

Raumakustik

Wie man Räume hörgerecht besser gestaltet

» Hier geht's
direkt
zum Buch

DIE LESEPROBE

Einführung

Die Raumakustik ist ein vielfältiges und sehr abwechslungsreiches Betätigungsfeld. Sie steht im Spannungsfeld zwischen Architektur, Kommunikation, Musik und Physik, zusammengeführt in eine Ingenieursdisziplin. Alles grundlegende Felder, aus denen man ein unerschöpfliches Meer an Motivation, Interesse und Leidenschaft ziehen kann. Vor allem die Musik ist es, die zumindest mich persönlich immer wieder „hineinzieht“ in die Akustik. Wie schaffe ich es, mit den Werkzeugen der Raumakustik die ideale Bühne für musikalische Gänsehautmomente zu schaffen? Was brauchen Musiker:innen? Was braucht Musik, um diese unvergesslichen und unbeschreiblichen Momente herbeizuführen?

Aber nicht nur die Musik, sondern auch Kommunikation, ob im Bildungswesen oder im Geschäftsleben, stellt einen gesellschaftlich extrem wichtigen Bereich dar. Mit welchen Mitteln erreiche ich die bestmögliche Umgebung für Vorträge, Diskussionen, Lernen, Arbeit oder einfachen Austausch?

All diese Fragen und Herausforderungen münden unweigerlich in Fragen der Architektur. Welche primären Eigenschaften wie Raumgröße und -form sollen Räumlichkeiten aufweisen? Welche sekundären Eigenschaften wie Oberflächen und Einrichtungsgegenstände müssen vorhanden sein? Wie kann man das Spannungsfeld zwischen Design und funktionaler Qualität auflösen? Aber auch, wie geht man mit bautechnischen und budgetären Einschränkungen um?

Bei den Lösungen und Maßnahmen der Raumakustik kann es sich um Schallabsorber, Schallreflektoren oder Schalldiffusoren als Flächen handeln. Aber auch um den bewussten Umgang mit Einrichtungsgegenständen und Bestuhlung. Weiter geht es um Lärminderungsmaßnahmen der haus- oder medientechnischen Einbauten und nicht zuletzt um Schallschutzmaßnahmen, um einen gewissen Ruhepegel im Raum zu erreichen und nicht von Außenlärm oder Nachbarlärm gestört zu sein. Aber es kann sich auch um elektroakustische Lösungen mittels Mikrofonen, Lautsprechern

und Signalprozessoren handeln. Sei es, um Beschallungsanlagen zur Verstärkung zu verwenden oder um eine aktive Akustik zur variablen Gestaltung der Akustik eines Raums einzusetzen. Welches Werkzeug man konkret einsetzt, ist immer von den Anforderungen bzw. der Problemstellung, den optischen Ansprüchen, den Qualitätsansprüchen, den Budgetmöglichkeiten und nicht zuletzt der Kreativität und Erfahrung der Planenden abhängig.

Die Erfahrung ist in der Raumakustik ein nicht zu unterschätzender Faktor. Nach ca. zehn Jahren Beratungstätigkeit und weiteren sieben Jahren Studium (ja, ich habe es sehr genossen zu studieren) kann ich behaupten, auf jedes Problem eine Antwort zu haben oder zumindest zu wissen, wo ich nachsehe oder wen ich konsultiere. Und das eben nicht nur auf Basis von Wissen, sondern primär auf Basis von Erfahrungen und Austausch. Es genügt in der Raumakustik also nicht das Lesen von ein paar Normen und Richtlinien, um die Problemstellungen komplett zu erfassen und lösen zu können. Neben der Aneignung von grundlegendem Wissen ist es essenziell, Erfahrungswerte zu sammeln und über die Eigenschaften von Schallquellen und das Gehör Bescheid zu wissen. Tipp: Ein musikalischer Hintergrund bzw. das aktive Musizieren helfen dabei enorm.

