lösungsansätze zur Optimierung der Ventilverlängerungen	
Ventillängen und Stimmungsabweichung aller Griffkombinationen	38
Unterschiedliche Faktoren durch Hauptstimmzug	39
Störungen, hier Erweiterungen durch Stimmzug-„Gaps“	
Perturbationen / gezielte Störungen	40
Transponierende Instrumente und deren Notation, Stimmlagen	40
Griffsystem, Standard- und „Hilfsgriffe“ bei Blechblasinstrumenten	41
Obertöne/Naturtöne verschiedener Grundstimmungen Vergleich	42
Auswirkung von Ventilen im Ensemble zu anderen Instrumenten	43
Vergleich Ventilkombinationen im Ensemble, Stimmtöne, E.T., J.I	44
Zusammenfassung, analytisches relatives Gehör	45

## VORWORT

Dieser Abschnitt entstand zum allergrößten Teil bereits 1999 – es sind nun 25 Jahre vergangen - und war für Interessierte, die in irgendeiner Form in der musikalischen Praxis mit Blechbläsern zusammenarbeiten, seien es Blechbläser selbst, Musiklehrer, Dirigenten, Kapellmeister, Stimmführer, Komponisten, Arrangeure, Instrumentenbauer, oder den interessierten Zuhörer gedacht.

Diese Einführung in das Thema kann einiges an Grundlagen vermitteln, wie es in einer solchen speziell auf Blechbläser abgestimmten Form meiner Erfahrung nach noch nicht zusammengestellt wurde. Einerseits gibt es viele Lehrbücher und Internetseiten über allgemeine Musikgeschichte, Zeitepochen, Instrumentenkunde, die Entstehung und Tradition der Blasinstrumente und Bläsermusikgruppen, Musiktheorie, Harmonielehre uvm. Andererseits gibt es Bücher und Zeitschriften, die sich sehr detailliert ausschließlich mit Physik, Akustik, Gehör, Intonation, Stimmungssystemen, und vielem mehr beschäftigen, aber oft fehlt eine Brücke dazwischen.

Als engagierter Musiker (Trompete, Flügelhorn), Kapellmeister, Komponist und Arrangeur kann ich auf langjährigen persönlichen Erfahrungen in den Bereichen Unterhaltungsmusik, Kammermusik, Blasmusik, Big Band, Jugendausbildung und Salonorchester aufbauen und kenne dadurch die verschiedenen „wirklichen“ Probleme in der Blechbläserpraxis von Amateuren aus der Sichtweise des Bläasers, wie auch aus der Sicht des Dirigenten. Neben der Zuhörerrolle durfte ich als Komponist Erfahrungen sammeln, wie andere Musiker etwas „auffassen“, „interpretieren“, „intonieren“, und mit welchem unterschiedlichen Vorgehensweisen z.B. geschriebene Noten in Musik umgesetzt werden. Manchmal erschweren fehlende Verknüpfungen der einzelnen Grundlagen die Aus- und Aufführung. Ich versuche daher, relevante Themen und Grundkenntnisse aus den verschiedensten Sachgebieten möglichst einfach und in komprimierter Form zusammenzuführen, wo notwendig da auch möglichst exakt, damit Leser aus diesem theoretischen Inhalt einen möglichst großen praktischen Nutzen ziehen können.

Wer als Blechbläser schon einmal (oder immer) Probleme mit der Intonation hatte, oder als Kapellmeister mit Stimmungsproblemen seines Ensembles zu kämpfen hat und nach deren Ursachen und Lösungsmöglichkeiten sucht; wer die akustischen und musikalischen Hintergründe der praktischen Arbeit als Blechbläser genauer unter die Lupe nehmen möchte, kann bei dieser Zusammenstellung möglicherweise fündig werden.

Ziel dieser Arbeit war es einerseits, das „Eigenleben“ der Stimmung von Blasinstrumenten genau darzustellen. Mythen, Wissen, und von Instrumentenbauern gern „Unausgesprochenes“ klar und deutlich aufzuzeigen, und mit diesem Know How gerüstet eine wesentlich bessere Ausgangsbasis für die notwendige Intonationsarbeit in der blasmusikalischen Praxis zu erlangen. Ein besonderes Ziel war es auch alle relevanten Daten und Zahlen wo notwendig so exakt wie möglich darzustellen. Einfach aus dem Grund, da in einschlägigen Lehrbüchern oft sehr viel verkürzt oder schlichtweg „durcheinandergebracht“ und dadurch „verwischt“ dargestellt wird.

Ein Hauptaugenmerk wurde hier deshalb in einer möglichst einfachen musikalischen Sprache auf Stimmung im Ensemble, Lagen, Ventile und damit verbundene Probleme gelegt. Natürlich ist die Natur und Akustik oft wesentlich komplexer als hier in dieser Einleitung teilweise dargelegt wird. Aber es soll ja eine Einführung in das Thema sein und keine umfassende Abhandlung.

Weitere meiner später publizierten Arbeiten beschäftigen sich sehr detailliert und ausführlich mit akustischer Grundlagenforschung, objektiver Messung, Beurteilung und Optimierungsmöglichkeiten von Blechblasinstrumenten. Diese zeigen dann die komplexen Zusammenhänge und bauen auf zahlreichem musikalischem Grundwissen dieser vorliegenden allgemeinen Einleitung auf.

Kritikern möchte ich gleich zuvorkommen und betonen, daß man selbstverständlich eine musikalische „Qualität“ nicht mathematisch berechnen und messen kann und soll. Das ist allerdings auch nicht meine Absicht. Musik ist für mich „natürlich“ wenn sie „natürlich“ gebracht wird. Eine möglichst gute Intonation ist aber nicht „unnatürlich“.

Bedenken Sie bitte, daß nur mit möglichst exakten Rechenbeispielen Unterschiede in Stimmung und Intonation deutlich dargestellt werden können. Selbstverständlich wird und soll diese einleitende Abhandlung die Bläserwelt auch nicht revolutionieren – sie kann aber vielleicht manchem Musiker helfen, Intonations- und Stimmungsprobleme besser in den Griff zu bekommen und anderen neue Sichtweisen zu eröffnen.

## Eine simple Einführung in akustische Grundlagen:

### Schall – Definition:

Die Akustik ist ein Teilgebiet der Physik und behandelt die Lehre vom Schall. Physikalisch kommt Schall durch Schwingungen (Vibrationen) eines elastischen Körpers zustande.

In der Musik können das z. B. sein:

bei Stimmen	Stimmbänder (Sänger, Sprecher)
bei Chordophonen	gespannte Saiten (z. B. Klavier, Harfe, Gitarre, Streichinstrumenten)
bei Aerophonen	gespannte Lippen (Blechbläser) Rohrblätter (Klarinette, Oboe, Fagott) Luftblätter, Metallzungen (Orgel, Flöten)
bei Membranophonen	gespannte Felle (Trommeln, Pauken)
bei Idiophonen	unterschiedliche Materialien (Stimmgabel, Glocken, Becken, Percussionsinstrumente)
bei Elektrophonen	Lautsprecher

Werden solche Körper in Schwingungen versetzt (aus ihrer Ruhelage gebracht), teilen sie sich dem umgebenden Medium (Luft) mit und bringen die Moleküle dieses Mediums ebenfalls aus Ihrer momentanen Lage.

Schall breitet sich (in der Luft) durch Schwingungen von Luftteilchen aus, eine Gesamtbewegung des Mediums Luft (Wind) entsteht dabei nicht. Es handelt sich vielmehr um ein abwechselndes Verdichten und Verdünnen, dadurch hervorgerufen, daß benachbarte (Luft-)Partikel gegeneinander und wieder voneinander wegschwingen.

Wichtig ist aus diesem Grund vor allem zu bemerken, daß bei Blechblasinstrumenten, welche zur Gruppe der „Luftschwinger“ gehören, die vibrierenden Lippen des Bläusers die Schallerreger sind, und die im Instrument eingeschlossene Luftsäule zum Schwingen anregen.

In geschlossenen Luftsäulen (bei Blasinstrumenten) können nur Längsschwingungen „Longitudinal-Wellen“ zustande kommen, die abwechselnde Verdichtung und Verdünnung verursachen.

Saiten, Metallstäbe, Felle etc. führen anfangs Querschwingungen aus. Auch die Querschwingungen werden dadurch, daß sie sich der umgebenden Luft mitteilen letztendlich in Längsschwingungen umgewandelt.

### Schallgeschwindigkeit:

Schall pflanzt sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten fort. Die ersten Experimente und groben Messungen der Schallgeschwindigkeit wurden mit Kanonenschüssen durchgeführt. Heutzutage brauchen wir – Gott sei Dank - keine Kanonen mehr um die Schallgeschwindigkeit zu messen. Die Schallgeschwindigkeit hängt von mehreren Faktoren ab:

1. Das Medium durch welches der Schall wandert
2. Die Temperatur des Mediums

Das Medium welches Schall transportiert kann flüssige, gasförmige oder feste Form besitzen.

Beispiele in:	Temperatur:	Schallgeschwindigkeit
Wasser	20 ° Celsius	1482 m pro Sek.
Ethanol	20 ° Celsius	1162 m pro Sek.
Stahl	-	5960 m pro Sek.
Luft	20 ° Celsius	343,5 m pro Sek.

In Luft bewegt sich Schall bei 0 ° Celsius und 0 % Luftfeuchtigkeit mit einer Geschwindigkeit von 331,6 m pro Sekunde, oder - anders ausgedrückt - mit 1193,76 km pro Stunde. Verglichen zur Geschwindigkeit von Licht in Vakuum (299792458 m pro Sekunde) bewegt es sich sehr langsam. Das führt dazu, daß wir bei einem Gewitter den Blitz zuerst sehen, und erst einige Sekunden später hören. Luftfeuchte erhöht die Schallgeschwindigkeit etwas.

Da es Musiker in der Regel mit Luft als Medium zu tun haben, hier eine genaue Formel für die Geschwindigkeit von Schallwellen im Medium Luft.

### Berechnung der Schallgeschwindigkeit in Luft:

Die Geschwindigkeit des Schalls, hängt neben dem Medium das es durchwandert auch von der Temperatur dieses Mediums ab. Die Geschwindigkeit ändert sich proportional zur Trägheit der Luftmoleküle. Bei „Absoluter Temperatur“, bezeichnet mit 0 ° Kelvin, was -273 ° Celsius entspricht, beträgt die Schallgeschwindigkeit 0 m/Sekunde.

Da die Geschwindigkeit bei 0 °C mit 331,6 m bekannt ist, können wir daraus die Geschwindigkeit bei anderen Temperaturen errechnen:

$$v = \text{Geschwindigkeit bei } 0 \text{ ° Celsius} * \text{Wurzel aus (Zeit 1Sek/(273 Grad Kelvin + } 0 \text{ ° Celsius))}$$

oder

$$v = 331,6 \text{ m} \quad * 0,0605228... \quad v = \underline{\underline{20,069345}}$$

Um die Geschwindigkeit von Schall in Luft bei +20 ° Celsius zu errechnen kann man folgendermaßen vorgehen:

1. 20 °C = 273 Kelvin + 20 ° Celsius = 293 Kelvin „Absolute Temperatur“
2. Wurzel aus 293 Kelvin „Absolute Temperatur“ = 17,1172
3. Geschwindigkeit bei 20 °C =  $\sqrt{20,069345} * 17,1172 = 343,5 \text{ m / pro Sekunde}$

Auf diese Art und Weise lassen sich auch alle anderen Geschwindigkeiten von Schall in Luft ermitteln:

Beispiele:	Lufttemperatur in ° Celsius:	Schallgeschwindigkeit in m / Sekunde
	-273	0
	-5	328,5
	0	331,6
	+5	334,6
	+10	337,6
	+20	343,5
	+25	346,5
	+30	349,3
	+35	352,2
	+100	387,6

Welche Auswirkung die Schallgeschwindigkeit auf Blasinstrumente hat? Wir werden sehen ....

### Lautstärke:

Wie weit eine Schwingung von Ihrer Ruhelage abweicht, bestimmt die Lautstärke. Ein weiter Ausschlag teilt sich einer größeren Anzahl von Luftteilchen mit, als ein kleiner Ausschlag. Die Entfernung dieses Ausschlages wird als Amplitude bezeichnet. Die Schwingungsweite ist wiederum abhängig von der Energie, mit der die Schwingung verursacht wird. Beispiel: eine kräftig gezupfte Gitarrensaite macht weitere Schwingungen und gibt einen stärkeren Ton als eine schwach gezupfte. Die Lautstärke ändert nichts an Schallgeschwindigkeit und Anzahl der Schwingungen in einem bestimmten Zeitraum (Tonhöhe). Die Lautstärke von Schall wird in Phon gemessen.

## Tonhöhe:

Einzig und allein maßgeblich für die Tonhöhe ist die Anzahl der Schwingungen während einer bestimmten Zeitspanne. Je höher die Schwingungszahl (Frequenz), um so höher der hervorgebrachte Ton. Pythagoras, der griechische Philosoph und Mathematiker hat schon im 6. Jahrhundert vor Christus durch Versuche an einem Monochord (Instrument mit nur 1 Saite) gefunden, daß Saitenlänge und Schwingungszahl (Tonhöhe) im umgekehrten Verhältnis zu einander stehen.

Oder einfach gesagt: Je länger die Saitenlänge, um so kleiner ist die Schwingungszahl bzw. tiefer ist der hervorgebrachte Ton. Je kürzer die Saitenlänge, um so größer ist die Anzahl der Schwingungen bzw. höher ist der hervorgebrachte Ton.

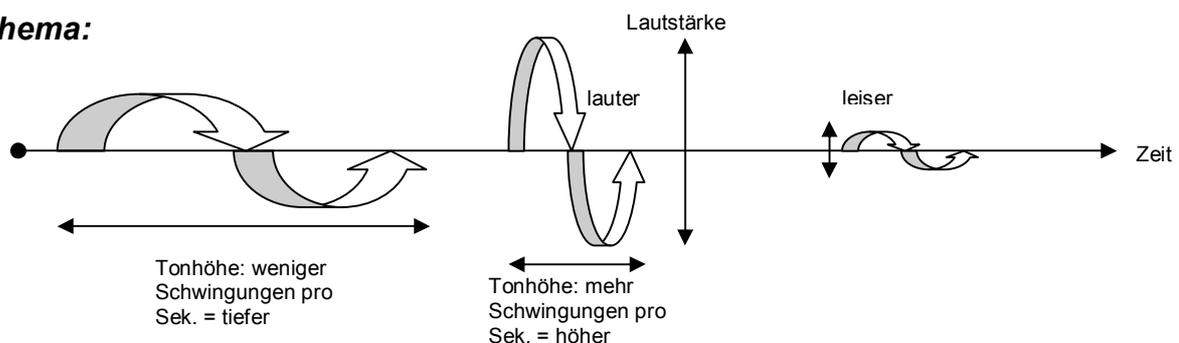
Dieses Naturgesetz gilt selbstverständlich auch beim Verhältnis der Länge von schwingenden Luftsäulen und der Schwingungszahl.

Die Schwingungen pro Sekunde werden in Hertz (kurz Hz) angegeben. Der Kammerton A1 = 440 Hz schwingt also 440 mal pro Sekunde. Anders herum betrachtet benötigt also eine einzelne Schwingung dieses Tones (1 Sek. / 440) = 0,00227272727 Sekunden. Andere Beispiele für Perioden sind

z. B.:

<b>Bewegung:</b>	<b>Periode (Zeit in Sek. f. 1 Schwingung)</b>	<b>Hz Frequenz</b>
Erdrotation	86400 (24 Std x 60 min x 60 Sek)	0,000011574
Herzschlag	1	1
M.M. = 180 (b.p.m)	0,33333	3
untere Hörschwelle Mensch	~ 0,0625	16
obere Hörschwelle Mensch	~ 0,00005	20 000
Funk (Radio)	0,0000001	10 000 000
PC Prozessoren (1999)	0,000000002	500 Mega Hz

## Schema:



## Resonanz - Definition:

Wenn die Saiten zweier Violinen gleich gestimmt sind und z. B. die g-Saite der ersten Violine gestrichen wird, gerät auch die g-Saite der zweiten Violine in Schwingung. Dieses Mitschwingen nennt man Resonanz. Diese akustische Erscheinung läßt sich daraus erklären, daß jeder elastische tongegebende Körper eine Eigenschwingung von bestimmter Wellenlänge hat und in Schwingung versetzt wird, wenn er von Schallwellen der selben Wellenlänge getroffen wird.

Wenn eine Stimmgabel angeschlagen und in die Luft gehalten wird, klingt ihr Ton nur sehr schwach. Wenn sie jedoch auf z. B. eine hölzerne Tischplatte gesetzt wird, ist der Ton wesentlich lauter, denn die Fasern des als Unterlage dienenden Holzes werden zum Mitschwingen gebracht, und diese Vibrationen gehen von der Holzoberfläche auf die Luft über. Dadurch werden größere Luftmengen in Schwingung gebracht als durch die relativ kleine Oberfläche der Stimmgabel selbst.

Die gleiche Aufgabe hat der Resonanzboden von Klavieren bzw. der Corpus von Saiteninstrumenten. Die Wände des Resonanzraumes nehmen die Schwingungen der Saiten auf und schwingen mit, durch die im Corpus befindliche Luft wird der Ton verstärkt.

## Resonanz bei Blechblasinstrumenten:

Bei Blechblasinstrumenten sind der Schallerreger die vibrierenden Lippen des Bläasers. Durch gezieltes „Anstoßen“ wird die Luftsäule, welche sich im Instrument befindet zum Mitschwingen „Resonieren“ angeregt. Wie wir aus der obigen Definition von Resonanz ersehen, gerät ein Resonator in „optimale Schwingung“, wenn er von genau der Wellenlänge getroffen wird, die seiner Wellenlänge entspricht.

Anders ausgedrückt: Die Länge der Luftsäule muß mit den Schwingungen, die von den Lippen ausgehen, übereinstimmen. Um so genauer diese beiden Komponenten übereinstimmen, um so besser wird der „Resonator“ seinen Dienst erfüllen, um so freier er schwingen.

Oder nochmals anders ausgedrückt:

Um so genauer der Bläser die Schwingungszahl seiner Lippen so steuern kann, daß er ein Optimum an Resonanz erzielt, um so weniger Energie wird er dafür aufwenden müssen. Daraus folgt natürlich auch, daß ein in sich „optimal“ gestimmtes Instrument wesentlich weniger Lippenkraft verbraucht, als ein weniger „optimal“ gestimmtes Instrument.

Man sieht aus obigen Beispielen also, daß die effektive Rohrlänge welche letztendlich der Länge der schwingenden Luftsäule gleichzusetzen ist, der wesentliche Faktor für die Wellenlänge der Resonanz ist.

## Überschlägige Berechnung der Resonanz bei Blechblasinstrumenten:

Folgende Formel ist notwendig, um die Resonanzen eines Kegels (Konus) mit offener großer Öffnung und mit geschlossener Spitze zu berechnen:

$$\text{Frequenz in Hz} = 1 \times \text{Schallgeschwindigkeit} / 2 \times \text{Länge}$$

Daraus folgt bei einer Länge von **1 m** und einer Temperatur der Luft von **0 ° C**:

$$\begin{array}{l} \text{Hz} \\ \text{oder Hz} \end{array} = \begin{array}{l} 1 \times 331,6 \\ 165,8 \end{array} / 2 \times 1 \text{ m} \quad \begin{array}{l} \\ \text{(Schwingungen pro Sekunde)} \end{array}$$

Daraus folgt bei der gleichen Länge von **1 m** und einer Temperatur von **20 ° C**:

$$\begin{array}{l} \text{Hz} \\ \text{oder Hz} \end{array} = \begin{array}{l} 1 \times 343,5 \\ 171,75 \end{array} / 2 \times 1 \text{ m} \quad \begin{array}{l} \\ \text{Schwingungen pro Sekunde} \end{array}$$

Es kann also bemerkt werden, daß mit zunehmender Temperatur der Luftsäule die Tonhöhe steigt, obwohl sich die Länge der Luftsäule nicht verändert.

Andererseits kann aus den vorgehenden Beispielen folgende Formel abgeleitet werden:

$$\text{Länge} = 1 \times \text{Schallgeschwindigkeit} / 2 \times \text{Frequenz in Hz}$$

Bei einer gewünschten Tonhöhe von 440 Hz (bei 20 ° C Temperatur der Luftsäule) ergibt sich:

$$\begin{array}{l} \text{Länge} \\ \text{oder Länge} \end{array} = \begin{array}{l} 1 \times 343,5 \\ 0,39034 \text{ m} \end{array} / 2 \times 440 \text{ Hz}$$

Nimmt man eine Trompete oder Flügelhorn in Bb, deren wiederum fiktiver Grundton ein großes Bb ist, oder 116,5 Hz (Equal Tuning und Kammerton A1=440 Hz, bei 20 ° C Temperatur der Luftsäule):

$$\begin{array}{l} \text{Länge} \\ \text{oder Länge} \end{array} = \begin{array}{l} 1 \times 343,5 \\ 1,4742 \text{ m fiktive akustische Länge,} \\ \text{die ein Konus mit geschlossener Spitze hätte.} \end{array} / 2 \times 116,5 \text{ Hz}$$

Das bedeutet, ein Blechblasinstrument mit einer fiktiven Länge von 1,4742 m die ein Konus hätte, würde bei 20 ° C als Grundton 116,5 Schwingungen pro Sekunden resonieren wenn es ein Konus wäre, welcher die theoretischen Schwingungsverhältnisse 1:2:3:4:5:6:7:8:9:10:11:12: usw.. aufweist, die tiefste Frequenz würde einer halben Wellenlänge entsprechen, die in Länge des Konus passt.

