

2. Schallempfindung in Räumen

2.1. Lautstärke und Klangfarbe

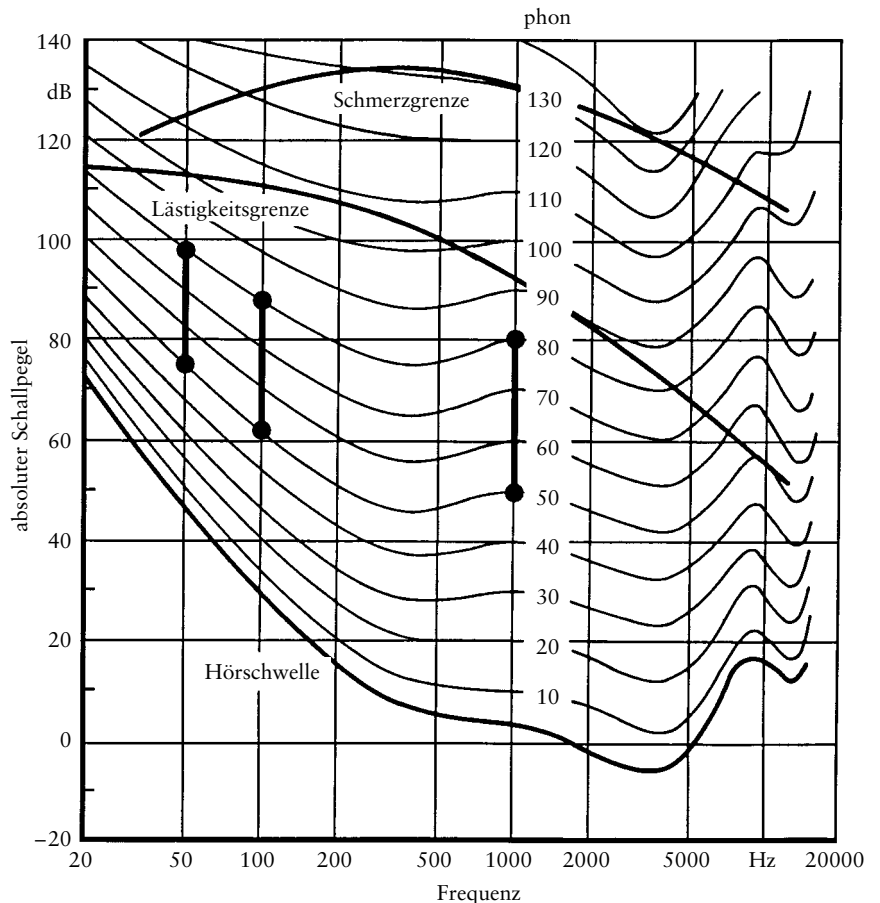
2.1.1. Frequenzabhängigkeit der Lautstärkeempfindung

Der klangliche Eindruck, der sich beim Hören von Sprache und Musik in Kirchen einstellt, hängt nicht nur von den Eigenschaften des Schallfeldes im Raum ab, sondern wird auch dadurch bestimmt, wie das Gehör auf die einzelnen Parameter des Schallfeldes reagiert. Dabei bestehen zwischen den subjektiven »Empfindungsgrößen« (wie Lautstärke, Klangfarbe, Deutlichkeit, Halligkeit usw.) einerseits und den objektiv messbaren Schallfeldgrößen (wie Schalldruckpegel, Frequenz, Zeitstruktur usw.) andererseits recht komplexe Zusammenhänge, d.h. eine bestimmte Empfindungsgröße ist nicht nur einer einzigen Schallfeldgröße zuzuordnen. Beispielsweise hängt der Lautstärkeindruck nicht nur vom Schalldruckpegel, sondern auch von der Frequenz ab und kann auch durch die Klangfarbe oder die Halligkeit beeinflusst werden. Sogar die Richtungen, aus denen die Schallwellen den Kopf des Hörers erreichen, spielen in diesem Zusammenhang eine Rolle.

