

**STM 1973**

**Objektive Frequenzmessung und subjektive  
Tonhöhenempfindung bei Musikinstrumentenklängen**

*Von Udo Sirker*

© Denna text får ej mångfaldigas eller ytterligare publiceras utan tillstånd från författaren.

Upphovsrätten till de enskilda artiklarna ägs av resp. författare och Svenska samfundet för musikforskning. Enligt svensk lagstiftning är alla slags citat tillåtna inom ramen för en vetenskaplig eller kritisk framställning utan att upphovsrättsinnehavaren behöver tillfrågas. Det är också tillåtet att göra en kopia av enskilda artiklar för personligt bruk. Däremot är det inte tillåtet att kopiera hela databasen.

# Objektive Frequenzmessung und subjektive Tonhöhenempfindung bei Musikinstrumentenklängen

Von Udo Sirker

## 1. Einleitung

Die in der abendländischen Musik gebräuchliche Skala beruht auf äquidistanten Halbtonabständen innerhalb von Oktaven. Die Bildung dieses Systems verläuft parallel zur Entwicklung von einer mehr horizontal-kontrapunktischen zu einer vertikalakkordischen Strukturierung des musikalischen Satzes als Folge einer fortschreitenden harmonischen Differenzierung seit etwa der Barockzeit. Hiermit fanden die zahlreichen seit der Antike unternommenen Versuche ein Ende, verschiedene Instrumentenstimmungen theoretisch spekulativ zu begründen und in der Praxis zu verwirklichen.

Im Gegensatz zum eindeutig definierten theoretischen System mit punktuell festgelegten Tonhöhen wird die subjektive Tonhöhenempfindung durch eigene Gesetzmäßigkeiten geprägt. Im musikalischen Kontext bilden sich Hörzonen aus, deren Empfindungs-Optimum sowie deren maximal zulässige Breite einmal individuell verschieden sind, zum anderen soziokulturell bedingten Normvorstellungen unterliegen.

Obwohl das menschliche Gehör eine große Anzahl von Tonhöhenreizen unterscheiden kann, trifft es, wenn es sich um Tonhöhen und ihre Abweichungen als Ausdruck künstlerisch musikalischer Gestaltung handelt, eine Auswahl und Bewertung durch einen Vergleich mit im Gedächtnis gespeicherten Mustern.<sup>1</sup>

## 2. Neue hörpsychologische Ansätze

Einander widersprechende Ergebnisse älterer Arbeiten, die die tatsächlich intonierte Tonhöhenkala mit theoretisch postulierten wie etwa der pythagoräischen oder natürlich-harmonischen Skala in Einklang zu bringen suchten, konnten durch neue methodische Ansätze der Hörpsychologie korrigiert werden.<sup>2</sup>

Ausgangspunkt bildet nicht mehr ein spekulatives System bzw. die physikali-

<sup>1</sup> P. C. Boomsliter u. W. Creel: Research potentials in auditory characteristics of violin tone, J. Acoust. Soc. Amer. 51, 1972, p. 1992.

<sup>2</sup> J. P. Fricke: Intonation und musikalisches Hören, Habil. Schr., Köln 1968.

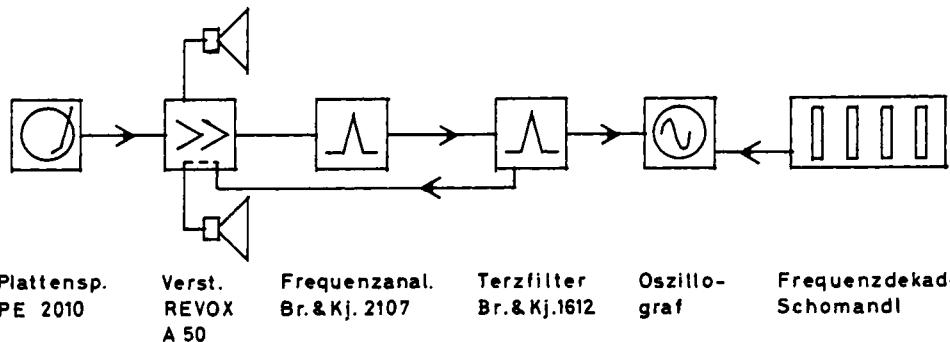


Fig. 1. Versuchsaufbau für Messungen an Tonhöhenkalen.

stische Annahme einer einfachen Entsprechung objektiver und subjektiver Größen,<sup>3</sup> sondern die Tonhöhenempfindung bzw. die Realisation in der Musik selbst. Es wird nicht mehr danach gefragt, welches der möglichen theoretischen Systeme am besten klinge, sondern als gut beurteilte Intonationen werden daraufhin überprüft, welchem bzw. ob sie überhaupt einem der bekannten Systeme am nächsten kommen.

