

## So gut wie das Original? Mehrkanal-Lautsprecher-Setups als musikalische Schallquelle für raumakustische Untersuchungen

Winfried Lachenmayr<sup>1</sup>, Christian Fuchs<sup>2</sup>, Hugo Fastl<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Müller-BBM GmbH, 82152 Planegg b. München, Deutschland, Email: winfried.lachenmayr@mbbm.com

<sup>2</sup> AG Technische Akustik, MMK, TU München, 80333 München, Deutschland, Email: hugo.fastl@tum.de

### Einleitung

Die Untersuchung der Akustik von Räumen für Musikdarbietung dient dem besseren Verständnis der Klangeindrücke. Dabei ist neben der physikalischen Messwerte bekanntermaßen die Ermittlung des Höreindrucks von großer Wichtigkeit. In der Beratungspraxis ist meist am ehesten der Vor-Ort-Eindruck gegeben und wichtig, da dieser anders als nachträgliche Auralisierungen im Labor unmittelbar, schnell und hochqualitativ erfolgt. Zudem ist insbesondere bei kleineren Sälen zum Untersuchungszeitpunkt aufgrund der geringeren Auslastung oder Relevanz im Vergleich zu großen Konzertsälen oder der einmalig gegebenen Abnahme im Rahmen eines Bauprojekts noch vor Eröffnung oft keine Konzertveranstaltung oder sonstige Musikdarbietung gegeben.

Um einen fundierten Höreindruck zu gewinnen, ist es wünschenswert, eine Schallquelle vorweisen zu können, die einigen Anforderungen genügt. Es kommt vor, dass entsprechend musikalisch ausgebildete Akustiker\*innen das eigene Instrument für eine Raumuntersuchung spielen. Dies bindet jedoch eine Person und verhindert zumindest für diese Person das Hören aus der Publikumperspektive. Die Schallquelle sollte also weitgehend autark und zudem unveränderlich sein, ausreichend realistisch und möglichst frei von störenden Artefakten sowie musikalisch-kontextuell sinnvoll, d. h. zu Raum und üblicher späterer Programmierung passen. Falls möglich sind darüber hinaus eine Skalierung von Solist bis kleines Ensemble zielführend sowie ingenieursübliche Anforderungen wie Tragbarkeit, Kosten und Pragmatismus in der Lösungsfindung. Es sei bemerkt, dass die genannten Anforderungen überwiegend auch für ein System zur nachträglichen Auralisierung wünschenswert sind.

Bei den bestehenden Lösungen bzw. verwandten Aufgabenstellungen sei auf einige Arbeiten hingewiesen [1], unter denen das sog. Lautsprecherorchester [2] und der Iksaeder [3] für den vorliegenden Fall interessant erscheinen. Erstes ist aufgrund des anderen Anwendungskontextes bereits inkompatibel (zu viele Lautsprecher insgesamt, zu wenige pro Instrumente, andere Musikgattung) und Letzteres vergleichsweise komplex zu implementieren und mangels passenden Musikmaterials bzw. Anwendungserprobung unpassend.

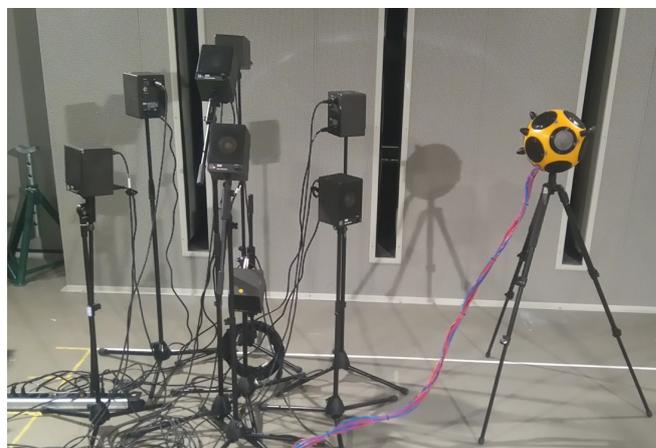
### Entwicklung der Schallquellen

Um die Aufgabenstellung, die im Rahmen einer Masterarbeit [4] bearbeitet wurde zu erfüllen, sollten zunächst Gedanken zur Art der Schallquelle entwickelt werden. Daraufhin war passendes Audiomaterial zu finden oder

zu erstellen. Die Schallquellen sollten im nächsten Schritt im Labor optimiert werden und nach diesen Tests schließlich in einem Saal mittels Hörversuch eine Bewertung erhalten.

