



universität
wien

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

Akustische Eigenheiten von Konzertsälen

am Beispiel des großen Musikvereinssaals
sowie des großen Saales des Wiener Konzerthauses

Verfasser

Peter Zanzinger

angestrebter akademischer Grad

Magister der Philosophie (Mag.phil.)

Wien, 2013

Studienkennzahl lt. Studienblatt:

A 316

Studienrichtung lt. Studienblatt:

Musikwissenschaft

Betreuer:

Univ. – Prof. Dr. Christoph Reuter

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	1
1. Einleitung	2
2. Physikalische Grundlagen	4
2.1. Schallausbreitung.....	4
2.2. Frequenz und Wellenlänge	5
2.3. Schallgeschwindigkeit	7
2.4. Schallschnelle & Schalldruck.....	8
2.5. Schalldruckpegel	8
2.6. Schallkennimpedanz	9
2.7. Schallleistung und Schallintensität	9
3. Raumakustik	10
3.1 Geometrische Raumakustik	10
3.1.1. <i>Die geometrischen Gesetze der Schallausbreitung</i>	10
3.1.1.1. Schallreflexion	11
3.1.1.2. Schallreflexion an gekrümmten Flächen	12
3.1.1.3. Schallbeugung	15
3.1.1.4. Schallbrechung	17
3.1.1.5. Schalldämmung.....	17
3.1.2. <i>Echo</i>	18
3.1.3. <i>Nützlicher Schall, schädlicher Schall</i>	20
3.1.4. <i>Interferenzen & Moden</i>	21
3.2. Statistische Raumakustik	23
3.2.1. <i>Nachhall</i>	23
3.2.2. <i>Nachhallzeit</i>	25
3.2.3. <i>Schallabsorption</i>	29
3.2.3.1. Absorbertypen	29
3.2.4. <i>Hörsamkeit und Raumgeometrie</i>	31
3.2.5. <i>Messtechnik und Messgrößen</i>	40
3.2.5.1. Die Nachhallzeit T	42
3.2.5.2. Early Decay Time EDT	43
3.2.5.3. Das Bassverhältnis BR	44
3.2.5.4. Das Klarheitsmaß für Musik C_{80}	44
3.2.5.5. Das Stärkemaß G	45
3.2.5.6. Das Deutlichkeitsmaß für Sprache C_{50}	45
3.2.5.7. Seitenschallgrad LF	46

4. Akustische Messungen an ausgewählten Beispielen	47
4.1. Das Musikvereinsgebäude	47
4.1.1. <i>Der große Saal, Raumgeometrie und vorhandene Materialien</i>	48
4.1.2. <i>Messsituationen</i>	51
4.1.3. <i>Verwendete Messgeräte</i>	51
4.1.4. <i>Messergebnisse</i>	51
4.2. Das Wiener Konzerthaus.....	54
4.2.1. <i>Der große Saal, Raumgeometrie und vorhandene Materialien</i>	55
4.2.2. <i>Messsituation</i>	58
4.2.3. <i>Messergebnisse</i>	58
4.2.3.1. Messungen ohne Akustikvorhang	59
4.2.3.2. Messungen mit Absorptionsvorhang	60
4.3. Beurteilung der Messergebnisse	61
4.3.1. <i>Musikverein</i>	61
4.3.2. <i>Konzerthaus</i>	64
5. Zusammenfassung	68
6. Quellenverzeichnis	70
Anhang 1: Tabelle – Messergebnisse.....	73
Anhang 2: Messprotokolle	74
Abstract	80
Lebenslauf.....	81

Vorwort

Ich möchte das Vorwort dazu nutzen den Menschen zu danken, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Allen voran danke ich Herrn Univ. Prof. Dr. Christoph Reuter für die hervorragende und geduldige Betreuung während und vor der Entstehungsphase dieser Arbeit. Ich möchte aber auch Danke sagen, für die inspirierenden, unterhaltsamen und lehrreichen Jahre des Studiums.

Herrn Dipl. Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz danke ich für die ambitionierte Vermittlung der Grundzüge der akustischen Messtechnik und für die Erlaubnis die Messergebnisse, die im Zuge der universitären Lehrveranstaltung erhoben wurden, in diese Arbeit mit einfließen zu lassen.

Ganz besonders dankbar bin ich meiner Kollegin und lieben Freundin Julia Lang für die Unterstützung bei dieser Diplomarbeit sowohl in Bezug auf die Formalitäten also auch für den großartigen emotionalen Beistand.

Außerdem möchte ich meiner Familie Danke sagen, die mich über die gesamte Dauer meines Studiums hinweg unterstützt hat. Besonderer Dank gilt meinem lieben Vater Mag. Karl Zanzinger, der mir beim Korrekturlesen eine große Hilfe war.

1. Einleitung

Die Faszination, die eine besondere Akustik auf die Menschen ausübt ist ein bekanntes Phänomen. Häufig werden Konzertsäle ihrer Akustik wegen gelobt und andere aus demselben Grund gemieden.

Entstanden aus dem Bedürfnis zu verstehen, welche Umstände für einen „gut klingenden“ Konzertsaal erfüllt sein müssen geht es nun um die Herausforderung dieses „Gut“ in einen wissenschaftlichen Kontext zu bringen und sich nicht mit rein subjektiven Empfindungen zufrieden zu geben.

Neben der Tatsache, dass es nicht der Raum ist, der klingt, sondern die Schallwellen, die ausgehend von einer Schallquelle auf unser Ohr treffen, soll in dieser Arbeit auch untersucht werden, welche Auswirkungen die Raumstruktur auf ein Schallereignis hat.

Die Raumakustik, ein Teilbereich der Akustik beschäftigt sich mit diesen Kriterien, wie den unzähligen Einflüssen auf eine Schallwelle im Raum und versucht hier Antworten zu finden. Jedoch trotz der immer fortschreitenden technischen Möglichkeiten in Bezug auf die messbaren Faktoren eines Raumes, bzw. seines Klanges spielen die Hörerfahrungen, Gewohnheiten und gesellschaftlichen Paradigmen eine entscheidende Rolle für die Bestimmung der Qualität eines Konzertsaals. Besonders hervorzuheben sei natürlich zudem die Tatsache, dass bestimmte Konzertsäle für bestimmte Musikgattungen besser geeignet sind und deshalb eine Unterscheidung der Säle gemäß ihrer Nutzung unbedingt notwendig ist. Der hierfür wichtigste Faktor ist die Nachhallzeit.

Diese Arbeit gliedert sich im Wesentlichen in vier größere Abschnitte. Diese beinhalten die physikalischen Grundlagen des Schalls, die statistische und die geometrische Raumakustik sowie ein abschließendes Kapitel, in welchem die theoretischen Kriterien durch eigens durchgeführte Messungen und daraus erhobenen Daten praktisch untermauert werden.