Allerdings stellt der Schalldruckpegel die für den subjektiven Lautstärkeindruck dominierende Größe dar. Dabei ist die Empfindlichkeit des Gehörs so groß, dass bereits Schallpegelunterschiede von 1 dB ausreichen, um eine Veränderung der empfundenen Lautstärke herbeizuführen. Noch geringere Pegelunterschiede lassen sich praktisch nicht mehr wahrnehmen. Betrachtet man unter diesem Gesichtspunkt die Schallpegelverteilung in einem Raum (s. Abb. 1.19), so wird deutlich, dass der Schallpegel des statistischen Feldes bei größerer Entfernung von der Schallquelle die für die Lautstärke wichtigste Größe darstellt. Nur wenn der Abstand des Hörers zur Schallquelle nicht größer als der doppelte Hallabstand ist (vergl. Tab. 1.6), führt der Direktschall zu einer Erhöhung des Gesamtschallpegels um 1 dB oder mehr, trägt also spürbar zum Lautstärkeindruck bei. Voraussetzung ist dabei dann natürlich, dass der Direktschall nicht durch ein Hindernis wie z.B. eine Säule oder einen Mauervorsprung abgeschattet wird.

Wie bereits in Abschnitt 1.4.3 erläutert, hängt der Schalldruckpegel des statistischen Schallfeldes im Raum – abgesehen von der Schalleistung der Schallquelle – von dem Volumen und der Nachhallzeit ab; die gleiche Schallquelle kann also in verschiedenen Räumen unterschiedlich laut wirken: Je größer der Raum und je kürzer die Nachhallzeit ist, desto leiser erscheint ein und dieselbe Schallquelle; dies spielt gerade bei der Betrachtung von Kirchen eine wichtige Rolle, da deren Volumina von weniger als 1.000 m³ bis über 100.000 m³ reichen können. Da die Nachhallzeit zudem oft eine ausgeprägte Frequenzabhängigkeit aufweist, kann der Raum auch die Klangfarbe beeinflussen, worauf später noch einzugehen ist.

Eine grundsätzliche Eigenschaft des menschlichen Gehörs besteht nun darin, dass Schall unterschiedlicher Frequenzen bei gleichem Schalldruckpegel nicht als gleich laut empfunden wird. Diese Eigenart des Gehörs ist in Abb. 2.1 in Form von Kurven dargestellt, die aus einer Vielzahl von inter-



2.1
 Kurven gleicher Lautstärke für Schalleinfall von vorn mit Hörschwelle und Schmerzgrenze sowie der Grenze für die Lästigkeit (nach Winkel, 1969). Die dicken Linien mit Endpunkten zeigen, dass für den Lautstärkeunterschied zwischen 50 phon und 80 phon je nach Frequenz eine unterschiedliche Schalldruckpegeldifferenz erforderlich ist.

nationalen Messungen auf statistischer Grundlage bestimmt sind und damit das typische Verhalten des Gehörs charakterisieren. Die individuellen Gehörseigenschaften können zwar etwas variieren, doch bewegen sich diese Unterschiede in relativ engen Grenzen, solange keine ausgesprochenen Gehörsschädigungen vorliegen.

Im Diagramm der Abb. 2.1 läuft von links nach rechts die Frequenz, nach oben ist der Schalldruckpegel aufgetragen. Die unterste Kurve gibt die untere Pegelgrenze für die Hörbarkeit von Tönen an. Man erkennt, dass das Ohr am empfindlichsten auf Frequenzen zwischen 2000 und 5000 Hz reagiert, hier liegt der erforderliche Mindestpegel am tiefsten. Nach höheren Frequenzen, vor allem aber nach tieferen Frequenzen hin nimmt die Empfindlichkeit des Gehörs ab; das heißt, dass hier erheblich höhere Schalldruckpegel erforderlich sind, bis ein Ton hörbar wird. Diese Tendenz bleibt auch erhalten, wenn man Töne verschiedener Frequenz bei größerer Intensität hinsichtlich ihres Lautstärkeindrucks miteinander vergleicht.

