

# Alte Musik und Aufführungspraxis

## Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-03735-970-9 (Schweiz)

ISBN 978-3-8258-0998-0 (Deutschland)

Festschrift für Dieter Gutknecht zum 65. Geburtstag

herausgegeben von

Dietrich Kämper,  
Klaus Wolfgang Niemöller und  
Wolfram Steinbeck

© LIT VERLAG GmbH & Co. KG Wien,

Zweigniederlassung Zürich 2007

Dufourstr. 31

CH-8008 Zürich

Tel. +41 (0) 44-251 75 05

Fax +41 (0) 44-251 75 06

e-Mail: [zuerich@lit-verlag.ch](mailto:zuerich@lit-verlag.ch)

<http://www.lit-verlag.ch>

LIT VERLAG Dr. W. Hopf

Berlin 2007

Auslieferung/Verlagskontakt:

Fresnostr. 2

48159 Münster

Tel. +49 (0)251-62 03 20

Fax +49 (0)251-23 19 72

e-Mail: [lit@lit-verlag.de](mailto:lit@lit-verlag.de)

<http://www.lit-verlag.de>

## Auslieferung:

Schweiz/Österreich: Medienlogistik Pichler-ÖBZ GmbH & Co KG

IZ-NÖ, Süd, Straße 1, Objekt 34, A-2355 Wiener Neudorf

Tel. +43 (0) 2236/63 535 - 290, Fax +43 (0) 2236/63 535 - 243, e-Mail: [mlo@medien-logistik.at](mailto:mlo@medien-logistik.at)

Deutschland: LIT Verlag Fresnostr. 2, D-48159 Münster

Tel. +49 (0) 251/620 32 - 22, Fax +49 (0) 251/922 60 99, e-Mail: [vertrieb@lit-verlag.de](mailto:vertrieb@lit-verlag.de)

Thomas Seedorf (1994): *Belcanto*. In Ludwig Finscher (Hrsg.), MGG Sachteil Bd. 1, Sp. 1347-1349.

Jeremy Siepmann (2001): *Hemsley, Thomas*. In: Stanley Sadie (Hrsg.), The New Grove Dictionary of Music and Musicians, 2. Auflage, London, New York.

Kenneth N. Stevens, S. Kasowski & Gunnar M. Fant (1953): *An Electrical Analog of The Vocal Tract*. In: Journ. Acoust. Soc. Amer. 25, S. 734-742.

Carl Stumpf (1918): *Die Struktur der Vokale*. In: Sitzungsberichte der kgl. Preußischen Akademie der Wissenschaften Berlin, Jahrgang 1918, S. 333-358.

Johan Sundberg (1973): *The Source Spectrum in Professional Singing*. In: Folia phoniatrica 25, S. 71-90.

Johan Sundberg (1974): *Production and Function of the „Singing Formant“*. In: Report of the Eleventh Congress of the International Musicological Society Copenhagen 1972. Band 2. hrsg. von Henrik Glahn et al., Kopenhagen, S. 679-686.

Johan Sundberg (1998): *Die Singstimme*. In: Verständliche Forschung. Die Physik der Musikinstrumente. Heidelberg 1992: Spektrum, S. 14-21.

Gerold Ungeheuer (1962): *Elemente einer akustischen Theorie der Vokalartikulation*. Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer.

Fritz Volbach (1930): *Handbuch der Musikwissenschaften, 2. Band: Ästhetik, Akustik und Tonphysiologie, Tonpsychologie*. Münster/W: Aschendorffsche Verlagsbuchhandlung.

Fritz Winckel (1971): *How to measure the effectiveness of stage singer's voices*. In: Folia phoniatrica 23, S. 228-233.

## Klangfarbentrennung durch Vibrato

### 1. Die Rolle von Vibrato und Mikromodulationen in der auditiven Trennung von Klangfarben

Nach der Theorie der Verschmelzung und partiellen Verdeckung kann die Klangfarbe simultan spielender Instrumente besonders dann gut getrennt wahrgenommen werden, wenn die starken Teiltöne im Formantgebiet der einen Klangfarbe im Bereich einer Minimastelle der anderen Klangfarbe liegen und umgekehrt (Fricke 1980, 131; Reuter 2000, 176). Die verbleibenden Teiltöne dieser nur teilweise verdeckten Klangfarben bilden Residuen aus (eines für jede Klangfarbe), welche getrennt wahrgenommen werden können.

