

## „Der Gang des ewigen Schalls“ – "where no Acoustician has gone before"

Mara-Kristin Lutz<sup>1</sup>, Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz<sup>1,2</sup>, Christoph Reuter<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universität Wien, Institut für Musikwissenschaft, A-1090, Österreich, maralutz@gmx.at

<sup>2</sup> Peutz Consult GmbH, D-40599 Düsseldorf, Deutschland

### Einleitung

Dieser Beitrag präsentiert die ersten akustischen Messungen, welche in einer oberösterreichischen Quelhöhle bei Windischgarsten durchgeführt wurden. Am Ende des 1,6 km langen Höhlensystems, welches erstmals 1978 erforscht wurde, befindet sich ein ca. 120 m langer Gang, der mit einer Neigung von etwa 50% insgesamt 70 hm steil in einen Siphon abfällt. [1] Dieser Abschnitt der Höhle ist als "Gang des ewigen Schalls" für seine eigentümlichen Klangeigenschaften bekannt, da diese bereits durch einfaches Rufen gut subjektiv auditiv wahrnehmbar sind.

Die akustischen Parameter im Gang des ewigen Schalls wurden bislang jedoch noch nicht objektiv messtechnisch untersucht. Um mögliche Erklärungen für das Phänomen des "unendlichen Klangs" zu finden, wurden nun erstmals akustische Impulsantwortmessungen darin durchgeführt.

Dabei ist die untersuchte Höhle keine Schauhöhle und somit nicht öffentlich zugänglich, weshalb in diesem Bericht aus Höhlenschutzgründen der Name und die genaue Lage der Höhle nicht detaillierter genannt werden.

Im vorliegenden Beitrag werden die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der akustischen Messungen in der Höhle, sowie die aus der Auswertung resultierenden Werte der monauralen akustischen Parameter ( $T_{30}$ , EDT,  $C_{50}$ ,  $C_{80}$ ,  $T_{center}$ ,  $AL_{cons}$ , STI) aus dem Gang des ewigen Schalls vorgestellt. Darüber hinaus bestand am Poster und besteht über den Link <https://muwiserver.synology.me/hoehle/> die Möglichkeit, die Höhle und ihre Akustik virtuell via VR-Headset interaktiv zu erfahren.

### Ausgangspunkte

Die im 19. Jahrhundert geprägte Theorie des „Höhlenmenschen“, welcher sein Leben weitgehend in Höhlen verbracht haben soll, ist heutzutage zwar bereits widerlegt, hält sich aber dennoch weiterhin als Irrglaube in der Bevölkerung. Der Mensch hat schon immer den größten Teil seines Lebens an der Erdoberfläche verbracht und suchte Höhlen nur in Ausnahmefällen auf. Neben der Nutzung von Höhlen als vorübergehenden Zufluchtsort zum Schutz vor Unwettern und klimatischen Umschwüngen geht man heute davon aus, dass Höhlen zudem als Reservoirs für Trinkwasser sowie als Opfer- und Bestattungsorte genutzt wurden. Zudem konnten bislang in über 340 Höhlen Europas Gravuren, Felsreliefs und Malereien gefunden werden, die auf den Homo Sapiens und vermutlich auch den Homo Neanderthalensis als Schöpfer zurückzuführen sind, und so geht man seit Mitte des 19. Jahrhunderts davon aus, dass Höhlen ebenfalls als Orte für kultische Handlungen gedient haben könnten. [2] Diese Höhlenkunstwerke sind auch für die Archäoakustik interessant geworden. Die Archäoakustik beschäftigt sich mit akustischen Phänomenen im Zusammenhang mit vorzeitlichen Artefakten und ist ein experimenteller Zweig der Archäologie und Anthropologie. Insbesondere wird in der Archäoakustik auch untersucht, ob sich ein Zusammenhang zwischen der Art und

Positionierung der Höhlenmalereien und den raumakustischen Bedingungen an den Stellen erkennen lässt. [3] Da in Österreich bis jetzt kein Werk der prähistorischen Höhlenwandkunst bekannt ist [2], beschäftigt sich diese Arbeit, anders als Studien wie z.B. die von Jiménez et al. 2008 [3] oder Resznikoff 1987 [4], nicht mit den Zusammenhängen von Höhlenmalerei und akustischen Eigenschaften, sondern ist eine rein raumakustische Untersuchung.