Um einen Zusammenhang zwischen dem Schalldruckpegel und der durch ihn bewirkten Lautstärkeempfindung herzustellen, hat man für die Lautstärke die Einheit »phon« eingeführt und diese so festgelegt, dass bei einer Frequenz von 1000 Hz die dB-Skala für den Schalldruckpegel und die phon-Skala für den »Lautstärkepegel« identisch sind. Vergleicht man nun Töne anderer Frequenzen mit einem 1000-Hz-Ton, so erhält man die sog. Kurven gleicher Lautstärke, welche die durch die Empfindlichkeit des Gehörs gegebene Zuordnung zwischen dem Schalldruckpegel und der dabei empfundenen Lautstärke darstellen. In Abb. 2.1 sind die entsprechenden Kurven für jeweils um 10 phon ansteigende Lautstärken eingetragen.

Verfolgt man beispielsweise die Kurve für 80 phon, so erkennt man, dass dieser Lautstärkepegel bei 1000 Hz (definitionsgemäß) durch einen Schall-

druckpegel von 80 dB hervorgerufen wird. Bei 500 Hz genügen dagegen etwa 75 dB für den gleichen Lautstärkeindruck, während bei 100 Hz fast 90 dB erforderlich sind. Ein Schalldruckpegel von 80 dB würde dementsprechend bei 500 Hz etwas lauter als bei 1000 Hz empfunden – nämlich mit 84 phon –, während der gleiche Schalldruckpegel bei 100 Hz nur eine Lautstärke von 72 phon hervorrufen würde.

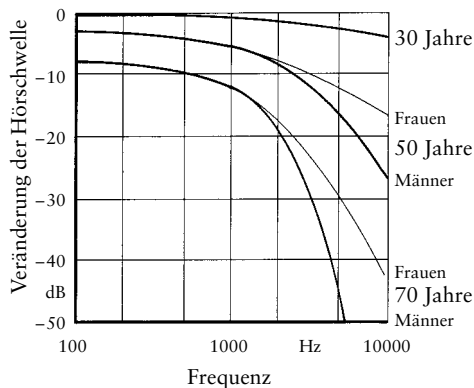
Im oberen Bereich der Kurven gleicher Lautstärke sind noch zwei weitere Kurven eingetragen, die den Hörbereich in gewissem Sinne nach oben begrenzen. Oberhalb der sog. Schmerzgrenze geht die Schallempfindung in ein Schmerzgefühl über, weil hier ein Sicherheitsmechanismus im Mittelohr einsetzt, der das Innenohr vor schädlicher Überlastung schützt, indem er nicht mehr die volle Schwingungsamplitude überträgt. Das bedeutet aber nicht, dass nicht auch schon unterhalb dieser Grenze vorübergehende oder dauerhafte Schädigungen des Gehörs auftreten können. Deutlich tiefer liegt die sog. Lästigkeitsgrenze, die ästhetisch bedingt ist und sich deshalb weniger exakt bestimmen lässt als der Übergang zum Schmerzgefühl. Diese Kurve bietet aber zumindest einen Anhaltspunkt dafür, welche Pegel im musikalischen Bereich nicht oder nur kurzzeitig überschritten werden sollten. Bemerkenswert ist der Abfall dieser Kurve zu hohen Frequenzen hin – eine Tatsache, die für den Höreindruck bei extrem obertonreichen Klängen durchaus von Bedeutung sein kann.

Voraussetzung für die Gültigkeit der in Abb. 2.1 dargestellten Kurven gleicher Lautstärke ist, dass die Töne lang genug sind. Wenn die Dauer eines Tones oder Geräusches kürzer als etwa 250 ms wird (1 Millisekunde = 1/1000 Sekunde), wird dieser Ton bzw. dieses Geräusch als etwas leiser empfunden, als es seinem Schalldruckpegel entspricht. Bei einer Dauer von 200 ms empfindet man die Lautstärke bereits so wie bei einem um 1 dB schwächeren Dauerton; dieser Unterschied steigert sich über einen Wert von knapp 2 dB bei einem Ton von 100 ms Dauer auf einen Wert von etwas über 3 dB bei einer Tondauer von 50 ms – Werte, die durchaus noch im musikalisch relevanten Bereich liegen, wenn man nicht nur an extrem schnelle Noten, sondern auch an die Dauer von Artikulationsgeräuschen denkt. Diese Eigenschaft des Gehörs, kurze Töne als etwas leiser zu empfinden, überlagert sich gewissermaßen noch der unter 1.4.3 erläuterten Einschwingzeit des Raumes.