Die physikalischen Grundlagen des Schalls, welche eingangs beschrieben werden, sollen eine Basis für das weitere Verständnis der Ausbreitung von Schallwellen schaffen. Darauf anschließend folgen die Betrachtung der Schallausbreitung im Raum, der Reflexion von Schallwellen, sowie der Entstehung von Echos, die zusammengefasst der geometrischen Raumakustik zugeordnet werden können.

Die statistische Raumakustik umschließt die Kriterien Hall, den Nachhall sowie die Schallabsorption und die Hörsamkeit. Zudem werden hierbei auch die Kriterien behandelt, die für eine optimale akustische Qualität essentiell sind.

Den Abschluss dieser Arbeit bildet die Untersuchung zweier beispielhafter Konzertsäle, die als wichtige Vertreter des Wiener Konzertlebens gelten. Zum einen der große Musikvereinssaal und zum anderen der große Saal des Konzerthauses. Die im Rahmen einer universitären Lehrveranstaltung erhobenen Daten sollen miteinfließen und mit den Ergebnissen der wichtigsten Vertreter in diesem Forschungsfeld verglichen werden.

2. Physikalische Grundlagen

Gerade in den großen Konzertsälen und Opernhäusern steckt das Wissen um das Verhalten von Schallwellen sowie die Arbeit und Zeit von Akustikern, damit die Zuhörer das musikalische Ereignis ungestört, ohne ungewollte Reflexionen, Echos oder Klangfarbenveränderungen genießen können. Um Genuss am Hören von Musik zu empfinden, ist es nicht notwendig die physikalischen Eigenschaften des Schalls bis ins kleinste Detail zu verstehen. Um jedoch eine objektive Aussage über die Qualität der Schallereignisse innerhalb eines Konzertsaaes treffen zu können umso mehr. Daher dient das folgende Kapitel der Erläuterungen einiger physikalischer Grundgesetze und zur Veranschaulichung des Verhaltens von Schall und Schallwellen innerhalb von Räumen, ohne den musikwissenschaftlichen Schwerpunkt zu sehr zu verlassen.

2.1. Schallausbreitung

„Schall ist also eine Störung der Luft, durch die er sich ausbreitet.“ (Hall 1997, S.21)
Schallwellen benötigen ein elastisches Medium, um sich auszubreiten. Es wird im Wesentlichen, je nach Medium zwischen Luft-, Wasser- und Körperschall unterschieden. Im Vakuum kommt es zu keiner Schallausbreitung, da die notwendigen Luftteilchen zur Ausbreitung fehlen (Dickreiter 2008, S. 1). Bei der Ausbreitung von Schallwellen in der Luft kommt es zur Verdichtung und Lockerung der Teilchen und Moleküle, die die Schallenergie weitergeben. Diese ändern ihre Position im Raum nur minimalst, indem sie parallel zur Ausbreitungsrichtung um ihrer Ruhelage vor und wieder zurück wandern. Entspricht die Bewegung der Teilchen der Ausbreitungsrichtung der Schallwelle, so wird diese als Longitudinalwelle bezeichnet.

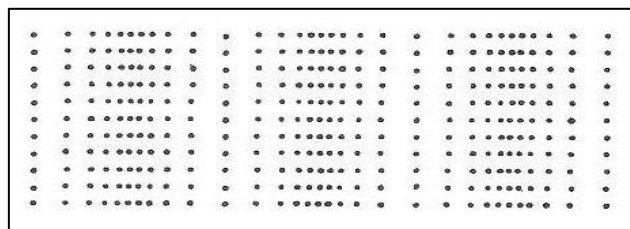


Abb. 1: Longitudinalwelle (Dickreiter 2008, S. 4)

Die Abbildung zeigt schematisch, wie es innerhalb der Longitudinalwelle zur Verdichtung und Lockerung der Teilchen kommt. Die Analogie mit Wasserwellen bezogen auf die Ausbreitung von Schallwellen liegt nahe, allerdings dient diese nur der bildlichen Vorstellung (Hall 1997, S. 21), weil die Teilchen bei Wasserwellen quer zur Ausbreitungsrichtung schwingen, was das typische Merkmal einer Transversalwelle ist (Römer 1994, S. 21).

Wesentlich jedoch bleibt die Tatsache, dass eine Schallquelle in ihrer unmittelbaren Umgebung Luftteilchen zum Schwingen bringt. Diese breiten die Schwingung durch das Zusammenstoßen mit weiteren Teilchen, wie es in Abbildung 3 zu sehen ist, in Form einer Welle über das Medium weiter aus (Dickreiter 2008, S. 1). Entfernt sich ein Teilchen von seiner Ruhelage so wird der Abstand als Elongation bezeichnet, wobei eine maximale Elongation als Amplitude bekannt ist (Auhagen 1994, S. 368).

Werden die Schwingungsverläufe eines Pendels, oder einer Stimmgabel aufgezeichnet, so entspricht die aufgezeichnete Form der Sinusfunktion. Diese lässt sich durch das Übertragen der Elongationen zu jedem Zeitpunkt auf eine Gerade, aus einer Kreisbewegung herleiten. Schwingende Körper führen in der Regel komplexere Bewegungen durch. Der Vorteil der Sinusschwingung liegt darin, dass sich komplexe Schwingungsformen in eine Reihe von Sinusschwingungen zerlegen lassen und infolge dessen leichter verständlich sind (Auhagen 1994, S. 370).

2.2. Frequenz und Wellenlänge

Hertz (Hz = 1/s), benannt nach dem Physiker Heinrich Hertz ist die Einheit der Frequenz (f), welche wiederum als Anzahl der Schwingungen pro Sekunde definiert ist. Die Frequenz, so beschreibt es Fasold, ist umgekehrt proportional zur Periodendauer (T) einer Schwingung (Fasold, Veres 2003, S. 15). Daraus ergibt sich folgender Zusammenhang.

$$f = \frac{1}{T}$$

Das Hörvermögen eines Menschen liegt im Wesentlichen im Frequenzbereich zwischen 16 Hz und 20.000 Hz, wobei sich die Grenzen je nach Literatur unterschiedlich darstellen. Der Bereich darüber wird als Ultra-, bzw. Hyperschall bezeichnet. Der Bereich des Infraschalls liegt unterhalb der menschlichen Hörschwelle. Die in Abbildung 2 gezeigte Darstellung gibt Aufschluss über die wichtigsten Frequenzbereiche der Akustik (Fasold, Veres 2003, S. 15-16).