Nun ist es so, daß ein Blechblasinstrument aber keinen Konus mit Spitze widerspiegelt. Vielmehr muß man es als mundstückseitig geschlossenes und schallbecherseitig offenes Rohr betrachten. Ein zylindrisches closed-open Rohr ergibt allerdings Resonanzfrequenzen, die  $\frac{1}{4}$  Wellenlänge und nur ungeradzahlig Vielfache dieser untersten (nun halben) Grundfrequenz betragen, geradzahlige Vielfache fallen auf Antiresonanzen, es ergeben sich hier daher Schwingungsverhältnisse von 1:3:5:7:9:11:13:15 usw.

Dazu muß gleich ergänzt werden, daß das Mundstück, der trichterförmige Verlauf des Schallbechers und die Mensur des Instruments die Länge der schwingende Luftsäule frequenzabhängig stark verändern. Die Frequenzverhältnissen nähern sich denen eines Konus mit Spitze an (der 1. Mode bleibt allerdings zu tief). Diese äußerst wichtige Tatsache wird in den weiteren Projektteilen vollständig und detailreich aufgearbeitet.

Keine Angst also, wenn Sie beim eventuellen Nachmessen einer Bb-Trompete auf eine tatsächliche Länge (inkl. Mundstück) von nur etwa 1,39 m gelangen. Diese „fixe“ fiktive Verlängerung spielt bei den Berechnungen im weiteren Verlauf dieser einleitenden Studie keine Rolle, denn für Ventilschleifenlängen ist die akustische Länge des fiktiven Konus (ein Mittelwert) als overall Referenzlänge maßgeblich.

Aus welchem (dichten) Material ein Instrument besteht, beeinflusst sehr wohl Ansprache, Lautstärke und Klangfarbe - auf die Länge der Luftsäule hat dies allerdings keinen Einfluß. Eine „unglückliche“ als auch eine gut angepasste Mensur hat allerdings Auswirkungen auf das Potential der Obertöne!

## Partialtöne und Obertöne:

Bisher wurde ein Ton nur als eine einfache Schwingung, eine sogenannte Sinuswelle dargestellt. Eine Sinuswelle erzeugt einen Ton, der tatsächlich nur aus dieser einen dargestellten Schwingungen besteht. Diese Grundschwingung muß nicht so gleichmäßig ausfallen wie im *Schema* dargestellt, sie kann auch „wellig“ sein, dazwischen gibt es jede erdenkliche Grundform einer Schwingung.

In der Natur gesellen sich zu dieser Schwingung, welche die Tonhöhe bestimmt, und die wir ab sofort den „Grundton“ nennen, noch weitere Töne, sogenannte Partialtöne oder Teilschwingungen.

Nehmen wir als Beispiel noch einmal die g-Saite einer Violine. Wird sie in ihrer ganzen Länge gestrichen, schwingt einerseits die ganze Länge dieser Saite, zusätzlich schwingt die Saite aber auch in ihrer halben Länge, in ihrer Drittel Länge, in ihrer Viertel Länge ..... usw.

Diese automatisch zusätzlich schwingenden Teile werden als Teilschwingungen oder als Partialtöne bezeichnet. Selbstverständlich ist das bei schwingenden Luftsäulen genauso.

<b>Beispiel: Sopraninstrument in Bb</b>	<b>fiktive Grundton Länge</b>	<b>Schwingungszahl Hz</b>
1. Partialton = <b>Grundton, kurz GT</b>	= <b>1,474 m</b>	= <b>116,5</b> x 1 = <b>116,5 Hz</b>
2. Partialton = <b>Oktave</b>	= <b>Grundton/2</b>	= <b>Schwingungszahl x 2 = 233,0 Hz</b>
3. Partialton = <b>Quint v. 2. Part. Ton</b>	= <b>Grundton/3</b>	= <b>Schwingungszahl x 3 = 349,5 Hz</b>
4. Partialton = <b>doppelte Oktave v. GT</b>	= <b>Grundton/4</b>	= <b>Schwingungszahl x 4 = 466,0 Hz</b>
5. Partialton = <b>gr. Terz v. 4. Part. Ton</b>	= <b>Grundton/5</b>	= <b>Schwingungszahl x 5 = 582,5 Hz</b>
6. Partialton = <b>Quint v. 4. Part. Ton</b>	= <b>Grundton/6</b>	= <b>Schwingungszahl x 6 = 699,0 Hz</b>
7. Partialton = <b>???</b>	= <b>Grundton/7</b>	= <b>Schwingungszahl x 7 = 815,5 Hz</b>
8. Partialton = <b>3-fache Oktave v. GT</b>	= <b>Grundton/8</b>	= <b>Schwingungszahl x 8 = 932,0 Hz</b>
9. Partialton = <b>großer Ganzton</b>	= <b>Grundton/9</b>	= <b>Schwingungszahl x 9 = 1048,5 Hz</b>
usw. ....in Ganzzahlschritten.....		

Aus diesem Beispiel kann abgeleitet werden, daß Töne 1 Oktave höher auf exakt doppelt so vielen Schwingungen basieren sollten, als in der jeweils tieferen Oktave.

## Unterschied zwischen Partialtönen und Obertönen:

Als **Partialtöne** bezeichnet man alle oben genannten Teilschwingungen. Die Anzahl und die Lautstärkeverhältnisse dieser Partialtöne zueinander bestimmen die **Klangfarbe** des produzierten Tones. Der Klang und damit die Partialtonverhältnisse sind abhängig von Material, Bauart, Art der Tonerzeugung und der Grundform der Schwingung.

Da jeder Ton aus mehreren Teilschwingungen besteht, ist aus akustischer Sicht bereits ein einzelner Ton ein Klang. Als **Obertöne** bezeichnet man diese Töne, wenn z. B. die Luftsäule in einem Blasinstrument durch „Überblasen“ dazu angeregt wird, diesen „höheren“ Ton - besser gesagt diese Teilschwingung – anstelle der Grundschwingung zu resonieren, wobei natürlich bei jedem dieser hervorgebrachten Obertöne wiederum seine eigenen Teilschwingungen (Partialtöne ausgehend vom Oberton) automatisch mitschwingen.

Wird auf Blasinstrumenten der Grundton 1 x überblasen = 2. Naturton, so resoniert (theoretisch) die  $\frac{1}{2}$  Luftsäule 2x mit der doppelten Anzahl an Schwingungen, daß heißt der produzierte Ton ist (theoretisch) 1 Oktave höher als der Grundton des Instruments. Wird der Grundton 2-fach überblasen = 3. Oberton, so resoniert die Luftsäule mit  $3x \frac{1}{3}$  ihrer Länge, es entsteht ein Ton mit  $3x$  mehr Schwingungen als der Grundton. Die Reihenfolge der Obertöne bei Blechblasinstrumenten entspricht 1:1 dem Vorhandensein der Partialtöne, praktisch werden aber nach oben und unten durch den Ansatz des Bläasers und durch die Konstruktion des Instruments früher oder später Grenzen gesetzt und Resonanzfrequenzen weichen ab.

### Zum besseren Verständnis - Ein Abstecher zu Holzblasinstrumenten:

Wird auf einer Klarinette der Grundton 1 x überblasen so resoniert der 3. Partialton, d. h. die Quint vom 2. Partialton oder besser gesagt die Duodezime. Dies kommt daher, daß die Grundform bei Klarinetten ein Zylinder ist, der einseitig (Blatt) hochgradig verschlossen ist und nur ungerade Resonanzmodes zulässt. Gerade Resonanzmodes haben am geschlossenen Ende keinen Druckbauch.

Bei Fagott, Oboe und Saxophon ist im Vergleich zu Klarinetten aufgrund der Konus die Grundform, weshalb bei Saxophonen bei 1 x maligem Überblasen des Grundtones wiederum der 2. Partialton = 2. Oberton = (theoretische) Oktave des Grundtones resoniert wird. Führt man sich also vor Augen, daß bei Klarinetten mit Hilfe von Klappen und Löchern  $1 \frac{1}{2}$  Oktaven überwunden werden müssen, wobei bei Saxophonen nur 1 Oktave ausgefüllt werden muß, versteht man warum trotz „gleichem Prinzip“ der Tonerzeugung ganz unterschiedliche Griffe notwendig sind.

### Zum besseren Verständnis – ein Abstecher zum Orgelbau und Mensur:

Die Orgel zählt ebenfalls zur Familie der Blasinstrumente (Aerophone). Hört man den Ton einer Orgel, so hört man meist nicht den Klang einer Orgelpfeife, sondern eine „Mixtur“ mehrerer Pfeifen. Um verschiedenste Klangfarben realisieren zu können – besitzen Orgeln in der Regel eine Anzahl von „Registern“. Jedes Register wiederum besteht aus einer Anzahl von Orgelpfeifen, von der längsten (tiefsten) bis zur kürzesten (höchsten). Die prunkvollen Pfeifen, die wir an einer Orgelfassade sehen, sind meist nur Zierde und Attrappen.

In der Orgelbaukunst spielen die Partialtöne – da sie die Klangfarbe des jeweiligen Registers entscheidend beeinflussen eine wesentliche Rolle. Diese Register haben etwa klingende Namen wie z. B. Quint=„Nasat“, Doppeloktav = „Blockflöte 2 Fuß“, etc. Im Orgelregister „Quintatön“ hat wie der Name schon sagt, der 3. Partialton in der Klangfarbe ein Übergewicht. Dem Organisten ist es durch das Hinzufügen oder Wegschalten solcher ganzen Register also möglich, die Klangfarbe wesentlich zu verändern.

### Der Begriff »Mensur« aus dem Orgelbau:

Unter **Mensur** versteht man allgemein ein klangbestimmendes Maß von Musikinstrumentenbauteilen, speziell bei Windinstrumenten, namentlich das Verhältnis zwischen einem Querschnittsmaß (Fläche, Durchmesser oder Umfang) und der Länge der klingenden Luftsäule. Letztere verhält sich umgekehrt ~ proportional zur Frequenz des erzeugten Tones. Diese sogenannte Weitenmensur ist ein Maß, mit dem der Klangcharakter von Orgelpfeifen großemäßig erfaßbar ist.

Da die Mensur ein Verhältniswert ist, verkleinern sich bei gleichmensurierten Pfeifen kürzerer Länge auch die übrigen abhängigen Größen gegenüber der längeren Vergleichspfeife. Die Pfeifenlängen halbieren sich (vereinfacht betrachtet) mit jeder Oktave. Würde man jedoch ein Register bauen, bei dem sich auch die Flächen der Pfeifenquerschnitte im Verhältnis 1:2 pro Oktave verhalten, erhielte man im Baßbereich viel zu weite und im Diskantbereich viel zu enge Pfeifen. Daher muß sich dieser reine Verhältniswert nach einer bestimmten Regel verändern, wenn über einen größeren Tonbereich ein einheitlicher Klangcharakter abgestrahlt werden soll.

Der Orgeltheoretiker J. G. Töpfer (1791 – 1870) erkannte, daß sich ein gleichbleibender Klangcharakter dann einstellt, wenn man die Querschnittflächen zweier Pfeifen ~ im Oktavabstand um  $1/\sqrt[8]{8}$  = Flächenfaktor 2,828 multipliziert oder dividiert. Zurückgerechnet ergibt das einen Längenfaktor von 1,68179 des Durchmessers mehr oder weniger je Oktave. In der Literatur zu historischem Orgelbau wird teilweise auf Endkorrekturen verwiesen, die wesentlich größer sind als aktuell theoretisch errechnete, nämlich 1,66 \* Durchmesser was aber möglicherweise mit anderen Komponenten bei Pfeifen in Zusammenhang steht ? Ich habe nicht vor es nachzurechnen.

*Zufälligerweise? ist diese Zahl sehr nahe der Verhältniszahl des goldenen Schnittes 1,61803 und  $2,828 / 4$  ergibt den sehr interessanten Bessel Flare Faktor 0,7071 welcher wiederum das geometrische Mittel von  $1/2$  und  $1/1$  ist.*

## Mensur bei Blechblasinstrumenten und etwas Geschichte:

Hier versteht man unter **Mensur**, wie rasch sich der Instrumentendurchmesser dem Enddurchmesser angleicht. Eng mensuriert gegenüber weit bedeutet die Annäherung erfolgt verstärkt erst im letzten Teil dafür sehr rasch mit der Schallbecherausschweifung. Innerhalb von Instrumentengruppen verwendet man den Begriff eng und weit gleichermaßen als Vergleich zweier Instrumente oder Teilen davon. Oft wird der zylindrischen Querschnitt, die „Bore Size“ damit bezeichnet – was aber oft alleine für sich keine Aussagekraft hat. Eine Borsize von 11mm bei Trompeten deutscher Bauart ist üblich und nicht klein, bei Perinet Instrumenten ist es hingegen „x-small“.

Häufig wird es einfach verwendet um strahlend, hell klingende Instrumente als engmensuriert zu titulieren und solche mit einem weichen Klang sind dann weit mensuriert. Auch wird manchmal angeführt, engmensurierte Blechblasinstrumente haben einen höheren zylindrischen Anteil als weitmensurierte, was aber im kuriosen Fall der Kornettfamilie nicht bestätigt werden kann, hier haben einige Originale aus dem 19. und 20. Jahrhundert mehr oder exakt gleich viel zylindrischen Anteil oder sogar mehr wie Perinetventil Trompeten. Oft verwenden diese auch das gleiche Schallstück, den Klang entscheidet nur das jeweilige Mundstück und Beginn des Mundrohres.

Der Begriff konisch in Zusammenhang mit Mensur wird oft mit weit mensuriert interpretiert. Die allerwenigsten Blasinstrumente sind allerdings tatsächlich linear konisch, sondern erweitern sich meist anhand einer Schleppkurve und werden nur in Verbindung mit einem Mundstück gespielt. Zudem kenne ich aktuell keines, dessen Konus eine geschlossenen Spitze aufweist.

Trompeter und ihre Instrumente waren über Jahrhunderte privilegiert, waren in Zünften organisiert, d.h. mussten/durften ihre Dienste unter Fürsten und dergleichen verrichten. Dem gemeinen Volk war es verboten Trompete zu spielen (wäre auch mangels Instrument vermutlich gar nicht gegangen). Es war ein herrschaftliches Status Symbol.

Das Cornett a Piston z.B. gab es nach Erfindung von Ventilen in so vielen Facetten, oft wurde gepriesen, es sei viel einfacher als eine Trompete zu spielen, Louis Armstrong sagte dazu angeblich, er sei auf Trompete gewechselt, weil diese einen so sanften Ton hat. Das verwendete Mundstück, die Spielart und vor allem der Spieler haben dermaßen großen Einfluß auf den Klang, speziell bei Instrumenten in der Sopranlage, das die Grenzen stark verschwimmen. In der romantischen Musik waren melodiose Instrumente gefragt.

Sieht man sich die Entwicklung an, so stammen heutige Trompeten von Langtrompeten ab, wurden aber mit Aufkommen von Ventilen wie Kornette gebaut chromatisch spielbar, und um fast der Hälfte Ihre Länge beraubt „kornettiger“, speziell die Typen mit Perinet Ventilen erhielten ausgeprägte „konische“ Mundrohre.

Eine moderne Trompete (von vor 1900 bis jetzt) klingt nicht mehr wie eine engmensurierte Barocktrompete, die übrigens keinerlei Hilfslöcher hatte, denn diese sind auch eine spätere Erfindung >1900. Eine Piccolo Trompete – die nur noch ca  $1/4$  der Rohrlänge besitzt hat ebenfalls einen komplett anderen Klang. Werke alter Meister können damit toll, aber nicht klanggetreu aufgeführt werden. Aber ich bin überzeugt, hätte es zu Zeiten Johann Sebastian Bachs bereits Ventiltrompeten gegeben, hätte es ihn auch gefreut.

Ein Flügelhorn / Bugle andererseits entstammt einem Signalhorn, später um ein Mundstück erweitert, daß es vorerst um Klappen erweitert als Klappenhorn um die Zeit Joseph Haydns in die Musiksalons der gehobenen Gesellschaft geschafft hat. Das berühmte Trompetenkonzert wurde für „Klappentrompete“ geschrieben! Mit Erfindung der Ventile wurde auch dieses Instrument chromatisch spielbar und damit immer „trompetiger“ – aufgrund der notwendigen zylindrischen Abschnitte.

Überlebt haben bis heute und das wird weiter so bleiben jeweils die Instrumente, deren jeweilige Mensuren sich bewährt haben, die sich gut verkauft haben und somit kopiert wurden, sowie solche, die nicht nur kopiert, sondern die Kopien ständig etwas verändert wurden. Nicht optimale Kopien und Ergebnisse wurden und werden aber trotzdem genauso verkauft und verwendet.

## Psycho-physische Grundlagen kurz umrissen:

### Schwebungen und Kombinationstöne:

Werden zwei Töne in ganz reinem Einklang gestimmt, so fließen die Töne ruhig zusammen. Ist die Stimmung nicht ganz rein, so hört man **Schwebungen** oder Stöße. (Der Hörer empfindet die Klangstärke abwechselnd lauter und leiser, dieses An- und Abschwellen der Klangstärke bezeichnet man als Schwebung). In welchen Frequenzbereichen und in welchen Umfang das menschliche Gehör diese Schwebungen tatsächlich wahrnimmt wird in einem weiteren Kapitel behandelt.

*Berechnung von Schwebungen:*                       $\text{Frequenz 1} - \text{Frequenz 2} = \text{Anzahl Beats (Schwebungen)}$   
*Beispiel:*     $440 \text{ Hz} - 434 \text{ Hz} = 6 \text{ Beats pro Sekunde}$

**Musikalische Darbietungen können durch sanfte Schwebungen an Schönheit gewinnen. Sind diese Schwebungen (Tonhöhendifferenzen) allerdings so groß, daß man sie bereits als „Stöße“ wahrnimmt, so empfindet der Hörer sie als „unrein“ bzw. „schlecht intoniert“, oder auch „falsch gestimmt“.**

Zu den Schwebungen gehören auch die sogenannten **Kombinationstöne**. Werden zwei unterschiedlich hohe Töne gleichzeitig gespielt, so gesellt sich ihnen „automatisch“ ein 3. tieferer Ton hinzu, dessen Schwingungszahl gleich ist der Differenz der beiden gespielten Töne.

#### Beispiel 1:

1. Ton gespielt	=	320 Hz	„e1“
- 2. Ton gespielt	=	192 Hz	„g“
= <b>Differenzton</b> (man hört zusätzlich )3. Ton	=	128 Hz	„c“

Der deutsche Physiker Helmholtz hat nachgewiesen, daß auch Summationstöne entstehen:

#### Beispiel 2:

<b>Differenzton</b> (man hört zusätzlich) 3. Ton	=	64 Hz	„C“
+ 1. Ton gespielt	=	192 Hz	„g1“
+ 2. Ton gespielt	=	320 Hz	„e1“
= <b>Summationston</b> (man hört zusätzlich) 4. Ton	=	512 Hz	„c2“

Streicher benützen die Erscheinung von Kombinationstönen beim Üben von Terz- und Sextgriffen zur Prüfung der Reinheit\*. Wird auf der Violine der Doppelgriff „g-e1“ (Schwingungszahl 192 und 320) kräftig angespielt, erscheint als Unterquint des tieferen Tones „g“ der Differenzton „c“ (128 Hz).

Die große Terz „e1-g1“ (Schwingungszahl 320 und 384) läßt den Kombinationston „C“, 64 Hz hören. Denselben Kombinationston bringt auch die Kombination „c1-e1“ (Schwingungszahl 256 und 320). Aufgrund der hörbaren Schwebungen kann dann die Handstellung entsprechend minimal korrigiert werden.

*\*) Diese Praxis orientiert sich am Stimmungssystem der „Reinen Stimmung oder Just Intonation“, welche in einem separaten Kapitel genau erläutert wird.*

Der normale Musikgenießer hört diese Kombinationstöne unbewußt, nur durch konzentriertes „analytisches Hören“ werden solche Töne bewußt wahrgenommen. Ein weiterer Unterschied besteht darin, daß diese Schwebungs- und Kombinationstöne nicht vom Instrument ausgehen und per Schallwellen übertragen werden, sondern vielmehr erst in unserem innersten Gehörsystem entstehen.

Würde man z. B. obengenannte Töne mittels eines Kopfhörers zuführen, und zwar so, daß auf jedem Ohr jeweils nur ein Ton erklingt, entstehen diese Kombinationstöne nicht.

## Das Gehörsystem des Menschen:

Hier sollen nur die notwendigsten Fakten zum Thema Gehör erörtert werden.