### Aufbauten

Es wurden dann zwei Ansätze gewählt, die es durch eine gewisse Anzahl an Kanälen pro Instrument ermöglichen sollten, eine Art von instrumenten-ähnlicher Richtcharakteristik zu generieren. Zum einen war dies ein "großes" clusterartiges Lautsprecher-Array aus Studio-Lautsprechern, zum anderen ein üblicher Dodekaeder mit 250 mm Durchmesser, der jedoch mit zwölf unterschiedlichen Signalen angesteuert werden kann und sehr gute Treiber verwendet. Die beiden Aufbauten sind in Abbildung 1 gezeigt. Das Array bildet eine eher freie, dreidimensionale Phantomschallquelle mit Abmessungen, die eine Instrumenten-Schallquelle geradeso sphärisch umgeben würde. Der Multi-Signal-Dodekaeder folgt dem eher üblichen Ansatz einer annähernd punktförmigen Schallquelle, mit bekanntermaßen spektral begrenzt beeinflussbarer Richtcharakteristik. Die zwölf Treiber des Dodekaeders wurden im vorliegenden Fall mit vector-based amplitude panning (VBAP) angesteuert. Nicht weiter untersucht wurde nach anfänglich unzureichenden Ergebnissen die ebenfalls häufig verwendete Methode einer Ambisonics-Implementierung. Überhaupt nicht untersucht wurden etwaige instrumentenähnliche Lautsprecheranordnungen in geschlossenem Gehäuse oder sonstige vorstellbare "Pseudoinstrumente", wie etwa ein Geigen-Korpus mit eingebauten Lautsprechern oder ein künstlicher Bläser.



**Abbildung 1:** Die zwei untersuchten Schallquellen. Lautsprecher-Array (links) und Multisignal-Dodekaeder (rechts).

### Audiomaterial

Im nächsten Schritt wurde recherchiert, ob für die genannten Aufbauten bereits reflexionsarm aufgenommenes Audiomaterial publiziert wurde. Meist waren jedoch entweder die Ensemblegrößen oder die Anzahl der Mikrofonkanäle pro Instrument oder das musikalische Material unpassend. Den spezifischen Anforderungen am nächsten kamen 12-kanalige, pro Instrument aufgenommene ital. Opern-Orchesteraufnahmen [5] sowie eine Streichquartett-Produktion mit einem Mikrophon pro Instrument [6].

Schließlich wurden passende Aufnahmen aus einer kürzlich vorgenommenen Forschungspraxis verwendet. Diese Aufnahmen mit acht Kanälen pro Instrument von W. A. Mozarts Serenade K.388 für Bläser in c-Moll ermöglichen je nach Wahl der Musikstelle und des Satzes auch eine Schallquelle für Solist, Quartett, Quintett oder eben Oktett. Die Aufnahmen wurden mit Studiomikrofonen erstellt, die Schalldruckpegel mit Messmikrofonen zur Ermittlung der Schalleistungen erfasst. Die ermittelten, unbewerteten Schalleistungen von 76,5 dB für die Oboe, 72,5 dB für die Klarinette und 82,0 dB für das Ensemble für je einen Ausschnitt sind in guter Übereinstimmung mit Literaturangaben und führten bei dem späteren Hörversuch im Saal zu realistischen Schalldruckpegeln.

### Klangüberprüfung

Die weitere Klangüberprüfung in einem stark bedämpften Laborraum und einem Hörsaal erfolgte hinsichtlich Anordnung, Balance und Spektrum der einzelnen Lautsprecher und der ganzen Anordnung. Die Reproduktion der Oboe wurde auch gegen die echte Oboistin im Hörsaal verglichen und angepasst. Es wurden gehörmäßig Filter für jedes Instrument und jeden Aufbau eingestellt. Es sei angemerkt, dass jede gehörmäßige Filterung eine gewisse Beliebigkeit mit möglicherweise geringer Reproduzierbarkeit darstellt. Es zeigte sich jedoch in einer anderen, anschließenden Arbeit, dass durchaus auch ein universeller Entzerrungsfilter möglich scheint, sofern dieser subjektiv sorgfältig geprüft wird. In dem Kammermusiksaal, in dem der Hörversuch stattfand, wurde keine klangliche Optimierung an den Schallquellen mehr durchgeführt.