Die Antwort auf die Frage nach der Ursache für die auftretenden Residuen kann in den unterschiedlichen Bewegungen der Teiltöne gefunden werden (Vibrato und Mikromodulationen), da sich die Eigenschaften der Teiltöne in den Eigenschaften der Residuen widerspiegeln.

Mit anderen Worten: Der Grund für die Trennung simultaner, unisono gespielter Klangfarben liegt weniger in den verschiedenen Formantgebieten der einzelnen Instrumente. Die unterschiedlichen Maxima und Minima in den Spektren von zusammenspielenden Musikinstrumenten sind jedoch dafür notwendig, dass man überhaupt die verschiedenen Modulationen und Fluktuationen der jeweiligen Teiltöne der beteiligten Instrumente wahrnehmen kann.

Dieser Gedanke führt zu einem Bereich, der in der Geschichte der Musikwissenschaft bisher größtenteils vernachlässigt wurde: Die Bedeutung von Vibrato und Mikromodulationen für die Wahrnehmung und auditive Trennung zusammenspielender Klangfarben.

Es ist bekannt, dass ein Vibrato mit einer Frequenz zwischen 6 und 8 Hz als besonders angenehm und instrumententypisch empfunden wird (Meyer 1968, 544), und dass Vibrati die Erkennbarkeit von Klangfarben verbessern (Saldanha, Corso 1964, 2024). Besonders deutlich wird dies bei Vibratoklängen in Gegenwart anderer Klangfarben im Hintergrund (z.B. McAdams 1989; Marin, McAdams 1991, 349).

Des Weiteren wurden sowohl typische Modulationsweiten für verschiedene Musikinstrumente untersucht (Meyer 1968, 588; Meyer 1991, 53-56), als auch unsere

Fähigkeit, gerade noch wahrnehmbare Tonhöhenmodulationen zu erkennen (unter 500 Hz: 3,6 Hz, über 500 Hz: 0,7%; Zwicker, Feldtkeller 1967, 66-68).

## 2. Experimente mit inkohärent modulierten gerad- und ungeradzahligen Teiltönen

Stephen McAdams (1982) war einer der ersten, die den Einfluss von Vibrato auf Teiltöne in harmonischem, erweitertem oder komprimiertem Verhältnis untersuchten (*erweitert* bedeutet hier, dass die Frequenz jedes Teiltons mit 1,07 multipliziert wird, während *komprimiert* eine Multiplikation jedes Teiltons mit dem Faktor 0,93 bedeutet):

Er modulierte in seinen Experimenten entweder alle Teiltöne, nur die geradzahligen oder nur die ungeradzahligen Teiltöne mit 6 Hz. Als Ergebnis dieses Experiments zeigte McAdams, dass die Partialtöne mit der gleichen Modulation (d.h. mit kohärenter Modulation) als einzelne Klangfarbe wahrgenommen werden, wohingegen die Teiltöne mit verschiedenen Modulationen (d.h. mit inkohärenter Modulation zwischen gerad- und ungeradzahligen Teiltönen) als zwei in Oktavbreite auseinanderliegende Klangfarben wahrgenommen werden (nach den Experimenten von Robert Carlyon (1991, 329f.) funktioniert die vibratogesteuerte Gruppierung von Teiltönen nur für harmonische Relationen. Man kann die Experimente McAdams jedoch unter Verwendung eines beliebigen Syntheseprogramms recht einfach wiederholen und zeigen, dass unterschiedliche Vibrati innerhalb der Teiltöne eines Klanges auch zu einer Aufspaltung des Klages in zwei oder mehrere Klangfarben führen, wenn es keine harmonischen Beziehungen zwischen den Teiltönen gibt).

Während jene Experimente mit synthetisierten Klangfarben realisiert wurden, ist es heute mit Programmen wie Melodyne möglich, die Spektren und Tonhöhenmodulationen von echten Instrumentalklangfarben sehr realitätsgetreu zu manipulieren und die Experimente von McAdams mit Klangbeispielen originaler Instrumente zu wiederholen.

Mit Hilfe eines FFT-Filters wurden die Klangfarben von 11 Instrumenten zunächst in gerad- und ungeradzahlige Teiltöne aufgetrennt (Abb. 1 Trennung der Teiltöne am Beispiel eines Geigenklangs).