Wir können wie folgt unterscheiden:

1. Das Äußere Gehörsystem mit Hörkanal
2. Das Mittelohr
3. Das Innere Gehörsystem
4. Das Nervensystem und das Gehirn

Selbstverständlich ist das Gehör jedes Menschen verschieden. Man kann den für Menschen hör-baren Bereich auf ca. 16-20.000 Hz ansetzen, wobei dieser Bereich mit zunehmendem Alter abnimmt.

## Wie funktioniert hören?

Über die Ohrmuschel und den Hörkanal gelangen Schallwellen zum Trommelfell. Dieser Hörkanal kann man sich genauso als resonierende Luftsäule - wie bei Blasinstrumenten – mit umgekehrter Funktion vorstellen. Dieser Resonanzkörper verstärkt die einstrahlenden Variationen von veränder-tem Luftdruck, hervorgerufen durch Schallwellen und leitet diese verstärkt an das Trommelfell weiter.

Vom Trommelfell werden die Schwingungen abgenommen und in „mechanische“ Schwingungen im Mittelohr verarbeitet und weiter verstärkt. Hier werden schwache Signale verstärkt und allzu starke Signale „abgebremst“. Man kann sich das wie eine vollautomatische Lautstärke-Regulierung für das Innenohr vorstellen.

Einströmende Signale werden mit bis zu ca. 800-facher ! Verstärkung an das Innenohr weitergegeben. Im Innenohr werden die mechanischen Schwingungen in hydraulischen Druck umgewandelt, dieser Druck öffnet nun ein Ventil, die "Eustachische Röhre", einem kleinen Gang, der in die Rachenhöhle mündet. Der Hörnerv tritt an der Basis der Schnecke ein und mündet im „Kortischen Organ“.

Das "Kortische Organ" ist ca. 4 cm lang und mit etwa 30.000 Nervenfasern versehen. Es ist von Flüssigkeit umgeben und kleinste Strömungen in dieser Flüssigkeit werden von den Nervenfasern aufgenommen als Information an das Gehirn übermittelt. Es stellt 2 wesentliche Funktionen zur Verfügung:

1. Es wandelt mechanische Energie in elektrische Energie
2. Es übermittelt dem Gehirn dann diese Informationen via Nervensystem über die aufgenommene Klangquelle - allerdings nicht nur die Tonhöhe, sondern auch die Intensität und Klangfarbe, wobei Nervenpaare zu „Datenhighways“ zusammengebündelt werden, deren Anzahl wiederum dem Gehirn eine Vorstellung der Intensität des „Signals“ vermitteln.

Andererseits leiten zurückführende Nervenfasern Befehle vom Gehirn wiederum an das Mittelohr zurück, um zum Beispiel allzu intensive Schallquellen abzudämpfen oder dem Gehirn momentan nicht wichtige Geräusche herauszufiltern.

## Schwelle der Erkennbarkeit:

Es gibt aber auch natürliche Grenzen für unser Ohr. So ist es auch mit der Unterscheidbarkeit von unterschiedlich hohen Tönen welche nacheinander erklingen.

Der Grad der Erkennbarkeit ist abhängig von Tonhöhe, Tonhöhenunterschied, Lautstärke und Länge der Töne und der dazwischen liegenden Pausen. Der Grad der Erkennbarkeit variiert stark von Mensch zu Mensch, ist abhängig vom musikalischen Training des Hörers, könnte aber in etwa so skizziert werden:

Bei einer Tonhöhe von etwa 400 Hz liegt die Erkennbarkeit bei etwa 0,75 % Abweichung von der ursprünglichen Frequenz; 0,75 % von 400 Hz = 3 Hz oder anders gesagt: ca. 10 Cent. (100 Cent ist der Abstand zwischen zwei Halbtönen).

Bei sehr tiefen Frequenzen kann sich der Abstand auf bis zu 10 % vergrößern, ohne wahrgenommen zu werden. Im Bereich von ca. 1000 bis 5000 Hz werden Abweichungen bereits ab Höhenunterschieden von ca. 0,5 % wahrgenommen. (Ein hohes C einer Bb Trompete hat ~ 930 Hz).

## Absolutes Gehör:

Es stellt sich nicht nur aufgrund der obigen Überlegungen die Frage wie absolut ein „Absolutes Gehör“ sein kann. Wie kommt ein absolutes Gehör zustande? Genügt es eine bestimmte Tonhöhe annähernd zu erraten? Mit besonderer Konzentration ist es ohne weiteres möglich, sich eine bestimmte Tonhöhe auch über einen längeren Zeitraum einzuprägen.

Ist es nicht so, daß Personen mit „Absolutem Gehör“ auf bestimmte Frequenzen förmlich „anspringen“? Das liegt teilweise daran, daß unser Gehörssystem eine gewisse Eigenschwingung hat. Was hilft es aber musikalisch, wenn man z. B. auf eine Frequenz von 837,2 Hz „innerlich“ explosionsartig reagieren würde?

Ich kann mich gut an meinen Trompetenunterricht bei einem Privatlehrer erinnern, wo bei jedem „Eb“ das ich gespielt habe, der Dackel des Lehrers angefangen hat zu heulen. Lag das an dem getroffenen Frequenzbereich oder war letztlich meine Tonkultur schuld?

Für Bläser wie Sänger ist es selbstverständlich sehr wichtig, sich bestimmte Tonhöhen ziemlich genau aus dem „FF“ ohne sonstige Hilfestellung vorstellen zu können. Gilt es doch Lippen, Atmung und den Ansatz speziell bei exponierten „Einsätzen“ am Beginn z. B. eines Konzertes einer geforderten Tonhöhe möglichst exakt anpassen zu können!

## Frequenzbänder:

Intonationskorrekturen werden von ausführenden Sängern, Bläsern und Streichern während der „stationären Phase“ des Tons vorgenommen. Voraus geht ihr die „Einschwingphase“ welche bei Bläsern durch Anblasgeräusche charakterisiert ist.

Als „Ausschwingphase“ wird das Verklingen des Tons bezeichnet, welches bei angeschlagenen bzw. gezupften Tönen die eigentliche Tondauer ausmacht, bei gestrichenen, geblasenen oder gesungenen Tönen aber sehr kurz und daher kaum wahrnehmbar ist.

Der Begriff „stationäre Phase“ läßt vermuten, daß der Ton in dieser Phase konstant ist und sich in seiner Höhe nicht ändert. **Dem ist aber nicht so.** Die unregelmäßigen Schwankungen, welche unwillkürlich und zufällig auf glatt ausgehaltenen Tönen entstehen werden als „statische“ Frequenzschwankungen bezeichnet. Im Gegensatz dazu wird ein gleichmäßiges und willkürlich steuerbares Tonhöhenvibrato als „periodische“ Frequenzschwankung definiert.

Das menschliche Ohr nimmt „statische“ Frequenzschwankungen zwar nicht als solche wahr, es würde sie jedoch vermissen, wenn sie fehlen würden. Sie verlaufen so schnell, daß unsere Ohren sie nicht mitverfolgen können. Die dabei durchlaufenen Frequenzen mischen sich in der Wahrnehmung zu einem „Frequenzband“, dessen mittlerer Wert als Tonhöhe wahrgenommen wird, ähnlich wie beim erkennbaren Tonhöhenvibrato.

Alle Frequenzbänder haben den gleichen Effekt: Sie vermitteln den Eindruck klanglicher „Wärme“. Beim 3-saitigen Saitenchor des Klaviers z. B. wird angeblich eine Verstimmung der einzelnen Saiten gegeneinander von 1,7 CENT vom Gehör als optimal empfunden.

Bei Bläsern kommt ein Vibratoeindruck hauptsächlich durch Lautstärke- aber immer Druckschwankungen zustande, und die Tonhöhenchwankungen ergeben sich damit als Nebeneffekt.

### Das „Zurechthören“:

Erklingen zu einem „A1“ mit 440 Hz zusätzlich die Frequenzen 658 oder 662 oder 665 Hz, so registriert unser Gehör all diese Intervalle als Quint. Es tut dies, obwohl die Quint ganz eindeutig mit dem Schwingungsverhältnis 2:3 definiert ist, und dieses ließe sich nur mit 660 Hz herstellen.

Unser Ohr ist in der Lage, zu erkennen, welcher ideale Wert sich hinter den abweichenden Schwingungswerten verbirgt, und kann daher alle in derselben „**Hörschublade**“ unterbringen. Die Fähigkeit, Intervalle trotz Verstimmung zu erkennen und zu akzeptieren, bezeichnet man als „Zurechthören“.

Aufgrund von Testreihen kann man davon ausgehen, daß das menschliche Gehör eine Erweiterung eines Intervalls wesentlich besser akzeptiert, als eine Verengung. Der geringste Spielraum besteht allerdings bei Prim, Oktave, Quint, Quart.

Wesentlich mehr Spielraum bieten Terzen und Sexten; bei Sekunden, Tritonus und Septimen werden die größten „Verstimmungen“ zurechtgehört. Man muß in diesem Zusammenhang allerdings immer zwischen harmonischer und melodischer Linie strikt unterscheiden.

Selbstverständlich ist mit oben behandelten Themen das Sachgebiet Akustik und Psychoakustik nur schemenhaft dargestellt und auszugsweise behandelt. Zum weiteren Studium empfehle ich die zahlreich bestehende Fachliteratur.

## Musikalische Grundlagen und abendländische Stimmungssysteme:

### Die Einteilung in Tonleitern:

Aus der unvorstellbar großen Anzahl an verschiedenen Tonhöhenunterschieden müssen einige ausgewählt werden, um eine Musik zu schaffen, die durch das menschliche Gehirn verarbeitet werden kann. Zum Aufbau eines musikalischen Systems bedarf es also einer festgelegten Anzahl von Tönen, die miteinander in Beziehung gesetzt werden können.

Die Auswahl dieser Töne ist im Prinzip frei, aber 3 Faktoren stehen als Wegweiser auf diesem entscheidenden Weg von einzelnen Tönen zu einem Tonsystem:

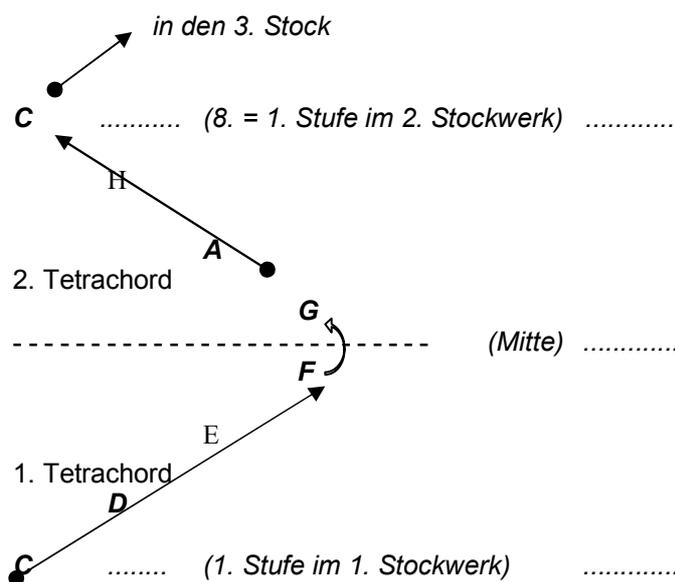
1. Das Oktavprinzip *Ein Ton hat in seiner Oktavwiederholung doppelt soviele Schwingungen. Hören wir einen Ton 1 Oktave höher, wissen wir, daß es sich um den selben Ton handelt. (Siehe Schwebungen und Kombinationstöne)*
2. Die Obertonreihe: *Es gibt hier viele Anhaltspunkte für natürliche Schwingungsverhältnisse Oktave 1:2 Quint 1:3 Doppeloktav 1:4 gr. Terz 1:5 usw.*
3. Das Gehörsystem: *Was nützen komplizierteste Berechnungen, wenn unser Gehör diese nicht nachvollziehen kann?*

Es gibt vielerlei recht verschiedene Musiksysteme auf unserer Welt. Angefangen von Urwaldbewohnern die Musiksysteme benutzen, welche aus nur 3 Tönen bestehen, über ein 5-Ton System in verschiedenen Ausprägungen – „Pentatonik „ genannt, bis hin zu arabischen Systemen mit 17 Tönen und indischen „Melas“ mit bis zu 22 Abstufungen, uvm.

In unserer abendländischen Kultur verwenden wir ein Musiksystem das aus 12 Tönen besteht. Das Oktavprinzip bildet auch hier den Ausgangspunkt wie bei so vielen anderen Musiksystemen. Man kann sich das so vorstellen, daß z. B. in einem Hochhaus jedes Stockwerk durch die selbe Anzahl von Stufen miteinander verbunden ist. Marschieren wir also beim Stockwerk „C1“ los, so erreichen wir nach einer gewissen Anzahl von Stufen das nächste Stockwerk „C2“.

Auf der sogenannten „diatonischen“ Treppe könnte man diese Differenz zwischen zwei Stockwerken mit nur 7 (**ungleich hohen**) Stufen erreichen. Auf einer „chromatischen“ Treppe würde der selbe Höhenunterschied in 12 (**nicht unbedingt gleichhohe**) Stufen aufgeteilt sein.

#### „Diatonische Tonleiter C-Dur“



#### Chromatische Tonleiter und „enharmonische Verwechslung“

..... =	..... =	..... =	..... =
D	D	Cisis	Eses
C#	Db	Cis	Des
C	C	His	Deses
H	Cb	Aisis	Ces
A#	Bb	Ais	Ceses
A	A	Gisis	Heses
G#	Ab	Gis	As
G	G	Fisis	Ases
F#	Gb	Fis	Ges
F	F	Eis	Geses
E	E	Disis	Fes
D#	Eb	Dis	Es
D	D	Cisis	Eses
C#	Db	Cis	Des
C	C	His	Deses
H	Cb	Aisis	Ces
..... =	..... =	..... =	..... =

## Das 12-Tonsystem:

Unser abendländisches, verwendetes **12-Ton System** gibt uns 12 Stufen pro Oktave vor. Es beschreibt Tonstufen, Intervalle und Akkorde, Tonarten, Tonleitern, und wird in der uns bekannten Notenschrift notiert; 2 Halbtöne zählen genauso viel als ein Ganztonschritt.

Diatonische C-Dur



Chromatische C-Dur



## Intervalle unseres 12-Tonsystems:

Intervalle beschreiben in der Musiklehre den Halbtonabstand zwischen zwei Tönen in unserem 12-Tonsystem. Dabei werden diese Intervalle in zwei Klassen eingeteilt:

### 1. „Reine“ Intervalle

	Prim	Quart	Quint	Oktave
Stufe der <u>diatonischer</u> Dur-Tonleiter:	I.	IV.	V.	VIII. Stufe
im Falle von C-Dur:	C-C	C-F	C-G	C-C
Anzahl Halbtöne:	0	5	7	12

„Reine“ Intervalle werden „vermindert“, wenn sie einen Halbton kleiner sind als „reine“ Intervalle:

im Falle von C-Dur:	C-Cb	C-Fb	C-Gb	C-Cb
Anzahl Halbtöne:	-1	4	6	11

„Reine“ Intervalle werden „übermäßig“, wenn sie einen Halbton größer sind als „reine“ Intervalle:

im Falle von C-Dur:	C-C#	C-F#	C-G#	C-C#
Anzahl Halbtöne:	1	6	8	13

#### Intervall-Umkehrungen z. B.:

1 reine Quart + 1 reine Quint	= 5 + 7 Halbtöne	= 12 HT =	1 Oktave
1 übermäßige Prim + 1 verm. Oktave	= 1 + 11 „-“	= 12 HT =	1 Oktave

### 2. „Große“ Intervalle

	Sekund	Terz	Sext	Septime
Stufe der <u>diatonischen</u> Dur-Tonleiter:	II.	III.	VI.	VII. Stufe
im Falle von C-Dur:	C-D	C-E	C-A	C-H
Anzahl Halbtöne:	2	4	9	11

„Große“ Intervalle werden „klein“, wenn sie einen Halbton kleiner sind als „große“ Intervalle:

Im Falle von C-Dur:	C-Db	C-Eb	C-Ab	C-Bb
Anzahl Halbtöne:	1	3	8	10

#### Intervall-Umkehrungen z. B.:

1 große Terz + 1 kleine Sext	= 4 + 8 Halbtöne	= 12 HT =	1 r. Oktave
1 kl Sekund + 1 gr. Septime	= 1 + 11 „-“	= 12 HT =	1 r. Oktave
1 große Terz + 1 kl. Terz	= 4 + 3 Halbtöne	= 7 HT =	1 r. Quint
1 gr. Sekund + 1 kl. Terz	= 2 + 3 „-“	= 5 HT =	1 r. Quart

„Große“ Intervalle werden „übermäßig“, wenn sie einen Halbton größer sind als „große“ Intervalle  
 „Kleine“ Intervalle werden „vermindert“, wenn sie einen Halbton kleiner sind als „kleine“ Intervalle

**Merke zur richtigen Benennung („Feinbestimmung“) von Intervallen:**

1. Der tiefere der beiden Töne ist Grundton der für diesen Intervall geltenden diatonischen Dur-Tonleiter!
2. Enharmonische Verwechslungen sind nicht erlaubt. z. B. C-F# = üb. Quart; C-Gb = verm. Quint  
 C#-G = verm. Quint; C#-F = verm. Quart

„Rein“ bedeutet in der Musiklehre nicht einen reinen Klang. Man darf hier genannte „reine“ Intervalle nicht mit z. B. „reinen Quinten“ z. B. in Just Intonation verwechseln. Die Notenschrift sagt nichts über die Schwingungsverhältnisse der Töne aus. Aus Gründen des Oktavprinzips könnten allenfalls Prim und Oktaven als „rein“ bezeichnet werden!

## Die Entwicklung unseres Zwölftonsystems:

Schon die Griechen benutzten Tonleitern mit 4 Tönen. Sie enthielten große und kleine Tonabstände. Solche Tonleitern nennt man **Tetrachorde**. Da in jedem dieser Tetrachorde einmal ein „Halbton“ an anderer Stelle vorkommt, waren diese Tonleitern untereinander vom Klang nicht gleich. Man empfand sie entweder als lustig, traurig, tragisch, feierlich usw, und verwendete sie in diesem Sinne, sei es im Dienste zur Huldigung bestimmter Gottheiten oder zur Hervorrufung gewünschter Gefühlsregungen.

Die frühen Theoretiker des christlichen Mittelalters empfingen diese antiken Musiklehren auf dem Weg über Rom. Sie bemühten sich, diese ihrem Glauben dienstbar zu machen und eine abendländische Musiktheorie zu schaffen. *Da so Sinn und Zweck der Musik einzig im Lob des allmächtigen Gottes bestand*, wurde ihre Theorie zu einem Zweig der Liturgie, aber auch der Wissenschaften, welcher man sich zum höheren Lob Gottes bediente. Werden jeweils zwei Tetrachorde übereinandergesetzt, entstehen verschiedene Skalen, sogenannte „Kirchentonarten“, diese trugen aus dem griechischen abgewandelte Namen, den „Modus“:

### Kirchentonarten im tonalen Raum von C, Dur/Moll Vergleich

The image displays nine musical staves, each representing a different church mode or scale. The modes are: Dorisch, Phrygisch, Lydisch, Mixolydisch, Aeolisch (Moll), Lokrisch, Ionisch (Dur), a-Moll Harmonisch, a-Moll Melodisch, and A-Dur Diatonisch. Each staff shows the sequence of notes on a five-line staff. Brackets are used to group notes and indicate intervals. A specific bracket is labeled 'Halbtonschritt' (half step). The A-Dur Diatonisch scale is shown as a reference point.

## Der Unterschied zwischen Ton- und Stimmungssystemen:

Stimmungssysteme oder „Tuningsysteme“ beschreiben im Unterschied zu Tonsystemen die **exakte Höhendifferenz** von einer Tonstufe zu anderen Stufen **innerhalb eines festgelegten Tonsystems**.

## Stimmungssystem des Mittelalters:

Wie schon im Kapitel „Akustische Grundlagen“ erwähnt, hat der griechische Mathematiker Pythagoras von Samos schon in der Antike festgestellt, daß eine schwingende Saite

in ihrer vollen Länge	eine bestimmte Grundschiwingung ausführt	= „Prim“
in ihrer $\frac{1}{2}$ Länge	2 x soviel Schwingungen ausführt	= „Oktave“
in ihrer $\frac{1}{3}$ Länge	3 x soviel -,-	= „Quint der Oktave“
usw.		

Nach Pythagoras meint man also, daß eine „pure Quint der Oktave“ in der selben Zeit 3 x mehr Schwingungen ausführt, während die Oktave 2 x mehr Schwingungen als die Grundschiwingung ausführt. Das Schwingungsverhältnis einer „puren Quint“ ist also 3:2, oder als Faktor ( $\frac{3}{2}=$ ) 1,5; andererseits ist die Differenz von reiner Quint zu reiner Oktave eine reine Quart. Daraus folgt eine reine Quart hat das Schwingungsverhältnis 4:3 bzw. den Faktor 1,333 (periodisch).