### 3. Die objektive Frequenzmessung

Frequenzmessungen dienen der Objektivierung und Reproduzierbarkeit des Untersuchungsmaterials, dessen Empfindungskorrelat inter- und intraindividuell unterschiedlich ausfallen kann. Ob die Grundtonempfindung mit dem tiefsten Teilton immer übereinstimmt, scheint bei einigen Instrumenten fraglich (Klavier, Schlaginstrumente).<sup>4</sup>

Von den bekannten Frequenzmeßgeräten und -methoden wie Stroboconn, Oszilloskop, digitales Frequenzmeßgerät, fotografische Registrierung eines Schallverlaufs, Abtastung eines Tonbandsegments mit einem rotierenden Tonkopf wurde für die im Abschnitt 4.11 durchgeführten Messungen ein Aufbau nach Fig. 1 benutzt.

Dem Oszilloskop-Eingang wurde die ausgesiebte Grundwelle zugeführt und diese durch externe Triggerung auf dem Oszilloskop-Bildschirm zum Stillstand gebracht.

### 4. Subjektive Größen der Tonhöhenempfindung

Auf der Suche nach Korrelationen zwischen subjektiven und objektiven Größen der Tonhöhe lassen sich zwei Methoden erkennen:

<sup>3</sup> U. Sirker: Methoden der Klangfarbenforschung, dargestellt an quasistationären Klängen von Doppelrohrblattinstrumenten, in: Festschr. K. G. Fellerer, ed. H. Hüschken, Köln 1973, p. 561–576.; Ders.: Der Musiktheoretiker Josef Achtélik, in: Mitt. d. Arbeitsgemeinsch. f. rhein. Musikgesch., Nr. 38, Köln 1972, p. 138.

<sup>4</sup> R. W. Young: Inharmonicity of piano strings, *Acustica* 4, 1954, p. 256 ff.; H.-P. Hesse: Die Wahrnehmung von Tonhöhe und Klangfarbe als Problem der Hörtheorie, Veröffentl. des staatl. Instituts f. Musikf. Preussischer Kulturbesitz Bd. VI, Köln 1972.

4.1 Frequenz-Durchschnittsbildung der Skalen von Musikinstrumenten, die in Stimmung und Intonation als gut empfunden wurden.

4.2 Vergleich psychologisch-subjektiver und physikalisch-objektiver Größen bei natürlichen und synthetischen Klängen im Laboratoriumsversuch.

Vor- und Nachteile haben beide Methoden: Bei 4.1 sind zwischen dem Tonhöhenreiz und seiner Empfindung Einflüsse des Instrumentenbauers und des Spielers (Stimmers) zu berücksichtigen. Gewollte und ungewollte Intonationsabweichungen beim Spiel sind ihrer Herkunft nach schwer zu lokalisieren. Jedoch bleibt je nach Meßmethode der musikalische Kontext gewahrt. Bei 4.2 kann eine Loslösung der Tonhöhe aus dem musikalischen Zusammenhang zu Fehlinterpretationen führen, jedoch ist eine Variierung des Materials im Hinblick auf gezielte Fragestellungen möglich.

### 4.1 Frequenz-Durchschnittsbildung der Skalen von Musikinstrumenten

Entsprechend der Variabilität ihrer Tonhöhenkalen lassen sich Musikinstrumente folgendermaßen gliedern:

- a) Instrumente mit vor dem Spiel regulierbaren Skalen wie Orgel, Klavier, Cembalo u. ä.
- b) Instrumente mit weitgehend veränderbaren Skalen wie Streichinstrumente<sup>5</sup>
- c) Instrumente mit beschränkt veränderlichen Skalen wie Blasinstrumente
- d) Instrumente mit absolut festliegenden Skalen wie Xylophon, Glockenspiel u. ä.

Die unter a) genannte Instrumentengruppe erhält vom Intonateur bzw. Klavierstimmer eine feste Tonhöhenkala. Abweichungen von der zwölfstufig gleichschwebenden Temperatur betragen bei Orgelklängen nach Lottermoser ±6 Cents,<sup>6</sup> nach Sundberg<sup>7</sup> sind sie noch geringer.

Klavierinstrumentenkänge weichen, abgesehen von der mittleren Lage, regelmäßig von der theoretisch geforderten Grundskala ab, u. zw., wie Untersuchungen von Railsback,<sup>8</sup> Schuck und Young<sup>9</sup> sowie von Martin und Ward<sup>10</sup> zeigen, um positive Abweichungen von der gleichschwebend temperierten Skala in der Höhe (bis zu ca. +30 Cents), um negative in der Tiefe (bis zu ca. -30 Cents). Die Größe

<sup>5</sup> Bei Streichinstrumenten sind leere Saiten festgelegte Punkte innerhalb der Skala, auch wenn sie sich im Einzelfall durch Lagenspiel umgehen lassen. Ihre Abstimmung erfolgt ähnlich den unter a) genannten Instrumenten.

<sup>6</sup> Zitiert nach J. Sundberg: The 'scale' of musical instruments, *Svensk tidskrift för musikforskning*, 1968, p. 121.

<sup>7</sup> Ebda.

<sup>8</sup> O. L. Railsback: Scale temperament as applied to piano tuning, *J. Acoust. Soc. Amer.* 9, 1938, p. 274 u. 10, 1938, p. 86.

