

# Eine mehrkanalige und nachhallfreie Aufnahme von Beethovens 8. Sinfonie

Christoph Böhm<sup>1</sup>, David Ackermann<sup>1</sup>, Stefan Weinzierl<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Fachgebiet Audiokommunikation, TU Berlin, 10587 Berlin, Deutschland*

*Email: c.boehm@tu-berlin.de, david.ackermann@tu-berlin.de, stefan.weinzierl@tu-berlin.de*

## Einleitung

Die Auralisation modellbasierter, virtueller akustischer Umgebungen bietet die Möglichkeit die akustischen Eigenschaften neuer Aufführungsstätten bereits in ihrer Planungsphase zu bewerten und gegebenenfalls zu optimieren. Auch nicht mehr vorhandene historische Orte können rekonstruiert, akustisch analysiert und wieder hör- und erlebbar gemacht werden [1, 2]. Diese Modellierungen erlauben unter anderem in den Musik-, Kultur- und Geschichtswissenschaften neue Ansätze in der Forschung [3]. Des Weiteren können Auralisationen als Stimuli zur Untersuchung der raumakustischen Wahrnehmung und zur Entwicklung neuer raumakustischer Prädiktoren verwendet werden [4, 5].

Für die Qualität modellbasierter, virtueller akustischer Umgebungen spielt aber nicht nur die raumakustische Simulation, sondern auch die Güte und die Eignung des Quellmaterials eine entscheidende Rolle. Eine geeignete Aufnahme realer Schallquellen zeichnet sich in technischer Hinsicht durch eine nachhallfreie Produktion, einen hohen Signal-Rauschabstand und durch ein geringes Übersprechen anderer Schallquellen auf den Aufnahmekanal aus. Gleichzeitig ist für die korrekte Modellierung der Richtcharakteristiken in der raumakustischen Simulation eine Aufnahme im Fernfeld der Quelle erforderlich. In künstlerischer Hinsicht muss die Aufnahme-situation mit ihren technischen Randbedingungen so gestaltet werden, dass sie auch für professionelle Interpreten akzeptabel ist und die musikalische oder sprachliche Leistung der Interpreten möglichst wenig beeinträchtigt wird.

Existierende nachhallfreie Orchesteraufnahmen [6, 7, 8, 9, 10] sind aufgrund der dabei eingegangenen Kompromisse für eine künstlerisch hochwertige Auralisation nur bedingt geeignet. Außerdem wurden teilweise nicht genügend Stimmen aufgenommen, um eine sinfonische Aufführung zu auralisieren. An der TU Berlin wurde daher eine Produktion der 8. Sinfonie von L.v. Beethoven mit einem professionellen Sinfonieorchester im reflexionsarmen Raum (RAR) durchgeführt.

Für die Aufnahme des nachhallfreien Quellmaterials stand das Orchester Wiener Akademie unter der Leitung von Martin Haselböck zur Verfügung. Das Orchester spielt in historisch-informierter Aufführungspraxis auf historischen Instrumenten und hatte bereits Erfahrung mit den besonderen Gegebenheiten der Filmmusikproduktion, wie z.B. das Ensemblespiel mit Kopfhörer-Monitoring und das Einspielen über eine hinzugemischte Pilotspur während der Aufnahme. Aufgezeichnet wurde

der 1., 2. und 4. Satz der 8. Sinfonie von L. v. Beethoven, op. 93, mit einer Spieldauer von insgesamt 20 Minuten. Die Anzahl der aufgenommenen Spuren entspricht einer mittelgroßen orchestralen Besetzung (Tabelle 1).

Das Übersprechen konnte durch die gruppenweise, halbsequentielle Aufnahme der Instrumente auf ein Minimum reduziert werden. Um den Musikern ein exaktes Timing zu ermöglichen, wurde neben einem individuellen Monitormix über Kopfhörer eine Videoaufzeichnung des Dirigenten und des Konzertmeisters in den Aufnahme-raum übertragen. Im Hinblick auf die genannten technischen Qualitätskriterien und durch eine sorgfältige tonmeisterliche Aufnahmeleitung und Nachbearbeitung konnte Audiomaterial für qualitativ hochwertige Auralisationen erstellt werden. Das Material mit allen benötigten zusätzlichen Daten wurde unter der Lizenz CC BY 4.0 veröffentlicht [11]:

<http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-6729>

## Methode

Das Orchester wurde im reflexionsarmen Vollraum der TU Berlin aufgenommen. Dieser ist ab einer Grenzfrequenz von 63 Hz vollständig absorbierend und bietet mit einem Raumvolumen von 1070 m<sup>3</sup> und einer begehbaren Fläche auf einem Drahtseilnetz von 126 m<sup>2</sup> gute Voraussetzungen, auch für mehrstimmige Musikaufnahmen.