Pythagoräische Stimmung basiert daher auf lauter solchen „puren Quinten“ in harmonisch-aufsteigender Reihenfolge, bzw. „puren Quarten“ in harmonisch-absteigender Reihenfolge:

- siehe Intervallbestimmung: 1 reine Quint +1 reine Quart = 1 reine Oktave!

von „C1“:	Prim C1 1:1	Quint G1 <b>=1,5</b>	Oktave C2 2:1	Quint der Okt. G2 <b>=3:2</b>	Doppeloktave C3 4:1	
von „G1“:	C1 <b>=2:3</b>	G1 1:1	C2 <b>=1,333per.</b>	G2 2:1	C3 =4:3	G3 4:1
=	Unterquart	Prim	Quart	Oktave	Quart d. Okt.	Doppeloktave
<b>Gegenprobe:</b>	reine Prim 1:1	+ reine Quint x 1,5		+ reine Quart x 1,333 periodisch		= r. Oktave = 2:1

Wie erwähnt wurde im Mittelalter dieses bereits aus der Antike stammende Wissen übernommen und immer weiter entwickelt. Man gab den Noten Namen des Alphabets

A B (durum) C D E F G

Doch es gab auch damals schon „Revolutionäre“, sie „erfanden“ immer neue Kirchentonarten, das brachte mit sich, daß die 2 bekannten Halbtonschritte E - F und (B Durum – C) nicht mehr ausreichten, sie erfanden neue Halbtonschritte (F#, Bb Mollum, Eb, C#, usw.) Hier gab es erste Konflikte mit den Notennamen.

Während im angelsächsischen Bereich das „B Durum“ als „B“ beibehalten wurde, wurde es im mitteleuropäischen Raum auf den nächsten freien Buchstaben im Alphabet - das „H“ umgetauft. Instrumente bekamen immer mehr Tasten, zu den „weißen“ Tasten welche den diatonischen „Tönen“ entsprechen, kamen immer mehr dazwischen eingeschobene „schwarze“ Tasten, die Namen dieser neuen Töne wurden von den danebenliegenden „abgeleitet“.

Selbstverständlich muß darauf hingewiesen werden, daß diese Veränderungen mehrere Jahrhunderte brauchten, um auch verwendet und akzeptiert zu werden. **Das mittelalterliche „Ideal“ lag in perfekten Quarten und Quinten**, die neben Prim und Oktave als besonders „konsonant“ empfunden wurden. Zu dieser Zeit wäre es wahrscheinlich „lebensgefährlich“ gewesen, hätte man diese Anschauung in Frage gestellt.

Schon im 14. Jahrhundert nach Christus fand man folgende Töne auf Tasteninstrumenten vor:

E<sub>b</sub> E F F# G G# A B<sub>b</sub> H (bzw. B) C C# D

Zu diesen Tönen gelangt man, wenn man auf eine pure Quint = Schwingungsverhältnis 3:2 (oder Faktor 1,5) immer wieder eine pure Quint aufsetzt (Quintenzirkel):

**E<sub>b</sub>** B<sub>b</sub> F C G D A E H (B) F# C# **G#** -> E<sub>b</sub>

Werden diese dann über mehrere Oktaven reichenden Töne in 1 Oktave verschoben, ergibt sich das Pythagoräische Stimmungs-System. In diesem geschilderten Fall Pythagoras **E<sub>b</sub> x G#**. Geht man vom Ausgangston E<sub>b</sub> aus, werden alle genannten Quinten „Pure Quinten“ mit dem Schwingungs-verhältnis 3:2 sein.

Nur G# - E<sub>b</sub> ist eine sogenannte „**Wolfsquint**“. Ihr Schwingungsverhältnis ist Faktor 1,479810559 - um das „**Pythagoräische Komma**“ = **Faktor 1,01364326** zu klein.

Am obigen Beispiel erkennt man deutlich daß man bei Kirchentönen bereits in dieser Zeit bis zu 3 B<sub>b</sub> bzw. bis zu 3# als Versetzungszeichen in der Kadenz verwenden konnte.

## Pythagoräische Stimmung – Die Berechnung:

### Berechnung

(harmonisch aufsteigend)

Schwingungsverhältnis in 1 Oktave gebracht: = Faktor in 1 Oktave gebracht:

= Grundton	= 1:1	= 1:1	= 1,0	reine Prim
+ 1 pure Quint	= 3:2	= 3:2	= 1,5	reine Quint
+ 2 pure Quint	= 3:2 von Quint	= 9:8	= 1,125	gr. Sekund
+ 3 pure Quint	= 3:2 von gr. Sekund	= 27:16	= 1,6875	gr. Sext
+ 4 pure Quint	= 3:2 von gr. Sext	= 81:64	= 1,265625	gr. Terz
+ 5 pure Quint	= 3:2 von gr. Terz	= 243:128	= 1,898438	gr. Septime
+ 6 pure Quint	= 3:2 von gr. Septime	= 729:512	= 1,423828	üb. Quart
+ 7 pure Quint	= 3:2 von üb. Quart	= 2187:2048	= 1,067871	üb. Prim
+ 8 pure Quint	= 3:2 von üb. Prim	= 6561:4096	= 1,601807	üb. Quint
+ 9 pure Quint	= 3:2 von üb. Quint	= 19683:16384	= 1,201355	üb. Sekund
+ 10 pure Quint	= 3:2 von üb. Sekund	= 59049:32768	= 1,802032	üb. Sext
+ 11 pure Quint	= 3:2 von üb. Sext	= 177147:131072	= 1,351524	üb. Terz
+ 12 pure Quint	= 3:2 von üb. Terz	= 531441:262144	= <b><u>2,02728653</u></b>	üb. Septime
			: 2,000000	- 1 Oktave
			= <b>1,01364326</b>	„Differenz“

Schreitet man mit 12 puren Quinten aufwärts und bringt sie in eine Oktave, ist die zwölfte Quint um ein „Pythagoräisches Komma“ höher als die Oktave.

**Berechnung***(harmonisch absteigend)*

Schwingungsverhältnis in 1 Oktave gebracht: = Faktor in 1 Oktave gebracht:

= Grundton	= 1:1	= 1:1	= 1,0	reine Prim
+ 1 pure Quart	= 4:3	= 2:3	= 1,33per.	reine Quart
+ 2 pure Quart	= 4:3 von Quart	= 16:9	= 1,77per.	kl. Septime
+ 3 pure Quart	= 4:3 von kl. Septime	= 32:27	= 1,185185	kl. Terz
+ 4 pure Quart	= 4:3 von kl. Terz	= 128:81	= 1,580247	kl. Sext
+ 5 pure Quart	= 4:3 von kl. Sext	= 256:243	= 1,053498	kl. Sekund
+ 6 pure Quart	= 4:3 von kl. Sekund	= 1024:729	= 1,404664	v. Quint
+ 7 pure Quart	= 4:3 von v. Quint	= 4096:2187	= 1,872885	v. Oktave
+ 8 pure Quart	= 4:3 von v. Oktave	= 8192:6561	= 1,248590	v. Quart
+ 9 pure Quart	= 4:3 von v. Quart	= 32768:19683	= 1,664787	v. Septime
+ 10 pure Quart	= 4:3 von v. Septime	= 65536:59049	= 1,109858	v. Terz
+ 11 pure Quart	= 4:3 von v. Terz	= 262144:177147	= 1,479811	v. Sext
+ 12 pure Quart	= 4:3 von v. Sext	= 524288:531441	= 0,98654037	v. Sekund
		eine Oktave höher:	= 1,97308074	v. None
			2,000000	Oktave
			: 1,97308074	- v. None
			= 1,01364326	„Differenz“

Schreitet man mit 12 puren Quarten aufwärts und bringt sie in eine Oktave, ist die zwölfte Quart um ein „Pythagoräisches Komma“ kleiner als die Oktave.

Eine übermäßige Septime ist um 1 pythagoräisches Komma größer, als die Oktave, eine verminderte Sekund ist um 1 Pythagoräisches Komma kleiner; Die Differenz zwischen verminderteter Sekund und übermäßiger Septime ist demnach ein 2faches Pythagoräisches Komma. Alle anderen Töne sind (einfach)-enharmonisch verwechselt um 1 Pythagoräisches Komma (Faktor 1,01364326) voneinander entfernt.

Beispiel: übermäßige Quart = 1,423828 : Komma 1,01364326 = 1,404664  
 verminderte Quint = 1,404664 x Komma 1,01364326 = 1,423828

übermäßige Sext = 1,802032 : Komma 1,01364326 = 1,777777  
 kl. Septime = 1,777777 x Komma 1,01364326 = 1,802032

Somit ist festgestellt, daß bei Pythagoräischer Stimmung Töne enharmonisch nicht ausgetauscht werden können. Man beachte auch, daß die „Halbtöne“, als auch die „Ganztöne“ unterschiedlich weit voneinander entfernt sind.

Beispiel: übermäßige Prim = 1,067871 x mehr Schwingungen als die reine Prim  
 kl. Septime - gr. Sext = 1,053497941 x mehr Schwingungen als gr. Sext

*Mit pythagoräischer Stimmung sind zwar Quart, Quinten und Oktaven rein, was dem mittelalterlichen Ideal von perfekter Konsonanz entspricht, große Terzen und Sexten dafür zu groß und kleine Terzen und Sexten zu klein. Auch der Lösungsversuch durch Verschieben der Stimmung von Eb - G# nach F#-H(B) bringt letztendlich keine Besserung. Der „Wolfs-Intervall“ liegt hier bei der Quint H (B) – F#.*

„Just Intonation“ – die „reine“ ? Stimmung:

Für die polyphone Musik und die Weltanschauung im Mittelalter und in der Gothik mit ihrer musikalischen Ausdrucksform war die pythagoräische Stimmung die „unanfechtbare und einzig wahre“ Stimmung – wollte man es sich nicht mit der kirchlichen Obrigkeit verscherzen.

Doch auch Weltanschauungen ändern sich, und je weiter man auf einer Zeitreise zur Epoche der Renaissance vordringt, umso mehr änderte sich auch die Einstellung zu Musik. Waren es im Mittelalter noch die „konsonanten Intervalle“ auf die man besonderen Wert legte, wurden mit zunehmender Entwicklung des Kontrapunktes die „schlimmen“ Terzen und Sexten der Pythagoräischen Stimmung immer mehr als störend empfunden. Man sah nun die Welt mit anderen Augen, und immer mehr setzte sich der Gedanke durch, daß Intervalle mit den einfachsten Schwingungsverhältnissen die bessere Wahl seien. Freilich, daß ging nicht von heute auf morgen, sondern war ein langer „Kampf“ zwischen den damaligen Theoretikern und dem Klerus. *Musiker waren vermutlich nie so perfekt und haben immer das produziert was gerade gefragt war!*

Obertonreihe / Partialtöne auf C

Nimmt man diese „natürlichen Schwingungsverhältnisse und überträgt sie auf eine diatonische Dur Tonleiter, so ergeben sich daraus folgende Intervalle:

Just Intonation diatonisch

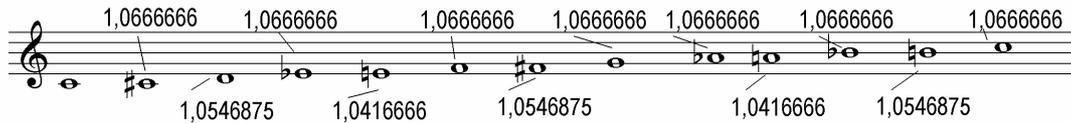
Diese Schwingungsverhältnisse in Faktoren ausgedrückt ergibt:

Intervall	Schwingungsverhältnis	Faktor	Anmerkung
Reine Prim	1:1	= 1	
Kleine Sekund	16:15	= 1,06666	= Halbton
Große Sekund	9:8	= 1,125	= großer Ganzton
Kleine Terz	6:5	= 1,2	= gr. GT + Halbton
Große Terz	5:4	= 1,25	= gr. + kl. Ganzton
Reine Quart	4:3	= 1,33333	= Quint – gr. GT
Übermäßige Quart	(Var #) 45:32	= 1,40625	= Quint - Halbton
Verminderte Quint	(Var b) 64:45	= 1,422222	= Quart + Halbton
Reine Quint	3:2	= 1,5	= pure Quint
Kleine Sext	8:5	= 1,6	= Oktave – gr. Terz
Große Sext	5:3	= 1,66666	= Oktave – kl. Terz
Kleine Septime	16:9	= 1,77777	= Oktave – gr. GT
Große Septime	15:8	= 1,875	= Oktave -- Halbton
Reine Oktave	2:1	= 2	= Quint + Quart

Selbstverständlich wird auch bei Just Intonation durch Addition von Intervall und Intervallumkehrung die Oktave erreicht:

Beispiel: Gr. Terz 1,25 x Kl. Sext 1,6 = 2  
 üb. Quart 1,40625 x verm. Quint 1,4222 = 2

**Chromatische C- Dur, Halbtöne Schwingungsfaktoren Just Intonation, Var. #**



Anhand dieser Übersicht wird deutlich, daß Notenschrift und Stimmung nicht übereinstimmen, so hat das „E“ 4,16 % mehr Schwingungen als das „Eb“, dagegen hat „G“ 6,66% mehr Schwingungen als Ton „Fis“. Da also auch bei diesem Stimmungssystem die Halbtöne nicht gleich groß sind, wäre es nur allzu schön, würden die Intervalle und Akkorde auf den verschiedenen Tonstufen aufgesetzt Ihr Schwingungsverhältnis beibehalten. Leider ist dem nicht so. Von „reiner Stimmung“ kann nicht gesprochen werden!

**Dreiklänge, welche bei diesem Stimmungssystem tatsächlich die angegebenen Faktoren besitzen:**

<b>Dur:</b> 1:1,25:1,5	I	I# / IIb	IV	V	V# / VIb			
<b>Moll:</b> 1:1,2:1,5	I		III	IV		VI	VIIb	VII

<b>Große Terzen zu eng:</b>	<b>zu weit:</b> (Stimmung auf C, Var. #)				
keine	e-g#	f#-a#	a-c#	bb-d	h-d#
	1,28	1,264	1,28	1,2656	1,28

<b>Kleine Terzen zu eng:</b>	<b>zu weit:</b> (Stimmung auf C, Var. #)					
c#-e	d-f	d#-f#	f#-a	g-bb	g#-h	keine
1,1718	1,18518	1,1718	1,18518	1,18518	1,171875	

<b>Quinten zu eng:</b>	<b>zu weit:</b> (Stimmung auf C, Var. #)	
d-a	eb-bb	f#-c#
1,481481	1,481481	1,51703703

Den Unterschied	zwischen großem Ganzton	(9:8)	bzw. Faktor 1,1250
	und kleinem Ganzton	(10:9)	bzw. Faktor 1,11111
bezeichnet man als	„Syntotisches Komma“	(81:80)	bzw. Faktor 1,01250

Auf das selbe Komma stößt man, vergleicht man eine Pythagoräische Terz (Faktor 1,265625) und eine gr. Terz in Just Intonation (Faktor 1,25). Selbiges Komma ergibt auch beim Vergleich von gr. Sexten.

Streicher stimmen ihre Saiten in „puren“ Quinten (Basso in Quartan), und überprüfen die Reinheit der Terzen mit „Differenztönen“ – siehe Kapitel akustische Grundlagen – sprich sie gehen vom Ideal aus, daß eine gr. Terz das Schwingungsverhältnis 4:5 (1,25) und eine kleine Terz das Verhältnis 5:6 (1,2) hat. = „Just Intonation!“

## Der Anpassungsvorteil und Probleme durch Flexibilität:

Instrumente, die eine starr vorgegebene Stimmung haben als Beispiel: Stabspiele, Orgel, Klavier, Akkordeon, Harfe, Gitarre, hängen natürlich am vorgegebenen Stimmungssystem. Das heißt Musiker können die vorgegebene Tonhöhe nicht anpassen. Alle anderen Instrumentalisten und auch Sänger haben die Möglichkeit und damit auch das große Problem der Anpassung. (Sänger, Streicher, Bläser).

Bläser, und speziell Blechbläser sind natürlich theoretisch ganz entscheidend auf die Obertonreihe angewiesen, aus der – wie in diesem Kapitel gezeigt – auch die Schwingungsverhältnisse für „Just Intonation“ abgeleitet sind. Zu beachten ist hierbei besonders der Intervall 4. – 5. Oberton (transponiert bei Sopran und Tenorinstrumenten das „C2“ und das „E2“) = Schwingungsverhältnis 1,25 – eine große Terz. Wie klein diese „Große“ Terz im Vergleich zu Equal Tuning ist, wird beim Kapitel „Berechnung von Ventilzuglängen“ noch eine entscheidende Rolle spielen.

Zusammenfassend kann man also sagen, daß mit Pure bzw. „Just Intonation“ zwar in einigen Tonarten pure Quarten und Quinten sowie pure Terzen und Sexten erreicht werden, was bedeutet das die wenigsten Schwebungen auftreten, sowie Summations- und Differenztöne durch das Gehirn verstärkt hörbar werden, was einen großartigen wahrgenommenen Klang bedeutet; man bei Modulationen (= Übergang von einer Tonart in andere Tonarten) aber auf sehr schlimme „Wölfe“ stößt, und dieses Stimmungsideal in solchen Tonarten somit musikalisch nicht mehr brauchbar ist. Einfache Kadenz (Akkordfortschreitungen) wie die Kadenz I – IV – V – I sind auf mehreren Stufen möglich; eine Kadenz I – IIm – V – I ist z. B. nur auf der erniedrigten VII. Stufe (VIIb) „rein klingend“ möglich.

Sei es, daß dieses Stimmungssystem für „harmonisch noch relativ anspruchslose“ Musik durchaus eine gute Wahl darstellt, das Ideal der „simplen Schwingungszahlen“ zur Zeit der Renaissance war es für vorab gestimmte Instrumente ohne Flexibilität allemal. Der Übelstand der „Wölfe“ - auch bei sehr benachbarten Tonarten und einfachen Kadenz - wurde aber immer „fühlbarer“ je weiter sich das Modulationswesen und die Kompositionstechniken weiterentwickelten.

Man kann eine Oktave mathematisch nicht „rein“ teilen. Auch Versuche mit mehr als 12 Tönen pro Oktave brachten nicht den erhofften Durchbruch. Die „Wohltemperierten Stimmungssysteme“ des 18. Jahrhunderts suchten die Stimmungsprobleme dadurch zu lösen, daß das Komma ungleichmäßig auf die 12 Quinten verteilt wurde. C-Dur und die benachbarten Tonarten bis 3b und 3# wurden möglichst „rein“ gestimmt, Tonarten mit mehr Vorzeichen hatten dadurch aber nach wie vor starke Schwebungen „Wölfe“ und Unreinheiten. Man kann nun erahnen, warum bestimmten Tonarten bestimmte Eigenschaften und Charakter zugeordnet wurden wie „strahlend“, etc. und warum Komponisten für ihre Werke ganz bestimmten Tonarten gewählt haben.

## Die „Gleichschwebende Stimmung“ – Equal Tuning (E.T.)

Um das Prinzip von Equal Tuning wirklich verstehen zu können, nochmals kurz zur Erinnerung das Prinzip der „Pythagoräischen Stimmung“:

12 pure Quinten mit dem Schwingungsfaktor 1,5 = 7 Oktaven, (Quintenzirkel)  
der letzte Ton (von C ausgehend) ist ein His,  
dieses His ist um 1 Pythagoräisches Komma „höher“ als der erwartete Ton C.

Zur Zeit J. S. Bachs machte Andreas Werckmeister 1691 in seinem Buch

*„Musikalische Temperatur und wahrer mathematischer Unterricht,  
wie man Orgelwerke wohltemperiert stimmen könne“*

den Vorschlag, den Unterschied zwischen „his“ und „c“ (=Pythagoreisches Komma), gleichmäßig auf alle zwölf Quinten aufzuteilen. Somit ist jede Quint nicht mehr „rein“ = 2:3 (1,5), sondern um 1/12 des Pythagoräischen Kommas kleiner. Alle Tonarten werden brauchbar und Töne könnten enharmonisch verwechselt werden. Daraus folgt, daß es bei E.T. 12 gleich große Halbtöne gibt, daß 1 Ganzton aus 2 gleichgroßen Halbtönen besteht, eine kleine Terz aus 3 gleich großen Halbtönen, usw.

Die unterschiedlich gelagerten „Schwebungen“ der bis zu dieser Zeit benutzen Stimmungssysteme wie „Pythagoräische Stimmung“ oder „Just Intonation“ und andere „Meantone“ Stimmungssysteme werden gleichmäßig, also „gleichschwebend“ auf alle Intervalle verteilt.