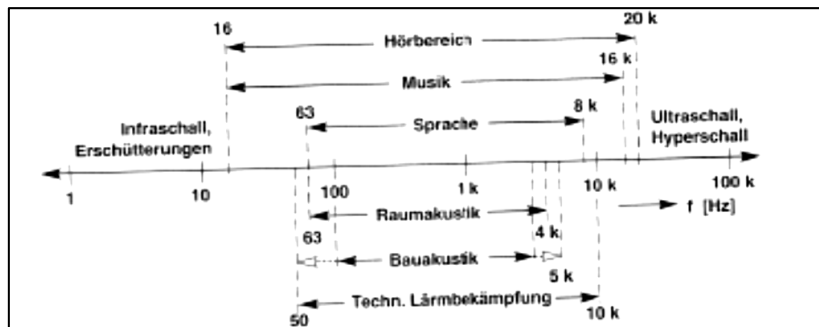


Abb. 2: Frequenzbereiche (Fasold, Veres 2003, S. 16)

Der Abstand zwischen den Wellenbergen wird als Wellenlänge (λ) bezeichnet (Fasold, Veres 2003, S.17) und dieser wiederum gibt Auskunft über die Frequenz des sich ausbreitenden Tones (Cremer 1948, S. 2).

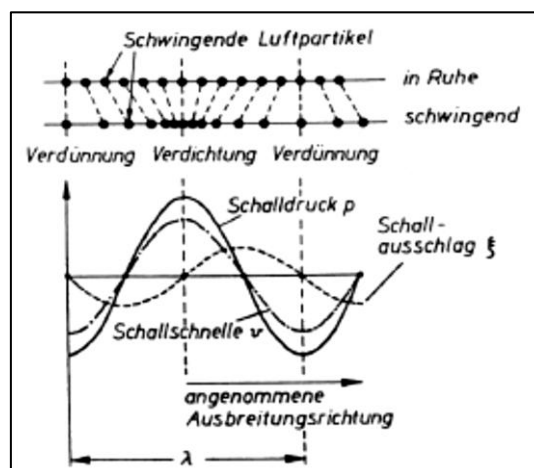


Abb. 3: Schallwelle (Veit 2003, S. 11)

Ein Ton mit einer Frequenz von 16000 Hz hat bei einer Temperatur von 20 °C eine Wellenlänge von 2,15 cm. Tiefe Töne hingegen sind langwellig. So erreicht ein Ton mit einer Höhe von nur 20 Hz eine Wellenlänge von 1717,10 cm, also über 17 m. Diese

Frequenzen werden als Tonhöhe wahrgenommen, wobei der Hörbereich des Menschen durchschnittlich wie schon erwähnt zwischen 16 und 16000 Hertz liegt. Physiologische und psychologische Störungen sind hierbei ausgenommen. Dies bedeutet also, dass unsere Fähigkeit Einzelschwingungen wahrzunehmen schon bei 16 Schwingungen pro Sekunde versagt (Cremer 1948, S. 2). In der folgenden Abbildung sind überblicksmäßig der Frequenzbereich des menschlichen Hörvermögens und die dazugehörigen Wellenlängen dargestellt.

Frequenz f	Wellenlänge λ
16 Hz	21,2 m
20 Hz	17 m
100 Hz	3,4 m
1000 Hz	0,34 m
10 000 Hz	0,034 m
16 000 Hz	0,021 m
20 000 Hz	0,017 m

Abb. 4: Frequenzabhängige Wellenlängen (Dickreiter 2008, S. 3)

Obwohl Hz eine exakte Angabe einer Tonhöhe zulässt, ist in der Musik die Einteilung in Halbtonschritte üblich. Die Einheit ist Cent, wobei ein Halbtonschritt 100 Cent entspricht. Zwölf Halbtonschritte ergeben eine Oktave oder 1200 Cent (Fasold, Veres 2003, S. 15-16).

2.3. Schallgeschwindigkeit

Die Schallgeschwindigkeit (Formelzeichen c), lässt sich als Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwelle in ihrem jeweiligen Medium definieren (Dickreiter 2008, S.2). Bekannt ist uns das Phänomen Schallgeschwindigkeit bei einem Gewitter. Will man die Entfernung eines herannahenden Gewitters wissen, zählt man die Sekunden die zwischen Blitz und Donner vergehen. Drei Sekunden Verzögerung entsprechen einem Kilometer Laufzeit des Schalls. Dies ergibt sich aus dem Wissen um die Schallgeschwindigkeit: $c = 344$ Meter pro Sekunde (Cremer 1948, S. 4). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls ist direkt proportional zur Dichte des Mediums in welchem er sich befindet. Bei Luft sind somit die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit die entscheidenden Faktoren und verändern die Schallgeschwindigkeit um rund 0,6m/s pro °C (Auhagen 1994, S. 373). Beträgt „ c “ bei 10°C etwa 338 m/s, wird die Geschwindigkeit des Schalls mit steigender Temperatur

höher und erreicht bei 20°C 344 m/s. Dies entspricht 1238,4 km/h (Dickreiter 2008, S. 2). In Festkörpern ist die Schallgeschwindigkeit am höchsten und beträgt in 10°C warmen Stahl 4880 m/s und in 20°C warmen Wasser 1484 m/s (Auhagen 1994, S. 374).

Die Schallgeschwindigkeit lässt sich mit der Frequenz und der Wellenlänge in folgende Beziehung setzen.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

2.4. Schallschnelle & Schalldruck

Nicht unwesentlich ist in weiterer Folge der Unterschied zwischen der Schallgeschwindigkeit und der Schallschnelle, also die Geschwindigkeit der einzelnen Luftteilchen innerhalb der Welle. Neben der Schallschnelle kommt es innerhalb der Schallwelle zu Änderungen des Drucks und der Dichte. Dieser auf das Trommelfell auftreffende und für die Schallempfindung essentielle Druck wird als Schalldruck bezeichnet. Bei akustischen Messungen wird vorzugsweise mit dem Schalldruck gearbeitet, weil dieser als einzelne Kenngröße aus mathematischer Sicht leichter zu verwenden ist. Das Maß für den Schalldruck ist Pascal, oder Newton/m² (1Pa = 1 N/m²) (Dickreiter 2008, S. 5). Er hat das Formelzeichen p und reicht von 2×10^{-5} Pascal, bei einem Ton mit einer Frequenz von 1000 Hz als Wahrnehmungsgrenze, bis 20 Pascal, was der Schmerzgrenze entspricht (Auhagen 1994, S. 374).

2.5. Schalldruckpegel

Der Schalldruckpegel, oder meist auch Schallpegel genannt ist eine weitere wichtige Größe die dazu dient, die Unterschiede des Schalldrucks leichter erfassen zu können. Gemessen in dB (Dezibel) ist der Schallpegel das zwanzigfache logarithmische Verhältnis eines gemessenen Schalldrucks (p) zu einem genormten Bezugsschalldruck (p_0), der etwa der Hörschwelle entspricht. Diese liegt bei 1000Hz bei 4dB und bei 2000Hz bei -2dB. Die Empfindung des Schalldruckpegels ist frequenzabhängig. Die Schmerzgrenze für das menschliche Gehör liegt bei 1000Hz bei 130 dB und bei 2000Hz bei 120 dB

(Dickreiter 2008, S.7), wobei diese Grenze nicht verallgemeinert werden kann und je nach persönlichem Empfinden variiert.