### Hörversuch

#### Setup

Der Hörversuch wurde in situ in einem professionellen Kammermusiksaal durchgeführt. Es handelt sich um das Kupferhaus in Planegg, einen Saal mit etwa 3200 m<sup>3</sup> für bis zu 500 Zuhörer. Die Nachhallzeiten ohne Publikum betragen etwa 1,8 s bei mittleren Frequenzen. Für den vorliegenden Zweck wurden auf sämtlichen Stühlen Stoffe ausgelegt, um das Publikum zu simulieren. Die Nachhallzeiten verkürzen sich somit auf etwa 1,5 s, einen sehr guten und üblichen Wert für einen besetzten Kammermusiksaal. Der Versuch wurde als Blindversuch angelegt. Ein Proband wurde bei zunächst geschlossenem Hauptvorhang in den Raum geführt. Die Hörposition befand sich hinter einem weiteren, kleinen Vorhang im Publikumsbereich, welcher schalldurchlässig, aber blickdicht

war. Der Abstand zur Quelle betrug etwa 11 m, eine Position in der Hälfte des Parketts und mittig. Es war nicht bekannt, was sich hinter dem Vorhang befindet und es wurde auch vorab nicht besprochen. Die Probanden wurden gefragt, welche Natürlichkeit das Dargebotene aufweist sowie nach ihrer Präferenz zwischen den Stimuli. Andere Klangeigenschaften wurden ebenfalls abgefragt (nicht gezeigt). Der Aufbau ist in Abbildung 2 gezeigt.



**Abbildung 2:** Hörversuch im Kammermusiksaal mit der Zuhörerposition vor dem schalldurchlässigen Vorhang und den verschiedenen Schallquellen auf der Bühne.

Die Natürlichkeit wurde auf einer Ordinalskala zwischen 1 und 7 bewertet und anhand von Boxplots als Lagemaß analysiert sowie mittels Kruskal-Wallis-Test auf signifikante Unterschiede untersucht. Die Präferenz wurde mittels AB-Paarvergleich ermittelt, eine Choice-Matrix erstellt und auf signifikante Unterschiede untersucht. So wurden an zwei Tagen im Juni 2020 drei Vergleiche durchgeführt (mit  $n$  ... Anzahl der Probanden):

1. Solo Oboe ( $n = 17$ )
  - Lautsprecher-Array (voll, reduziert, verhallt)
  - Multi-Signal-Dodekaeder
  - Echte Musikerin
2. Solo Klarinette ( $n = 17$ )
  - Lautsprecher-Array "LP-Array"
  - Multi-Signal-Dodekaeder
3. Ensemble Lautsprecher-Array ( $n = 9$ )
  - 12-kanalig ("LP")
  - 6-kanalig ("LP-red.")
  - Stereo
  - Je ohne und mit zusätzlicher Verhallung

Hierbei beschreibt "voll, reduziert, verhallt" weitere drei Unterzustände für das Lautsprecher-Array mit acht Lautsprechern (voll) oder vier Lautsprechern (reduziert) sowie die Hinzugabe eines kurzen Faltungshalles. Die Verhallung folgte einer anfänglichen Idee, die

Schallquelle zeitlich zu maskieren und so möglicherweise perceptiv zu tarnen. Die Bezeichnung Ensemble 12-kanalig bzw. 6-kanalig bedeutet, dass zwölf bzw. in reduzierter Form sechs Lautsprecher zur Wiedergabe eines ganzen Bläserensembles verwendet wurden. Die Ensemble-Aufstellung war dabei eine Quad- bzw. Stereo-Anordnung mit acht bzw. vier Stützlautsprechern. "Stereo" verwendete insgesamt nur zwei Lautsprecher. Außerdem wurde wiederum eine Verhallung der Ensemble-Anordnung vorgenommen. Die Reihenfolgen der Stimuli wurden aufgrund der bereits hohen Komplexität und manuellen Gestaltung des Versuchsablaufs nur teilweise randomisiert. In einer kurzen Trainingsphase füllten die Probanden eine erste Seite aus und hörten dabei zum Eingewöhnen und wie im späteren Test 2 x 2 Wiederholungen des 17 s langen Oboen-Stimulus. Dieser war beim Training stets und unbekannterweise die echte Oboistin.