**Die Berechnung der Halbtöne in 12-Ton Equal Temperament:**

Die Formel für den Schwingungsfaktor lautet:	=	$2^{(1/12)}$	
oder	=	$2^{(0,08333)}$	
Halbton ET	=	1,059463094	
Beispiel 2 Halbtöne (=1 Ganzton)	=	$2^{(2/12)}$	
oder	=	Halbton ET x Halbton ET	
Ganzton ET	=	1,122462048	
12 Halbtöne (=1 Oktave)	=	$2^{(12/12)}$	= 2
oder	=	Halbton ET <sup>12</sup>	= 2
<b>Die goldene Mitte = das geometrische Mittel von 2/1=</b>		<b>Wurzel aus 2=1,4142..=6 Halbtöne!</b>	

J. S. Bach war, wie auch andere zeitgenössische Musiker von der Idee Werckmeisters begeistert. Schon in seinen zweistimmigen Inventionen hatte er versucht, den praktischen Tonartenkreis zu erweitern. Durch die damals neu aufkommende Temperierung war das Stimmungsproblem für die Tasteninstrumente gelöst. Jetzt war es möglich in sämtlichen 12 Tonarten zu musizieren.

Den praktischen Beweis hierfür erbrachte Bach in seinem berühmten zweibändigen Werk „Das Wohltemperierte Klavier“ 1722. In jedem der zwei Bände sind je 12 Präludien mit Fuge jeweils in Dur und in Moll, diese stehen in allen Tonarten, auch in solchen, die früher nicht gebraucht werden konnten wie z. B. Cis-Dur, gis-moll usw.

**Die Einheit „CENT“**

Bisher wurden die Schwingungsverhältnisse immer mit Dezimalbruchzahlen bzw. Schwingungsfaktoren dargestellt. Man könnte diese selbstverständlich auf in Hz darstellen. Um aber einen genauen Überblick bieten zu können wird – auch auf modernen Stimmgeräten (=Tunern) – die Einheit „CENT“ benutzt, wobei 100 Cent genau den Abstand eines Halbtones in Equal Tuning darstellen. 1 Cent ist also 1/100 Halbtonschritt eines Halbtones in Equal Tuning, 200 Cent ist ein Ganzton, 1200 Cent die Oktave. Muß man bei Faktoren multiplizieren, so kann man im Gegensatz dazu Cent addieren.

<b>Equal Tuning – Cent</b> (anhand der chromatischen Tonleiter auf C-Dur, auf „C1“ bezogen):												
C1	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A	A#	H1	C2
0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200

Berechnung:	<b>Cent</b>	=	<b>(Log2 von Schwingungsfaktor)</b>	<b>x 1200</b>
-------------	-------------	---	-------------------------------------	---------------

Für die Berechnung von Cents empfiehlt sich ein technischer Rechner. Sollte die mathematische Funktion „Log2“ nicht vorhanden sein kann sie auch folgendermaßen errechnet werden:

Log2 von Schwingungsfaktor	=	(Log(natürlich) von Schwingungsfaktor) / (Log(natürlich) v. 2)
----------------------------	---	--

**Bei Equal Tuning = enharmonisch verwechselbar =** könnte man den Log2 auch so ermitteln:  
 Man benötigt 12 Halbtöne (=z. B. kl. Sekund) um eine Oktave zu komplettieren,  
 d. h. 1 kl. Sekund = 1/12 = 0,083333 Oktaven = Log2 v. Intervalfaktor  
 Man benötigt 2 übermäßige Quarten um 1 Oktave zu komplettieren,  
 d. h. 1 üb. Quart = 1/2 = 0,5 Oktaven = Log2 von Intervalfaktor usw.

Beispiele für Cent Berechnung:

<b>Halbton Cent</b>	=	(Log2 von 1,059463094)	x 1200
	=	(0,08333)	x 1200
	=	<b>100 Cent</b>	
<b>Ganzton Cent</b>	=	(Log2 von 1,122462048)	x 1200
	=	(0,16666)	x 1200
	=	<b>200 Cent</b>	
<b>Oktave Cent</b>	=	(Log2 von 2)	x 1200
	=	(1)	x 1200
	=	<b>1200 Cent</b>	

**Vergleich der vorgestellten Stimmungs-Systeme mit „CENT“**

Anhand der Einheit „Cent“ lassen sich verschiedene Stimmungssysteme exakt miteinander vergleichen. Stellt man die Tonstufen den entsprechenden Cent-Werten von Equal Tuning gegenüber, so erkennt man, ob in einem anderen Stimmungssystem ein Ton (-) tiefer bzw. (+) höher als Equal Tuning ist.

Tuning Systeme - Vergleich																						
<b>Equal Temperament - "Temperierte Stimmung", 12 gleiche Halbtöne, Alle Töne enharmonisch verwechselbar</b>																						
Equal Temperament	Kl. Sek	Gr. Sek.	Kl. Terz	Gr. Terz	Quart	Verm. Quint	Quint	Kl. Sext	Gr. Sext	Kl. Sept	Gr. Sept											
Faktor	1,0595	1,1225	1,1892	1,2599	1,3348	1,4142	1,4983	1,5874	1,6818	1,7818	1,8877											
CENT E.T.	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100											
<b>Just Intonation - Renaissance - "Reine Stimmung" Schwingungsverhältnisse von Obertonreihe abgeleitet, pure Terzen + Sexten</b>																						
Just Intonation	Kl. Sek	Gr. Sek.	Kl. Terz	Sept. Komma	1,0125	Quart	Var #	Var b	Quint	Kl. Sext	Sept. Komma	1,0125	Kl. Sept	Gr. Sept								
Faktor	1,0667	1,1250	1,2000	1,2900	1,3333	1,40625	1,4222	1,5000	1,6000	1,6667	1,7778	1,8750										
CENT E.T.	112	204	316	386	498	590	610	702	814	884	996	1088										
Abweichung von ET	+ 12	+ 4	+ 16	-14	-2	-10	+ 10	+ 2	+ 14	-16	-4	-12										
<b>Pythagoräische Stimmung - Mittelalter - Gotik "Reine Quinten und Quart, Terzen und Sexten alle unrein, 1 zu kleine Quint"</b>																						
Pythagoras	DES	Cis	Ebes	D	Eb	Dis	Fes	E	F	Eis	Ges	Fis	Ases	G	Ab	Gis	Heses	A	Bb	Ais	Ces	H
Faktor	1,0535	1,0679	1,1099	1,1250	1,1852	1,2014	1,2486	1,2656	1,3333	1,3515	1,4047	1,4238	1,4798	1,5000	1,5802	1,6018	1,6648	1,6875	1,7778	1,8020	1,8729	1,8984
CENT E.T.	90	114	180	204	294	318	384	408	498	522	588	612	678	702	792	816	882	906	996	1020	1086	1110
Pythagoräisches Komma	23,46	23,46	23,46	Comma=	1,0136433	23,46	23,46	23,46	23,46	23,46	23,46	23,46	23,46	23,46	23,46	23,46	23,46	23,46	23,46	23,46	23,46	23,46
<b>Pythagoräische Stimmung - Variante "Eb x G# Tuning"</b>																						
Eb x G# (=Original)	1,0679	1,1250	1,1852	1,2656	1,3333	1,4238	1,5000	1,6018	1,6875	1,7778	1,8984											
CENT E.T.	114	204	294	408	498	612	702	816	906	996	1110											
Abweichung von ET	+ 14	+ 4	-6	+ 8	-2	+ 12	+ 2	+ 16	+ 6	-4	+ 10											
Einziges Quint zu klein			1,479810553	x. Comma = 1,5																		
<b>Pythagoräische Stimmung - Variante "F# x H Tuning"</b>																						
F# x H (=Modifiziert)	1,0535	1,1250	1,1852	1,2656	1,3333	1,4047	1,5000	1,5802	1,6875	1,7778	1,8984											
CENT E.T.	90	204	294	408	498	588	702	792	906	996	1110											
Abweichung von ET	-10	+ 4	-6	+ 8	-2	-12	+ 2	-8	+ 6	-4	+ 10											
Einziges Quint zu klein						1,4798	x. Comma = 1,5															

Prim (0 Cent, Faktor 1) und Oktave (1200 Cent, Faktor 2) sind bei allen Stimmungssystemen aufgrund des Oktavprinzips gleich und scheinen daher in der obigen Tabelle nicht auf.

Vergleicht man in Just Intonation mit den „natürlichen“ Schwingungsverhältnissen und Equal Tuning, so stellt man schnell fest

daß **kl. Terz und gr. Sext in Equal Tuning wesentlich kleiner** sind  
 und **gr. Terz und gr. Sext in Equal Tuning wesentlich größer** sind als in „Just Intonation“

Zusammenfassend kann man sagen, daß Equal Temperament (E.T.) sich sehr schnell zum „Standard Tuning System“ entwickelt hat. Hier überwiegen in Summe einfach die Vorteile der enharmonischen Verwechselbarkeit und der Modulationsfähigkeit. Selbstverständlich hat Equal Tuning Jahrzehnte gebraucht, um akzeptiert zu werden; mußte doch das Gehör plötzlich ganz andere Intervalleverhältnisse als „lupenrein“ einstufen und als gegeben akzeptieren. Stimmungssysteme waren und sind immer eine Modeerscheinung und wurden den jeweiligen musikalischen Gegebenheiten angepaßt.

„Schwebungen“ gibt es bei Equal Tuning, Pythagoräischer Stimmung, Just Intonation und vielen anderen Meantone-Systemen, diese hier zu behandeln würde die Grenzen dieser Arbeit sprengen.

Einige sollen nur kurz namentlich aufgezählt werden: Lucy Tuning (Charles Lucy, Entdecker der Entfernung von der Erde zum Mond), Marpurg, Young,  $\frac{1}{4}$  syntotic Comma Meantone, und viele mehr.

Die gesamte Stimmungsproblematik läßt sich auf die Diskrepanz zwischen der reinen und der pythagoräischen Terz zurückführen, oder anders ausgedrückt:

***Das Bemühen um die richtige Intonation ist immer der Kampf  
zwischen purer Terz und reiner Quint!***

Das Verständnis und Wissen um diese verschiedenen Stimmungssysteme erlaubt es die Themen Resonanz und Intonation in Angriff zu nehmen.

## Ein Kammerton und Stimmtöne...

Aus dem Kapitel Akustische Grundlagen geht hervor, daß jeder Schwingungszahl eine Klanghöhe entspricht. Andererseits wurde dargelegt, daß im Tonsystem nur relative Tonhöhen notiert werden, es gehen also aus der Notation keine Angaben über tatsächliche Schwingungszahlen hervor. Mit Tuningsystemen andererseits werden Schwingungsverhältnisse für ein entsprechendes Tonsystem festgelegt. Welcher Ton wo an den Notenlinien platziert ist, gibt der „Schlüssel“ vor, Notation in Tenor- und Basslage sind historisch bedingt.

Folglich fehlt jetzt noch eine Angabe, welche exakte Tonhöhe ein bestimmter Ton tatsächlich haben soll. Nur mit dieser Angabe kann man die Stimmung von Instrumenten vereinheitlichen. **Auf der internationalen Stimmtonkonferenz in Wien im Jahr 1885 wurde ein „Kammerton“ festgelegt, der als Norm gelten sollte.** Dem eingestrichenen A (A1) = zweithöchste Saite einer Violine - Stimmton bei Violinen - wurde eine Frequenz von 435 Hz zugeteilt. Man verfertigte einen Metallstab, der in Paris unter stets gleichen Bedingungen aufbewahrt wird, angeschlagen ergibt er stets den „Kammerton A“, auf den alle Instrumente der Welt gestimmt werden sollten und alle Orchester der Welt „eingestimmt“ werden müssten!

Doch die Musiker hielten sich nicht lange an diese Abmachung. Auf der Suche nach immer brillanteren Klangeffekten schraubte man diese „Normalstimmung“ von 435 Hz stets ein wenig höher hinauf. Man vergaß die negative Seite, daß Blasinstrumente + auch Sänger(innen) sich diesen Änderungen nicht so leicht anpassen können, und daß „Spitzentöne“ bei Gesangsstimmen nicht unbeträchtlich höher zu intonieren waren als bei Normalstimmung.

Nach jahrhundertelangen Epochen, in denen jede Orgel/Stadt und auch jedes namhafte Orchester gewissermaßen seinen eigenen Stimmton besaß, setzte sich nochmals eine neue Norm ~ weltweit durch:

**Der offizielle Kammerton „A1“ hat seit dem Jahr 1939 nach ISO exakt 440 Schwingungen / Sekunde.** Instrumente wurden dann zum Teil mit „LP“ = low pitch markiert. Das bleibt aber eine graue Theorie, Norm und These; Was wenn sich die Temperatur schlagartig ändert? Und zudem wollen alle wieder etwas höher rücken ~ aktuell 442 Hz - aber warum? Was passiert mit all den historischen Instrumenten vor dieser Zeit?

<b>Der Kammerton im Wandel der Zeit:</b>	<b>„a1“ =</b>
Allgemein gebräuchliche Kirchenstimmung in Norddeutschland, 1619	567 Hz
Schlick, tiefe Stimmung Silbermann Straßburg, 1714	377 Hz
Händels Gabel, 1751	423 Hz
Internationale Stimmtonkonferenz, Wien 1885	435 Hz
Britische Armeestimmung 1879	452 Hz
<b>Alt-Österreich-Ungarische Militärstimmung „Hohe Stimmung“</b>	<b>~460 Hz</b>
<b>Internationale Konferenz der ISA, 1939</b>	<b>440 Hz</b>

Da der Kammerton in der heutigen Zeit mit 440 Hz normiert ist, kann man je nach Stimmungssystem jedem anderen Ton im Tonsystem seine exakte Tonhöhe zuteilen. Manchmal kann man den Kammerton mit 440 Hz beim Einstimmen von Ensembles nicht realisieren, sei es wegen Temperatur oder wegen anders gestimmter Instrumente, die im Ensemble mitwirken sollen und eine andere Stimmung haben (alle Instrumente, die sich nicht ohne weiteres umstimmen lassen) wie z. B. Stabspiele, Orgel, Klaviere, usw. Man wird sich in diesem Fall beim Einstimmen logischerweise der Stimmung des betreffenden Instrumentes anpassen. Auch gibt es die scheinbar nie endende Tendenz (warum?) bei manchen Orchestern bereits wieder etwas höher einzustimmen (~442 Hz). Das birgt das Potential bei vorgegebenen Ventilschlaufenlängen die Faktoren zu verschlechtern.

## Der Stimmton und die Praxis des Einstimmens in Ensembles

Ist der offizielle Kammerton „A1“ bei Ensembles, welche von Streichern dominiert sind auch Stimmton, so hat dies seinen Grund darin, daß Violinen traditionell zuerst die zweithöchste Saite = A1 = einstimmen, und dadurch sehr einfach die restlichen tieferen 3 Saiten einstimmen können, so hat dies bei Instrumenten mit anderer Grundstimmung nicht allzu viel Sinn.

Bei Blasinstrumenten deren Grundstimmung heutzutage zum größten Teil „Bb“ ist wird normalerweise in Blechbläserensembles der klingende Ton „Bb1“ (= 466,16 Hz E.T. bei Kammerton A1=440 Hz) in verschiedenen Oktavlagen zum Einstimmen verwendet. Daß diese Praxis viel Sinn macht, zeigt daß nächste Kapitel. Welche Auswirkungen es haben kann, z. B. ein „Eb-Waldhorn“ oder eine „Eb-Tuba“ mit dem Kammerton A als Stimmton zu stimmen wird im nachfolgenden Kapitel näher durchleuchtet.

Betrachtet man den Kammerton „A1“ nach „alter österreichischer Militärstimmung“ mit ~ 460 Hz E.T., so bemerkt man, daß diese Stimmung um nahezu einen Halbton höher war als unsere jetzige Grundstimmung.

Die meisten elektronische Stimmgeräte können dazu verwendet werden, jeden beliebigen Ton als Stimmton zu verwenden. Sie sind „in sich“ in Equal Tuning abgeglichen und zeigen auf einer Skala den entsprechenden Ton optimalerweise mit „440 Hz“ bzw. 0 Cent an (wenn in Equal Tuning eingestimmt wird). Abweichungen nach unten und oben von der eingestellten Stimmfrequenz werden in +/- Cent angezeigt.

Ein „Einblasen“, Aufwärmen der Lippen, Zunge, Muskulatur, Mundstücks und des Instruments auf die nachfolgende Betriebstemperatur sollte selbstverständlich sein, darauf gehe ich nicht weiter ein.

Für Bläser gilt: Sie sollten den Stimmton unbedingt so anblasen, wie sie dies im folgenden Verlauf des Musizierens vorhaben. Funktioniert das **gleichzeitige** Einstimmen bei Streichern sehr gut, weil diese Ihr Ohr sehr nahe an ihrem Instrument haben und dieses während des Stimmens auch nicht abzusetzen brauchen, so müssen Bläser immer wieder absetzen um gegebenenfalls die Rohrlänge ihres Instruments zu korrigieren.

Ein anderer negativer Effekt bei Bläsern ist der „Nachahmungseffekt“ beim Einstimmen. So wird vom Bläser „instinktiv“ versucht, den einmal „bekannten Stimmton“ möglichst gut zu intonieren, ohne zu berücksichtigen, daß der Stimmton optimalerweise die „goldene Mitte“ der von den Lippen und vom Instrument produzierten Resonanz sein soll.

Man kann das leicht überprüfen, in dem man als „Einstimmer“ - mit einem Stimmgerät bewaffnet - absichtlich einmal einen zu hoch oder zu tief gespielten Ton als richtig deklariert, und anschließend die Reaktion der nächsten Bläser beobachtet. Es ist keine Schande beim Einstimmen nicht zu stimmen, denn aus diesem Grund wird ja eingestimmt!

*Das Einstimmen auf den Stimmtton darf nicht mit einer „Gehörschulung“ verwechselt werden. Beim Einstimmen als Bläser geht es darum, sich seine persönlichen „Reserven“ und Intonationsspielräume für das anschließende Musizieren zu schaffen!*

Mancher Bläser muß sich wirklich „überwinden“ hier vor versammelter Mannschaft solistisch in Erscheinung zu treten und eine „wirklich“ optimal resonierte Tonhöhe und Qualität zu produzieren, welche in Lautstärke und Klang (inklusive Tonhöhenvibrato, welches beim Einstimmen keine negativen Auswirkungen hat) des nachfolgenden Musizierens gleichkommt. Eine Gruppe von Bläsern sollte immer nacheinander und abwechselnd den Stimmtton anblasen. Ist die Feinarbeit geleistet, so kann durch gemeinsames Anspielen die eine oder andere Schwebung im Unisono beseitigt werden.

Zudem sollte unbedingt berücksichtigt werden, daß Bläser auf einen Ton einstimmen sollen, welcher im Tonhöhenbereich liegt, in welchen sie anschließend spielen und auch stimmen sollen. Was bringt es z. B. einen Bläser, der in der mittleren Lage aus „Ansatzgründen“ bereits „zu tief“ ist auf einen Stimmtton in mittleren Register einzustimmen? Er wird anschließend bei seiner tieferen Spieltätigkeit durchwegs zu hoch sein!

Ein großes Problem bei Amateurkapellen ist die Auffassung (einer unterschiedlich großen Anzahl der musikalischen Mitstreiter), daß jetzt die Stimmung passe, das Kapitel erledigt ist und man sich im weiteren Verlauf darüber keine großen Gedanken mehr machen braucht. Wir haben eingestimmt, wir stimmen jetzt! Bei einer Gitarrengruppe wäre das fürs erste auch so. Für Bläser beginnt aber jetzt erst das Intonieren, und zwar bei jedem geblasenen Ton im musikalischen Kontext des Stückes!

Der gute Ton macht bekanntlich die Musik und Stimmung ist das A&O jeder guten Musik, egal ob es sich um ein Berufsorchester oder ein Schülerorchester handelt, gleichgültig ob auf einer Probe, bei einem Frühschoppen oder bei einem Konzert, Klassik, Pop, Jazz, Volksmusik. Aus diesem Grund sind auch vielleicht auf den ersten Blick unkonventionelle Praktiken erlaubt, welche zu einer Verbesserung der Stimmung, Auffassung und Intonation beitragen! Das Einstimmen auf einen Stimmtton selbst ist nur eine erste Annäherung auf einen gemeinsamen Nenner, eine Anfangsreferenz.

....kennen Sie den schon: **Was ist der Unterschied zwischen dem 1. und dem 4. Hornisten?**

(.....ein Halbton!)

...sprach Karajan zum 1. Trompeter: **„Sie haben heute aber ein hohes Fis!“**

1. Trompeter: **„Da haben Sie mein G noch nicht gehört!“**

...Gespräch zwischen 1. und 2. Posaunisten: **„Was für ein „A“ hast Du heute?“**

## Naturtöne und fiktive Rohrlängen von Blechblasinstrumenten

### Zusammenfassung der bisher erläuterten Grundlagen:

Im Kapitel „akustische Grundlagen“ wurde beschrieben wie Töne entstehen, Schallwellen bei unterschiedlichen Materialien und Temperaturen übertragen werden und dann vom Gehör umgesetzt werden. Es wurde die Resonanz von Blechblasinstrumenten kurz erläutert und daß jeder Ton nicht nur eine tiefste Grundschiwingung hat, sondern aus vielen Teilschwingungen „Partialtönen“ besteht. Im Kapitel „musikalische Grundlagen“ wurde der Unterschied zwischen Notensystem und Stimmungssystem erklärt und die Einheit „Cent“ als Gradmesser für Stimmungssysteme erklärt.