2.6. Schallkennimpedanz

Die Schallkennimpedanz Z_0 ist ein Charakteristikum für jedes Übertragungsmedium. Es handelt sich um das Verhältnis von Dichte und Schallgeschwindigkeit des Mediums und gibt somit in gewisser Weise den Widerstand an, welchen das Schallfeld zu überwinden hat (Veit 2003, S. 16).

2.7. Schallleistung und Schallintensität

Die Begriffe Schallleistung und Schallintensität dienen zur Beschreibung des Energiegehalts einer Schallquelle bzw. des Schallfeldes (Dickreiter 2008, S.8). Jede Schallquelle hat somit eine eigene Schallleistung, wobei diese das Produkt aus der Schallintensität und der Fläche ist, die der Schall durchdringt. Die Einheit ist dB (Veit 2003, S. 17).

Die Schallintensität ist eine gerichtete Größe, um die beim Empfänger ankommende Schallleistung bestimmen zu können. Sie gibt die Schallenergie an, die pro Zeit durch eine bestimmte Fläche hindurchtritt (Weinzierl 2008, S. 26).

Die Schallintensität ist somit das Produkt aus Schalldruck und Schallschnelle mit der Einheit: W/m^2 (Fasold, Veres 2003, S. 24).

3. Raumakustik

Das folgende Kapitel behandelt das Thema Raumakustik. Die Raumakustik, als Teilbereich der Akustik, beschäftigt sich ganz speziell mit dem Wohlklang von Musik und den für das Verständnis von Sprache ausschlaggebenden Faktoren. Es kommt auf die Beschaffenheit des Raumes, also seine Größe, das Volumen und die Reflexions-, bzw. Absorptionsfähigkeit seiner Begrenzungsflächen an (Hall 1997, S. 319).

Im Wesentlichen wird die Raumakustik in geometrische und statistische Raumakustik aufgeteilt, wobei erstere, vor allem die geometrischen Gesetze der Schallausbreitung und Reflexionen aber auch störende Faktoren, wie Echos oder Raummoden behandelt (Cremer 1948, Inhaltsverzeichnis). Die statistische Raumakustik beschäftigt sich mit den Faktoren Hall bzw. Nachhall, der Schallabsorption sowie der Hörsamkeit, wie auch der idealen Nutzung von Räumen (Cremer 1978, Inhaltsverzeichnis).

3.1 Geometrische Raumakustik

3.1.1. Die geometrischen Gesetze der Schallausbreitung

„Ein allgemeines, von Fermat aufgestelltes Prinzip besagt, daß jede Wellenausbreitung immer auf dem schnellsten Weg vom Sender zum Empfänger gelangt. Dieser schnellste Weg ist aber in einem Medium mit gleicher Fortpflanzungsgeschwindigkeit eben auch der kürzeste, also bei der freien Ausbreitung eine Gerade.“ (Cremer 1978, S. 8)

Bei der Schallausbreitung im Raum ist ein Schallereignis, im Gegensatz zum freien Schallfeld Störungen, wie frequenzabhängigen Ablenkungen, Reflexionen oder schallabsorbierenden Flächen ausgesetzt. Es entsteht ein diffuses Schallfeld, bei welchem die Schallenergie im besten Falle gleichmäßig über den Raum verteilt ist. Ein „freies“ Schallfeld besteht somit nur in eigens gebauten reflexionsarmen Räumen, oder auf freien, beispielsweise schneebedeckten Flächen. Hier kann sich der Schall ausbreiten ohne behindert oder abgelenkt zu werden (Dickreiter 2008, S. 9).

Allerdings sind die Behandlung raumakustischer Probleme sowie die Ausbreitung von Schallwellen schwer vorstellbar, weshalb Furrer (1956, S. 52) empfiehlt, sich einfache Schallstrahlen zu denken, an denen die Reflexionsgesetze der geometrischen Raumakustik vereinfacht dargestellt werden können. Folgende Bedingungen sind für die

Reflexion von Bedeutung: Die Abmessungen des Raumes müssen größer sein als die Abmessungen der Wellenlängen des zu betrachtenden Schallereignisses, da sonst Beugungserscheinungen auftreten. Außerdem muss das reflektierende Medium einen sehr hohen Schallwellenwiderstand haben, um Schallabsorption zu verhindern (Furrer 1956, S. 52).

3.1.1.1. Schallreflexion

Einer Änderung der Ausbreitungsrichtung liegt meist eine totale, oder teilweise Reflexion des Schalles zugrunde. Diese kann den gesamten Frequenzbereich, oder auch nur Teile davon betreffen. Zusätzlich zur Richtungsänderung wird dabei dem Schall Energie entzogen. Zur vereinfachten Veranschaulichung nimmt man an, dass sich Schall wie auch Licht in Form eines Strahles ausbreitet und den aus der Optik bekannten Gesetzen unterliegt (Meyer 2004, S. 143). Gemäß den Reflexionsgesetzen gilt auch bei der Reflexion von Schallwellen: Einfallswinkel ist gleich Ausfallswinkel, wobei bedingt sein muss, dass die Fläche, an welcher der Schall zurückgeworfen wird eine bestimmte Größe, im Vergleich zur Wellenlänge hat. Wird ein Schallstrahl von einer Ecke zurückgeworfen, wird er zweimal so reflektiert, sodass der ausfallende Strahl parallel zum Einfallenden zurückkehrt (Dickreiter 2008, S. 9).

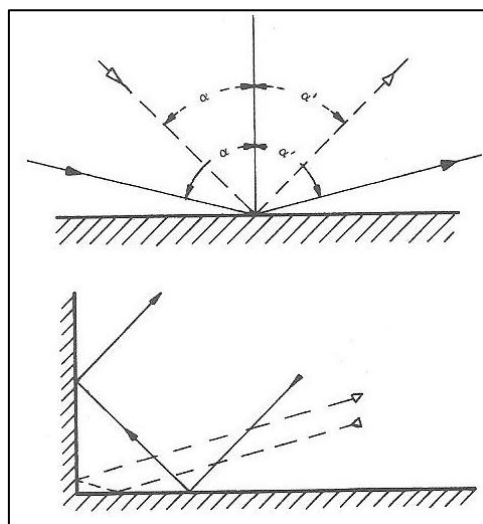


Abb. 5: Schallreflexion an einer ebenen Fläche und an einer Ecke (Dickreiter 2008, S. 10)