<sup>9</sup> O. H. Schuck u. R. W. Young: Observations on the vibrations of piano strings, *J. Acoust. Soc. Amer.* 15, 1943, p. 1–11.

<sup>10</sup> D. W. Martin u. W. D. Ward: Subjective evaluation of musical scale temperament in pianos, *J. Acoust. Soc. Amer.* 33, 1961, p. 582–585.

der Abweichungen scheint je nach Instrumententyp unterschiedlich zu sein.<sup>11</sup> Bei Hörversuchen ergab sich eine Bevorzugung der gestreckten Skala gegenüber der gleichschwebend temperierten.<sup>12</sup> Eine Interpretation dieser Tonhöhenabweichungen glauben Schuck und Young in den von der harmonischen Reihe abweichenden Partialtonstrukturen gefunden zu haben.<sup>13</sup>

Die Realisation der Skalenbildung und die Intonation werden bei Streichinstrumenten weitgehend vom Spieler bestimmt. Shackfords<sup>14</sup> und Franssons et al.<sup>15</sup> Untersuchungen lassen bei der Wiedergabe von Musik Intonationszonen erkennen, die sich mehr oder weniger weit von der gleichschwebend temperierten Stimmung entfernen. Die Breite dieser Zonen beträgt ca. 40–60 Cents. Shackford hat, wie vor ihm bereits Kreichgauer,<sup>16</sup> Abweichungen in der Intonation (zu große Durterz, zu kleine Mollterz u. a.) in einen Zusammenhang mit dem musikalischen Kontext bringen können. Intonationsänderungen konnten auf die harmonische und melodische Funktion der Intervalle sowie auf deren zeitliche Dauer zurückgeführt werden.

Bei Blasinstrumenten ergeben Intonationsänderungen durch Anblasstärke oder durch veränderte Ansatzstellung in ihren positiven und negativen Extremwerten den Ziehbereich, innerhalb dessen eine Tonhöhenkorrektur möglich ist. Die schwankenden Angaben, etwa bei Meinel<sup>17</sup> und Meyer,<sup>18</sup> dürften mit den Anblasbedingungen bzw. den noch eben akzeptablen Qualitätsänderungen zusammenhängen.

Aus der objektiven Frequenzmessung von Blasinstrumentenskalen, die mit Ausnahme der Arbeit Franssons et al.<sup>15</sup> ohne Zusammenhang zum musikalischen Kontext erfolgten, ergaben sich zwei Tendenzen der Intonationsrealisierung.

In der Tendenz gestreckte Blasinstrumentenskalen ähnlich den bei Klavierinstrumenten gefundenen Skalen lagen vor bei Querflöten,<sup>19</sup> Oboen,<sup>20</sup> Klarinetten<sup>21</sup> und Trompeten,<sup>22</sup> u. zw. betrug die Streckung ca. 50 Cents. Andere Fre-

quenzmessungen ergaben lediglich Schwankungen um die zwölfstufig temperierte Skala, so bei Klarinetten (J. Meyer, Stauffer, Sundberg, Backus), bei Fagotten (J. Meyer, Stauffer, Sundberg), Waldhörnern (Stauffer) und Tuben (Stauffer).

#### *4.1.1. Exkurs: Messungen an Klarinetten-Skalen innerhalb eines musikalischen Kontextes*

Die Intonationsrealisierung von Klarinetten wurde anhand des langsamen Satzes von Mozarts Klarinetten-Quintett KV 581 (Takte 1–20) in zwei Interpretationen<sup>23</sup> überprüft. Weitere Stichproben wurden dem ersten und vierten Satz des selben Werkes und dem ersten und zweiten Satz von Brahms' Klarinetten-Quintett op. 115 entnommen.<sup>24</sup>

Die Bandfilterkurven des Analysators hatten eine konstante relative Bandbreite (6% Halbwertsbreite für 3 dB Abfall) mit einer Dämpfung von 45 dB pro Oktave von der Mittelfrequenz. Hierdurch ergab sich eine Einschwingzeit im untersuchten Bereich zwischen 83 msec. bei 100 Hz und 8,3 msec. bei 1000 Hz.<sup>25</sup> Die Kürzesten gemessenen Notenwerte (1/8) dauerten dagegen ca. 800 msec. in der Interpretation I bzw. 900 msec. in II im langsamen Satz von Mozarts Quintett.

Durch die Verbindung des Frequenzanalysators mit einem Terz-Filter wurde in einigen Fällen eine Verbesserung der Weitabselektion erreicht. Die kleinste Schrittweite der Frequenzdekade betrug 1 Hz. Hierbei war der Fehler der Ausgangsfrequenz vernachlässigbar (nach 15 Minuten Einlaufzeit  $1 \cdot 10^{-6}$  Hz).