Demgegenüber kann eine kurzzeitige Erhöhung des Schallpegels am Beginn eines längeren Tones die für diesen Ton empfundene Lautstärke etwas gegenüber jener Lautstärke erhöhen, die dem späteren Schallpegel des Tones entsprechen würde. Beispielsweise kann eine Anhebung des Schallpegels um 3 dB während der ersten 50 ms den ganzen (!) Ton um 1 dB stärker erscheinen lassen, während eine gleichartige Pegelanhebung im späteren Verlauf des Tones gar nicht wahrgenommen wird (Kuwano u. M., 1991). Dieses mit elektronisch erzeugten Klängen durchgeführte – und daher recht abstrakte Experiment – lässt den Schluss zu, dass prägnant oder artikuliert angesetzte Instrumentaltöne gegenüber gleich stark gespielten, aber weich angesetzten Tönen etwas an Lautstärke gewinnen. Voraussetzung ist dabei allerdings, dass diese Art des Tonansatzes nicht durch raumakustische Bedingungen verschliffen wird. So wirken insbesondere die tieffrequenten Klanganteile leiser als es Schalleistung der Quelle und Nachhallzeit des Raumes erwarten lassen, wenn die ersten Raum-Reflexionen tiefer Frequenzen beim Zuhörer später eintreffen als die ersten höherfrequenten Reflexionen. Ein derartiger Effekt war übrigens zuerst im Zusammenhang mit der New Yorker Philharmonic Hall aufgefallen (E. Meyer u. Kuttruff, 1963).

2.1.2 Alterseinflüsse

Die Kurven gleicher Lautstärke und insbesondere die Hörschwelle gelten, so wie sie in Abb. 2.1 eingetragen sind, nur für sog. Normalhörende, bei denen noch keine Einbußen des Gehörs aufgrund der natürlichen



2.2 Altersbedingte Verschiebung der Hörschwelle, Mittelwert für nicht krankhaft veränderte Ohren (ISO 7029)

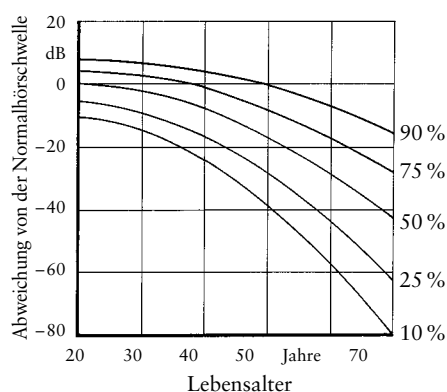
Alterung aufgetreten sind. Bereits in mittleren Jahren, vor allem aber in höherem Alter verschlechtert sich jedoch die Empfindlichkeit des Gehörs, insbesondere für hohe Frequenzen. Im Hinblick auf die Altersstruktur der Besucher vieler kirchlicher Veranstaltungen sollte deshalb dieser Aspekt des Hörens bei Betrachtungen der raumakustischen Verhältnisse in Kirchen nicht unberücksichtigt bleiben.

Besonders genau untersucht ist der Einfluss des Alters auf den Verlauf der Hörschwelle. In Abb. 2.2 ist die Abweichung der Hörschwelle gegenüber dem Hörvermögen eines 20jährigen in Abhängigkeit von der Frequenz dargestellt; das Hörvermögen eines 20jährigen würde also in diesem Diagramm als Gerade auf dem Niveau von 0 dB erscheinen. Das Diagramm entspricht in seiner Darstellungsart übrigens den »Audiogrammen«, wie sie von Ohrenärzten üblicherweise aufgezeichnet werden. Bei den hier eingetragenen Kurven handelt es sich um den anhand umfangreicher Statistiken bestimmten Mittelwert für »gesunde Ohren«, d.h. Einflüsse lärmbedingter oder krankhafter Verschlechterungen des Hörvermögens sind in diesen Kurven noch gar nicht berücksichtigt.