Abbildung 1: 360°-Rundum-Ansicht der Höhle von Position 1 aus

### Raumakustische Messungen, Ergebnisse und Bewertung Beschreibung des Messraums

Der Gang weist im Vergleich zu den anderen Gängen der Höhle wenig Versturzböcke auf und besitzt vergleichsweise glatte, gelaugte Wandflächen. Die Böden sind von einer rutschigen Lehmschicht bedeckt, weshalb der Ab- und Aufstieg nur entlang von fest gespannten Seilen möglich ist. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, handelt es sich um einen 120 m langen schachtartigen Gang, welcher ca. 70 hm bei einer durchschnittlichen Neigung von 45° abfällt. Der Gang weitet sich dabei nach unten hin zu einem Kessel auf und mündet in einem tiefen Höhlensiphon, in dem bereits einige Tauchgänge unternommen wurden [5], ohne jedoch weitere luftegefüllte Räume zu erreichen.

Die durchschnittliche Jahrestemperatur im Inneren der Höhle liegt bei 8°C und einer Luftfeuchtigkeit von fast 100 %. Abbildung 1 zeigt eine 360°-Rundum-Ansicht der Höhle von Messposition 1 aus, Abbildung 2 im Detail den dortigen Messaufbau und Abbildung 3 die Messpositionen im Längsschnitt des untersuchten Höhlengangs. Abbildung 4 zeigt die Messpositionen in der Aufsicht.



Abbildung 2: Ansicht des Messaufbaus an Messposition 1

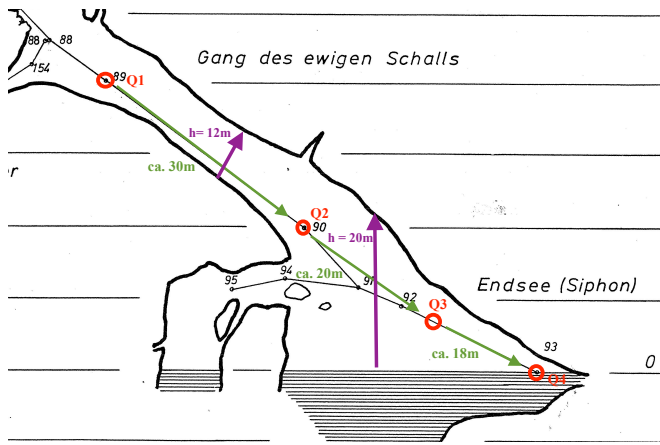


Abbildung 3: Längsschnitt des Gangs, Quellpositionen rot markiert

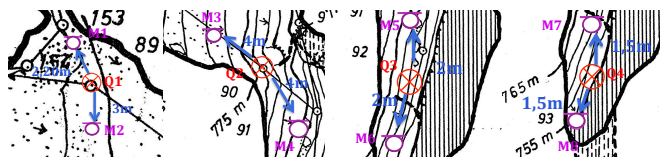


Abbildung 4: Übersicht über Quell- (Q1-Q4, rot) und Mikrofonpositionen (M1-M8, pink), Aufsicht

**Messpfade im Raum**

Für die Messungen wurde eine Messkette mit zwei Messmikrofonen verwendet. Diese konnte, aufgrund des teils starken Gefälles und der unebenen Untergrundbedingungen im Gang nicht in regelmäßigen Abständen entlang des Höhlenverlaufs, sondern nur an bestimmten Stellen entlang des mit Seilen gesicherten Pfads an der rechten Seite des Gangs aufgestellt werden (siehe Abb. 3). Zudem konnten aufgrund der genannten Bedingungen auch die Messmikrofone nicht immer im selben Abstand zur Schallquelle aufgestellt werden. Genauere Informationen über die jeweiligen Positionen der Messmikrofone sind Abbildungen 3 und 4 zu entnehmen.

Die erste Messung wurde auf einem Vorsprung am oberen Eingang des Gangs durchgeführt, bevor dieser beginnt, steil nach unten abzufallen (siehe M1 in Abb. 4 und Abb. 1, sowie Abb. 3).