Die Spannung in der Raumakustik entsteht aber auch dadurch, dass das Ergebnis immer einen starken subjektiven Anteil aufweist. Betrachtet man Räume, die für Sprache bzw. Kommunikation ausgelegt sind, so ist die Beurteilung der Güte eines Raumes relativ einfach. Am Ende muss das gesprochene Wort verstanden werden; wir sprechen allgemein von der Sprachverständlichkeit. Hier gibt es relativ wenig Spielraum und es haben sich dafür mehr oder weniger effiziente Kriterien etabliert. Denkt man aber an die Güte von Räumen für Musik, so ist es schlichtweg unmöglich, ein universelles Qualitätskriterium festzulegen. So etwas wie Musikverständlichkeit gibt es einfach nicht. Das musikalische Erlebnis ist stark abhängig von der konkreten Musik, der Erwartungshaltung der Zuhörer, der Tagesverfassung bzw. Performance der Ausführenden und nicht zuletzt vom eigenen Geschmack. Wir werden uns nie darüber einig werden: Beatles oder Rolling Stones? In meinem Fall ist es doch recht eindeutig: The Beatles. An dieser Stelle eine kurze Songempfehlung, da ich erlebt habe, dass dieser Song nicht jedem bekannt ist: „Because“. Es gibt auch eine A-capella-Version. Zum Dahinschmelzen! Wir werden in diesem Buch so gut und kompakt als möglich herausarbeiten, welche Qualitätskriterien auch für Musik geeignet sind. Jede/r Akustiker:in wird aber daran scheitern, die raumakustische Situation mit einem einfachen Maß für die Eignung oder Güte für Musik beschreiben zu können.

Komplexität in der Raumakustik

Die Faszination Akustik ganz im Allgemeinen und der Raumakustik im Besonderen entsteht auch durch ihre Komplexität und die vielen Querschnitte durch verschiedene Materien wie Physik, Musik, Architektur, Psychologie und Physiologie.

Beispielsweise ist die Standardantwort des/r Akustiker:in ja: Es ist frequenzabhängig! Die Frequenzabhängigkeit durchdringt nahezu alle Bereiche der Raumakustik: die Eigenschaften der Schallabsorber, die Absorption in der Luft, die Reflexions- und Streuungseigenschaften verschiedener Gegenstände oder Oberflächenstrukturen, die schalldämmenden Eigenschaften von Bauteilen, die Eigenschaften der Stimme, Lautsprecher oder Musikinstrumente. Von wesentlicher Bedeutung sind natürlich die stark frequenzabhängigen Eigenschaften des menschlichen Gehörs.

Die Komplexität rührt vor allem daher, dass sich der hörbare Frequenzbereich maximal zwischen 20 Hz und 20 kHz befindet. Die zugehörigen Wellenlängen erstrecken sich von 17 m bis 17 mm. Man kann das vergleichen mit der Größe einer Kaulquappe im Vergleich zu einem Blauwal. Das Entscheidende ist, dass die Interaktion von Schallwellen mit Oberflächen, Strukturen, Objekten und Materialien frequenzabhängig variiert. Ein und dasselbe Objekt, etwa eine Säule, kann für hohe Frequenzen (ca. über 2000 Hz) reflektierend in eine bestimmte Richtung wirken. Für mittlere Frequenzen (ca. 500–1000 Hz) streuend (Reflexionen in viele Richtungen) oder für sehr tiefe Frequenzen (ca. kleiner 100 Hz) völlig „unsichtbar“ sein. Es ist wichtig, im Kopf zu behalten, dass daher auch jedes Maß oder Qualitätskriterium immer frequenzabhängig ist. Eine Reduktion auf einen einzelnen Wert, und dies wird oft versucht, ist daher immer stark vereinfachend.