### Ergebnisse

Für das Instrument Oboe sind die Ergebnisse für Natürlichkeit und Präferenz in Abbildung 3 gezeigt. Sämtliche Stimuli werden recht ähnlich mit einer Natürlichkeit um den Wert 5 bewertet, die echte Musikerin erzielt einen Median von 6, wird also erwartungsgemäß etwas natürlicher empfunden. Es sind keine signifikanten Unterschiede messbar. In der Trainingsphase, in der ebenfalls nur die Musikern spielte, lag dieser Wert um 5. Die echte Musikerin scheint somit eher kaum unterscheidbar natürlich im Vergleich zu sämtlichen Reproduktionen. Bei den Präferenzen ist ein ähnliches Bild ohne signifikante Unterschiede zwischen den Stimuli zu erkennen. Der Dodekaeder wird tendenziell etwas weniger präferiert. Die verhallte bzw. reduzierte Variante ist weder besser noch schlechter.

Bei dem Stimulus Klarinette, nunmehr ohne "echtes" Instrument, ist der Dodekaeder durchaus weniger natürlich wahrgenommen ( $p = 0,012$ ) als das Lautsprecher-Array und auch weniger präferiert als das Array und das reduzierte Array ( $p < 0,05$ ), siehe Abbildung 4. Es lässt sich somit sagen, dass das Lautsprecher-Array mit einem Natürlichkeitswert von 5 wiederum durchaus hoch bewertet wird (Dodekaeder: 4). Die reduzierte Variante ist nicht maßgeblich schlechter. Eine zusätzliche Verhallung ist nicht unterscheidbar.

Die Ergebnisse zum Ensemble sind in Abbildung 5 gezeigt. Hierbei wurden nur noch verschiedene Aufbauten des Lautsprecher-Arrays verglichen. Die Mediane sämtlicher Stimuli befinden sich im Bereich von 3 bis 6 der Natürlichkeit (min...max: 0...7). Der reduzierte Aufbau ist knapp am natürlichsten und auch bevorzugt. Mit sechs Lautsprechern ist dieser praktikabler als der volle Aufbau. Ansonsten sind kaum Unterschiede zu sehen, tendenziell ist die Stereo-Variante etwas schlechter. Möglicherweise werden zu viele und zu wenige Quellen auf der Bühne nicht positiv wahrgenommen. Ein zusätzlicher Hall wirkt hier eher weniger natürlich.

### Zusammenfassung, Diskussion, Ausblick

Die Reproduktion einer musikalischen Schallquelle scheint in leicht unterschiedlichem Maße ausreichend natürlich und qualitativ hochwertig für die verwendete

Techniken Lautsprecher-Array und Dodekaeder. Der Lautsprechereinsatz als musikalische Schallquelle ist somit für raumakustische Untersuchungen möglich. Es wird augenscheinlich eine ausreichend hohe Klangqualität geschaffen, die der Aufgabe als Hilfsinstrument zur raumakustischen Untersuchung der Saalakustik genüge tut.

Die Hörer waren überwiegend überrascht von der stattfindenden "Täuschung". Wenige Teilnehmer suchten sich andere Anhaltspunkte zur Bewertung wie etwa die Gleichheit von Spiel-Wiederholungen, Atem-Geräusche und dergleichen. Jedoch konnte dies auch unabsichtlich in die Irre führen, da etwa Atem-Geräusche sowohl in den Aufnahmen als auch der echten Darbietung in durchaus erheblichem Maße hörbar sein konnten.

Im vorliegenden Test wurden neben anderen, nicht gezeigten Klangeigenschaften die Natürlichkeit und Präferenz abgefragt. Im Grunde ist das Ziel jedoch eine ausreichende Nähe zum echten Musiker mit Instrument. Es erscheint daher angebracht, die Forschungsfrage umzuformulieren und bei einem weiteren Test konkret nach "Hören Sie Lautsprecher oder echtes Instrument?" zu fragen. Zudem liefern die doch recht nahe beieinander liegenden Werte zu Natürlichkeit und Präferenz den Eindruck, dass die ausgewählten Stimuli zu wenig Unterschiede boten. Einfachere Techniken wie etwa Mono-Lautsprecher und Mono-/Ein-Signal-Dodekaeder sollten untersucht werden, um die Bandbreite zu erweitern.