Drei Eigenarten der Gehörsveränderungen lassen sich in diesem Diagramm erkennen. Zum einen setzen die Veränderungen schon im Alter von rund 30 Jahren ein, auch wenn die Abweichungen gegenüber dem Normalhörenden praktisch noch nicht spürbar sind. Mit zunehmendem Alter verschlechtert sich die Hörschwelle bei Frequenzen unterhalb etwa 1000 Hz zwar in relativ kleinen Schritten, oberhalb 1000 Hz nimmt die Hörschwel­lenverschiebung jedoch in erheblichem Maße zu. Auffällig ist zudem, dass diese Veränderung der Hörschwelle bei hohen Frequenzen bei Frauen deutlich weniger stark ausgeprägt ist als bei Männern. So beträgt beispielsweise die Hörschwellenverschiebung im Frequenzbereich um 4000 Hz bei Männern im Alter von 50 Jahren 16 dB, bei gleichaltrigen Frauen jedoch nur 9 dB; bei 70jährigen liegen die Werte bei 43 dB für Männer, aber bei nur 24 dB bei Frauen.

Wie erwähnt handelt es sich bei den Kurven in Abb. 2.2 um statistische Mittelwerte für die entsprechenden Altersgruppen. Individuell können die Werte aber in einem weiten Rahmen schwanken. Für den Frequenzbereich um 4000 Hz ist dies in Abb. 2.3 dargestellt: die an die einzelnen Kurven geschriebenen Prozentzahlen geben an, bei wie viel Prozent der in dieser Statistik erfassten Männer das Audiogramm unterhalb der entsprechenden Kurve liegt, d.h. wie viel Prozent schlechter hören, als es der Kurve entspricht. Für die Hälfte aller Probanden würde das Audiogramm demnach in den Bereich zwischen 75 und 25 % fallen, und nur 10 % würden besser hören, als es der obersten Kurve entspricht. Des Weiteren ist in dieser Darstellung zu erkennen, dass es auch bei den 20jährigen bereits einen Streubereich gibt, der allerdings für die Hälfte der Probanden nur 10 dB breit ist.

Allerdings sollten diese Hörschwellenverschiebungen nicht zu dem Schluss führen, dass man alle Lautstärkegrade entsprechend abgeschwächt hört, dass also gewissermaßen die Kurven gleicher Lautstärke im Ganzen verschoben würden. Vielmehr beruht die Altersschwerhörigkeit vorwiegend auf einer Beeinträchtigung des Hörvermögens für leise Töne und Geräusche, während die Kurven gleicher Lautstärke und auch die Lästigkeits- und die Schmerzschwelle praktisch nicht verschoben werden. Das hängt damit zusammen, dass bestimmte Bereiche des Innenohres bei niedrigen Schalldruckpegeln als »Vorverstärker« wirken, bei höheren Schalldruckpegeln jedoch die Schwingungen quasi unverstärkt weiterleiten. Und gerade diese Bereiche des Innenohres unterliegen in besonderem Maße der Schädigung infolge des Alters (aber auch der Schädigung durch Lärm). Infolgedessen werden höhere Schalldruckpegel noch mit annähernd »normaler« Lautstärke wahrgenommen, niedrige dagegen deutlich leiser oder gar nicht mehr. Anders ausgedrückt: Durch diese als »Recruitment« bezeichnete Erscheinung werden die Kurven gleicher Lautstärke nach oben zusammengeschoben; hat sich also – als ein individuelles Beispiel – die Hörschwelle aus Altersgründen um 40 dB



2.3 Individuelle Unterschiede der Hörschwelle für Frequenzen um 4000 Hz bei Männern unterschiedlichen Alters. Die Prozentzahlen geben an, für wie viel Prozent die Hörschwelle unterhalb der betreffenden Kurve liegt (nach ISO 7029).