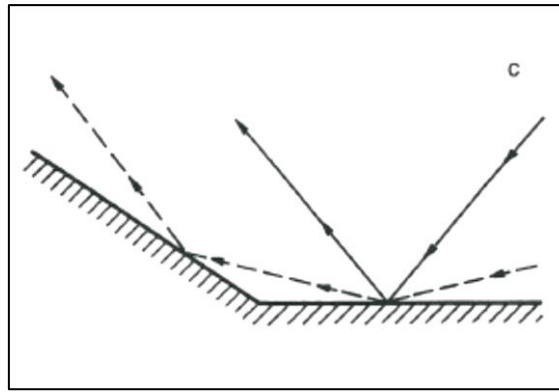


Abb. 6: Schallreflexion an Wänden mit einem stumpfen Winkel (Meyer 2004, S. 143)

Die in Abbildung 6 dargestellte Situation beschreibt das Reflexionsverhalten eines Schallstrahles bei einer Ecke mit einem stumpfen Winkel. Trifft der Schallstrahl in einem steilen Winkel auf die Begrenzungsfläche kommt es zu einer einfachen Reflexion, während der Schallstrahl doppelt gespiegelt wird, wenn er flach einfällt (Meyer 2004, S. 143).

3.1.1.2. Schallreflexion an gekrümmten Flächen

Sehr häufig wird in der Raumakustik mit gekrümmten Wandflächen gearbeitet, um störende Reflexionen zu vermeiden und zugleich den Schall gleichmäßig über den Raum verteilen zu können. Eine Sonderform dieser architektonischen Gegebenheiten begegnen uns in Kirchen, wo Kuppeln - sofern zugänglich - für einen ganz speziellen akustischen Genuss berühmt sind (Dickreiter 2008, S. 11-12). Besonders eindrucksvoll kann man dieses Phänomen in sogenannten Flüstergalerien erleben. Hier kann ein Empfänger selbst geflüsterte Sprache verstehen (sofern er sich in der Sammelbrennzone befindet), da es durch die Kuppelform in deren Brennpunkt zur Konzentration des Schallereignisses kommt, selbst wenn das Schallereignis des Sprechers über den direkten Weg nicht zu hören ist (Cremer 1948, S. 40-41).

Anhand der folgenden Abbildungen werden die möglichen Reflexionen, die beim Auftreffen auf eine konkave Fläche entstehen, erklärt.

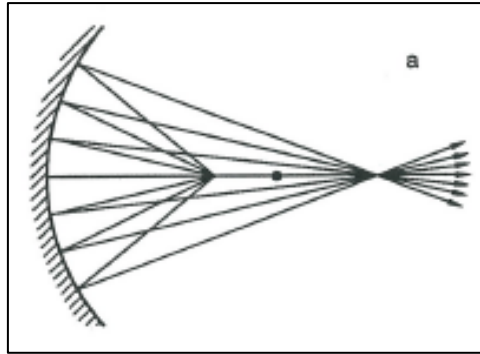


Abb. 7: Reflexion an einer gewölbten Fläche; Schallquelle zwischen Krümmungsradius r und $r/2$ (Meyer 2004, S. 144)

Befindet sich die Schallquelle zwischen dem Mittelpunkt und dem halben Krümmungsradius, treffen sich die Reflexionen in einem Punkt außerhalb des Krümmungsmittelpunktes. Eine derartige Schallkonzentration ist, sofern sie in den Bereich der Zuhörer fallen sollte nicht erwünscht (Meyer 2004, S. 143-144).

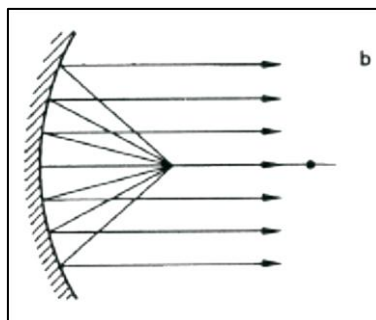


Abb. 8: Reflexion; Schallquelle auf halbem Krümmungsradius (Meyer 2004, S. 144)

Die reflektierten Strahlen verlassen den Spiegel parallel zueinander, wenn die Schallquelle gleich dem halben Krümmungsradius ist. Ein Parabelspiegel eignet sich für die Ausnützung dieses Effektes am besten (Meyer 2004, S. 144).

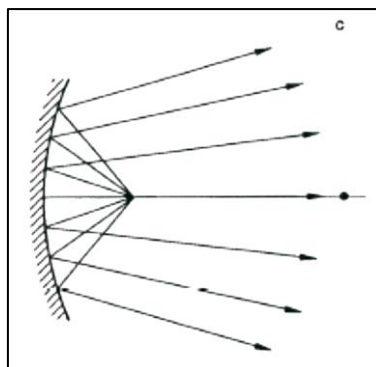


Abb. 9: Reflexion; Schallquelle innerhalb des halben Krümmungsradius (Meyer 2004, S. 144)

Liegt die Schallquelle auf einem Punkt der kleiner als der halbe Krümmungsradius ist, laufen die reflektierten Strahlen auseinander. Verlängert man den Strahlenverlauf käme es zu einem Brennpunkt, der hinter der gewölbten Fläche liegt, wie in Abbildung 10 nochmal verdeutlicht. Die reflektierten Strahlen ähneln in diesem Fall den Reflexionen die bei einer konvexen Wandfläche zustande kommen (Meyer 2004, S. 144).

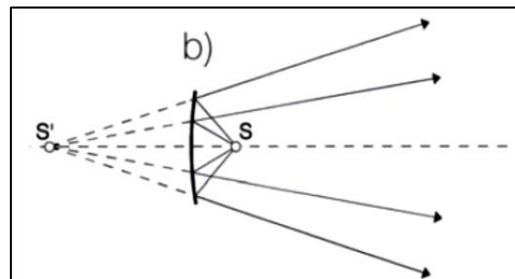


Abb. 10: Reflexion an einer gekrümmten Fläche; Schallquelle innerhalb des halben Krümmungsradius (Kuttruff 2009, S. 117)

Befindet sich die Schallquelle außerhalb des Krümmungsradius kommt es zu einer Bündelung und anschließenden Streuung der Schallstrahlen (Kuttruff 2009, S. 117)

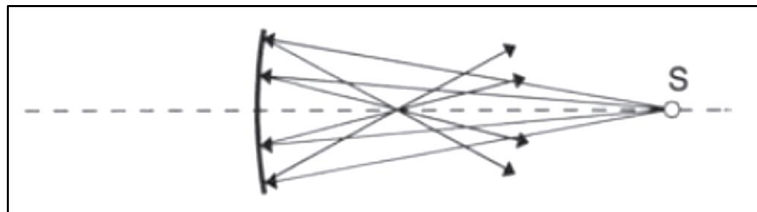


Abb. 11: Reflexion an einer gekrümmten Fläche; Schallquelle außerhalb des Krümmungsradius (Kuttruff 2009, S. 117)

Aus diesen Beispielen kann man erkennen, dass die Verwendung von konkaven Wandflächen sowohl im Zuschauerbereich, als auch im Bereich des Podiums nicht ideal ist, da die Gefahr der Brennpunktbildung besteht. Zur besseren Vergleichbarkeit zeigt die nachstehende Abbildung die Reflexionswirkung einer konvexen Fläche.