In Fig. 2 sind die Abweichungen beider Interpretationen von der zwölfstufig temperierten Stimmung angegeben. Auf eine Erfassung der sechzehntel Noten mußte aus meßtechnischen Gründen verzichtet werden. Als Bezugspunkt wurde der erste Ton (klingend a<sup>1</sup>) gewählt, der über die Feinregulierung des Plattenpielers auf a<sup>1</sup>=440 Hz eingestellt und innerhalb einer jeden Meßreihe mehrmals überprüft wurde. Allerdings war das a<sup>1</sup> in beiden Interpretationen zu Anfang um ca. 3 Hz (13 C.) zu hoch intoniert (vgl. weiter unten).

Die Reproduzierbarkeit der Daten wurde durch eine zweite Messung der Interpretation I kontrolliert. Sie lag, abgesehen von wenigen stark fluktuierenden Tönen, innerhalb  $\pm 1$  Hz. Der kleinste wahrnehmbare Frequenzhub beträgt für sinusförmig modulierte Sinustöne bis 500 Hz nach Zwicker und Feldtkeller<sup>26</sup> etwa 1,8 Hz (z. B. 7,8 C. bei 400,0 u. 401,8 Hz) und oberhalb 500 Hz etwa 0,3% (5,2 C.). Für komplexe Klänge gibt Sundberg als Wahrnehmungsschwelle eine Größenordnung von 0,5 bis 0,2% für musikalisch trainierte Versuchspersonen an.<sup>27</sup>

<sup>23</sup> Interpr. I mit K. Leister (Klar.) und den Philharmonischen Solisten Berlin (Deutsche Grammophon 138996 SLPM). Interpr. II mit W. Gärtner (Klar.) u. dem Kußmaul-Quartett (Sastruphon SM 007009).

<sup>24</sup> Mit H. Geuser (Klar.) u. dem Drolc-Quartett (Columbia C 80449).

<sup>25</sup> Dauer:  $\frac{2\pi}{\Delta\omega} = \frac{1}{\Delta f}$  ( $\Delta f$ =Bandbreite) nach K. Küpfmüller: Die Systemtheorie der elektrischen Nachrichtenübertragung, Stuttgart 1968, p. 72.

<sup>26</sup> E. Zwicker u. R. Feldtkeller: Das Ohr als Nachrichtenempfänger, Stuttgart 1967, p. 68.

<sup>27</sup> J. Sundberg: Pitch of synthetic sung vowels, STL-QPSR 1/1972, p. 44.