Da es für das nähere Verständnis dieses Kapitels erforderlich ist, diese Grundlagen vollinhaltlich zu verstehen, wird empfohlen, diese beiden Kapitel gegebenenfalls nochmals durcharbeiten, bevor dieses Kapitel in Anspruch genommen wird.

### Das Prinzip von Resonanz und Rohrlänge:

Beim Musizieren mit Blechblasinstrumenten sind die Schallerreger die vibrierenden angespannten Lippen des Bläusers. Diese werden durch „Anstoßen“ mit Druckluft aus den Lungen geflutet und so zum Schwingen angeregt. Durch richtige Atemtechnik, Hals- und Zungen- und Lippenstellung werden die Vibrationen der Lippen durch das Mundstück auf die im Instrument befindliche Luftsäule übertragen, und diese wird zum Mitschwingen angeregt. Durch den Schallbecher werden diese Schwingungen größtenteils zu den Lippen zurückreflektiert, der Rest an die Außenwelt weitergegeben.

Das Instrument selbst wirkt als Resonator und bestimmt durch seine Rohrlänge und Mensur die Länge der schwingenden Luftsäule und somit die resonante Tonhöhe = Schwingungszahl (Hz). In geschlossenen Luftsäulen kommen nur Longitudinalwellen (Längswellen) zustande. Durch die abwechselnde Verdichtung und Verdünnung der Luft werden die Lippen neben dem Luftstrom aus der Lunge auch durch die Schwingungen der Luftsäule im Instrument zum Weiterschwingen animiert.

Da die Temperatur für die Geschwindigkeit von Schall in Luft in der obigen Definition einen bedeutenden Einfluß hat und auch die Schwingungszahl der Lippen durch den Bläser variiert werden können, kann man zwischen Rohrlänge und Schwingungszahl kein fixes Verhältnis herstellen.

Die durch die Lippen des Bläusers angeregte schwingende Luftsäule schwingt nicht nur in ihrer ganzen Länge = Grundschiwingung, sondern auch in ihrer Hälfte, Drittel, Viertel, usw (=Partialtöne). Genauso verhält sich auch das Blasinstrument als Resonator. Es resoniert auch die Teilschwingungen der Luftsäule, sogenannte Obertöne, die durch Überblasen der Grundschiwingung bei gleichbleibender Rohrlänge entstehen. Siehe auch Kapitel „Akustische Grundlagen“, Punkt 7 – 10.

Darüber hinaus wird das Instrument diejenige Teilschwingung resonieren, zu der das Schwingungsverhältnis der Lippen am passt. Ist die Differenz zum nächst höheren bzw. tieferen Oberton kleiner als die aktuelle, so wird das Instrument auf den nächstgelegenen Oberton „umspringen“ und diesen resonieren (Kiecke), oder gewollt bei Bindungen. Andererseits kann mit Hilfe des Ansatzes die resonante Tonhöhe eines jeden resonierten Obertones nach oben (durch zusätzliches Anspannen der Muskulatur) und nach unten bis zu einem gewissen Grad „gedehnt“ werden.

Dieser „menschliche“ Umstand ist einerseits für notwendige Intonation sehr vorteilhaft, andererseits erschwert es das Treffen der „goldenen Mitte“ eines jeden Tones, bei welcher Lippenschwingungen und Resonanz des Instruments sich optimal ergänzen. Kann diese „optimale Mitte“ nicht angewendet werden, weil z. B.

1. diese vom Bläser bei den einzelnen Tönen nicht gefunden „getroffen“ wird – oder
2. diese optimal resonante Tonhöhe nicht der gewünschten Tonhöhe entspricht -

bedeutet dies einen zusätzlichen Energieaufwand für die Ansatzmuskulatur des Bläusers, und diesen Aufwand will wiederum jeder Bläser so gering wie möglich halten. (Ansatz sparen)

Daraus kann man schließen, daß ein Blasinstrument, das auf Grund seiner Rohrlänge und Mensur die erwarteten Schwingungen optimal resoniert

1. mit wesentlich weniger Energieaufwand gespielt werden kann
2. daß der Bläser eine wesentlich bessere Intonationskontrolle bekommt
3. der Ton in der „goldenen Mitte“ der Frequenz mit dem geringsten Widerstand des Instruments konfrontiert wird und damit freier schwingt und besser klingt,

als es mit einem schlecht gestimmten bzw, konzipierten Instrument der Fall ist.

Da man mit den menschlichen Einflüssen auf die Tongebung bei schlecht, wie auch bei gut konzipierten Instrumenten auskommen muß, und diese Einflüsse nur durch „Übung“ trainiert und optimiert werden können, beziehen sich alle Berechnung und Aussagen immer nur auf die objektive Ebene der physikalischen Resonanz (=goldene Mitte) und Stimmung der Instrumente selbst.

Im Kapitel „Musikalische Grundlagen“ wurde festgestellt, daß Equal Tuning das einzige Stimmungssystem ist, welches enharmonisch verwechselt werden kann und der Abstand zwischen allen chromatischen Halbtonen gleich groß ist.

Zudem haben wissenschaftliche Untersuchungen sehr deutlich bewiesen, daß eine Orientierung am Stimmungssystem Equal Tuning die bestmögliche Ausgangsbasis für die Intonationsarbeit von Streichern, Sängern und Bläsern bieten würde. Folglich müssen sich Blechbläser an „Equal Tuning“ als Stimmungssystem orientieren, obwohl die Instrumente von Haus aus ganz andere Schwingungsverhältnisse resonieren!

**Obertonreihe auf c**

Grundschiwungung x

1    2    3    4    5    6    7    8    9    10    11    12 usw.

Beachten Sie den Unterschied zwischen Notensystem und Stimmungssystem: Das Notenbild sagt nichts über das gewünschte Stimmungssystem aus. So hätte z. B. der 5. Oberton „e2“ nach temperierter Stimmung 1,259921 mal mehr Schwingungen als der 4. Oberton „c“, in der Naturtonreihe hat er ein Schwingungsverhältnis von 5:4 = 1,250 mal mehr Schwingungen!

Beim jeweiligen 5. und 10. Oberton = gr. Terzen besteht die größte natürliche Abweichung der Stimmung zu Equal Tuning! -14% eines Halbtonschrittes. Hier wird deutlich, was „Intonation“ bedeutet, muß doch bei diesem Oberton die „goldene Mitte“ der Resonanz mitunter absichtlich nach oben verlassen werden, um mit Instrumenten welche eine andere Grundschiwungung haben bzw. in Equal Tuning eingestimmt sind zu „intonieren“.

Da sich Equal Tuning wie auch Just Intonation und auch die Physik an das „Oktav-Prinzip“ halten, stimmen die Schwingungsverhältnisse der Obertöne 1, 2, 3, 4, 6, 8 usw. welche das Instrument resoniert relativ gut mit Equal Tuning überein. Die schwarz eingezeichneten Töne 7 und 11 weichen so weit von unserem verwendeten 12-Tonsystem ab, daß sie in dieses nicht hineinzupassen scheinen. Auf Instrumenten die keine Möglichkeit bieten, die Rohrlänge zu variieren, können also diese Obertöne „Naturtöne“ produziert werden.

## Berechnung von Grundschwingung und fiktive Rohrlänge eines Konus:

### Wichtiger Hinweis:

1. Die Angaben der „Rohrlänge“ beziehen sich immer auf die tatsächliche Länge der schwingenden Luftsäule = Wellenlänge des fiktiven Grundtons. Durch den Mensurverlauf und den Schallbecher des Instruments wird die tatsächlich vorhandene physikalische Rohrlänge verändert, d. h. die tatsächlichen Abmessungen der „fertigen“ Instrumente sind kleiner als die hier errechneten „fiktiven“ Rohrlängen = Luftsäulen/Wellenlängen.

2. Dies hat aber keinen Einfluß auf die Berechnung von Verlängerungsfaktoren für Ventile und damit auf die Länge der Ventiltzüge, da sich die Ventile immer im zylindrischen Teil des Teil des Instruments befinden und die tatsächliche Länge der schwingenden Luftsäule durch Ventile verlängert werden. (Ein beidseitig offener Zylinder hat die selben Schwingungsmoden wie ein Konus mit Spitze, egal ob dieser offen oder geschlossen ist; ein Einschieben einer zylindrischen Rohrschleife hat 2 offene Enden an den jeweiligen Übergängen).

### Einige Beispiele:

Länge der schwingenden Luftsäule	fiktiver Grundton	tatsächliche Abmessungen von Instrumenten inkl. Mundstück, Stimmton = „kl. Bb“, +/- cm sind mensurabhängig
bei 20 °C und Kammerton A1=440 Hz, E. T.		
	<b>schwingende fiktive Luftsäule:</b>	<b>tatsächl. Abmessungen:</b>
Trompete in Bb	1,47387 m	= ca. 1,39 m
Althorn in Eb	2,2085 m	= ca. 2,01 m
Posaune in Bb	2,9477 m	= ca. 2,71 m
Tenorhorn in Bb	2,9477 m	= ca. 2,69 m
Bariton in Bb	2,9477 m	= ca. 2,67 m
Waldhorn in F	3,9376 m	= ca. 3,73 m
Basstuba in F	3,9376 m	= ca. 3,63 m
Basstuba in Bb	5,89547 m	= ca. 5,53 m

Die äquivalente fiktive Rohrlänge bestimmt die resonierte Grundschwingung eines Blechblasinstruments. Soll z. B. wie im 1. Beispiel die Obertonreihe von klingend „kl. c“ gespielt werden können, so muß man zuerst die Frequenz dieses Tones bestimmen, um die Rohrlänge des Instruments ermitteln zu können:

### Berechnung der Grundschwingung und Rohrlänge für eine Obertonreihe auf klingend „kl. c“ bei 20 °Celsius:

$$\begin{aligned} \text{Kammerton „a1“} &= 440 \text{ Hz} \\ \text{Kammerton „a1“} &= 1,6818 \text{ mal mehr Hz als „c1“ nach Equal Tuning (gr. Sext)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \text{große Sext tiefer} = „c1“ = 261,62 \text{ Hz} \quad /2 \\ &= \text{Oktave tiefer} = „kl c“ = 130,81 \text{ Hz} \quad \text{nach Equal Tuning} \end{aligned}$$

$$\text{Schalltemperatur bei } 20 \text{ °C} = 343,5 \text{ m / Sekunde}$$

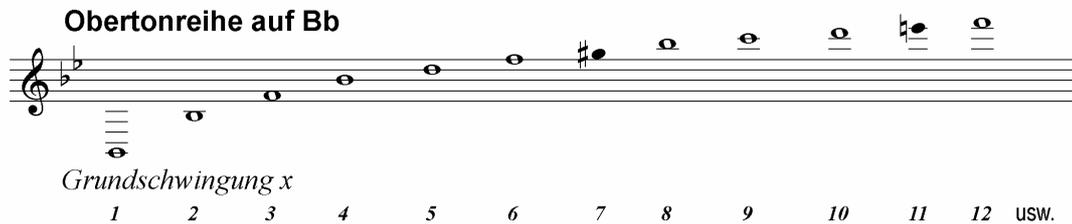
$$\begin{aligned} \text{Länge der Luftsäule} &= 1 \times \text{Schallgeschwindigkeit} \quad / (2 \times \text{Hz Grundschwingung}) \\ &= 343,5 \quad / (2 \times 130,81) \\ &= 1,31297 \text{ m} \end{aligned}$$

### Fazit:

Ein Sopraninstrument in „C“ hat eine äquivalente fiktive Rohrlänge von 1,3129 m, um die Töne klingend „c“, „c1“, „c2“, „c3“ usw. nach Equal Tuning zu resonieren.

Ein Tenorinstrument in „C“ hat die doppelte fiktive Rohrlänge und dadurch den Grundton um 1 Oktave tiefer (=1/2 Schwingungszahl).

Ein Bassinstrument in C hat die 4fache fiktive Rohrlänge und dadurch den Grundton um 2 Oktaven tiefer (=1/4 Schwingungszahl).



Um eine Obertonreihe auf einer anderen Tonstufe hervorbringen zu können, muß sich die Rohrlänge ändern:

**Berechnung der Grundschiwingung und Rohrlänge für eine Obertonreihe auf klingend „gr. Bb“ bei 20 °Celsius:**

Kammerton „a1“	=	440 Hz
Halbton höher „Bb1“	=	1,059463 mal mehr Hz als „a1“ nach Equal Tuning
= „Bb1“	=	466,16... Hz / 4
= 2 Oktaven tiefer = „gr Bb“	=	<b>116,54... Hz nach Equal Tuning</b>

Schalltemperatur bei 20 °C = 343,5 m / Sekunde

Länge der Luftsäule	=	1 x Schallgeschwindigkeit	/	(2 x Hz Grundschiwingung)
	=	343,5	/	(2 x 116,54....)
	=	1,4738 m		

**Fazit:**

Ein Sopraninstrument in „Bb“ hat eine fiktive Rohrlänge von 1,4738 m um die Töne „gr. Bb“, „kl. Bb“, Bb1“, „Bb2“ usw. nach Equal Tuning zu resonieren.

## Ventile

Vor Erfindung von Ventilen wurde z.B. mit Hilfe sogenannter „Inventionsbögen“ (Rohrverlängerungen, die zwischen Mundstück und Instrument gesteckt wurden) die Rohrlänge von Blechblasinstrumenten verlängert. Bei Posaunen ist das auch jetzt noch der Fall, durch den Zug sogar mit variabler Länge. Dadurch ist es möglich, Obertöne jeweils verschiedener Grundtöne zu erzeugen. Mit der Technik des „Stopfens“, d. h. Einführen der Hand in den Schallbecher wurden (werden bei Hörnern) in den höheren Registern Zwischentöne produziert, wobei durch das Stopfen die Tonqualität natürlich leidet. Blechblasinstrumente mit Klappen konnten sich bis in unsere Zeit nicht behaupten.

Da das Austauschen der Inventions- und Krumbbögen allerdings nicht blitzartig geschehen konnte und durch das Einsetzen einer Rohrverlängerung wiederum nur die Obertöne dieser einen dann längeren Röhre erzeugt werden konnten, ist mit Erfindung der Ventile durch Blühmel, Oberschlesien eine neue Ära der Blechblasinstrumente angebrochen.

Blühmel verkaufte seine Rechte an den Berliner Kammerhornisten Stölzel, der darauf im Jahr 1818 ein Patent erhielt. Die anfangs in Kastenform gebauten Ventile wurden daraufhin von findigen Instrumentenbauern immer weiter entwickelt. Die in weiter Folge daraus entstandenen Zylinderdrehventile, als auch die 1839 vom Franzosen Périnet verbesserten Pistons oder „Pumpventile“ bewirken durch Betätigung von Ventilen eine fixe Verlängerung der Rohrlänge. Ventile, welche die Rohrlänge verkürzen können genauso implementiert werden, wir betrachten hier das übliche Verlängerungsprinzip.

Sieht man sich die vorangegangenen Obertonreihen von Blechblasinstrumenten an und bedenkt man, daß der Grundton der jeweiligen Blechblasinstrumente selbst in der Praxis musikalisch kaum verwendet werden kann (mit Ausnahme von Pedaltönen), so zeigt sich daß zwischen dem 2. und 3. Oberton = reine Quint der größte Abstand zwischen den Obertönen besteht. Es sind dies 6 Halbtöne, die zwischen die beiden Obertöne hineinpassen. Durch die Verlängerungsventile soll diese Lücke geschlossen werden um chromatisch spielen zu können.

Hinweis: Es werden hier nur Blechblasinstrumente mit 3 Ventilen behandelt. Selbstverständlich bietet eine größere Anzahl von Ventilen mehr Kombinations- und Intonationsmöglichkeiten. Da aber eine größere Anzahl an Ventilen nichts am Prinzip der Ventile ändert, beschränke ich mich hier auf 3 Ventile. Div. entwickelte Kompensationssysteme seien erwähnt, werden hier aber nicht behandelt.

### Das etablierte 3-Ventilsystem bei Blechblasinstrumenten:

Wird ein Ventil betätigt (eine Rohrschleife eingefügt), verlängert sich die Rohrlänge und damit die schwingende Luftsäule. Durch Kombination (gleichzeitiges Öffnen keiner oder mehrerer Ventile) können 8 verschiedene Rohrlängen erreicht werden:

Beispiel 3. Oberton des 1. Beispiels (g1), hier ist die größte Anzahl Halbtöne zu überwinden:

Leer	kein Ventil geöffnet (gedrückt)	keine Längenänderung	g
	2. Ventil	~1 Halbton tiefer (länger)	~f#
	1. Ventil	~ 2 Halbtöne tiefer	~f
	3. Ventil	~ 3 Halbtöne tiefer	~e

Kombinationen:

	1.+2. Ventil	~3 Halbtöne tiefer	~e
	2.+3. Ventil	~4 Halbtöne tiefer	~eb
	1.+3. Ventil	~5 Halbtöne tiefer	~d
	1.+2.+3. Ventil	~6 Halbtöne tiefer	~c#

(Ein 4. Ventil bei manchen Instrumenten kann anstelle von 1. und 3. Ventil verwendet werden.)

Da nur in Equal Tuning wirklich von „Halbtönen“ gesprochen werden kann, da hier die Zwischenräume gleich groß sind, habe ich hier bewußt ein ~ Zeichen hinzugefügt. Durch Drücken des 2. Ventils läßt sich ein Instrument, dessen Grundton und damit Grundstimmung z. B. ein Bb ist, in ein Instrument in „A“ umwandeln. Würde das 1. Ventil gedrückt, wäre die Stimmung des Instrument dann „Ab“, usw.

### Berechnung von Verlängerungsfaktoren für Ventilschleifen

#### Problembereich Teil A: Mathematisch, denn + ist nicht \*

Nimmt man Equal Tuning, wo jeder Halbton jeweils den Faktor 1,059463094 mehr oder weniger Schwingungen als sein chromatischer Nachbar hat, so könnte man ausgehend von der Schwingungszahl des fiktiven Grundtons eines Instruments die notwendigen Verlängerungsfaktoren laienhaft wie folgt berechnen:

Griff (Ventil)	Grundton	Verlängerungsfaktor	= Faktor länger (=tiefer) als die Grundlänge nach Equal Tuning:
0	- 0 Halbtöne E.T	1,0000000000	= 1,000000000
2	- 1 Halbton E.T.	1,059463094 ^1	= 1,059463094
1	- 2 Halbtöne E.T.	1,059463094 ^2	= 1,122462048
3	- 3 Halbtöne E.T.	1,059463094 ^3	= 1,189207114
<u>Kombinationen berechnet nach E.T.:</u>			<u>gewünschter Faktor lt. E.T.:</u>
1+2	- 3 Halbtöne E.T.	1,059463094 ^3	= 1,189207114
2+3	- 4 Halbtöne E.T.	1,059463094 ^4	= 1,259921048
1+3	- 5 Halbtöne E.T.	1,059463094 ^5	= 1,334839852
1+2+3	- 6 Halbtöne E.T.	1,059463094 ^6	= 1,414213559

Nimmt man diese Verlängerungsfaktoren des Stimmungssystems „Equal Tuning“, so stößt man auf das Problem, daß zwar alle Ventile einzeln richtig stimmen könnten, alle Ventilkombinationen allerdings zu hoch sind, und zwar umso höher, umso mehr Ventile beteiligt sind, da die Referenz sich geändert hat!

<b>Kombination 1.+2. Ventil, gestimmt nach E.T., Faktor von E.T. gefordert:</b> =1,189207114		
Grundlänge		1,000000000
+ 1. Ventil	Verlängerung	0,122462048
+ 2. Ventil	Verlängerung	0,059463094
= 1.+ 2. Ventil = Verlängerungsfaktor <b>1,181925142</b> wäre Faktor 1,007281972 zu kurz (zu hoch) !		

<b>Kombination 2.+3. Ventil, gestimmt nach E.T., Faktor von E.T. gefordert:</b> =1,259921048		
Grundlänge		1,000000000
+ 2. Ventil	Verlängerung	0,059463094
+ 3. Ventil	Verlängerung	0,189207114
= 2.+ 3. Ventil = Verlängerungsfaktor <b>1,248670208</b> wäre Faktor 1,01125084 zu kurz (zu hoch) !		

<b>Kombination 1.+3. Ventil, gestimmt nach E.T., Faktor von E.T. gefordert:</b> =1,334839852		
Grundlänge		1,000000000
+ 1. Ventil	Verlängerung	0,122462048
+ 3. Ventil	Verlängerung	0,189207114
= 1.+ 3. Ventil = Verlängerungsfaktor <b>1,311669162</b> wäre Faktor 1,02317069 zu kurz (zu hoch) !		

<b>Kombination 1.+2.+3. Ventil, gestimmt nach E.T., Faktor v E.T. gefordert:</b> =1,414213559		
Grundlänge		1,000000000
+ 1. Ventil	Verlängerung	0,122462048
+ 2. Ventil	Verlängerung	0,059463094
+ 3. Ventil	Verlängerung	0,189207114
= 1.+2.+3. Vtl. = Verlängerungsfaktor <b>1,371132256</b> wäre Faktor 1,043081303 zu kurz (zu hoch) !		