Weiter ist nicht nur der hörbare Frequenzbereich, sondern auch der hörbare Dynamikbereich des Schalldrucks ein entscheidender Umstand, der einen unvorstellbaren Bereich umfasst. Der Unterschied zwischen gerade noch hörbarem Schalldruckpegel 0 dB SPL, der Hörschwelle bei 2 kHz und der Schmerzschwelle –134 dB SPL liegt also bei 134 dB. In Pascal, das Maß für den Schalldruck, liegen diese Werte bei 20 μ Pa (Mikropascal) und rund 200 Pa. Also ein Unterschied von 1:10000000 (eins zu zehn Millionen). Dies ist vergleichbar mit dem Gewicht einer kleinen Maus mit jenem eines ausgewachsenen Elefanten. Dies sind unglaubliche Dimensionen und daher hat sich das Verhältnismaß mit Dezibel durchgesetzt, da dieser riesige Bereich auf einen überschaubaren Zahlenraum projiziert wird.



Wer sich in die Grundlagen des Schalls und der Schallausbreitung einarbeiten will, dem sei die Literatur im Literaturverzeichnis nahegelegt. Auch Wikipedia ist eine tolle Ressource, um sich den Größen wie Schalldruck, Frequenz, Wellenlänge etc. zu nähern. Besonders möchte ich aber den frei zugänglichen Online-Kurs „Fundamentals of Communication Acoustics“ ans Herz legen, der von Experten der TU München und RWTH Aachen entwickelt wurde.¹⁾

Weiter spannend ist, dass in der Raumakustik nach wie vor eine hohe Unsicherheit der Berechnungs- und Messmethoden besteht. Gängige Richtlinien zum Beispiel defi-

¹ Der Kurs ist zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Buches auf der Plattform edX zu finden: <https://www.edx.org/course/fundamentals-of-communication-acoustics>.

nieren Qualitätskriterien mit Toleranzen von $\pm 20\%$. Eine Bandbreite, die in anderen Fachbereichen undenkbar wäre. Dies resultiert zum einen aus unseren Geschmacks- und Erwartungsunterschieden bezüglich einer optimalen Akustik; zum anderen auch daraus, dass Berechnungs- und Messmethoden eine relativ hohe Unsicherheit aufweisen.

Dies drückt sich auch darin aus, dass der Stand der Technik in der akustischen Simulation nach wie vor weit entfernt von einer echtzeitfähigen genauen Nachbildung der Schallfelder ist. Die gängigen Berechnungsmethoden der Raumakustik basieren auf idealisierten Modellen. Wir nähern uns dieser Problematik aber schrittweise an und in ein paar Jahren nach Erscheinen dieses Texts wird es vielleicht schon entscheidende Fortschritte gegeben haben.

Diese hohe Komplexität soll jedoch nicht abschrecken, sondern hoffentlich umso mehr motivieren, da das Feld der Raumakustik fast unerschöpflich ist, was das Entwickeln von neuem Wissen und Erkenntnissen für nahezu jeden Wissenstand ist. Und es ist daher umso wichtiger, Ungenauigkeiten oder unvollständiges Erklärungsvermögen durch Erfahrungswerte auszugleichen.

Raumakustik in der Planungspraxis

Eine erfreuliche Entwicklung ist, dass die Relevanz der Raumakustik im Bauwesen bzw. allgemein in der Gesellschaft in den letzten Jahren stark gestiegen ist und weiter zu steigen scheint. Sei es sowohl im Bau von Schulen, Universitäten oder Fachhochschulen, in denen Sprachkommunikation und Zuhören essenziell sind, als auch in Büros bzw. Großraumbüros, wo die Lärmentwicklung bzw. das Störpotenzial massiv durch die Raumakustik beeinflusst wird. Auch in Restaurants oder Bars wird die Atmosphäre extrem stark durch die raumakustischen Verhältnisse beeinflusst. Ein Beispiel sind auch Räume für Videokonferenzen – ein Mikrofon ist einfach nur so gut, wie die Raumakustik es zulässt.