### Literatur

- [1] M. R. Schroeder, D. Gottlob, and K. F. Siebrasse, "Comparative study of European concert halls: Correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 56, pp. 1195–1201, 1974.
- [2] J. Pätynen, *A Virtual Symphony Orchestra for Studies on Concert Hall Acoustics*. PhD thesis, Aalto University, Finland, 2011.
- [3] F. Zotter, *Analysis and Synthesis of Sound-Radiation with Spherical Arrays*. PhD thesis, Institut 17 Elektronische Musik und Akustik, University of Music and Performing Arts Graz (Austria), 9 2009.
- [4] C. Fuchs, *Nachbildung eines Holzbläser-Quartetts und dessen Einzelinstrumenten für raumakustische Untersuchungen (Master's thesis)*. Technische Universität München, 2020.
- [5] M. Garai, D. D'Orazio, G. Fratoni, and A. Rovigatti, "A virtual orchestra to qualify historical opera houses," *Building Acoustics*, vol. 27, pp. 1–18, 9 2020.
- [6] S. Weinzierl, H. Rosenheinrich, J. Blickensdorff, M. Horn, and A. Lindau, "Die Akustik der Konzertsäle im Leipziger Gewandhaus. Geschichte, Rekonstruktion und Auralisation," in *Fortschritte der Akustik - DAGA 2010*, (Berlin), pp. 1045–1046, Dt. Ges. für Akustik, 2010.

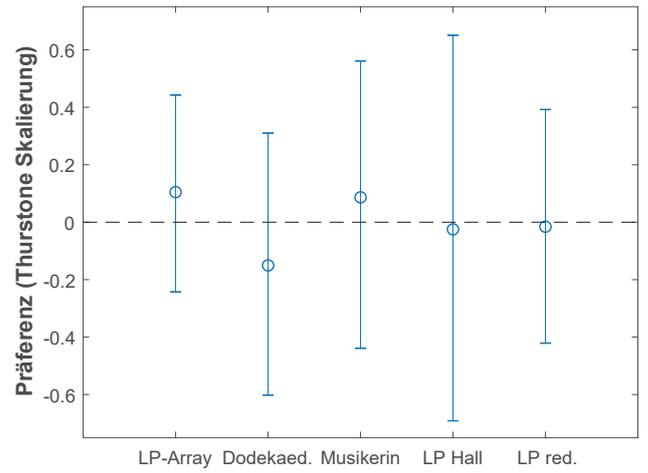
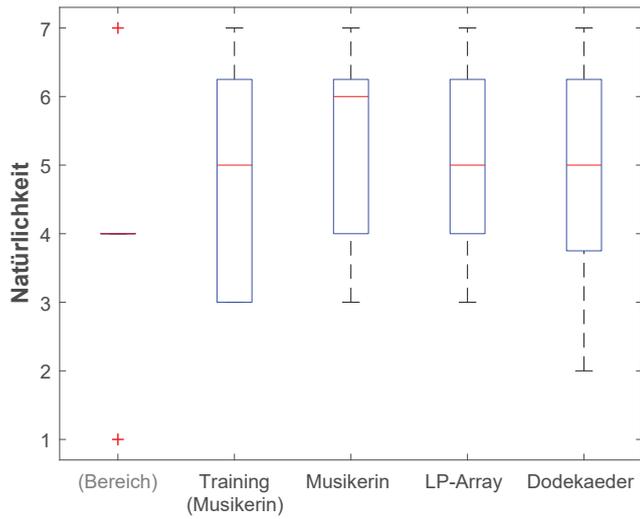


Abbildung 3: Stimuli Oboe: Natürlichkeit (links) und Präferenz (rechts).