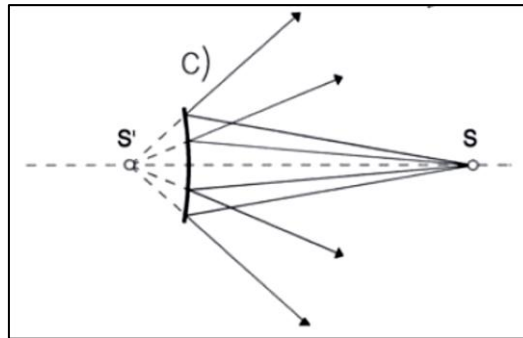


Abb. 12: Reflexion an einer konkaven Fläche (Kuttruff 2009, S. 117)

3.1.1.3. Schallbeugung

Die Schallbeugung oder auch Diffraktion (Werner 2009, S. 67) ist ein weiterer spezieller Fall, der bei der Ausbreitung des Schalls im Raum von Bedeutung ist. Wie der Name schon sagt kommt es bei der Schallbeugung zur frequenzabhängigen Umgehung von Hindernissen, die zwischen Schallquelle und Hörer befindlich sein können. Lothar Cremer beschreibt das Problem so:

„Es gehört zu den besonderen Schwierigkeiten und Reizen der Raumakustik, daß hier sowohl große Wellenlängen vorkommen, die vorzugsweise um Gegenstände herumbeugen und auch von gegliederten Wänden geometrisch reflektiert werden, als auch sehr kleinen Wellenlängen, die eine Schattenbildung ermöglichen und an gegliederten Wänden diffus reflektiert werden.“ (Cremer 1948, S. 9)

Da ein Klang meist aus vielen Teilfrequenzen besteht kommt es bei Hindernissen die Schallquelle und Hörer trennen, häufig zur Schallbeugung und zur sogenannten Schallschattenbildung. Die langwelligen, tiefen Anteile beugen um das Hindernis herum, während die hochfrequenten Anteile reflektiert werden und für den dumpf klingenden „Schatten“ verantwortlich sind (Dickreiter 2008, S.12). Des weiteren schreibt Cremer:

„Man kann diese unterschiedliche Behandlung hoher und tiefer Töne am deutlichsten an der Schallschattenwirkung kleiner Hindernisse beobachten. Wandert man beispielsweise an einem rauschenden Gebirgsbach entlang und trennt vorübergehend ein kleiner Felsvorsprung Weg und Bach, so daß dieser nicht mehr zu sehen ist, so bleibt er doch noch zu hören, [...]. Dabei erscheint er nicht nur leiser, sondern vor allem auch tiefer. [...] Die tieferen Teiltöne, und nur diese, beugen um den Vorsprung herum.“ (Cremer 1948, S. 9-10)

Eine erfolgreiche Reflexion des Schalles ist nur möglich, wenn einige Faktoren erfüllt sind, da eine Beugung bei Hindernissen erfolgt, die sogar größer sind, als die doppelte Wellenlänge des zu reflektierenden Schalles. Um eine vollständige Reflexion zu provozieren, muss das Hindernis dementsprechend groß sein, um vor allem auch die tieffrequenten Wellen zu reflektieren. Außerdem gilt, je näher die Schallquelle und je steiler der Einfallswinkel, desto wahrscheinlicher ist eine vollkommene Reflexion (Dickreiter 2008, S. 13).

Veit vergleicht die Schallbeugung mit der Blendenwirkung in der Optik. Die Schattenbildung gemäß der Größe der Blende wie sie bei Lichtstrahlen entsteht ist bei der Akustik nicht gegeben, da die Lichtwellenlänge viel geringer ist als die Länge von Schallwellen (Veit, 2003, S. 20f).

Ist die Öffnung des Hindernisses gleich, oder kleiner als die Wellenlänge, dann wird der durchdringende Schall an der Blende gebeugt und breitet sich danach kugelförmig aus. Dieses Phänomen ist in Abbildung 13 dargestellt.

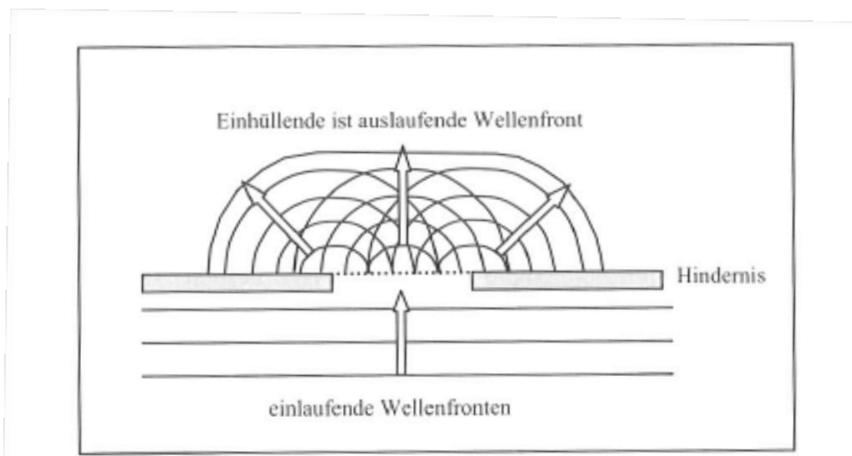


Abb. 13: Schallbeugung (Werner 2009, S. 67)

Die Anteile der Schallwelle, die nicht durch die Blende gebeugt werden, werden an der Grenzfläche reflektiert. Als Beispiel gibt Veit ein offenes Fenster eines Wohnzimmers an, welches für die Schallwellen einer in der Mitte des Raumes befindlichen Quelle vollkommen schallabsorbierend wirkt, weil der Schall hier ungehindert ins freie Feld dringen kann und nicht wie an den Grenzflächen des Zimmers zurückgeworfen wird (Veit 2003, S. 21).

3.1.1.4. Schallbrechung

Es kommt beim Auftreffen eines Schallstrahls auf eine Grenzfläche nicht nur zur Reflexion, sondern auch hier gemäß den Gesetzen der Optik zur Brechung. Der entscheidende Faktor hierbei ist die „akustische Dichte“ des Ausbreitungsmediums. Je langsamer die Schallgeschwindigkeit, desto akustisch dichter ist das Medium. Die Unterschiede der Schallgeschwindigkeit der beiden Übertragungsmedien werden beim akustischen Brechungsindex n in Verhältnis gebracht (Veit 2003, S. 21-22).