Es besteht in Projekten oft ein Kompetenzvakuum, wenn es zur Raumakustik kommt. Nachdem die Raumakustik nach wie vor kein oder lediglich ein sehr geringer Teil der Ausbildung in der Architektur ist, ist das Bewusstsein für die Bedeutung manchmal nicht im ausreichenden Maße vorhanden. Die Raumakustik ist kein eigenes Gewerk und wird oft der Bauphysik zugerechnet. Akustische Lösungen bewegen sich jedoch immer zwischen den klassischen Gewerken wie Innenarchitektur, Bauphysik, Haustechnik und vielleicht sogar Elektrotechnik, wenn es um Beschallung geht. Da die raumakustischen Entscheidungen jedoch einen sehr großen Einfluss auf das Raumgefühl und -erlebnis haben, wäre dieses Thema eher bei der Architektur selbst anzusiedeln, mit der Unterstützung von Fachpersonen.

Was hilft, ist die stetige Weiterentwicklung der Normen und Richtlinien. Hier sind die Normen und Richtlinien der DIN, ÖNORM, des VDI und der ISO gemeint. Aktualisierungen dieser Normen haben in den letzten Jahren stattgefunden und es ist auch er-

freulich, dass neue Normen hinzukommen. Ziel muss sein, diese möglichst fundiert in Gesetze und Verordnungen zu überführen, um die raumakustische Planung mehr und mehr zu einem klaren Standard werden zu lassen. Von welchen Normen wir konkret sprechen, wird sich im Laufe der Lektüre zeigen oder diese sind im Literaturverzeichnis zu finden.

Dieses Buch

In diesem Buch werden wir grundlegende Zusammenhänge so kompakt wie möglich einführen und so anschaulich wie möglich verstehen lernen. Es werden immer wieder Praxisbezüge hergestellt und konkrete Anwendungsbereiche vorgestellt. Hierbei werden wir zuerst in „die Basics“ das Phänomen des Nachhalls genau untersuchen und anschauliche Bilder zum besseren Verständnis finden. Wir werden uns auch mit dem Thema Lautstärke und Raummoden beschäftigen. Danach geht es um „die Bausteine“ zur Gestaltung der Raumakustik, vor allem aber um Schallabsorber, das Hauptwerkzeug zur Lösung der typischen Problemstellungen im Alltag. Wir werden verstehen lernen, welche Prinzipien und verschiedene grundlegende Typen es gibt, aber auch konkrete Produkte des Markts kennenlernen. Weiter werden wir tiefer ins raumakustische „Design“ einsteigen. Was sind überhaupt Qualitätskriterien für eine exzellente Raumakustik? Gibt es dazu Normen, Richtlinien und Gesetze? Und was sind typische Designansätze für verschiedene Raumkategorien. Wir werden also den raumakustischen Planungsprozess einmal durchgehen. Dabei wird es einige Beispiele aus der Praxis geben. Geschmückt wird diese Dreiteilung durch Interviews mit Expert:innen aus verschiedenen Fachbereichen. Dabei konnten wir Dr. Jamilla Balint, Prof. Dr. Eckhard Kahle, Prof. Dr. Michael Vorländer, Prof. Dr. Stefan Weinzierl, Dipl.-Ing. Thorsten Rohde, Prof. Dr. Malte Kob sowie Peter Maier gewinnen. Diese Interviews sollen Impulse für die Vertiefung spezieller Themen anregen. Die meisten wurden per Video-Konferenz aufgezeichnet und nur Ausschnitte davon für das Buch verwendet. Die gesamte Aufzeichnung der Interviews sind auf der Buch-Website zu finden.



Klangbeispiele, Videos und die Interviews können auf den zum Buch gehörenden Websites gefunden werden.



Hier auch noch ein paar Tipps zur Lektüre dieses Buches: Wer dieses Buch wirklich durcharbeiten will und nicht nur als Nachschlagewerk nutzen möchte, dem sei ans Herz gelegt, sich mit Bleistift, Marker und Notizbuch durch das Buch zu arbeiten. Eigene Notizen erhöhen die Wahrscheinlichkeit, dass Inhalte im Kopf bleiben. Nach dem Abschluss eines Kapitels sollte dieses noch einmal durchgearbeitet und die wichtigsten Punkte herausgeschrieben werden. Am besten erzählst Du Deinen Bekannten oder Kolleg:innen gleich davon. Wer es jemandem beibringen kann, hat es auch verstanden.