Ein Lösungsansatz für dieses Problem wäre z.B., die Ventile 1 und 2 zusätzlich etwas länger zu machen, damit die Kombination 1+2 stimmt. Das allerdings führt wiederum zu mehreren Komplikationen. Einerseits würden die Töne, die mit 1. oder 2. Ventil gespielt würden zu tief resonieren und alle Kombinationen, die Ventil 2 + 3 verwenden, würden genauso wenig stimmen.

## Problembereich Teil B: verschiedene Stimmungssysteme als Grundlage

Ein weiteres Problem ergibt sich z.B. bei Betrachtung des 5. Obertones, des notierten „e2“:

### Wiederholung:

Beachten Sie den Unterschied zwischen Notensystem und Stimmungssystem: Das Notenbild sagt nichts über das gewünschte Stimmungssystem aus. So hätte z. B. der 5. Oberton „e2“ nach temperierter Stimmung 1,259921 mal mehr Schwingungen als der 4. Oberton „c“, in der Naturtonreihe hat er ein Schwingungsverhältnis von 5:4 = 1,250 mal mehr Schwingungen! Das Frequenzverhältnis entspricht einer gr. Terz.

Beim jeweiligen 5. und 10. Oberton besteht die größte natürliche Abweichung der „reinen“ Stimmung zu Equal Tuning! Hier wird deutlich, was „Intonation“ bedeutet, müßte doch bei diesem Oberton die „goldene Mitte“ der Resonanz absichtlich nach oben verlassen werden, um mit Instrumenten welche eine andere Grundschiwingung haben bzw. in Equal Tuning eingestimmt sind zu „intonieren“.

Der 5. Oberton ist also gegenüber Equal Tuning - siehe auch Stimmungssysteme-Vergleich gr. Terz -

**den Schwingungsfaktor 1,00793 oder 14 Cent = 14 % eines Halbtonschrittes! zu tief**

und muß mit Hilfe der Ansatzmuskulatur auch ohne Ventil-Verlängerung nach oben korrigiert werden. Wird jemand (Instrumentenerzeuger) jetzt die Verlängerungsfaktoren für die Ventile 1+2 noch darüberhinaus verlängern, wird das den Abstand aller vom 5. Oberton abgeleiteten Verlängerungen zwischen der zu niedrigen Frequenz und Equal Tuning noch wesentlich weiter vergrößern, was eine gute Intonation dieser Töne (Eb/Dis, D, Des/Cis) sehr schwierig macht. (Und das hört man laufend :).

## Problembereich Teil C: Mensur und daraus Problemtöne/Problembereiche

### Die Mensur+Mundstück+Schallbecher und ihre Auswirkungen auf Stimmung:

Eine weitere Größenordnung und der größte Misstand daraus ist die Mensur der Instrumente. Unter Mensur versteht man den unterschiedlichen Anteil an zylindrischer bzw. konischer Rohrlänge, Mundstückproportionen und Schallbecherdimensionen. Ein „glücklicher“ Verlauf dieser Mensur bewirkt, daß die vom Instrument resonierten Obertöne selbst (auch ohne Verwendung von Ventilen) besser „in sich“ stimmen, d.h. möglichst die Schwingungsverhältnisse  $\sim 1:2:3:4:5:6\dots$  etc erzeugen.

Bisher wurde laienhaft davon ausgegangen, daß Blasinstrumente diese Verhältnisse quasi „einprogrammiert“ haben, dies ist aber nicht der Fall. Blechblasinstrumente könnten im theoretischen Extremfall diese Werte einnehmen, aber im anderen Extremfall die Werte eines einseitig geschlossenen Zylinders mit Resonanzen, die im theoretischen Abstand von  $1:3:5:7:9:11$ : usw. auftreten. **Dazwischen gibt es mensurabhängig nochmals viele Abweichungen der Verhältnisse.**

#### Hier Grundregeln und Erfahrungswerte über Folgen von „unglücklichen“ Messuren:

Symptom:	mögliche Ursachen:
Obere Lage des Instruments zu hoch:	Schallstück zu eng bzw. Mundrohr zu weit
Obere Lage des Instruments zu tief:	Schallstück zu weit bzw. Mundrohr zu eng
Mittlere Lage des Instruments zu hoch:	Querschnitt der Mitte zu weit oder Schallstück viel zu eng
Mittlere Lage des Instruments zu tief:	Querschnitt der Mitte zu eng
Untere Lage zu hoch:	Querschnitt in der Mitte in ihrer ganzen Länge zu eng
Untere Lage zu tief:	Querschnitt in der Mitte in ihrer ganzen Länge zu weit

### Lösungsansätze zur Optimierung der Ventilverschlaufenlängen nach Plan B:

Ein Ansatzpunkt ist also, die Verlängerungsfaktoren so zu wählen, um einerseits

1. die vom 5. Oberton mittels Ventil abgeleiteten Töne, also „eb“, „d“ und „des“ den von Haus aus beim 5. Oberton vorhandenen Unterschied von -14 Cent nicht noch weiter vergrößern,

und andererseits

2. die durch Ventilkombinationen zustandekommenden Faktoren zu optimieren,

damit

**eine größtmögliche Annäherung** des größtmöglichen Teils aller Töne des Tonumfangs **an Equal Tuning** unter Ausschluss von wesentlichen Verschlechterungen bei 1. und 2. Ventil **erreicht wird.**

In Lehrbüchern findet man die folgenden traditionell überlieferten Faktoren:

Ventil	Verlängerung:	ergibt Faktor:	Faktor lt. E.T. wäre:	Ergebnis im Vergleich zu ET:
1.	1/8 der Länge	=1,1250	1,12246 = gr. Sekund	zu tief - 4 Cent
2.	1/15 der Länge	=1,0666	1,05946 = kl. Sekund	zu tief <b>-12 Cent</b>
3.	1/5 der Länge	=1,2000	1,18920 = kl. Terz	zu tief -15 Cent
4.	13/40 der Länge	=1,3250	1,33483 = reine Quart	zu hoch +13 Ct.

#### Ergibt die Kombinationen:

1.+2. Ventil	=1,1916	1,18920 = kl. Terz	zu tief	- 4 Cent
2.+3. Ventil	=1,2666	1,25992 = gr. Terz	zu tief	- 9 Cent
1.+3. Ventil	=1,3250	1,33483 = reine Quart	zu hoch	+13 Ct.
1.+2.+3. V.	=1,3916	1,41421 = üb. Quart	viel zu hoch	+ 28 Ct.

Wobei man berücksichtigen muß, daß diese tatsächlichen Faktoren in der Praxis nie eingehalten werden. Einerseits, weil dies Anhaltspunkte sind, und bei Instrumenten mit Stimmzügen (Drücker am 3. Ventil) diese Züge manchmal ein wenig kürzer gemacht werden. Andererseits, weil es in der Produktionsphase eines Blechblasinstruments kaum genau einzuhalten ist.

Instrumentenbauer gehen beim 3. Ventil eher davon aus, die Ventilzüge gefühlsmäßig ein „wenig“ kürzer zu machen, in der Annahme ein Bläser könnte durch Korrektur (Ausziehen der Stimmzüge) selbst ja noch immer Änderungen vornehmen. Bei beinahe allen mir persönlich bekannten Instrumenten (Trompete/Flügelhorn, Kornett) waren der 1. und 2. Ventilzug immer wesentlich zu lang, der 3. Zug nie zu lang.

Zum anderen ist der Bläser selbst und das Design des anschließend verwendeten Mundstücks eine nicht zu unterschätzende Größe, die daher vom Instrumentenbauer beim Anfertigen eines Blechblasinstruments nicht exakt miteinbezogen werden kann.

Bei der Länge des Ventils selbst und deren Verlängerung (Ventilzug) muß weiters berücksichtigt werden, daß durch die Konstruktion der heute gebräuchlichen Ventile diese in geschlossenem Zustand eine „kürzere“ Rohrlänge haben, als in geöffneten Zustand.

Bei Zylinderventilen in geschlossenem Zustand ist die Rohrlänge des Ventils selbst ca. der Durchmesser des Ventils, bei geöffneten Ventilen allerdings der doppelte Wert. Bei Perinetventilen ist die Rohrlänge des Ventils bereits in geschlossenem Zustand größer als ihr Durchmesser, und aufgrund deren Konstruktion unterschiedlich lang, daß muß bei den Längen der Züge selbst mit berücksichtigt werden.

### Ventillängen optimieren:

Wichtig ist zu verstehen, daß es kein Universalrezept gibt. Es bleibt jedem Instrumentenbauer frei überlassen, wie er die Längenverhältnisse der Ventilzüge untereinander bestimmt, und dadurch einen „Intonationscharakter“ für dieses Instrument festlegt. So hat jeder Instrumentenbauer eigene Tabellen, in denen er „Erfahrungswerte“ einträgt und verwendet. Jede kleinste Variation bewirkt eine Verschiebung – für manche Töne positiv – für andere dafür negativ.

Aus diesem Grund ist die Annahme falsch zu glauben, ein „teures“ Instrument müsse besser stimmen als ein „billigeres“. Genauso falsch ist es zu glauben, ein handgearbeitetes „Meister-Instrument“ hätte durch die „Meisterhand“ automatisch eine bessere Stimmung als ein industriell gefertigtes Produkt.

Gibt es kein Universalrezept, so gibt es doch Wegweiser wie man bei Konzeption und Design von Blechblasinstrumenten logisch vorgehen könnte: Umso besser man eine einzige Ventilkombination anzupassen versucht, umso schlechter wird die Situation bei abgeleiteten Tönen des 5. Obertons, welche ich im Kapitel „musikalische Grundlagen“ aus diesen Gründen von mir absichtlich als „Bläser-Komma“ bezeichnet habe.

Hier 3 von mir berechnete Varianten, die teils gute Ergebnisse liefern könnten:

<b><u>Verlängerungsfaktoren:</u></b>	<b>VAR I:</b>	<b>VAR II:</b>	<b>VAR III:</b>	<b>Equal Tuning</b>
2. Ventil	<b>1,0604</b>	1,0604	1,0604	1,05946..
1. Ventil	<b>1,1229</b>	1,1235	1,1242	1,12246..
3. Ventil	<b>1,1993</b>	1,2000	1,2000	1,18920..
<b><u>ergibt folgende Kombinationen:</u></b>				
1. + 2. Ventil	<b>=1,1833</b>	=1,1839	=1,1846	1,18920..
2. + 3. Ventil	<b>=1,2597</b>	=1,2604	=1,2604	1,25992..
1. + 3. Ventil	<b>=1,3222</b>	=1,3235	=1,3242	1,33483..
1. + 2. + 3. V.	<b>=1,3826</b>	=1,3839	=1,3846	1,41421..

Meine persönliche Auswahl fällt auf **Variante I**, da hier einerseits beim Einsatz einzelner Ventile die geringsten Abweichungen der gezeigten Varianten sind, und die Faktoren auch bei den Kombinationen 1.+2. und 2.+3. Ventil die annähernd beste Auswahl darstellen. Auch weil

1. die Ventilkombinationen 1.+3. und 1.+2.+3. Ventil bei weitem nicht so häufig wie die anderen Kombinationen auftreten, und man
2. mit anderen Varianten bei diesen Kombinationen auch nur annähernd bessere Ergebnisse erzielt

wäre die Variante I meiner Meinung nach zu bevorzugen, gerade auch weil man als Blechbläser bei den notierten Tönen „cis1“ und „d1“ sowieso mit zu hoher Frequenz rechnet.

Resonanz Beispiel Sopran in Bb, Variante I, Stimmtön klingend Bb															
Oberton		Equal Tuning	leer	2 Ventil	1 Ventil	1+2. Vent.	3. Ventil	2+3. Vent.	1+3. Vent.	1+2.+3. V.	Griffsystem	=Var. I:	Var II:	Var III:	Korrektur-
Nr.	Verlängerungsfaktor:		1	1,0604	1,1229	1,1833	1,1993	1,2597	1,3222	1,3826	Standard	CENT:	Vergleich	CENT:	möglich-
1	kl. C Hz:	116,5	116,5	109,9	103,8	98,5	97,2	92,5	88,1	84,3	Kombination	0	0	0	keiten:
2	f#	164,8								168,6	123	+39	+38	+37	2,3 cm
	g	174,6							176,3		13	+16	+15	+14	0,9 cm
	g#	185,0						185,0			23		-1	-1	
	a	196,0				197,0	194,3				12	+9	+8	+7	
	b	207,7			207,6						1	-1	-2	-3	
	h	220,0		219,8							2	-2	-2	-2	
3	c1	233,1	233,1								0				
	c#	246,9								252,9	123	+41	+39	+39	2,4 cm
	d	261,6							264,4		13	+18	+17	+16	1,0 cm
	d#	277,2						277,5			23	+2	+1	+1	
	e	293,7				295,5	291,5				12	+11	+10	+9	
	f	311,1			311,4						1	+1		-1	
4	f#	329,6		329,7						337,2	2				
	g1	349,2	349,6						352,6		0	+2	+2	+2	
	g#	370,0						370,1			23		-1	-1	
	a	392,0				394,0	388,7				12	+9	+8	+7	
	a#	415,3			415,1					421,5	1	-1	-2	-3	
	h	440,0		439,6					440,7		2	-2	-2	-2	
5	c2	466,2	466,2					462,6			0				
	c#	493,9				492,4	485,9			505,7	12	-5	-6	-7	
	d	523,3			518,9				528,9		1	-14	-15	-16	
	d#	554,4		549,5				555,1			2	-15	-15	-15	
	e2	587,3	582,7			590,9	583,0			590,0	0	-14	-14	-14	
	f	622,3			622,7					617,0		1	+1		-1
6	f#	659,3		659,4				647,6		674,3	2				
	g2	698,5	699,2				689,4	680,2		705,1	0	+2	+2	+2	
	g#	740,0			726,5				740,1				-1	-1	
	a	784,0		769,3		787,9	777,4		793,3		12	+9	+8	+7	
	a#2	830,6	815,8		830,3				832,6	842,9	1	-1	-2	-3	
	h	880,0		879,2			886,4	874,6		881,4	2	-2	-2	-2	
8	c3	932,3	932,3		934,1			925,1		927,2	0				
	c#	987,8		989,1		984,9	971,7		969,6	1011,5	2	+2	+2	+2	
9	d3	1046,5	1048,9		1037,9			1017,7	1057,7		0	+4	+4	+4	
	d#	1108,7		1099,0			1083,4	1068,9	1110,2		2	-15	-15	-15	
10	e3	1174,7	1165,4		1141,6		1181,9	1166,1			0	-14	-14	-14	
	f	1244,5		1208,9	1245,4						1	+1		-1	
11	f#3	1318,5	1282,0	1318,8							2				
	g3	1396,9	1398,5								0	+2	+2	+2	

usw. Angaben bei 20°C und Kammerton "a1"=440 Hz; bei 30° C (1. Ventilfaktor=1,228) würde sich 1on "kl. g" und "d1" um 1 Cent erhöhen, Rest fällt unter Rundungsgrenzen

Würden alle Naturtöne des Instruments in sich stimmen (Reine Stimmung), so wären die berechneten Tonhöhen möglich. Die Tabelle zeigt alle Standardgriffe (grün) und sogenannten „Hilfsgriffe“. Einige wenige Hilfsgriffe im hohen Register würden sogar besser nach E.T. stimmen, haben aber wegen der längeren Rohrlänge einen teils beträchtlich anderen Klang und erfordern auch mehr Energie.

## Unterschiedliche Rohrlängenfaktoren durch den Hauptstimmzug:

Da die Lufttemperatur und Luftfeuchte im Instrument und damit die Schallgeschwindigkeit sehr unterschiedlich sein kann, ergeben sich relativ große Differenzen bei Berechnung einer fiktiven gesamten Rohrlänge. Es hat keinen Sinn zu versuchen, ein Instrument einzustimmen, bei dem der Bläser sein Instrument und sich selbst nicht auf passende „Betriebstemperatur“ gebracht hat.

Bei der Berechnung von Verlängerungsfaktoren selbst allerdings sind Differenzen aufgrund von der Länge des Hauptstimmzuges eher verschwindend klein. D.h. **kleine** Korrekturen am Stimmbogen während des „Einstimmens“, die dadurch logischerweise etwas andere Ventilverlängerungsfaktoren bewirken, haben unter normalen Umständen einen eher unwesentlichen Effekt, es sei denn, es wird auf einen Stimmtone mit höherer Frequenz eingestimmt, für die die Instrumentenabmessungen zu lang sind!

Man könnte ja Ventilzüge teilweise ausziehen, aber nicht unter ein Minimum (Vorgabe) einschieben!

<b>Beispiel:</b>	<i>fikt. Rohrlänge Tenorhorn in Bb, 20 °C</i>	= 2,94774 m	
	<i>(bei Kammerton 440 Hz)</i>	= 58,5 Hz Grundton	
	<i>= Stimmtone Bb „233 Hz“</i>	= 0 Cent Abweichung	
<hr/>			
	<i>Beispiel Faktor für 1. Ventil</i>		
	<i>Länge des Instruments mit 1. Ventil</i>		
	<i>z. B. Var. I Faktor=1,1229</i>	= -1 Cent bei Ableitung vom 2. Oberton	
	<i>Länge der Ventilverlängerung</i>	= 0,3622 m	
	<i>Gesamtlänge inkl. 1. Ventilzug</i>	= 3,3100 m	
<hr/>			
	<i>z. B. gespielter Stimmtone</i>	= -10 Cent	<i>laut Stimmgerät zu tief</i>
		= 231,79 Hz	<i> gespielter Ton</i>
		= 57,9475 Hz	<i> momentaner Grundton</i>
		= 2,96416 m	<i> momentane Länge</i>
		= 1,64 cm	<i> momentan zu lang</i>
<hr/>			
	<i>Länge der Ventilverlängerung bleibt</i>	= 0,3622 m	
	<i>Gesamtlänge inkl. 1. Ventilzug</i>	= 3,3264 m	
	<i>= entstandener Faktor Verlängerung</i>	= 1,1222	= 0 Cent, d. h. +1 Cent höher
	<i>= entstandener Faktor zu A1=440 Hz</i>	= 1,12846	= -9 Cent zu tief

Würde mit diesem nicht „eingestimmten“ Instrument gespielt, so wären alle Töne die ohne Ventile gespielt werden gegenüber der Stimmung basierend auf Kammerton A1=440 Hz um 10 Cent zu tief. Alle Töne die mit Ventil 1 gespielt würden, wären natürlich auch zu tief (-9 Cent). Nimmt man die vorliegende Länge des Instruments als Grundstimmung, so wäre der Unterschied aufgrund der geänderten Verlängerungsfaktoren beim 1. Ventil aber nur 1 Cent.

### Als grobe Faustregel kann gelten:

Stimmzug um +/- 5 mm ausziehen oder verkürzen (= in Summe 1 cm Rohrverlängerung)

Sopran in Bb	= ca +/- 12 Cent veränderte Frequenz
Tenor in Bb	= ca +/- 6 Cent veränderte Frequenz
Bass in Bb	= ca. +/- 3 Cent veränderte Frequenz
Althorn in Eb	= ca. +/- 8 Cent veränderte Frequenz
Waldhorn / Tuba in Eb	= ca. +/- 4 Cent veränderte Frequenz
Waldhorn / Tuba in F	= ca. +/- 5 Cent veränderte Frequenz

Die selben Längen gelten jeweils auch für eine Längenänderung der Ventilzüge!

## Störungen, hier Durchmesser-Erweiterungen durch Stimmzug-„Gaps“:

Die entstehenden „Gaps“ oder Rohrweiterungen verursachen allerdings teils sogar gegenteilig mögliche Ergebnisse – für jeden Naturton unterschiedlich, d.h. es kann sich abhängig von der Position dieser Erweiterungen für einzelne Töne sogar der gegenteilige Effekt einstellen, nämlich das einzelne Töne durch das Ausziehen des Zuges = Verlängerung nicht tiefer werden, sondern sogar höher werden! Im Gegenzug können auch beim Einschieben des Zuges dadurch einige Töne tiefer werden!

Solche Effekte können bei gezielter Steuerung und Platzierung verwendet werden um die Intonation, aber auch Ansprache von Instrumenten bewusst zu verändern. Bei Stimmzügen sind 2 Positionen betroffen, bei einem herkömmlichen Klappenzug nur 1 Position. Leider liegen die möglichen Positionen bei den allermeisten Instrumenten aber nicht an den dafür günstigsten Positionen. Die Existenz von 2 „Hauptstimmzug“-Gaps bzw. 1 Klappenzug-Gaps verändert daher bereits die Intonation aber auch Ansprache einer Vielzahl an Tönen meist nicht optimal.

**Solche gezielten Änderungen sind Hauptteil meiner weiteren Forschungen und hier daher nur am Rande erwähnt:**

### Perturbationen / gezielte Störungen:

Jeder Naturton = stehende Welle hat die selbe Anzahl seiner Naturton Nummer an Druckknoten (Umgebungsluftdruck) als auch Druckbäuchen (anhand der Frequenz = Geschwindigkeit) rasch wechselnden Über- und Unterdruck im Instrument entlang der Instrumentenachse. Auf der Lippeebene hat jeder Naturton zwangsweise /systembedingt einen Druckbauch. (Die nicht spielbaren Frequenzen zwischen zwei Naturtönen haben hier einen Druckknoten!), näheres dazu in Teil 2!