**Tabelle 1:** Aufgenommene Instrumente, Instrumentengruppen und Anzahl der Musiker und Musikerinnen

Instrument	Anzahl Musiker	Anzahl Stimmen	Gruppe
1. Violine	2	14	Streicher
2. Violine	2	11	
Viola	2	11	
Violoncello	1	6	
Bass	1	6	
Flöte	2	2	Holzbläser
Oboe	2	2	
Klarinette	2	2	
Fagott	2	2	
Horn	2	2	Blechbläser
Trompete	2	2	
Pauke	1	1	Schlagwerk
$\Sigma$	<b>21</b>	<b>61</b>	

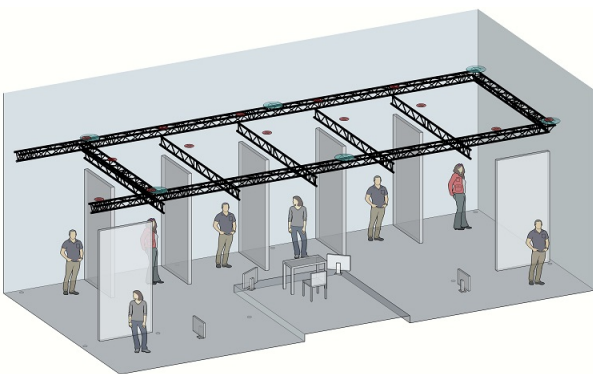
## Aufnahmesituation

Um eine optimale Abschirmung der Instrumente zueinander zu realisieren, wurden die Musikerinnen und Musiker stehend bzw. sitzend auf dem Netz platziert, und Abschirmwände wurden aufgrund der begrenzten mechani-



**Abbildung 1:** Fotografie der Aufnahmesituation im reflexionsarmen Raum der TU Berlin mit acht Streichern und Dirigent

schen Belastbarkeit des begehbaren Drahtseilnetzes von einem eigens dafür eingebauten Traversen-Rig abgehängen. Als absorbierende Abschirmung kamen mit 20 cm dickem Schaumstoff belegte massive Holzwände zum Einsatz. Diese wurden, um Mehrfachreflexionen entgegen zu wirken, leicht angewinkelt zueinander aufgehängt. Dadurch konnten halboffene Aufnahmekabinen für acht gleichzeitig musizierende Musiker realisiert werden (Abb. 1 und 2).



**Abbildung 2:** Aufnahmesituation im reflexionsarmen Raum der TU Berlin mit acht Instrumenten und Dirigent

## Signalaufzeichnung

Auch bei der Mikrofonierung wurde auf eine möglichst hohe Kanaltrennung geachtet. Für die Celli und die Bässe wurden Mikrofone mit Nierencharakteristik, für die Pauke wurde, da sie alleine im Raum aufgenommen wurde, ein Druckempfänger und für alle anderen Instrumente wurden Mikrofone mit Achtercharakteristik verwendet. Technisch konnten auf diese Weise Aufnahmen mit einem Pegelunterschied zwischen dem Ausgangssignal des Mikrofons direkt an der Quelle und dem nächstgelegenen Mikrophon von mindestens 22 dB (RMS) erreicht werden. Dieser Wert reicht aus, um hörbare Klangverfärbungen [12] ebenso wie eine Lokalisationsverschiebung gegenüber der primären Quelle zu vermeiden und erscheint deshalb ausreichend für Auralisationen der parallel aufgenomme-

nen Instrumente einer Gruppe.

Von allen Mikrofonen wurden die Amplitudenfrequenzgänge und Übertragungsfaktoren bestimmt, ebenso wie die während der Aufnahme eingestellten Verstärkungsmaße der Mikrofonvorverstärker. Die Mikrofone wurden von oben auf die jeweiligen Hauptabstrahlrichtungen der Instrumente gerichtet, während die Richtung der größten Auslöschung in Richtung der anderen Instrumente zeigte. Die verwendeten Mikrofontypen und genauen Mikrofonpositionen in kartesischen Koordinaten und als Azimut- und Elevationswerte im Kugelkoordinatensystem relativ zum Instrument sind in Tabelle 2 vermerkt und im Datensatz enthalten. Zur akustischen Entkopplung vom Drahtseilnetz wurden die Mikrofone an Seilen von der Traversenkonstruktion abgehängt, wodurch die Körperschallübertragung auf ein Minimum reduziert wurde.