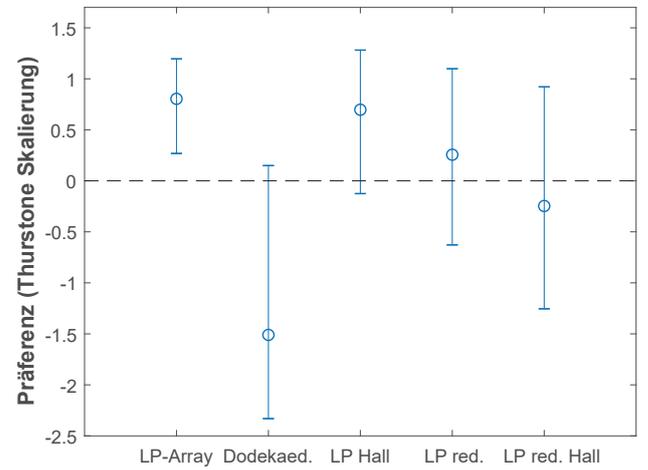
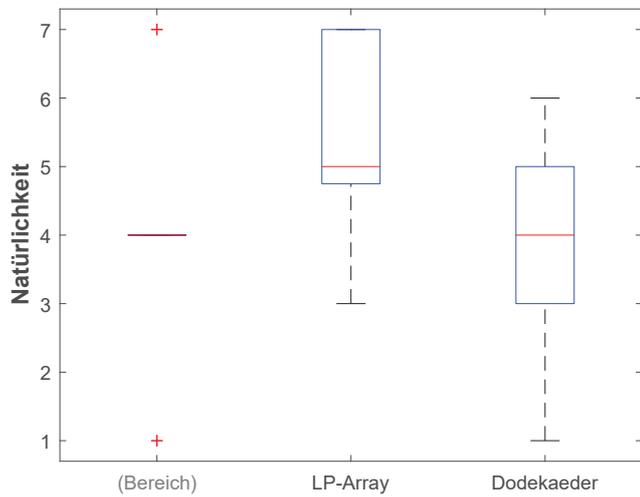


Abbildung 4: Stimuli Klarinette: Natürlichkeit (links) und Präferenz (rechts).

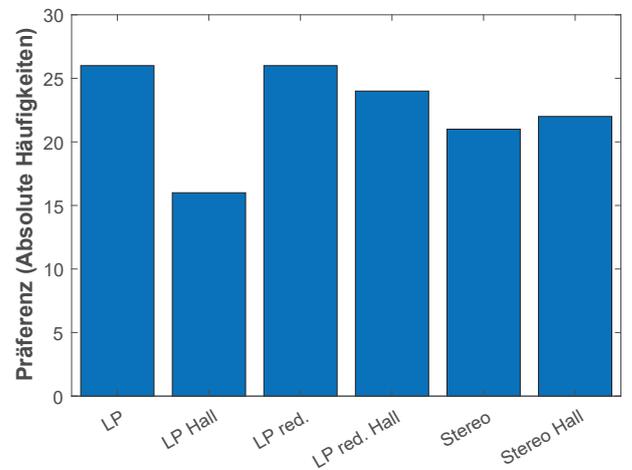
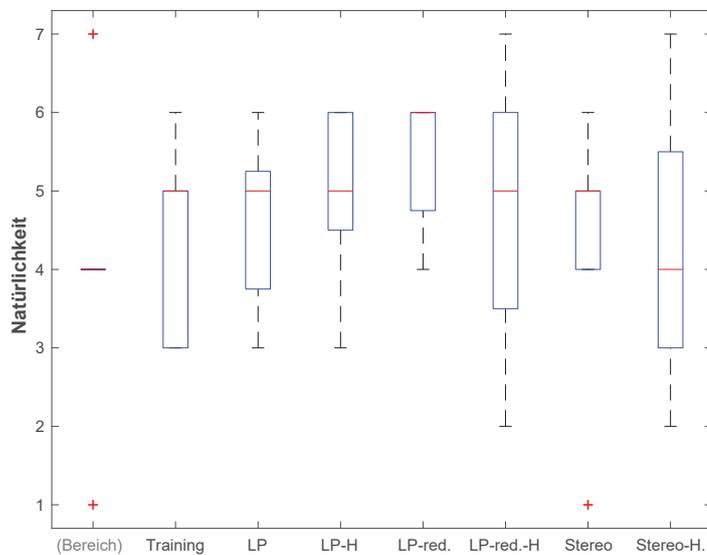


Abbildung 5: Stimuli Ensemble: Natürlichkeit (links) und Präferenz (rechts).