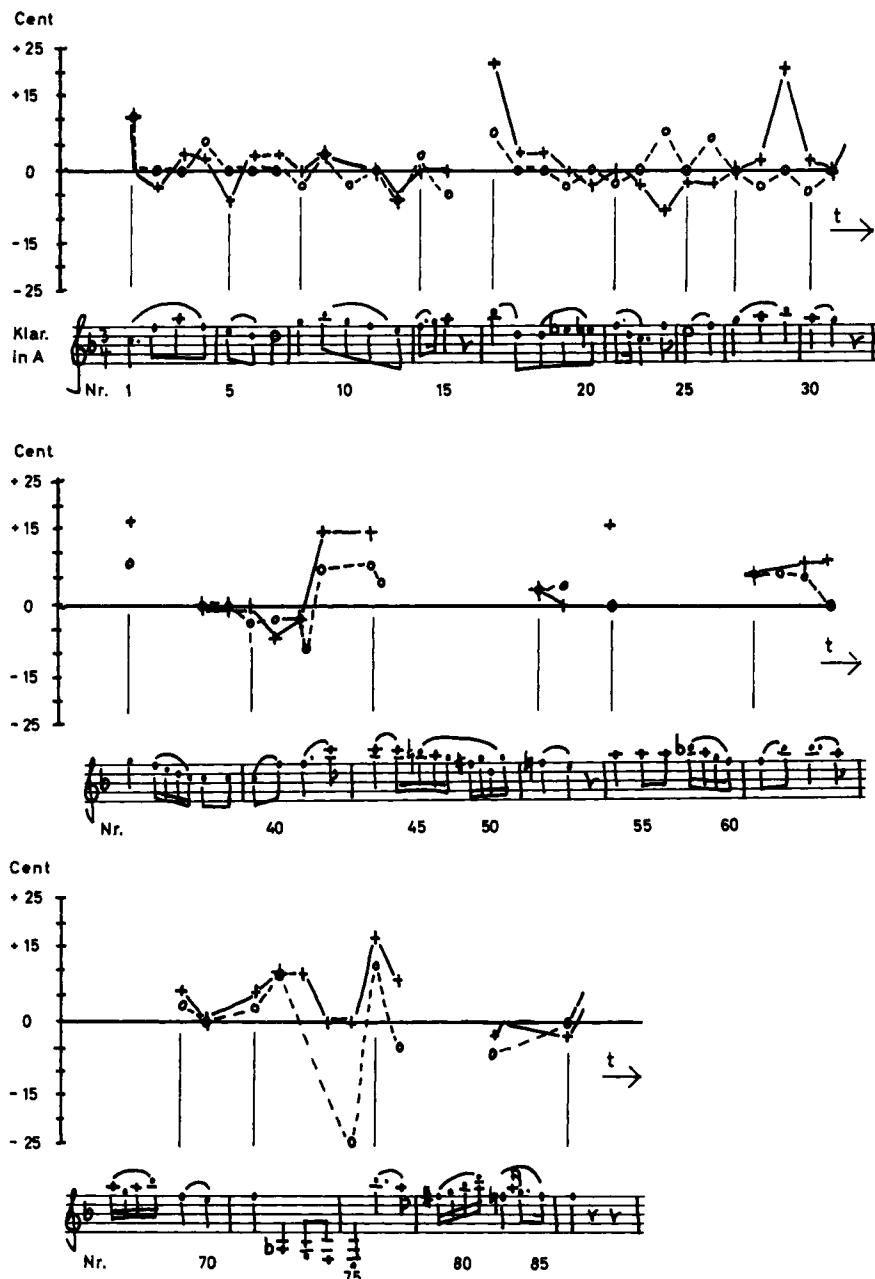


Fig. 2. Mozart: Klarinetten-Quintett KV 581, 2. Satz, Takte 1-20. o=Meßpunkte für die Abweichungen der Interpretation I in Cents von der zwölfstufig temperierten Skala. + = Meßpunkte für die Interpretation II. Der zeitliche Verlauf der Abszisse folgt dem Notenbild.

Die Intonation des Soloinstrumentes kommt in den untersuchten Stücken der zwölfstufig temperierten Stimmung in der Regel außerordentlich nahe. Intonationsabweichungen sind die Folge

- 1) eines gesteigerten Ausdruckes innerhalb des musikalischen Kontextes,
- 2) von Dynamikänderungen,
- 3) der Spieltechnik und des Ansatzes.

*Zu 1):* Die in Tabelle I wiedergegebenen Intonationsabweichungen kennzeichnen Stellen, die musikalisch gesehen einen Höhepunkt darstellen und dementsprechend im klanglichen Ausdruck hervorgehoben werden.<sup>28</sup>

Intonationserhöhungen ergeben sich an musikalischen Höhepunkten sekundär durch eine expressive Klangfarbengestaltung, die bei Rohrblattinstrumenten durch verstärkten Druck auf das Rohrblatt erreicht wird. Vergleichen wir die Töne 27-31 der Fig. 2, so finden wir in der Interpretation I eine gleichmäßige Tongebung, in der Interpretation II eine Steigerung der Expressivität zum b<sup>2</sup> hin. Dementsprechend wird im ersten Fall die temperierte Stimmung verwirklicht, im zweiten Fall tritt eine Intonationserhöhung auf dem Höhepunkt ein.

*Zu 2):* Crescendo ergibt bei Klarinetteninstrumenten eine geringfügige Intonationsvertiefung, Decrescendo eine Intonationserhöhung, die nur bei stärkerem Dynamikwechsel trotz sich ändernder Teiltonstrukturen merkbar sind (Tabelle II).

Tabelle I. Intonationsabweichungen an musikalischen und klanglichen Höhepunkten entsprechend den angegebenen Fig. Der Pfeil bedeutet eine Intonationsabweichung von → nach innerhalb eines Tones.

Fig.	Note Nr.	Temp. (Hz)	Interpr. I		Interpr. II	
			Hz	Cent	Hz	Cent
2	29	784			794	+ 22
	43	880	885	+ 9→+ 5	888	+ 15
	63	784	787	+ 6	788	+ 8
	76	784	789	+ 11	792	+ 17
3	4	880	885	+ 9	888	+ 15
4	3	988	1 002	+ 24		

Tabelle II. Intonationsabweichungen bei Dynamikänderungen entsprechend den angegebenen Fig. Der Pfeil bedeutet eine Intonationsabweichung von → nach innerhalb eines Tones.

Fig.	Note Nr.	Temp. (Hz)	Interpr. I		Interpr. II	
			Hz	Cent	Hz	Cent
2	31	659			659→661	0→+ 5
	41	587	586→584	- 3→- 9		
	43	880	885→882	+ 9→+ 4		
	86	587	587→589	0→+ 6	586→588	- 3→+ 3
4	1	185	188→185	+ 28→ 0		
	2	392	397→395	+ 22→+ 13		
	4	494	494→496	0→+ 7		
5	1	880	880→882	0→+ 4		
	2	880			887→884	+ 13→+ 7

<sup>28</sup> Bezugspunkt für Fig. 4 ist a<sup>2</sup> (gegr.)=740 Hz im Takt 6 des 1. Satzes.

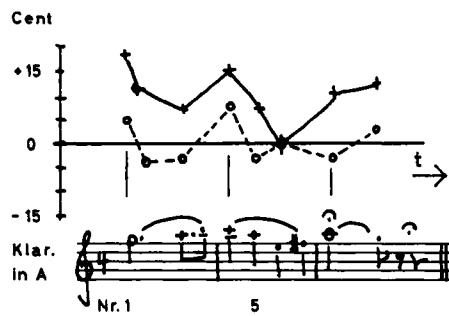


Fig. 3. Mozart: Klarinetten-Quintett KV 581, 4. Satz, Takte 103–105. Meßpunkte wie in Fig. 2.