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}$$

Eine Brechung zum Lot findet statt, wenn der Schall in das Medium mit der niedrigeren Schallgeschwindigkeit eindringt. Umgekehrt erfährt der Schall eine Brechung vom Lot, wenn er aus dem akustisch dichteren Medium kommt (Veit 2003, S. 21-22).

3.1.1.5. Schalldämmung

Ein nicht außer Acht zu lassender Teil der Akustik ist die Schalldämmung. Nicht immer geht es nur um einen guten Klang innerhalb von Räumen und Sälen, sondern, vor allem in der Bauakustik, gilt es den Schall in Zaum zu halten und zu verhindern, dass dieser ins freie Schallfeld, oder - noch wichtiger in benachbarte Wohnungen und Gebäude gelangt. Im Wesentlichen muss hier zwischen Körper- und Luftschalldämmung unterschieden werden (Furrer 1956, S. 147).

Das in dB angegebene und mit R abgekürzte Schalldämmmaß gibt Auskunft über die Qualität der Materialien hinsichtlich ihrer dämmenden Wirkung. Diese hängt in erster Linie von ihrer Masse ab. R besteht aus dem Verhältnis des auf das Dämmmaterial auftreffenden Schalldrucks und des durchgelassenen Schalldrucks. Trotz der Frequenzabhängigkeit liegt der Vorteil des Schalldämmmaßes darin, mit nur einer Zahl eine Aussage über das Schalldämmverhalten von Baumaterialien zu erhalten (Dickreiter 2008, S. 19).

Material, Dicke	Schalldämm-Maß in dB
Blocksteine, 25 cm	49 bis 54
Kalksandstein, 12 cm (20 cm)	46 bis 50 (50 bis 55)
Beton, 12 cm (20 cm)	47 bis 52 (53 bis 59)
Gipsplatten, 6 cm (10 cm)	30 bis 34 (36 bis 40)
Holzspanplatten, 1 cm (4 cm)	17 bis 20 (26 bis 30)
Backsteinwand, 11 cm, verputzt	44 bis 48
leichte Zimmertür	10 bis 20
schalldämmende Spezialtür	35 bis 45
doppelt verglaste Fenster	30 bis 40
Regiefenster	bis 65

Abb. 14: Schalldämmmaße (Dickreiter 2008, S. 20)

Wie schon erwähnt wirken schwere, luftdichte und harte Materialien bezüglich der Dämmwirkung am besten. Genau diese sind allerdings für eine gute Raumakustik wiederum kontraproduktiv, weshalb Schalenkonstruktionen - sogenannte „Raum in Raum“ Systeme - vor allem in Probe-, Studio- und Regieräumen zur Anwendung kommen. Schalldämmendes Material dient als Schale und schalldämpfende Werkstoffe als Verkleidung der Innenseite (Weinzierl 2008, S. 278).

3.1.2. Echo

Die Echobildung hat mit den unterschiedlichen Laufzeiten des Direktschalls und den Reflexionen eines Schallereignisses zu tun. Der Zeitpunkt ab welchem die später einfallenden Reflexionen als störend empfunden werden liegt bei einer Laufzeitdifferenz von 50 ms und wird als Verwischungsschwelle bezeichnet. Ab einer Laufzeitdifferenz von 100 ms, was einer Laufwegdifferenz von 34 Metern entspricht, wird von Echogrenze gesprochen (Fasol, Veres 2003, S. 52).

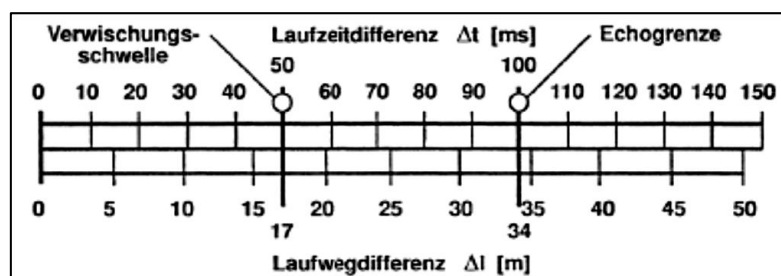


Abb. 15: Verwischungsschwelle und Echogrenze (Fasold, Veres 2003, S. 53)

Trifft der reflektierte Klang etwa 100 ms nach dem Direktschall aufs Trommelfell des Hörers, so sind sogar einsilbige Wörter als Echo wahrzunehmen. Handelt es sich hingegen um ein impulshaftes Klangereignis so kann die Differenz der Laufzeiten auch kürzer sein, um ein Echo zu provozieren. Liegt die Zeit zwischen Direktschall und den Reflexionen unter der sogenannten Verwischungsschwelle so wird der Klang begünstigt und sorgt für eine Verbesserung der Akustik (Cremer 1948, S. 54). Um die Verständlichkeit von Sprache zu gewährleisten wird versucht im Zuge der raumakustischen Planung ein Mittelwert von 50 ms zu erzielen. Bei Musik ist diese Grenze nicht so ausgebildet, weshalb man versucht einen Wert von 80 ms zu erreichen (Fasold, Veres 2003, S. 52).

Abgesehen von den unterschiedlichen Laufzeiten ist auch die Schallleistung bzw. die Schallintensität ein entscheidender Faktor. So ist unmittelbar nach einem Pistolenschuss meist ein Echo wahrzunehmen, wogegen die Reflexionen eines leisen Schallereignisses mit dem Hintergrundschallpegel verschmelzen und somit nicht mehr hörbar sind. Zusätzlich dazu gibt es auch die Möglichkeit, dass das Echo zum Schallimpuls durch die eigenen Reflexionen überdeckt wird. Dies ist der Fall wenn die Schallwellen sehr diffus reflektiert werden. Tritt der Fall ein, dass die Echoimpulse sehr dicht hintereinander auf das Trommelfell des Hörers treffen, so nimmt dieser die Summe der Impulse als Klang wahr. Dies wird als Klang - Echo bezeichnet (Cremer 1948, S. 60).

Eine andere Form, bei der ein Echo mehrmals reflektiert wird ist das sogenannte Flatterecho (Fasold, Veres 2003, S. 159). Vor allem bei parallelen Boden und Deckenflächen, sowie bei gleichen Wandpaaren kommt es zu einem mehrmaligen Zurückwerfen des Schallereignisses. Dieses raumakustische Phänomen ist bereits bei einem Wandabstand von etwa sieben Metern zu beobachten, wobei demzufolge die Laufzeit des Echos nur 40 ms beträgt (Cremer 1948, S. 62).