Wer nichts anbrennen lassen und das Thema Raumakustik wirklich verinnerlichen will, dem seien unsere Seminare nahegelegt. Wir haben fünf Sinne und es ist bewiesen, dass wir am effizientesten lernen, wenn man möglichst viele Sinne anspricht. Daher haben wir diese Inhalte in verschiedenen Seminarformaten aufbereitet, tragen diese lebendig und praxisbezogen vor und bieten möglichst viele Hörerlebnisse und Übungen dazu an. Mehr dazu auf www.rohde.at/academy.

1

Die Basics

Ich möchte Dich einladen, sich einen Moment zu nehmen und für ca. eine Minute die Augen zu schließen und einfach nur zu hören. Hör auf das, was sich in der Umgebung abspielt.

... nur eine Minute ... ja, hier und jetzt!

Was hast Du gehört? Wie würdest Du die Klänge und Geräusche beschreiben? Wie fühlt es sich an? WO hast Du WAS gehört? Wie hat die Umgebung Deiner Meinung nach den Klang beeinflusst?

Interessant oder? So etwas machen wir so gut wie nie. Einfach nur zu hören. Wobei der Gehörsinn ein sehr spezieller ist:

- Wir hören 24 Stunden lang, das Ohr schläft nie (sonst würde der Wecker in der Früh auch keinen Sinn haben).
- Der Gehörsinn „wacht“ im Mutterleib als Säugling als erster auf, die Stimme der Mutter ist das Erste, was wir wahrnehmen.
- Wir hören mit einer Frequenzauflösung und einem Umfang wesentlich besser, als das Auge sieht.
- Ebenso können wir wesentlich feiner bezüglich der Reizstärke unterscheiden und haben einen unfassbaren Dynamikumfang von leisesten zu lautesten Schallereignissen.
- Wir hören räumlich in 3D: vorne, hinten, links, rechts, oben und unten. Wir können also Schall aus allen Richtungen lokalisieren.

Und doch scheint das Ohr im Vergleich zum Auge eine untergeordnete Rolle zu spielen. Der Gehörsinn spielt aber beim Spüren und Erleben von Umgebungen eine entscheidende Rolle. Wir orientieren uns im Raum über das Ohr und nehmen die Größe des Raums wahr. Wir spüren Gefahren z. B. im Straßenverkehr hauptsächlich über das Ohr auf. Und nicht umsonst gehen wir zur Erholung in den Bergen wandern, durch Wälder spazieren oder hören dem Rauschen des Meeres zu, um einfach Entspannung und Abwechslung zu erleben.

Die Akustik ist die Lehre des Schalls; die Raumakustik demnach die Lehre des Schalls im Raum. Nun, was definiert einen Raum eigentlich? Die Grundfläche und die Raumhöhe – das Raumvolumen – die Form, Materialien bzw. Konstruktionen an den Oberflächen und die Einrichtungsgegenstände. Alles Dinge, die von der Architektur beim Design von Räumlichkeiten entschieden werden. Und alles Dinge, die die Akustik in einem Raum maßgeblich beeinflussen.



Jede architektonische Entscheidung ist eine akustische Entscheidung!

Es liegt also maßgeblich in den Händen der Architektur, die Akustik und somit das Erlebnis von Umgebungen und Räumen zu gestalten.

Eine integrale Architektur fragt also nicht: Wie soll ein Raum aussehen?

Sondern: Wie sollen Menschen sich in Räumen fühlen?

Die Aufgabe des Akustikers ist es, diese Zusammenhänge zwischen Akustik und Architektur zuallererst klarzustellen und im Weiteren in der Gestaltung mitzuwirken. Dazu benötigt er geschickte Kommunikation, Berechnungen, Konstruktionen, Zeichnungen, Messungen und geschultes Beurteilen der Auswirkungen anderer architektonischer oder baulicher Aspekte und Schnittstellen.

Was definiert nun aus akustischer Sicht einen Raum? Was ist notwendig, um von Raumakustik zu sprechen?