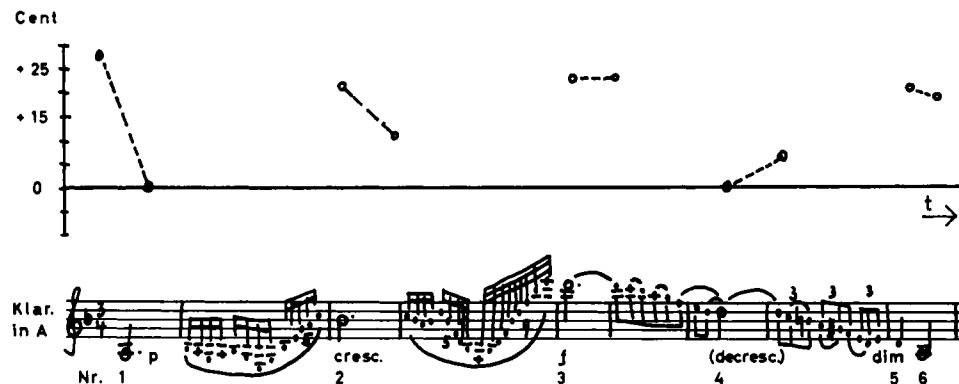


Fig. 4. Brahms: Klarinetten-Quintett op. 115, 2. Satz, Takte 42–50. Die Töne Nr. 1–4 sind jeweils am Anfang und am Ende gemessen. Sie zeigen Intonationschwankungen entsprechend der Dynamik.

Beisp. hierfür sind in Fig. 2: Ton 31 (decresc. in der Interpr. II), Ton 41 (cresc. in I), Ton 43 (cresc. in I) und Ton 86 (decresc. in I u. II). Aus Fig. 4 werden Dynamikänderungen, auch wenn sie nur agogische Zutaten sind, deutlich (Ton 1 cresc., Ton 3 konstant, Ton 4 decresc.). Eine Deutung der wechselnden Frequenz gelingt in Fig. 5 nur im Zusammenhang mit der vorliegenden Schallplatten-Aufnahme. In der Interpretation I findet sich auf Ton 1 ein decresc., Nr. 2 bleibt konstant, in II bleibt Nr. 1 konstant, während bei Nr. 2 ein cresc. zur nachfolgenden Passage hin gespielt wird.

Weitere Beisp. können im 2. Satz von Brahms' Quintett angeführt werden: Takt 55 (gegriffen e<sup>2</sup> von 558→554 Hz)<sup>29</sup> und Takt 67 (gegriffen a<sup>2</sup> von 749→744 Hz).

Zu 3): Bei frei einsetzenden, besonders hohen Tönen, wird der Druck auf das Rohrblatt verstärkt, um eine sichere Ansprache zu erreichen. Hierdurch ergibt sich eine erhöhte Intonation (Tabelle III).

So wird im ersten Takt der Fig. 2 sofort nach dem Anspielen ein Intonationsausgleich vorgenommen (443→440 Hz). Ob die Intonationserhöhung von Ton Nr. 76 mehr auf 1) oder mehr auf 3) zurückzuführen ist, bleibt offen. Im 2. Satz von Brahms' Quintett wird im Takt 73 das frei einsetzende e<sup>3</sup> (gegriffen) mit

<sup>29</sup> Der Pfeil bedeutet eine Intonationsveränderung innerhalb eines Tones.



Fig. 5. Mozart: Klarinetten-Quintett KV 581, 1. Satz, Takte 35–38. Meßpunkte wie in Fig. 2.

1 126 Hz intoniert, was einer positiven Abweichung von 17 Hz oder 26 C. entspricht.

Bildet man eine Kurve für die mittleren Abweichungen der Fig. 2, so lassen sich trotz der wenigen Meßwerte Tendenzen für die Oktave a<sup>1</sup> bis a<sup>2</sup> (klingend) erkennen (Fig. 6), die der Darstellung Youngs<sup>30</sup> und Franssons et al.<sup>31</sup> nahekommen. Es stellt sich jedoch die Frage, ob die Mittelwertkurve mehr als eine erste Information vermitteln kann, da die Tonhöhenabweichungen offensichtlich kontextabhängig sind.

Bei einem Hörvergleich der beiden Interpretationen der Fig. 2 wirkt die Interpretation I verhaltener, die Interpretation II dagegen im klanglichen Ausdruck expressiver. Hierdurch dürften die in ihren Größen unterschiedlichen Abweichungen in den hohen Lagen (Fig. 6) eine Erklärung finden. In der tiefen Lage liegen in Fig. 6 zu wenig Meßwerte vor, um Rückschlüsse ziehen zu können. Immerhin wäre es möglich, daß das e<sup>0</sup> (gegriffen) in I ohne die tief E-Verbesserung gespielt wurde und deshalb 25 C. zu tief intoniert wurde.