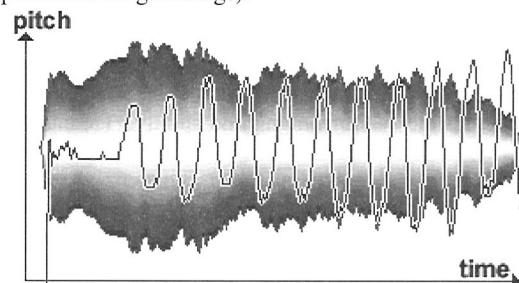


Abb. 1a: Dynamikhüllkurve und Vibratokurve, Geige, a', wird aufgeteilt in geradzahlige und ungeradzahlige Teiltöne

## Klangfarbentrennung durch Vibrato

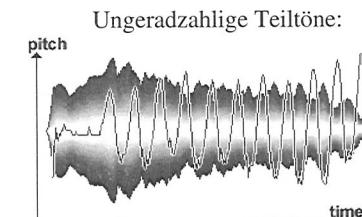


Abb. 1b: Dynamikhüllkurve, Geige, a', Vibratokurve der ungeradzahligen Teiltöne

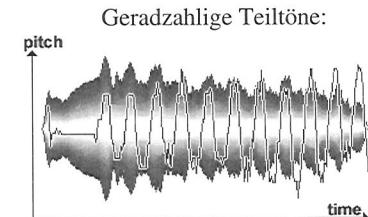


Abb. 1c: Dynamikhüllkurve, Geige, a', Vibratokurve der geradzahligen Teiltöne

Die Instrumentalklangfarben waren Flöte, Oboe, Englisch Horn, Klarinette (B), Fagott, Horn, Trompete (B), Tenorposaune, Violine, Viola und Violoncello, jede in den Tonhöhen c<sup>1</sup> (260 Hz), es<sup>1</sup> (311 Hz), fis<sup>1</sup> (370 Hz) und a<sup>1</sup> (440 Hz). Das Vibrato der geradzahligen Harmonischen wurde zunächst auf unterschiedliche Art und Weise manipuliert und daraufhin wieder mit den ungeradzahligen Harmonischen zusammen gemischt. Die Manipulationen der geradzahligen Teiltöne waren:

### 1.) keine Manipulation

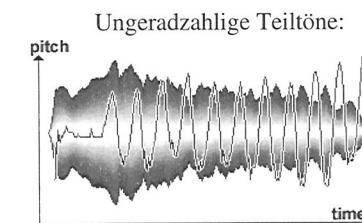


Abb. 2a: Dynamikhüllkurve, Geige, a', Vibratokurve der ungeradzahligen Teiltöne

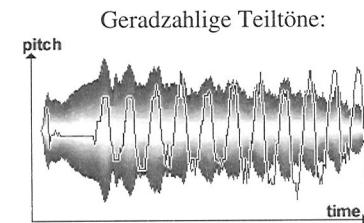


Abb. 2b: Dynamikhüllkurve, Geige, a', unveränderte Vibratokurve der geradzahligen Teiltöne

## 2.) Umkehrung der Vibratophase

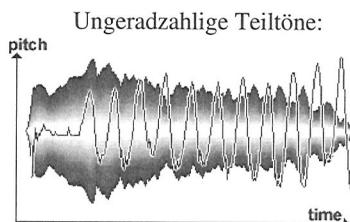


Abb. 3a: Dynamikhüllkurve, Geige, a', Vibratokurve der ungeradzahligen Teiltöne

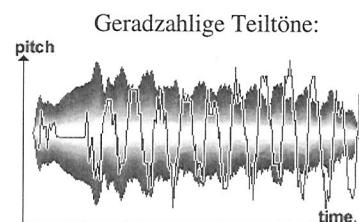


Abb. 3b: Dynamikhüllkurve, Geige, a', umgekehrte Vibratokurve der geradzahligen Teiltöne

## 3.) Dehnung der Vibratoweite bis zu maximal 100 Cent (d.h. +/- 50 Cent ausgehend von der Trägerfrequenz)

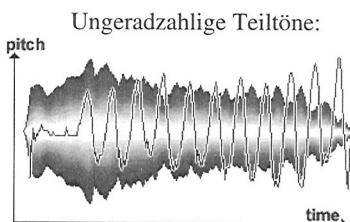


Abb. 4a: Dynamikhüllkurve, Geige, a', Vibratokurve der ungeradzahligen Teiltöne

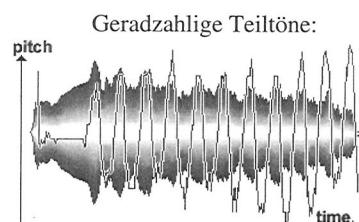


Abb. 4b: Dynamikhüllkurve, Geige, a', gedehnte Vibratokurve der geradzahligen Teiltöne