**Verwendete Messgeräte**

Bei den raumakustischen Messungen in der Höhle wurden folgende Messgeräte verwendet, siehe Tabelle 1:

Tabelle 1: Bei den raumakustischen Messungen in der Höhle verwendete Messgeräte

Messmikrofone	Behringer ECM 8000
Impulsschallquellen	Starterklappe
Fieldrecorder	Zoom H4-N
Analyse - Software	Aurora für Audacity 2.0.0 [6], Matlab <sup>(R)</sup> -Skript raci 115 [7], sowie Spectralyzer 3.7.1 der Fa. Peutz

**Messung der Raumimpulsantworten**

Die Impulsschallquelle für die Messungen war aus Gründen der Kompaktheit und Zuverlässigkeit unter den besonderen Messumständen eine Starterklappe aus Holz. Diese wurde pro Messung jeweils 3 Mal betätigt, und in der Auswertung wurden die resultierenden Parameterwerte pro Messpfad

über alle drei Impulsanregungen arithmetisch gemittelt. Abbildung 5 zeigt das resultierende Frequenzspektrum einer so angeregten Raumimpulsantwort auf Messpfad Q4-M7.

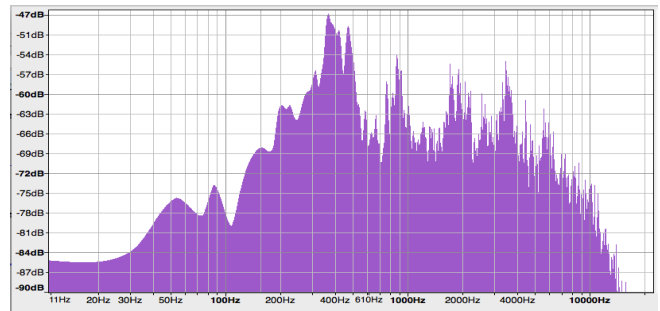


Abbildung 5: Frequenzspektrum einer Impulsantwort, aufgenommen mit Starterklappe (Messpfad Q4-M7)

**Messung der Nachhallzeiten**

Die Nachhallzeiten wurden aus den aufgenommenen Impulsantworten durch das „RT<sub>30</sub> - Verfahren“ mit Audacity 2.0.0 und dem dazugehörigen Modul "Aurora for Audacity 2.0.0“ von Angelo Farina [6] ermittelt. Die Oktavbänder mit Mittenfrequenz unter 1 kHz werden zunehmend problematisch in Bezug auf die Auswertung, da die Anregungsquelle Starterklappe (siehe Abb. 5) bei Frequenzen unterhalb ca. 350 Hz weniger Energie aufweist und somit der Signal-Rauschabstand geringer ist, was die Auswertung erschwert. Daher wurde zusätzlich zur Auswertung der Nachhallzeiten aus den Impulsantworten mit dem Plugin Aurora eine weitere Auswertung mit dem Programm Spectralyzer der Peutz-Gruppe durchgeführt, um die Nachhallgeraden den Abklingkurven manuell anpassen zu können. Daher ergeben sich in dieser zusätzlichen Auswertung etwas niedrigere Nachhallzeitwerte in den unteren Oktavbändern, siehe Tabelle 3 und Abb. 6.

**Nachhallzeiten**

Die Ergebnisse der Nachhallzeit-Messungen T<sub>30</sub> sind im Folgenden dargestellt als frequenzabhängiger Raummittelwert pro Oktavband über alle Messungen mit den Mittenfrequenzen 500 Hz bis 4.000 Hz, siehe Tabelle 3, sowie als Mittelwerte pro Messposition als Grafik in den Abbildungen 5 und 6. Die Werte gelten für den Zustand mit zwei Personen in der Höhle anwesend. Zu höheren Frequenzen hin ist ein deutliches Absinken der gemessenen Nachhallzeiten zu beobachten.

Tabelle 3: Raummittelwerte von T<sub>30</sub> für die Oktavbänder mit Mittenfrequenzen 125 bis 8.000 Hz und T<sub>1k-8k</sub>= Mittelwert davon, zwei Personen anwesend

T <sub>30</sub> [s] / Oktavband-Mittenfrequenz [Hz]	T <sub>30</sub> (Aurora) [s]	T <sub>30</sub> (Spectralyzer) [s]
125	10,6	8,0
250	8,4	6,9
500	7,6	6,2
1.000	6,4	5,3
2.000	4,4	4,4
4.000	2,8	2,8
8.000	1,3	1,1
T <sub>1k-8k</sub>	3,6	3,4

Spannend ist zu sehen, siehe Abbildung 6, wie die Nachhallzeit in allen Frequenzbändern ab Quellposition 2 und 3, also ab der Mitte und in der unteren Hälfte des Gangs

stark ansteigt: zwischen den Positionen 2 und 3 weitet sich der Gang auf eine Höhe von 20 m aus, während sich die Breite jedoch im gesamten Gang nie stark verändert. Bei Messposition 1 am oberen schmalen Ende des Gangs liegen lokal deutlich geringere Nachhallzeitwerte vor, siehe Abb. 6.