Tabelle III. Intonationsabweichungen, die auf eine Änderung des Ansatzes zurückzuführen sind. Der Pfeil bedeutet eine Intonationsabweichung von → nach innerhalb eines Tones.

Fig.	Note Nr.	Temp. (Hz)	Interpr. I		Interpr. II	
			Hz	Cent	Hz	Cent
2	1	440	443→	+13→	443→	+13→
			440	○	440	○
	16	784	788	+ 8	794	+22
	32	659	662	+ 8	665	+16
	54	740	740	○	747	+16
2. Satz Brahms	76	784	789	+11	792	+17
	T. 73	1 109	1 126	+26		

<sup>30</sup> Vgl. Anmerkung 21.

<sup>31</sup> Vgl. Anmerkung 15.

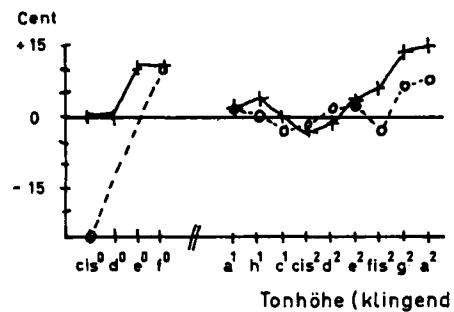


Fig. 6 Mittlere Abweichungen von der zwölfstufig temperierten Skala entsprechend Fig. 2. Meßpunkte wie in Fig. 2.

#### 4.2 Psychologisch-subjektive und physikalisch-objektive Größen bei natürlichen und synthetischen Klängen im Laboratoriumsversuch

Helmholtz vermutete einfache und eindeutige Zusammenhänge zwischen Frequenz und Tonhöhenempfindung, Amplitude und Lautstärkeempfindung, Spektrum und Klangfarbenempfindung. Dies konnte aufgrund der komplexen Abhängigkeiten der Empfindungsgrößen untereinander korrigiert werden.<sup>32</sup> Die in psycho-physi- schen Experimenten gefundenen Unterschiedsschwellen haben innerhalb einer musikalischen Gestalt offensichtlich einen größeren Spielraum. So konnte in den von spekulativen Tonsystemen ausgehenden Laboratoriumsversuchen von Ward und Martin<sup>33</sup> ein Teil der Versuchspersonen zwischen harmonisch reiner und zwölfstufig temperierter Stimmung nicht unterscheiden. Bei Sukzessivdarbietungen, in denen melodische Phrasen in verschiedenen Stimmungen beurteilt werden sollten, konnte nur eine geringe Bevorzugung der gleichschwebend temperierten Stimmung festgestellt werden. Insgesamt lagen keine eindeutigen Resultate vor. Neuere hörpsychologische Forschungen lassen den Verdacht einer einseitigen und eingengten Fragestellung auftreten, da als Antwort von den Versuchspersonen lediglich Zustimmung bzw. Ablehnung einer melodischen Phrase in einer konstruierten Intonation erwartet wurde. Bereits 1893 hatte Planck zu solchen Versuchen Einwände erhoben, als er sagte, „daß sich die bisherigen Untersuchungen auf diesem Gebiete vorwiegender mit der Frage beschäftigt haben, was sein soll als mit der, was wirklich ist . . .“<sup>34</sup>

Dagegen konnten die von Shackford mitgeteilten Ergebnisse über die Intonationsrealisierung in umfangreichen Hörversuchen, bei denen natürliche Instrumentenklänge in der Tonhöhe verändert und auf die optimale Intonation hin beurteilt und eingestellt wurden, von J. Fricke präzisiert werden.<sup>35</sup> Simultan- und

<sup>32</sup> H. P. Reinecke: Über den doppelten Sinn des Lautheitsbegriffes beim musikalischen Hören, Diss., Hamburg 1953.

<sup>33</sup> W. D. Ward u. D. W. Martin: Psychophysical comparison of just tuning and equal temperament in sequences of individual tones, J. Acoust. Soc. Amer. 33, 1961, p. 586–588.

<sup>34</sup> Zitiert nach J. P. Fricke a. a. O., p. 122.

<sup>35</sup> Ebda.

Sukzessivintervalle bilden danach verhältnismäßig breite Intonationszonen, die sämtliche spekulativen Systeme umfassen. Kennzeichnend sind „ausdrucksbedingte Bestrebungen zur Verengung und Überdehnung, zur Herausarbeitung charakteristischer Unterschiede sowie allgemein zur Variierung der Intonation der Tonstufen . . .“<sup>36</sup> Ferner wird „einerseits die Tendenz erkennbar, in gewissen Zusammenhängen sowohl aufwärts als auch abwärtsstrebende Leittöne zu verkleinern, Ganztorschritte zu vergrößern und den Charakter von Terzen und Sexten durch Übertreibung herauszuarbeiten; andererseits wird deutlich, daß Strukturintervalle stabilisierende Wirkung haben. Zu den Gesetzmäßigkeiten der Intonation gehören ferner die Bedingungen für die Verwirklichung dieser im bestimmten Kontext vorliegenden Tendenzen.“<sup>37</sup>

#### 5. Zusammenfassung

Aussagen über Zusammenhänge zwischen subjektiven und objektiven Parametern der Tonhöhe bei Musikinstrumentenklängen basieren auf zwei Methoden:

- 1) Untersuchungen der Instrumentenskalen selbst,
- 2) Untersuchungen an simultan und sukzessiv dargebotenen Intervallen im Laboratoriumsversuch.