Exkurs: Amphitheater

Amphitheater können als die erste Form eines Veranstaltungsraumes und Vorgänger aller später erbauten Theater angesehen werden. Sie sind noch heute für ihre exzellente Akustik bekannt. Eines der wohl bekanntesten ist Epidauros auf dem griechischen Peloponnes. Es wurde im 4. Jahrhundert v. Chr. erbaut und bietet nach einem Umbau bis zu 12000 Besuchern Platz. Eine weitere akustische „Sehenswürdigkeit“ ist das römische Theater von Amman, das noch heutzutage für diverse Veranstaltungen verwendet wird.

Weitere römische und griechische Theater wie die Arena in Pula, das Theater in Merida und viele andere sind ebenso bekannt für ihre ausgezeichnete Akustik. Aber woran könnte das liegen? Hat es etwas mit der typischen Halbkreisgeometrie zu tun? Haben die Verteilung und die Segmentierung der Sitzplätze einen Einfluss darauf? Welche akustischen Eigenschaften besitzen die Baumaterialien und inwiefern tragen sie zur guten Akustik bei? Und kann man wirklich eine Stecknadel fallen hören?

Viele Theorien wurden unter Laien, aber auch in wissenschaftlichen Kreisen diskutiert: von den Gerüchten, dass sich unter manchen Amphitheatern riesige geheime Resonatoren befinden bis zu den Thesen, dass Amphitheater entlang der Windrichtung gebaut wurden, sodass der Wind den Schall zum Publikum lenkt.

Um nicht von der Vielzahl von Annahmen überwältigt zu werden, wurden Amphitheater in Forschungsprojekten Schritt für Schritt untersucht. Ein Amphitheater

besteht aus drei Hauptelementen: dem Orchester, dem Theatron (Cavea) und der Skene (Bühnengebäude). Dadurch entstehen die akustisch relevanten Komponenten:

- Eine stark reflektierende Rückwand, die den Schall von der Bühne zum Publikum reflektiert.
- Eine stark reflektierende kreisförmige Bodenfläche vor dem Publikum (das sogenannte Orchestra), die normalerweise aus Marmor besteht und den Schall ebenso zum Publikumsbereich reflektiert.
- Ein sehr steiler stufenförmiger Publikumsbereich (Cavea) in Halbkreisform, um den direkten Schallweg zu minimieren, welcher bei manchem Amphitheater mit einem Rundgang am oberen Ende abgeschlossen ist.

Daraus entstehen folgende akustisch günstige Zusammenhänge:

- starker Direktschall durch die möglichst kurz gehaltenen Distanzen zwischen Schallquellen auf der Bühne und dem Publikum,
- frühe Reflexionen von der Bodenfläche (Orchestra),
- frühe Reflexionen durch dahinter liegende Stufen.

Es ist also ersichtlich, dass die Geometrie der Bühne und des Publikumsbereichs frühe Reflexionen begünstigt, die für die Sprachverständlichkeit entscheidend sind.

Nach einer Studie eines amerikanischen Akustikers¹⁾ ist jedoch nicht nur der spezifische Bühnenaufbau, sondern auch der Abstand der regelmäßig aufsteigenden Stufen von großer Bedeutung. Aufgrund dieses Abstands entsteht eine Streuung der mittleren und hohen Frequenzen. Die tieferen Frequenzen werden von diesem Effekt hingegen nicht beeinflusst. Die typische Frequenz $f\Lambda$, ab der dieser Effekt eine Rolle spielt, unterscheidet sich von einem Amphitheater zum anderen und hängt vom Abstand der Stufen $[\Lambda]$ ab, wie z. B.:

- Pergamon mit $\Lambda = 1.6 \text{ m}$ und $f\Lambda = 300 \text{ Hz}$,
- Epidauros mit $\Lambda = 0.83 \text{ m}$ und $f\Lambda = 530 \text{ Hz}$,
- Aphrodisias mit $\Lambda = 0.74 \text{ m}$ und $f\Lambda = 600 \text{ Hz}$.