Während der gesamten Aufnahme wurde auf eine optimale Aussteuerung geachtet. Die Aufzeichnung mit hochwertigen Vorverstärkern und A/D-Wandlern (PreSonus DigiMax DP88, RME UFX) mit 48 kHz Abtastrate und 32 Bit Wortbreite im Gleitkommaformat sorgen für eine ausgezeichnete Signalqualität mit hohem SNR. Die finalen Pegelverhältnisse zwischen den einzelnen Spuren werden ohne Einfluss auf den SNR in den Dateien berücksichtigt. Durch die Aufzeichnung im beschriebenen Format ist eine digitale Vollaussteuerung nicht notwendig.

## Monitoring

Durch die räumliche Abschirmung der gleichzeitig musizierenden Instrumentalisten zueinander und die gruppenweise Aufnahme musste besonderes Augenmerk auf ein musikalisch korrektes Timing, eine gute Intonation sowie eine technisch latenzarme Aufnahmeumgebung für die Musiker gelegt werden. Hierzu wurde im ersten Durchgang der Aufnahmen zunächst ein Pilottrack der ersten Streichergruppe (2x Vl 1, 2x Vl 2, 2x Va, 1x Vc, 1x Kb) aufgezeichnet. Zusätzlich zur Audioaufnahme wur-

Tabelle 2: Verwendete Mikrofone und ihre Positionen bezogen auf das Instrument

Instrument	Mikrofon (Nr.)	Richtcharakteristik	Mikrofonposition [x; y; z] in m	Radius in m	Azimut in Grad	Elevation in Grad	Mikrofonvorverstärkung in dB	Tonmeisterliche Pegelanpassung in dB
Violine 1.1	KM 120 (1)	Acht	0,28; 0,06; 0,54	0,61	12	62	40	-12
Violine 1.2	KM 120 (2)	Acht	0,40; 0,23; 0,67	0,81	30	55	40	-6
Violine 2.1	KM 120 (3)	Acht	0,16; 0,40; 0,71	0,83	68	59	40	-6
Violine 2.2	KM 120 (4)	Acht	0,24; 0,00; 0,61	0,65	0	69	40	-6
Bratsche 1	KM 120 (5)	Acht	0,36; 0,06; 0,82	0,89	9	66	40	-12
Bratsche 2	KM 120 (6)	Acht	0,37; 0,30; 0,75	0,88	39	58	40	-12
Cello	KM 184 (7)	Niere	0,50; 0,00; -0,17	0,52	0	-19	30	-6
Bass	KM 184 (8)	Niere	0,50; 0,20; -0,13	0,55	22	-14	30	-2
Fagott 1	KM 120 (3)	Acht	0,60; 0,00; 0,51	0,78	0	40	40	-12
Fagott 2	KM 120 (4)	Acht	0,48; 0,26; 0,67	0,86	28	51	40	-14
Flöte 1	KM 120 (2)	Acht	0,33; 0,23; 0,46	0,61	35	49	40	-17
Flöte 2	MK 8 (9)	Acht	0,10; 0,62; 0,51	0,8	81	39	40	-18
Klarinette 1	KM 120 (1)	Acht	0,60; 0,42; 0,31	0,79	35	23	40	-16
Klarinette 2	KM 120 (6)	Acht	0,69; 0,00; 0,55	0,88	0	39	40	-15
Oboe 1	KM 120 (6)	Acht	0,80; 0,00; 0,29	0,85	0	20	40	-15
Oboe 2	MK 8 (10)	Acht	0,40; 0,04; 0,59	0,71	6	56	40	-15
Trompete 1	KM 120 (1)	Acht	1,30; 0,80; 0,54	1,61	31	19	30	-7
Trompete 2	KM 120 (6)	Acht	0,62; 0,48; 0,46	0,91	38	30	30	-7
Horn 1	KM 120 (2)	Acht	0,37; 0,38; 0,39	0,65	46	36	30	-14
Horn 2	MK 8 (9)	Acht	0,13; 0,24; 0,52	0,58	62	62	30	-17
Pauke	MK 5 (11)	Omni	0,20; 0,00; 1,17	1,18	0	80	15	-7

den mit zwei Videokameras der Dirigent und der Konzertmeister aufgenommen. Der Pilottrack und die zugehörige Videoaufnahme wurden bei allen weiteren Gruppen für die Musiker über Kopfhörer und Bildschirme synchron wiedergegeben. Dadurch konnten die Musiker sowohl dem Dirigenten, als auch dem Bogen des Konzertmeisters folgen. Für die Videowiedergabe kamen jeweils einzelne Video-Monitore für jeden der acht Musiker zum Einsatz.