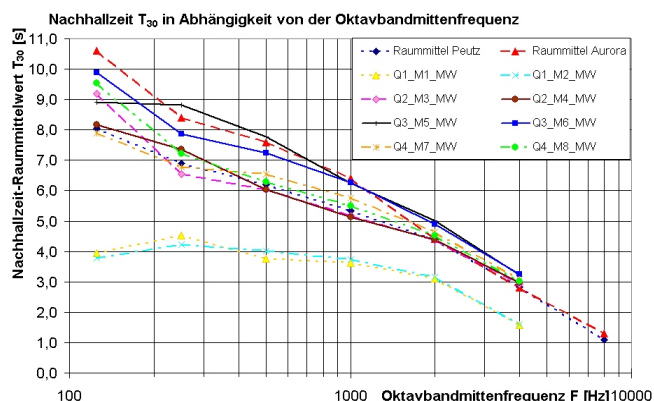


Abbildung 6: Frequenz- und Positionsabhängigkeit der gemessenen Nachhallzeiten

Die sehr langen Nachhallzeiten der tiefen und mitteltiefen Frequenzen von über 8 s bei den Messpositionen 2 bis 4 darunter im Gang darunter mögen dabei ausschlaggebend für die Namensgebung als Gang des ewigen Schalls gewesen sein. Betrachtet man diese Werte kategorisch, befinden sich insbesondere diese Nachhallzeitwerte für tiefe und mitteltiefe Frequenzen deutlich oberhalb dessen, was nach den Forschungen von Ernst Pöppel als musikalische Gleichzeitigkeit innerhalb des "3-Sekunden-Fensters" liegt [8] und noch deutlich über dem Wert der nach J. Meyer für große mittelalterliche Kirchen üblich ist [9].

**Raumimpulsantworten u. daraus berechnete Parameter**

In den Abbildungen 7 und 8 sind gemessene Raumimpulsantworten ausgewählter Messpfade an unterschiedlichen Positionen in der Höhle zu in ETC-Darstellung sehen. In beiden Impulsantwortdarstellungen ist eine deutliche Double-Decay-Struktur zu erkennen: dem Direktschall folgt ob dem begrenzten Gangquerschnitt zunächst für ca. 10 dB ein rascheres Abklingen, während das restliche Gangvolumen angeregt wird und hernach auf niedrigerem Pegelniveau länger ausklingt.

**Deutlichkeitsmaß C<sub>50</sub>, AL<sub>cons</sub> und Deutlichkeit D<sub>50</sub>**

Mit dem Matlab<sup>(R)</sup>-Skript der Fa. Peutz wurden auch die Werte der raumakustischen Parameter C<sub>50</sub>, D<sub>50</sub>, AL<sub>cons</sub>, STI und T<sub>center</sub> aus den gemessenen Raumimpulsantworten pro Messpfad und Abklingvorgang berechnet. Diese Werte wurden arithmetisch gemittelt über die Abklingvorgänge pro Messpfad, und im Frequenzbereich der Oktavbänder mit Mittenfrequenzen 500 bis 2.000 Hz, siehe folgende Tabelle 4. Darüber hinaus wurde trotz der Vielgestaltigkeit der sich ständig ändernden Form der Höhle pro Parameter ein Raummittelwert aus den Messpfaden ermittelt. Dessen Aussagekraft ist wie der Raummittelwert der Nachhallzeit jedoch davon eingeschränkt, dass aus Praktikabilitäts- und Sicherheitsgründen vergleichsweise kurze Mikrofonkabel (jeweils 5 m) gewählt wurden und somit nur wenige

Positionen und kurze Abstände der Mikrofone zur Sendeposition messtechnisch erfasst wurden.