Erweitert man den Durchmesser an einer Position bereits nur eines einzigen Druckbauches, so fällt die Frequenz, Erweiterungen an einem Druckknoten (zwischen 2 Druckbäuchen) erhöhen die Frequenz. Eine Erweiterung in der Mitte jeweils zwischen Druckknoten und Druckbäuchen verändert die Frequenz nicht.

Dafür ist an beinahe dieser Stelle das maximale Potential für bessere/schlechtere Ansprache dieses Naturtones (Eingangsimpedanz Peak Maxima). Bei Verengungen ändert sich die Tonhöhe und Ansprache entgegengesetzt, aber nicht in demselben Ausmaß!

### Transponierende Instrumente und Notation

Blasinstrumente, deren notierter Grundton nicht „klingend C“ ist, bezeichnet man als transponierende Instrumente, d. h. z. B. bei Instrumenten in „Bb“ ist der Grundton ein klingendes „Bb“. Auf der Stimme / in einer Partitur steht dann: Trp. in Bb. Den Bläsern transponierender Instrumente in Bb stellt sich das Notenbild einer „Stimme in Bb“ in der Grundstimmung des Instruments allerdings in „C“ dar, da die Noten vom Notensetzer bereits um 2 Halbtöne höher und damit 2 # Vorzeichen mehr geschrieben =transponiert wurden. Bei Instrumenten in „Eb“ ist der Grundton ein klingendes „Eb“. Den Bläsern dieser Instrumente stellt sich das Notenbild einer „Eb-Stimme“ in Grundstimmung ebenfalls in „C“ dar.

Bläser von „transponierenden“ Instrumenten lernen, daß der Grundton ihres Instruments ein „C“ ist, vorerst egal welcher Ton das „klingend“ wäre. Das hat einerseits den Vorteil, daß das Griffsystem z. B. auf einem Eb-Horn dasselbe ist als es auf einem Horn mit Grundstimmung in D, E, F oder F#, usw wäre. Der Schüler lernt also für jeden geschriebenen Ton eine bestimmte Griffkombination, und dieses Griffsystem ist dann bei allen Lagen (Sopran, Alt, Tenor, Bass) gleich.

Andererseits besteht der Nachteil darin, daß z. B. Noten in einer „Eb-Stimme“ für Eb-Horn auf einem F-Horn gespielt – jetzt vom Bläser „transponiert“ werden müssen, in diesem Fall jede geschriebene Note um 2 Halbtöne tiefer gegriffen und gespielt werden müssen, da die Grundstimmung eines F Hornes um 2 Halbtöne höher liegt als die eines Eb Horns. Detto Instrumente mit z.B. betätigtem Quartventil (4. Ventil).

Eine Ausnahme bilden Bassinstrumente, Posaunen und Tenorinstrumente z. B. in Bb, Eb oder F welche traditionell „klingend“ im Baßschlüssel notiert werden. Das Griffsystem wird bei solchen Instrumenten vom Schüler „transponiert“ gelernt. So kann z. B. ein gelernter F-Tubist nicht ohne Vorübung dieselben klingenden Noten auf einer Eb-Tuba spielen, da er in diesem Fall alle Noten 2 Halbtöne höher greifen „transponieren“ müßte. Ebenso hat sich diese Schreibweise bei Kuhlo-Chören auch für Instrumente in Sopranlage in Deutschland etabliert. Chormitglieder bekommen C-Stimmen und lernen die Griffe transponiert.

Um das Griffsystem solcher Instrumente gleichzuhalten haben sich einige Notationsvarianten zusätzlich zur klingenden Notation im Baßschlüssel eingebürgert. So gibt es teilweise zusätzliche Stimmen für Eb – Bässe und Bb-Bässe im Violinschlüssel (sogenannte „Schweizer Stimmen“). In diesen Notationsvarianten stellt sich das Notenbild dem Bläser wiederum bereits transponiert in der Grundstimmung seines Instrumentes dar (mit Oktavverschiebung).

Eine weitere Besonderheit der Notation gilt für Instrumente in Tenorlage (Tenorhörner, Posaunen in Bb, aber auch Tenorsaxophone, usw.) wenn sie im Violinschlüssel notiert sind: Tenorinstrumente haben die doppelte Rohrlänge von Sopraninstrumenten und klingen folglich eine Oktave tiefer. Diese Instrumente werden um 1 Oktave höher notiert, als sie klingen. Langtrompeten (ventillos) wurden traditionell tief notiert, das hat sich bei Stimmen für Es-Trompeten (in Altlage) bis Ende des 20. Jahrhunderts gehalten. (Tiefe Notation, eine Oktave tiefer notiert als ein Es Althorn mit selber Rohrlänge).

**Gebrauchliche Notation von Blechblasinstrumenten:**

	Notation Bb-Sopran	Notation B-Tenor	Notation F-Horn	Notation Eb-Horn	Notation Eb-Bass	Notation Bb-Bass
--	-----------------------	---------------------	--------------------	---------------------	---------------------	---------------------

klingend C1  
(262 Hz)

Notation obiger Instrumente im F-Schlüssel:

Der klingende Ton „C1“, 262 Hz nach E.T. wird in einer Bb-Stimme als „D“ notiert, in einer F-Stimme als „G“, in einer Eb Stimme als „A“. Eine F-Stimme hat demnach 1 b weniger (=1 # mehr) Vorzeichen, eine Bb-Stimme hat um 2 b weniger (=2 # mehr) Vorzeichen, eine Eb-Stimme hat 3b weniger (=3 # mehr) Vorzeichen als die klingende C-Stimme.

**Gebrauchlicher Stimmton in Blechbläserensembles:**

	Notation Bb-Sopran	Notation B-Tenor	Notation F-Horn	Notation Eb-Horn	Notation Eb-Bass	Notation Bb-Bass
--	-----------------------	---------------------	--------------------	---------------------	---------------------	---------------------

klingend Bb  
(466/233/116,5 Hz)

Notation obiger Instrumente im F-Schlüssel:

Griff:	0	0	1	0	0	0
Oberton - Nr:	4	4	6	6	3	4

**Das Griffsystem bei Blechblasinstrumenten ergibt Standard- und „Hilfsgriffe“:**

**Griffsystem Blechblasinstrumente mit 3 Inventionsventilen (Oberton 1-10):**

Griff: leer    2    1    1+2    3    2+3    1+3    1+2+3

Je nach Griffkombination können theoretisch die gezeigten **enharmonisch verwechselbaren Töne** erzeugt werden, **die allerdings unterschiedliche Tonhöhen haben**. Da Waldhörner im Vergleich zu Althörnern die doppelte Rohrlänge besitzen, (ein Eb Waldhorn hat die selbe Rohrlänge eines Eb-Basses), sind deren Obertöne 1 Oktave tiefer angesetzt als hier notiert. Waldhornbläser müssen also obige Noten 1 Oktave tiefer denken bzw. 1 Oktave höher greifen, um die richtigen Griffe und Obertöne zu erhalten.

Da bei Waldhörnern also schon ein notiertes „E1“ d. h. als 5. Oberton leer gegriffen wird, versteht man daß hier Töne aufgrund der zahlreichen knapp nebeneinanderliegenden Obertöne im mittleren und oberen Register sehr schwer zu treffen sind. Selbiges gilt für alle Töne in jeweiliger Clarin Lage!

Selbstverständlich hört die Obertonreihe beim 10. Oberton nicht auf, sondern wäre „theoretisch“ beinahe unbegrenzt, welchen Umstand Virtuosen immer wieder unter Beweis zu stellen wissen. Den Grundton und von ihm abgeleitete tiefere Töne bezeichnet man als Pedaltöne. Pedaltöne werden vereinzelt z. B. bei Posauneneinsätzen und Tuben gefordert, größtenteils werden diese Pedaltöne und Frequenzen darunter aber zum Auflockern der Ansatzmuskulatur (in Pausen) eingesetzt.

Piccoloinstrumente besitzen (in selber Grundstimmung) im Vergleich zu Sopraninstrumenten nur die halbe fiktive Rohrlänge, was wiederum bedeutet, daß der Tonumfang eine Oktave höher beginnt, und alle Noten eine Oktave tiefer gegriffen werden müssen.

### Obertöne Blechblasinstrumente - Vergleich © Hermann Preisl 1999

<p><b>Sopran in Bb</b></p> <p>klingend:</p>	<p>transponiert:</p> <p>+gr, -2Bb</p>	<p>notiert:</p> <p>detto</p>	
<p><b>Tenor in Bb</b></p> <p>klingend:</p>	<p>transponiert:</p> <p>+gr, -2Bb</p>	<p>notiert:</p> <p>+1 Okt. in Bb 1 Stimme, G-Schl.</p>	<p>klingend im F-Schlüssel</p>
<p><b>Bass in Bb</b></p> <p>klingend:</p>	<p>transponiert:</p> <p>+gr, -2Bb</p>	<p>notiert:</p> <p>+2 Okt. in Bb 1 Stimme G-Schl.</p>	<p>klingend im F-Schlüssel</p>
<p><b>Horn in F</b></p> <p>klingend:</p>	<p>transponiert:</p> <p>+r5, -1Bb</p>	<p>notiert:</p> <p>detto</p>	<p><b>Tuba in F</b></p> <p>notiert:</p> <p>klng. im F-Schl. 1</p>
<p><b>Horn in Eb</b></p> <p>klingend:</p>	<p>transponiert:</p> <p>+gr.6, -3Bb</p>	<p>notiert:</p> <p>detto</p>	<p><b>Tuba in Eb</b></p> <p>notiert:</p> <p>transp. im G-Schl. +8+gr.6, -3Bb</p>

## Vergleich der Ventilkombinationen im Ensemble zu anderen Lagen und Instrumenten:

Wie in den vorangegangenen Kapiteln erläutert wurde, gibt es keine fixe Norm, nach der bei Blechblasinstrumenten die Ventillängen ideal ausgerichtet werden können. Es gibt mehrere Lösungsmöglichkeiten, wobei wiederum jede Optimierung einer bestimmten Ventilkombination mit einer Intonationsverschlechterung an anderer Stelle einhergeht.

Dies hat einerseits den Grund, daß die natürliche Obertonreihe keine gleich großen Halbtonschritte besitzt und andererseits mathematisch  $1 + 2 = 3$  ergibt, diese Rechnung aber bei der Verlängerung der schwingenden Luftsäule mittels Ventilen und deren Kombination und daher Längenfaktoren nicht aufgeht.

Zwangsläufig ergibt sich dadurch in der Praxis der Umstand, daß jedes individuelle Instrument seine eigene Stimmung und damit ein „**Eigenleben**“ besitzt, das vom Bläser erforscht und bewältigt werden will! Aus diesem Grund kann man auch keine Vergleichstabelle erstellen, da jedes individuelle Instrument + Bläser für sich unterschiedliche Verlängerungskombinationen besitzt.

Kritische Stimmen wollen vielleicht jetzt behaupten, daß man sich vielleicht besser an „Naturstimmung“ (Just Intonation) anstelle von temperierter Stimmung halten sollte, sind doch die Obertöne für sich ein Bestandteil dieses Stimmungssystems. Nun, das ist möglich solange 1. keine Ventile verwendet werden und 2. keine Instrumente mit unterschiedlicher Grundstimmung zum Einsatz kommen. Zu Vergleichszwecken habe ich auch dieses Stimmungssystem in die nachfolgende Tabelle mit aufgenommen.

Der Vergleich in der nachfolgenden Tabelle basiert wiederum auf den Verlängerungsfaktoren der vorgehenden Variante 1, mit Standardgriffen, wobei ich nochmals feststellen möchte, daß man aus dieser Tabelle zwar keine absoluten Schlüsse ziehen kann, allerdings jedoch **Tendenzen** eindeutig ablesen kann!

Die folgende Tabelle teilt sich in 3 Vergleichsgruppen und geht **stümperhaft** von einem idealisierten Fall aus, nämlich **daß alle Instrumente (Bläser) selbst in sich völlig „rein“ stimmen würden**, was aber aus allen in dieser Arbeit genannten Gründen nicht der Fall ist!

<b>Gruppe 1:</b>	<b>Stimmtön = Kammerton „klingend A1=440 Hz“</b> Spalte 1: Name des „klingenden“ Tones Spalte 2-6: Frequenz in Hz des jeweiligen Instruments Spalte 7: Referenz Frequenz nach temperierter Stimmung (E.T.)
<b>Gruppe 2:</b>	<b>Stimmtön = „klingend Bb1=466 Hz“</b> Spalte 8-12: Frequenz in Hz des jeweiligen Instruments
<b>Gruppe 3:</b>	<b>Just Intonation auf klingend Bb = „klingend Bb1=466 Hz“</b> Spalte 13: Referenz Frequenz nach Just Intonation Var. # Spalte 14: Referenz Frequenz nach Just Intonation Var. b

Alle Angaben sind der Übersichtlichkeit wegen gerundet in 1 Hz Schritten, Obertonbereich 1-12. Die jeweiligen Stimmtöne sind fett umrandet. Beachten Sie, daß auch hier trotz gleicher Ventillängenberechnung bei den Instrumenten teilweise große Tonhöhenunterschiede bestehen.

Vergleich der Resonanz von Blechblasinstrumenten untereinander													
Vergleichsgruppe 1					E. T.	Vergleichsgruppe 2					Naturstimmung		
Angaben in Hertz	Bb-Tuba	Eb-Tuba/Horn	F-Tuba/Horn	Bb Tenor	Bb-Sopran	Referenz	Bb-Sopran	Bb Tenor	F-Tuba/Horn	Eb-Tuba/Horn	Bb-Tuba	Just Inton. (#)	Just Inton. (Bb)
Ton klingend:	Resonanz nach Stimmtton A1=440 Hz				<--	A1 = 440 Hz	-->	Resonanz nach Stimmtton kling. Bb = 466 Hz				Basis kling. Bb	Basis kling. Bb
Subkontra A						27,5	Berechnung auf Verlängerungs-Faktor:					27,3	27,3
Subkontra Bb	29					29	2. Ventil (2. Pos.Zug)		1,0604		29	29	29
H						31	1. Ventil (3. Pos.Zug)		1,1229			31	31
Kontra C						33	3. Ventil (4. Pos.Zug)		1,1993			33	33
C#						35	und Standard-Fingering, ohne 4. bzw. Quartvent.					35	35
D						37	gerundet auf GANZE Hertz					36	36
Eb		39				39				39		39	39
E	42					41					42	41	41
F	44		44			44			44		44	44	44
F#	46					46					46	47	47
G	49					49					49	49	49
Ab	52					52					52	52	52
A	55	56				55				56	55	55	55
Bb	58	59		58		58		58		59	58	58	58
H	63	62	64			62			63	62	63	62	62
Gr. C	66	66	67			65			66	66	66	66	66
C#	69	69	70			69			69	69	69	70	70
D	74	73	74			73			74	73	74	73	73
Eb	78	78	78			78			78	78	78	78	78
E	83	84	83	84		82		84	82	84	82	82	83
F	87	88	88	88		87		88	87	88	87	87	87
F#	93	93	95	93		92		93	95	93	93	93	93
G	99	99	100	99		98		98	99	98	98	97	97
Ab	104	104	105	104		104		104	104	104	104	104	104
A	110	110	112	110		110		110	111	110	110	109	109
Bb	117	117	118	117	117	117	117	117	117	117	117	117	117
H	123	123	124	127		123		126	123	123	123	124	124
Kl. C	130	131	132	132		131		132	131	131	130	131	131
C#	138	139	140	139		139		139	139	138	137	140	140
D	146	147	149	148		147		148	147	147	146	146	146
Eb	156	156	157	156		156		156	155	155	156	156	156
E	165	164	166	165	169	165	169	165	165	164	165	164	166
F	175	173	176	175	176	175	176	175	174	173	175	175	175
F#	185	183	186	185	185	185	185	185	184	183	185	187	187
G	197	194	196	197	197	196	197	197	194	194	197	194	194
Ab	208	208	207	208	208	208	208	208	206	208	208	207	207
A	220	220	220 **	220	220	220	220	220	218	220	220	219	219
Bb	233	233	235	233	233	233	233	233	233	233	233	233	233
H	248	247	249	246	253	247	253	246	247	247	247	249	249
C1	262	263	264	260	265	262	264	259	262	263	262	262	262
C#	275	277	279	275	278	277	278	275	277	277	275	280	280
D	292	293	297	292	296	294	295	291	295	293	291	292	292
Eb	312	311	311	312	312	311	311	311	311	311	311	311	311
E	330	330	332	330	330	330	330	330	329	330	330	328	332
F	350	349	352	350	350	349	350	350	349	349	350	350	350
F#		367	373	370	370	370	370	370	370	366		373	373
G		389	396	394	394	392	394	394	393	388		389	389
Ab		416	415	416	416	415	415	415	411	415		415	415
A1		440	440	440	440	440	440	440	436	440		437	437
Bb1		467	470	467	467	466	466	466	466	466		467	467
H			493	495	493	494	492	495	494			498	498
C2			528	528	519	523	519	524	523			525	525
C#				550	550	554	550	550				560	560
D				583	583	587	583	583				583	583
Eb				623	623	622	623	623				622	622
E				660	660	659	659	659				656	664
F				700	700	698	699	699				700	700
F#					741	740	740					747	747
G					789	784	788					778	778
Ab					831	831	830					829	829
A					880	880	879					875	875
Bb					933	932	932					933	933
H					990	988	989					995	995
C3					1030	1047	1049					1050	1050
C#					1100	1109	1099					1120	1120
D					1166	1175	1165					1166	1166
Eb					1247	1245	1245					1244	1244
E					1320	1319	1319					1312	1327
F3					1400	1397	1398					1400	1400

## Zusammenfassung:

Man kann feststellen, daß eine allgemeine oder komplette Orientierung an der „reinen“ Stimmung keine bessere Lösung der Gesamtsituation im gemeinsamen Ensemblespiel mit sich bringen würde als gleichschwebend temperierte Stimmung, beide werden daher in der Praxis stets vermengt und vermischt, was unser Gehör zum Teil sehr gut toleriert. Die Toleranz endet aber rasch, wenn Instrumente prominent beteiligt sind, die eine fixe Stimmung haben.

Im musikalischen Kontext bildet sich als Ergebnis letztlich ein Wechselspiel zwischen Gesamtklang, Schwebungen, Terzen / Sexten und Quinten/Quarten, Leittöne zeigen nicht nur den Weg zu Tonika, Dominante und Subdominante, sondern bestimmen zu einem Großteil die tatsächliche Stimmung der jeweiligen zeitlich nacheinander hervorgebrachten Akkorde.

Die Kunst daraus Musik entstehen zu lassen, die berührt und zu Herzen geht hängt vom Hören, Einfühlen, Nachgeben und Umsetzen und glücklicherweise dem Zurechthören ab und das passiert alles in unseren Köpfen!

Mit analytischem Hören im 12 Ton System und bisher angeeignetem Vorwissen ist es daher oft relativ einfach möglich, ohne „absolutes“ sondern mit relativem Gehör die zugrunde liegende Tonart eines Musikstückes zu erkennen, denn die jeweiligen größeren Abweichungen sind immer an den selben Tonika Schritten/Kadenzen, mit und ohne Ventilverlängerungen!

D. h. es ist ziemlich einfach als erfahrener Bläser/Zuhörer zu bestimmen ob ein Stück in C, Db, H oder Bb oder einer sonstigen Tonart aufgeführt wurde, egal wie viele Beteiligte es dabei gegeben hat, ob Solo oder Ensemble, wenn man die jeweilige Grundstimmung der Instrumente kennt. Bei aufführenden Professionisten und Virtuosen und bei optimierten und geschnittenen Tonaufnahmen wird es zugegebenermaßen immer schwieriger zu errahnen, aber auch hier schlagen oft in bestimmten Passagen Tendenzen und Anhaltspunkte durch!

Ich hoffe, es konnten von mir einige Zusammenhänge trotz der vielen Theorie verständlich vermittelt werden. Es gibt meine persönliche Erfahrung und Sichtweise und wieder, die nicht immer die richtige sein muß. Diese Einführung erhebt auch keinen Anspruch auf Vollständigkeit. In weiteren veröffentlichten Arbeiten habe ich meine fortführenden Forschungen an Trompeten dokumentiert.

Es sollten in diesem Abschnitt musikalische Aspekte und vorhandene Probleme im musikalischen Kontext aufgezeigt werden. Die akustische Aufarbeitung finden Sie in den weiteren Teilen meines Projekts.

Sollten Sie Fehler finden freue ich mich auf Ihre Rückmeldung per Email.

Sollte Ihnen meine Arbeit gefallen haben, und Sie daraus einen Nutzen für sich ziehen können, so freue ich mich auch über eine kleine Spende auf mein Paypal Konto: [paypal.me/preisl](https://www.paypal.me/preisl)