Das gegenseitige Hören in der für die Musiker ungewohnten Umgebung des reflexionsarmen Raumes wurde durch ein eigenes stereophones Monitoring für jeden der Musiker über Kopfhörer realisiert. Hierfür wurden die Eingangssignale der Mikrofone direkt nach der Verstärkung vor der A/D-Wandlung über einen Direkt-Out in den Aufnahmeraum auf das Monitormischpult geschickt. Auf diesem wurde eine individuelle Mischung für jeden Musiker zum einen aus dem eigenen Direktschall und den anderen aktuell musizierenden, als auch den zuvor bereits aufgenommenen Stimmen durchgeführt. Zusätzlich kam ein Faltungshall mit einer für Orchesteraufführungen geeigneten Raumimpulsantwort zum Einsatz, um zusammen mit der Mischung eine natürliche akustische Aufnahmeumgebung für die Musiker zu schaffen. Da vor allem das Monitoring des eigenen Instruments zeitkritisch ist, wurden die Signale auf einem Computer gefaltet und dem trockenen Signal hinzugemischt, welches direkt vom Mischpult auf die verwendeten Kopfhörerverstärker gesendet wurde.

## Aufnahme

Durch eine Kombination von gruppenweisen und sequentiellen Aufnahmen wurde ein optimaler Kompromiss im Hinblick auf künstlerische und technische Aspekte angestrebt. Es konnten bis zu acht Stimmen gleichzeitig im Raum aufgenommen werden. Die vier Instrumentengruppen

Streicher, Holzblasinstrumente, Blechblasinstrumente und Schlagwerk (s. Tabelle 1) wurden hierfür nacheinander aufgezeichnet. Um eine mittelgroße Orchesterbesetzung mit mindestens 12 ersten Violinen zu realisieren, wurde die Streichergruppe sechsmal in Folge eingespielt. Außerdem konnten einzelne Passagen mehrfach und sequentiell nacheinander aufgezeichnet werden.

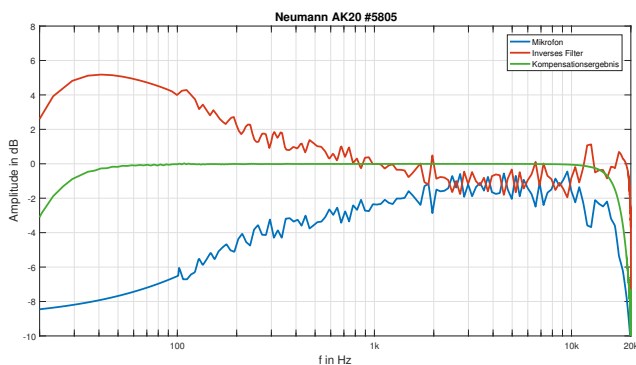
Die Aufnahme wurde durch einen musikalischen Aufnahmeleiter und den Dirigenten geleitet. In einem ersten Durchlauf künstlerisch nicht optimal gelungene Passagen wurden so oft wiederholt, bis eine für alle Beteiligten zufriedenstellende Version eingespielt war.

## Nachbearbeitung

Bei der Bearbeitung der aufgenommenen Audiosignale wurden zunächst die während der Aufnahme dokumentierten Änderungen des Mikrofon-Gains kompensiert. Im Folgenden wurden die eingespielten Takes geschnitten und zusammengefügt, wobei insbesondere leichte Asynchronitäten, die bei einer Einspielung mit Pilotspur kaum vermieden werden können, aufgrund der nachhallfreien Produktion weitgehend problemlos korrigiert werden konnten. Aus den zuvor gemessenen Mikrofonübertragungsfunktionen wurden Filter erzeugt und auf die finalen Audiospuren angewandt, um den Einfluss der Mikrofone auf den Frequenzgang zu kompensieren (siehe beispielhaft in Abb. 3). Ebenso wurden die Pegelunterschiede durch unterschiedliche Entfernungen zwischen Mikrofon und Instrument sowie die gemessenen Mikrofonempfindlichkeiten im Ausgangsmaterial kompensiert. Hierzu wurden alle Spuren auf die Empfindlichkeit des Mikrofons mit der kleinsten Sensitivität von 10,1 mV/Pa normiert.