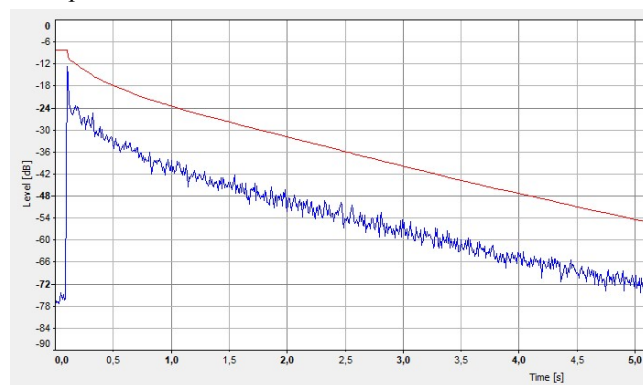


Abbildung 7: Raumimpulsantwort in ETC-Darstellung aus Aurora auf Position 2 (Pfad Q2 –M4)

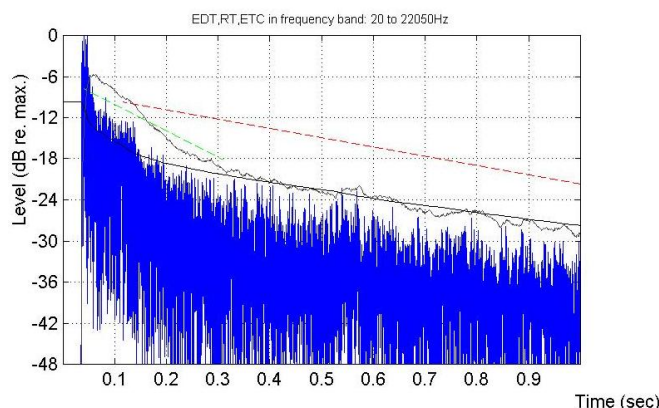


Abbildung 8: Raumimpulsantwort in ETC-Darstellung aus Peutz-Matlab-Skript auf Position 4 (Pfad Q4 –M7)

Tabelle 4: Mittelwerte für C<sub>50</sub>, D<sub>50</sub>, AL<sub>cons</sub>, STI, STI und T<sub>center</sub> pro Messpfad gemittelt, Mittelwert der Oktavbänder 500 - 2.000 Hz

Pfad / Parameter		C <sub>50</sub> [dB]	D <sub>50</sub> [%]	AL <sub>cons</sub> [%]	STI	T <sub>center</sub> [ms]
Position 1	Mikrofon 1	-0,3	48	7	0,59	103
	Mikrofon 2	+2,2	61	5	0,64	78
Position 2	Mikrofon 1	-5,6	22	16	0,42	232
	Mikrofon 2	-1,2	43	10	0,52	177
Position 3	Mikrofon 1	-0,5	48	7	0,57	216
	Mikrofon 2	+1,2	57	7	0,59	171
Position 4	Mikrofon 1	+2,0	61	6	0,61	114
	Mikrofon 2	+0,3	51	7	0,58	133
Raummittelwerte		- 0,2	49	8	0,56	158

**Bewertung der Messergebnisse**

Warum nun also eine akustische Messung in einer Höhle durchführen? Höhlen waren mit die ersten Orte, die der Mensch für kultische Handlungen aufgesucht hat, wobei er oftmals Malereien hinterließ. Studien wie die von St. Waller 1993 [10] haben ergeben, dass dabei die akustischen Eigenschaften des Raums mit entscheidend für die Art und Positionierung von Höhlenmalereien im Raum waren. Sieht man nun Kirchen auch als einen Typ solcher Kulträume an, lässt sich eine Verbindung zu J. Meyers Annahme herstellen, dass die akustischen Eigenschaften bei Kirchen und in diesem Fall von Höhlen eine ebenso große Bedeutung für den sakralen bzw. kultischen Charakter eines Raumes haben wie die visuellen Eindrücke. Meyer geht davon aus, dass die akustische Atmosphäre mit ein Bestandteil für das Wesen



und die Ästhetik des Raums ist und „den Besucher aus dem Alltäglichen heraushebt“ [9].

Wie sich in der bereits erwähnten Studie von E. Pöppel ergeben hat, nutzt der Mensch für die Organisation von Bewusstseinsinhalten eine 3-Sekunden-Segmentierung. Pöppel spricht hier auch vom sogenannten „Gegenwartsfenster“, in das alle Informationen, die zeitlich darüber hinaus gehen, nicht mehr integriert und zur Wahrnehmungsgestaltung verwendet werden können [8]. Was also passiert in einem Raum, der bis zu 11 s nach dem eigentlichen Schallsignal noch akustische Informationen darüber liefert? Stellt man hier nun wieder einen Bezug zu Kulträumen her, könnte man argumentieren, dass neben der Raumgröße vor allem auch die damit einhergehende Nachhallzeit, welche über das Gegenwartsfenster Pöppels hinaus geht, für den sakralen bzw. kultischen Charakter sorgt und den Eindruck einer Verbindung zu etwas zeitlosem „Göttlichen“ erzeugt.