Demnach: je größer der Abstand, desto tiefer die Grenzfrequenz bzw. desto länger die „Grenzwellenlänge“. Dieser Effekt ist vorteilhaft, weil genau der Frequenzbereich oberhalb dieser Frequenzen entscheidend für die Sprachverständlichkeit ist (Obertöne der menschlichen Sprache). Auf der anderen Seite sind die Störgeräusche (Publikumsschritte, Windgeräusche, usw.) eher im Bereich bis 500 Hz und bleiben durch den Effekt unverstärkt. Die Stufen wirken also wie ein Hochpassfilter.

Der Effekt wurde auch indirekt durch eine weitere Studie²⁾ bestätigt. Daraus ging hervor, dass ein Anstieg der Nachhallzeiten ab einer bestimmten Frequenz passiert. Das heißt, die mittleren und hohen Frequenzen werden im Vergleich zu

¹ Declercq, N. F.; Dekeyser, C. S.A.: Acoustic diffraction effects at the Hellenistic amphitheater of Epidaurus: Seat rows responsible for the marvelous acoustics, in: The Journal of the Acoustical Society of America, 2007

² Bevilacqua, A.; Ciaburro, G.; Iannace, G.; Lombardi, I.; Trematerra, A.: Acoustic design of a new shell to be placed in the Roman amphitheater located in Santa Maria Capua Vetere, in: Applied Acoustics, 2021

den tiefen Frequenzen mehr reflektiert bzw. gestreut. In einem geschlossenen Raum würde dies nicht unbedingt eine bessere Sprachverständlichkeit hervorrufen, in einem Amphitheater bzw. im Freien dagegen führt es zu einer Verstärkung des Direktschalls. Dieser fällt im Freien proportional dem Quadrat der Entfernung ab und somit ist die Verstärkung, die sich durch die erhöhte Nachhallzeit äußert, von Bedeutung.

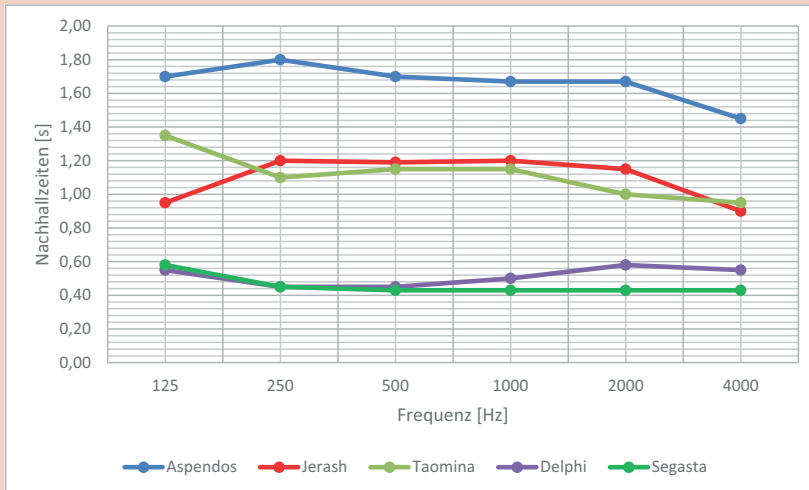


Bild 1.1 Nachhallzeiten verschiedener Amphitheater³⁾

Es sind nicht nur die reflektierenden Bühnenelemente, die den Schall ins Publikum lenken, sondern auch die geometrischen Abmessungen und Abstände der Stufen für die exzellente Akustik der Amphitheater zuständig. Die Stufen wirken wie ein Hochpassfilter, indem sie die tieffrequenten Störgeräusche unterdrücken und die mittel- und hochfrequenten Sprachanteile durch die Streuung anheben.



Bild 1.2 Amphitheater mit originaler Bühne und teilweise nachgebautem Publikumsbereich

³⁾ Farnetani, et al.: On the acoustics of ancient Greek and Roman theaters, in: J. Acoust. Soc. Am. 124 (3), September 2008