## 4.) Dehnung der Vibratoweite bis zu maximal 100 Cent verbunden mit einer Umkehrung der Vibratophase.

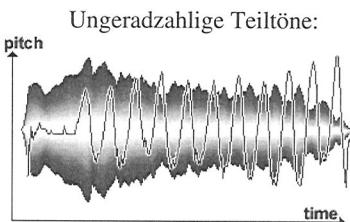


Abb. 5a: Dynamikhüllkurve, Geige, a', Vibratokurve der ungeradzahligen Teiltöne

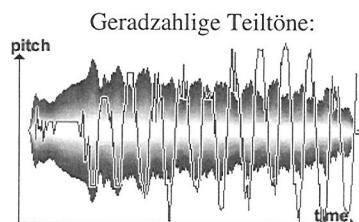


Abb. 5b: Dynamikhüllkurve, Geige, a', gedehnte und umgekehrte Vibratokurve der geradzahligen Teiltöne

## 5.) kein Vibrato

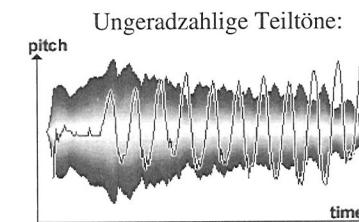


Abb. 6a: Dynamikhüllkurve, Geige, a', Vibratokurve der ungeradzahligen Teiltöne

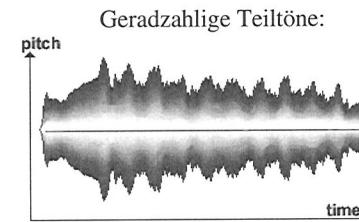


Abb. 6b: Dynamikhüllkurve, Geige, a'; kein Vibrato, Vibratokurve auf 0.

In fünf Wahrnehmungsexperimenten wurden die manipulierten Klangfarben in einer randomisierten Abfolge 10 Versuchspersonen (Vp) präsentiert, welche für jede Klangfarbe folgende Fragen zu beantworten hatten:

„Hören Sie ein oder zwei Instrumente und welches Instrument wird gerade gespielt?“

## 3. Statistische Auswertung

Die fünf Wahrnehmungsexperimente führten zu den folgenden Ergebnissen:

Vp, die zwei Instrumente hören	Original	Umkehrung der Vibratophase	100 Cent Vibrato Dehnung	100 Cent Dehnung, Umkehrung der Vibratophase	Kein Vibrato
Flöte	0	7	10	9	4
Oboe	0	7	9	9	3
Englisch Horn	0	10	10	10	5
Klarinette	0	2	3	8	0
Fagott	0	7	8	8	2
Horn	0	0	10	9	1
Trompete	0	4	10	10	1
Posaune	0	1	10	10	1
Violine	0	8	10	10	1
Viola	0	0	7	10	0
Violoncello	0	5	8	9	1

Um eine zufällige Entscheidung weitgehend auszuschließen, wurden die Ergebnisse mit einem Bernoulli-Entscheidungsprozess je Vp modelliert (50 % richtig (Erfolg), 50% falsch (Fehler)). Aufgrund N=10 musste mit einer Binomialverteilung über 10 Wiederholungen mit einer Erfolgswahrscheinlichkeit von  $p=0.5$  bzw.  $\text{Bin}(10, 0.5)$  gerechnet werden.

Entsprechend lautet die Nullhypothese

$H_0$ : Die Verteilung der richtigen Entscheidungen ist Bin(10,0,5), d.h. der Erwartungswert einer richtigen Entscheidung ist 50%.

Die Nullhypothese wird verworfen, wenn die beobachteten Werte innerhalb der Verteilung extrem hoch oder extrem niedrig sind. Bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha=0.05$  werden die 2,5% der niedrigsten und 2,5% der höchsten Werte als nicht mehr zufällig betrachtet: Mit den 2,5% der niedrigsten Werte kann definitiv eine Erfolgswahrscheinlichkeit von weniger als 50%, mit den 2,5% der größten Werte von mehr als 50% angenommen werden.