Im Falle der hier vorliegenden und erstmals raumakustisch untersuchten Höhle mit dem treffend als "Gang des ewigen Schalls" benannten Höhlengang ist diese Namensgebung ob der aus den Messungen resultierenden Werte insbesondere für die Nachhallzeit mithin sogleich sinnfällig.

### Zusammenfassung

Dieser Beitrag präsentierte die ersten akustischen Messungen, welche in einer oberösterreichischen Quelhöhle bei Windischgarsten durchgeführt wurden.

Der Grund für die Namensgebung des "Gangs des ewigen Schalls" konnte auf Basis der Ergebnisse der durchgeführten raumakustischen Messungen auf die sehr langen Nachhallzeiten in den jeweils mittleren und unteren Messpositionen im Höhlengang zurückgeführt werden.

Zur Durchführung der Impulsantwortmessungen wurde dabei ein Messaufbau verwendet, welcher es erlaubt, unter in solchen Höhlen vorliegenden Randbedingungen, zuverlässig objektive raumakustische Messungen durchführen zu können, wobei neben akustischen auch Sicherheitsaspekte eine Rolle spielen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich die hier verwendete Art der Messmethode für Höhlen als geeignet erwiesen hat, zumal in solchen Messsituationen nicht nur akustische Erwägungen, sondern auch Sicherheitsaspekte eine wesentliche Rolle spielen. Lediglich bei der Schallimpulsquelle lohnt es sich in Zukunft, wenn es die Bedingungen im Höhlenraum zulassen, zusätzlich Luftballone einzusetzen, um eine gleichmäßigere Anregung des Raums in allen wesentlichen Oktavbändern zu gewährleisten.

Nach diesem erfolgreichen Testlauf sind noch weitere Messungen in Höhlenhallen mit größeren Dimensionen geplant. Zudem wäre es sicherlich spannend, kultisch genutzte Höhlen zu untersuchen in denen archäologische Funde gemacht wurden oder in denen sich Höhlenzeichnungen befinden, um eine Verbindung zu bisherigen archäoakustischen Forschungen herstellen zu können.

### Literatur

- [1] Plan Entwurf und Zeichnung Steinmaßl. H.; Vermessung November 1977 – April 1978 vom Vermessungsteam des Vereins für Höhlenkunde Sierning.
- [2] Kusch, H.: "Höhlen in der Urgeschichte", in: Spötl, C.; Plan, L.; Christian, E. (Hrsg.): *Höhlen und Karst in Österreich*, Linz: Oberösterreichisches Landesmuseum (2016), 273–276.
- [3] Jiménez, N.; Picó, R.; Redondo, J.: „The Parpalló Cave“, in: *The Journal of the Acoustical Society of America* 123/5 (2008): 3608.
- [4] Reznikoff, I. "On the sound dimension of caves with paleolithic paintings“, in: *Comptes rendus de l'Académie des Sciences* 304 II/3 (1987), 153–156.
- [5] Seebacher, R.: „Höhlentauchen“, in: Spötl, C.; Plan, L.; Christian, E. (Hrsg.): *Höhlen und Karst in Österreich*, Linz: Oberösterreichisches Landesmuseum (2016), 427–438.
- [6] Farina, A.; Campanini, S.: "A new Audacity feature: room acoustical parameters calculation module“, Tagung, Parma Italy, 2009, URL: <http://www.angelifarina.it/Public/Aurora-for-Audacity/2.0.0/>
- [7] Lorenz-K, K.-H.; Vercammen, M.: *Acoustical Survey of 25 European Concert Halls*, NAG/DAGA 2009.
- [8] Pöppel, E.: „Gehirnzeit und Musikempfinden“, in: Götze, H.; Simon, W. (Hrsg.): *Wo Sprache aufhört... . Herbert von Karajan zum 5. April 1988*, Berlin/Heidelberg: Springer Verlag 1988, S. 31–49.
- [9] Meyer, Jürgen: „*Kirchenakustik*“, Frankfurt am Main: Erwin Bochinsky Verlag 2003.
- [10] Waller, Steven: „Sound and rock art“, in: *Nature* 363: 501 (1993).