Bei den mit der ersten Methode gemessenen Frequenzskalen ergeben sich folgende scheinbar einander widersprechende Ergebnisse der Intonationsrealisierung:

- a) Bei Orgelinstrumenten stimmen Empfindungs-Optimum und theoretisches System weitgehend überein.
- b) Bei Klavierinstrumenten entsprechen die gemessenen Grundfrequenzen einer gestreckten Skala, die in der Höhe um positive, in der Tiefe um negative Beträge von der gleichschwebend temperierten Stimmung abweicht.
- c) Bei Streichinstrumenten weicht die optimale Intonation von der theoretisch postulierten mehr oder weniger ab entsprechend den musikalischen Erfordernissen wie Kontext und Ausdruck.
- d) Bei Blasinstrumenten streuen die Werte einerseits gleichmäßig um die temperierte Skala, andererseits ergibt sich eine gestreckte Skala. Hierbei dürfte es sich, wie bei den vorgelegten Messungen an Klarinetten gezeigt werden konnte, um musikalisch bedingte Interpretationsunterschiede bzw. um spiel- und instrumententechnische Abweichungen innerhalb der Wahrnehmungsschwellen bzw. der vom Gehör zulässigen Hörzonen handeln.

Zumindest bei Holzblasinstrumenten sind Intonationsänderungen, die von der Grundskala abweichen, vielfach Sekundäreffekte einer expressiven Klanggestaltung an musikalischen Höhepunkten (positive Abweichungen in der hohen Lage), in geringem Umfang auch von Dynamikänderungen (bei Klarinetten-Instrumenten positive Abweichungen beim Decrescendo, negative Abweichungen beim Crescendo).

<sup>36</sup> Ebda., p. 221.

<sup>37</sup> Ebda., p. 220.

cendo) und bestimmten Spielpraktiken (positive Abweichungen bei frei einsetzenden Tönen).

Die unterschiedlichen Intonationsrealisierungen, die sich aufgrund von Frequenzmessungen der Instrumente selbst ergeben, können mit der zweiten Methode in Zusammenhang gebracht werden. Danach stellt die zwölfstufig temperierte Skala die ideale Beschreibung eines theoretischen Systems dar, das in der Intonationsrealisierung Schwankungen unterliegt. Das Gehör akzeptiert mehr oder weniger breite Hörzonen. Innerhalb dieser Hörzonen lassen sich verschiedenartige Intonationen realisieren, deren Abweichungen je nach Instrumententyp abhängig sind vom musikalischen Kontext oder von der Spiel- und Klangtechnik.

Die Ursachen für Intonationsabweichungen bei Streichinstrumenten (Ausdruck und Kontext bezogen auf den melodischen und harmonischen Verlauf) und Blasinstrumenten (Klangfarbe und Instrumententechnik) dürften die bekannten Schwierigkeiten in der Intonation beim Zusammenspiel beider Gruppen bewirken.

Hier stellt sich nun die grundsätzliche Frage nach der Aussagekraft von Mittelwertkurven zur Darstellung von Intonationsabweichungen. Bildet man Mittelwertkurven aufgrund von Instrumenten-Skalen, so fehlt die Kontextbezogenheit der musikalischen Intonation, bildet man Mittelwertkurven für eine kontextbezogene Intonation, so werden typische Tendenzen der Intonationsrealisierung nur ungenügend erfaßt. Mit der von Tjernlund, Sundberg und Fransson beschriebenen Methode<sup>38</sup> können mit Hilfe einer EDV-Anlage statistische Aussagen über die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Ton vorkommt, und über die Streuung von Tönen um eine mittlere Frequenz gemacht werden. Die Realzeit-Verarbeitung gestattet es hierbei, Messungen unmittelbar an Musikstücken vorzunehmen. Von hier aus könnten in einem weiteren Schritt Intonationsabweichungen, die z. B. durch bestimmte Spieltechniken oder durch Kontextbezüge zustande kommen, abgerufen werden, da Tonhöhe, Spektrum, Lautstärke und Dauer nach entsprechender Digitalisierung zumindest grob geordnet und in einen Zusammenhang mit der Intonation gebracht werden könnten. Hiermit wäre ein bedeutender Schritt in Richtung auf eine quantitative Erfassung musikalischer Gestalten getan.

<sup>38</sup> P. Tjernlund, J. Sundberg u. F. Fransson: Grundfrequenzmessungen an schwedischen Kernspaltflöten, in: *Studia instrumentorum musicae popularis II*, Stockholm 1972.