Da der Test für 11 Instrumente durchgeführt wurde, wird das 5%-Niveau durch die Anzahl der Instrumente korrigiert. Die Bonferroni-Korrektur gewährleistet, dass die Urteile der Vp für alle Instrumente mit einer Zufälligkeit von weniger als 5% getroffen wurden. Dies führt zur folgenden Korrektur des Signifikanzniveaus:

Bonferroni Korrektur	2.5% der kleinsten Werte	2.5% der größten Werte
Signifikanzniveau	0.025	1-0.025
Korrigiertes Signifikanzniveau	$0.025/11 = 0.002272727$	$(1-0.025)/11 = 0.9977273$

Die kumulierten Wahrscheinlichkeiten der möglichen Realisierungen des Binomial-Experiments mit  $p=0.5$  sind in der folgenden Tabelle dargestellt:

Realisierung	Kumulierte Wahrscheinlichkeiten
0	0.0009765625
1	0.0107421875
2	0.0546875000
3	0.1718750000
4	0.3769531250
5	0.6230468750
6	0.8281250000
7	0.9453125000
8	0.9892578125
9	0.9990234375
10	1

Dementsprechend kann die Nullhypothese für die Realisierung 0 verworfen werden, da die kumulierten Wahrscheinlichkeiten kleiner als 0,002272727 sind. Das gleiche gilt für die Realisierungen 9 und 10, da die kumulierten Wahrscheinlichkeiten größer als 0,9977273 sind. Mit anderen Worten: Das Ergebnis kann als nicht mehr zufällig betrachtet werden, wenn die Entscheidungen von 0, 9 oder 10 Versuchspersonen übereinstimmen.

Jedes Ergebnis der 5 Experimente wird mit diesem Kriterium verglichen (sowohl die Erkennbarkeit der einzelnen Instrumente als auch die Trennung der Klangfarben

aufgrund der verschiedenen Vibrati). Aufgrund des äußerst geringen Signifikanzniveaus (11 Instrumente) können lediglich Extremwerte (0, 9 oder 10) als nicht zufällig betrachtet werden.

Die Ergebnisse werden klarer, wenn man sämtliche Realisierungen aller Instrumente zusammenfasst und das Signifikanzniveau an alle der 5 Variablen eines Instrumententyps anpasst. So erhält man  $0.025 / 5 = 0.005$  und  $1 - 0.005 = 0.995$  als kritische Summenwahrscheinlichkeiten. In diesem Fall sind die Summenwerte nicht mehr zufällig, falls sie kleiner gleich 42 oder größer gleich 69 werden.

Personen, die zwei Instrumente hören	Original	Umkehrung der Vibratophase	100 Cent Vibrato Dehnung	100 Cent Dehnung, Umkehrung der Vibratophase	kein Vibrato
Flöte	0	7	10	9	4
Oboe	0	7	9	9	3
Englisch Horn	0	10	10	10	5
Klarinette	0	2	3	8	0
Fagott	0	7	8	8	2
Horn	0	0	10	9	1
Trompete	0	4	10	10	1
Posaune	0	1	10	10	1
Violine	0	8	10	10	1
Viola	0	0	7	10	0
Violoncello	0	5	8	9	1
Gesamt	0 (signifi- kant)	51 (zufällig)	95 (signifi- kant)	102 (signifikant)	19 (signifi- kant)

#### 4. Ergebnisse

Neben den hier vorgestellten Wahrnehmungsergebnissen zeigte sich bei der Analyse der Mikromodulationen der originalen Klangfarben, dass ein typisches Vibrato von Musikinstrumenten nicht unbedingt sinusförmig sein muss: das Vibrato von Instrumenten mit doppeltem Rohrblatt (Oboe, Englisch Horn, Fagott) zeigte eine eher rechteckige oder dreieckige Form (s. Abb. 7).