In einem letzten Schritt wurde eine künstlerische Anpassung der Lautstärkeverhältnisse durchgeführt. Auch

wenn Pegelunterschiede, die durch den technischen Aufbau bedingt sind, in den finalen Audiospuren kompensiert wurden, bleibt eine finale Anpassung erforderlich, da die in einer gewohnten akustischen Umgebung stattfindende dynamische Anpassung innerhalb einer Instrumentengruppe in ungewohnten Spielsituation mit Kopfhörern im reflexionsarmen Raum nicht in gleicher Weise möglich ist. Diese finale Anpassung der Lautstärkeverhältnisse wurde durch professionelle Tonmeister vorgenommen. Die vorgenommenen Pegeländerungen wurden dokumentiert (Tab. 2) und können somit bei Bedarf rückgängig gemacht werden. Anhand der Verstärkungswerte der Mikrofonvorverstärker können alle Spuren auf ein einheitliches Pegelniveau gebracht werden.



**Abbildung 3:** Übertragungsfunktion und inverses Filter für ein Mikrofon vom Typ Neumann KM120

## Ergebnis

Der veröffentlichte Datensatz enthält jeweils die erste Minute der drei aufgenommenen Sätze der 8. Sinfonie in Einzelspuren sowie ein Stereomix mit künstlichem Nachhall, um einen ersten Eindruck der künstlerischen Qualität und des Nutzungspotentials der Aufnahmen zu erhalten. Zudem sind die angewendeten Mikrofonfilter in Form von Impulsantworten im WAV-Format enthalten. Dieser Ausschnitt ist gemeinfrei unter der Lizenz CC BY 4.0 nutzbar. Für eine weitergehende Nutzung der vollständigen Aufnahme kann mit den Autoren des Beitrags Kontakt aufgenommen werden.

## Literatur

- [1] Weinzierl, S.: Beethovens Konzerträume: Raumakustik und symphonische Aufführungspraxis an der Schwelle zum modernen Konzertwesen, Bochinsky, Frankfurt a. M. (2002).
- [2] Lombardo, V., Valle, A., Fitch, J., Tazelaar, K., Weinzierl, S. and Borczyk, W.: A Virtual-Reality Reconstruction of Poème Électronique Based on Philological Research, *Computer Music Journal*, 33/2 (2009), 24–47.
- [3] Weinzierl, Stefan and Lepa, Steffen: On the Epistemic Potential of Virtual Realities for the Historical Sciences. A Methodological Framework, in: Ariso, J.M. (Hrsg.). *Augmented Reality. Reflections on Its*

*Contribution to Knowledge Formation* (Berlin Studies in Knowledge Research 11), Berlin: De Gruyter 2017, 61–80 (2017).

- [4] Lokki, T.: Subjective comparison of four concert halls based on binaural impulse responses, *Acoust. Sci. & Tech.*, 26/2 (2005), 200–203.
- [5] Lepa, S. and Weinzierl, S.: A room acoustical quality inventory, *J. Acoust. Soc. Am.*, 141 (2017), 3933.
- [6] Burd, A. N.: Nachhallfreie Musik für akustische Modelluntersuchungen, *Rundfunktechnische Mitteilungen*, 13 (1969), 200–201.
- [7] Witew, Ingo, Paprotny, Jan and Behler, Gottfried: Auralization of orchestras in concert halls using numerous uncorrelated sources, *Proc. of the Institute of Acoustics*, 28/2 (2006), 293–296.
- [8] Pätynen, J., Pulkki, V. and Lokki, T.: Anechoic Recording System for Symphony Orchestra, *Acta Acustica united with Acustica*, 94 (2008), 856–865.
- [9] Vigeant, M. C., Wang, L. M., Rindel, J. H., Christensen, C. L. and Gade, A. C.: Multi-channel orchestral anechoic recordings for auralizations, *Architectural Engineering - Faculty Publications*, 4 (2010)
- [10] D’Orazio, D., Cesaris, S. De and Garai, M.: Recordings of Italian Opera orchestra and soloists in a silent room, *22nd International Congress on Acoustics*, (2016).
- [11] Böhm, C., Ackermann, D. and Weinzierl, S.: A Multi-channel Anechoic Orchestra Recording of Beethoven’s Symphony No. 8 op. 93. Technische Universität Berlin. <http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-6729>
- [12] Brunner, S., Maempel, H.-J. and Weinzierl, S.: On the Audibility of Comb Filter Distortions, *Audio Engineering Society Convention 122*, (2007).