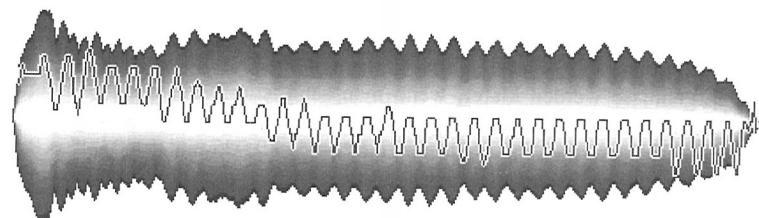


Abb. 7: Dynamikhüllkurve und Vibratokurve, Englisch Horn, a',  
Das Vibrato schwankt zwischen einer rechteckigen und einer dreieckigen Form

Desweiteren zeigen die Ergebnisse der fünf Wahrnehmungsexperimente, dass eine Dehnung der Modulationsweite der geradzahligen Teiltöne auf 100 Cent signifikant zur Wahrnehmung von zwei im Oktavabstand spielenden Instrumenten führt (Ausnahme: Klarinette, aufgrund der weniger prominenten geradzahligen Harmonischen). Dies kann auch bei Klangfarben mit einer umgekehrten Vibratophase kombiniert mit einer Dehnung der Vibratowelt der geradzahligen Harmonischen auf 100 Cent beobachtet werden (keine Ausnahmen).

Im Fall der Klangfarben mit invertierter Phase des Vibratos kann Zufälligkeit nicht ausgeschlossen werden. Eine reine Invertierung der Vibratophase der geradzahligen Teiltöne (ohne Dehnung der Modulationsweite) ruft meist den Eindruck eines einzigen Instruments hervor. Aufgrund der abweichenden Vibratostuktur im Vergleich zur Vibratostuktur anderer Instrumente (rechteckig/dreieckig im Vergleich zu einer sinusoidalen Form, siehe oben) bilden die Blasinstrumente mit doppeltem Rohrblatt eine Ausnahme.

Eine Modulation der geradzahligen Teiltöne um 0 Cent (kein Vibrato) erwies sich als nicht signifikant. Das Gleiche gilt für die Kombination von gerad- und ungeradzahligem Anteil ohne Manipulation (Originalklänge).

Das Erkennen der Klangfarben der einzelnen Instrumente funktionierte in allen Aufgaben signifikant gut und wurde durch die Manipulationen nicht nennenswert beeinflusst.

Mit anderen Worten: Der Einfluss von Vibrato und anderen Tonhöhenmodulationen ist stark genug, um eine stabile Klangfarbe in zwei wahrnehmbare Teile aufzuspalten, wenn die gerad- und ungeradzahligen Teiltöne mit unterschiedlichen Modulationsweiten versehen werden. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass die Rolle des Vibratos für die auditive Trennung von zusammenspielenden Klangfarben bisher unterschätzt wurde.

#### Literatur:

Carlyon, Robert P.: *Discrimination between coherent and incoherent frequency modulation of complex tone*. In: JASA 89, 1991, S. 329-340.

Fricke, Jobst Peter: Art. *Formant*. In: Herders großes Lexikon der Musik, Bd. 3, Freiburg 1980, S. 130f.

Marin, Cecile; McAdams, Stephen: *Segregation of concurrent sounds II: Effects of spectral envelope tracing, frequency modulation coherence, and frequency modulation width*. In: JASA 89, 1, 1991, S. 341-351

McAdams, Stephen: *Segregation of concurrent sounds I: Effects of Frequency Modulation coherence*. In: JASA 86, 6, 1989, S. 2148-2159.

Meyer, Jürgen: *Vibrato: am besten 6 bis 8 Hz*. In: Instrumentenbau-Zeitschrift 22, 1968, S. 544-546.

Meyer, Jürgen: *Betrachtungen zum instrumentalen Vibrato*. In: Instrumentenbau-Zeitschrift 22, 1968, S. 588-592.

Meyer, Jürgen: *Klangliche Strukturen beim Instrumentalvibrato*. In: Instrumentenbau-Zeitschrift 45, 9, 1991, S. 53-56.

Reuter, Christoph: *Verschmelzung und partielle Verdeckung. Ein Konzept für die Wahrnehmung und Zuordnung gleichzeitig erklingender Musikinstrumente*. In: DAGA 2000, Fortschritte der Akustik, Oldenburg, S. 176-177.

Saldanha, E.L., Corso, John F.: *Timbre Cues and the Identification of Musical Instruments*. In: JASA 36, 1964, S. 2021-2026.

Zwicker, Eberhard, Feldtkeller, Richard: *Das Ohr als Nachrichtenempfänger*. Stuttgart<sup>2</sup>1967.