Ein Flatterecho gilt in der Raumakustik, sowie auch in der Aufnahmetechnik als besonders störend, weshalb vor allem bei neueren Konzertsälen die Errichtung von parallelen Wänden vermieden wird. Nichtsdestotrotz gibt es auch in Sälen, bei denen ein besonderes Augenmerk auf die Raumakustik gelegt wurde, immer wieder Flatterechos. Diese sind allerdings meist an Positionen im Raum, von welchen nur selten ein impulshaftes Schallereignis ausgeht, um ein Mehrfachecho hervorzurufen.

„Im allgemeinen wird man auch bei den Echos annehmen können, daß sie in die betreffenden Räume nicht absichtlich eingebaut worden sind, sondern dass sie ihre Entstehung dem Zufall verdanken. Es wäre aber nach unseren Darlegungen gar nicht einmal schwierig, sie zu konstruieren.“ (Cremer 1948, S. 71)

3.1.3. Nützlicher Schall, schädlicher Schall

Neben der Tatsache, dass Musikveranstaltungen, oder teilweise sogar Gespräche im Freien ohne nützliche Reflexionen ihre Verständlichkeit bzw. Dynamik einbüßen, liegt es nahe, dass zwischen nützlichen und schädlichen Reflexionen unterschieden werden muss. Von frühester Kindheit an ist der Mensch an Reflexionen gewohnt. Sie dienen teilweise sogar als Orientierungshilfe (Cremer 1948, S. 73).

Diese Unterscheidung ist von der Laufzeitdifferenz zwischen Direktschall und nachfolgenden Reflexionen abhängig. Eine große Zeitdifferenz zwischen den Schallereignissen ist negativ und eine kurze Abfolge positiv zu beurteilen (Cremer 1948, S. 73).

In Bezug auf Sprache sind die maßgebenden Kriterien die kurz gesprochenen Konsonanten. Liegt die Laufzeitdifferenz bei diesen nämlich unter der Verwischungsschwelle, so überlagern sich Direktschall und Reflexionen und erzeugen meist eine Verstärkung. Störend für die Sprachverständlichkeit oder den Redner selbst wird es, wenn die Laufzeitdifferenz über dem Schwellenwert liegt, was eine „Verdopplung“ der Konsonanten zur Folge hat. In weiterer Folge sollte bei einem Vortrag der Abstand zwischen Redner und Rückwand 8,5 Meter nicht überschreiten bzw. die Rückwand sollte sonst geneigt werden, da er sich somit merklich über der Verwischungsschwelle befindet, was den Redefluss stören könnte (Cremer, 1948, S. 75-76).

Wesentlich schwieriger entfaltet sich die Setzung der Verwischungsschwelle in Bezug auf Musik, da hier zusätzlich zum Interpretationsspielraum noch die persönliche Vorliebe für die notwendige Nachhallzeit hinzukommt. (Cremer 1948, S. 76).

Ein weiteres Beispiel für die Nützlichkeit von Reflexionen fällt auf, wenn ein Sprecher in einem stark absorbierenden Umfeld, z.B. einer freien Fläche mit einer großen Menge Neuschnee, nicht in die Richtung des Hörers spricht, dann wird der Großteil der Schallenergie absorbiert, das Gesagte wird daher nicht verstanden. Dieser Fall soll von

der Wichtigkeit der Reflexionen zeugen, denn ein ähnliches Problem kennen Musiker, die im freien Spielen. Auch hier fallen die notwendigen Reflexionen weg, was zur Folge führt, dass sich die Musiker selbst schlecht hören (Cremer 1948, S. 77).

3.1.4. Interferenzen & Moden

Schallwellen breiten sich innerhalb eines Raumes aus, ohne sich zu beeinflussen. Da das Ohr die Summe aus den beiden Schalldrücken empfängt, kann es zu sogenannten Interferenzerscheinungen kommen. Überlagern sich zwei Schallwellen mit der gleichen Frequenz an der Stelle des Wellenberges werden die Schalldrücke addiert und es kommt zu einer Erhöhung des Lautstärkeempfindens (Bergeijk 1960, S. 50). Für dieses, als konstruktive Interferenz beschriebene Phänomen gelten die Voraussetzungen: „[...], dass beide Wellen amplitudengleich, frequenzgleich und gegeneinander nicht phasenverschoben sind.“ (Werner 2009, S. 64). Treffen ein Wellenberg und ein Wellental aufeinander löscht sich das Signal aus, sofern der Schalldruck des jeweiligen Schallereignisses gleich ist (Bergeijk 1960, S. 50). Diesen Fall bezeichnet man als destruktive Interferenz, sofern beide Wellen um 180° phasenverschoben, jedoch frequenz- und amplitudengleich sind (Werner 2009, S. 64).

Zusammenfassend beschrieben ist die Ursache von Interferenzerscheinungen einerseits eine zeitunabhängige, konstante Phasenverschiebung und andererseits eine konstante Frequenz der sich überlagernden Wellen (Werner 2009, S. 63).

Eine weitere Besonderheit ergibt sich wenn zwei Signale mit sich minimal unterscheidender Frequenz übereinander gelegt werden. Daraus resultiert die sogenannte Schwebung, was als abwechselnd ansteigende und abfallende Lautstärke empfunden wird, weil eine Phasenübereinstimmung zyklisch einer Phasenopposition folgt (Auhagen 1994, S. 370-371). Die entstandene Schwebungsfrequenz ist die Differenz aus den beiden Teilschwingungen pro Sekunde (Hall 1997, S.85).

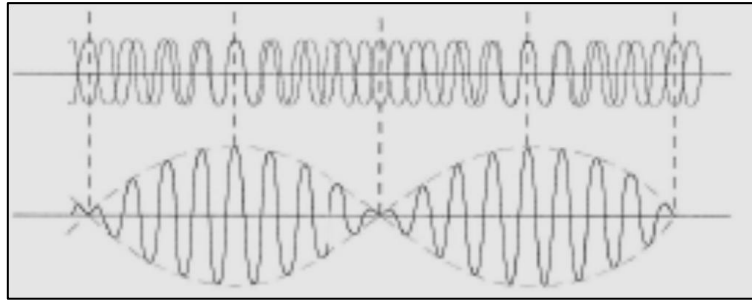


Abb. 16: Schwebung (Hall 1997, S. 85)

Die Schwebung hat vor allem ihre Bedeutung beim Einstimmen von Instrumenten. Ist die Schwebung beim Anspielen der identischen Saiten zweier Instrumente nicht mehr zu hören, so sind diese gleich gestimmt. Wird die Schwebungsfrequenz schneller, so wird der Unterschied zwischen den beiden Teilschwingungen größer. Der Bereich zwischen der Schwebung und dem Zeitpunkt, ab welchem zwei unterschiedliche Frequenzen zu hören sind wird als Rauigkeit bezeichnet (Hall 1997, S. 85-86).

Werden konstante Schallereignisse innerhalb eines Raumes reflektiert kann es zur Bildung von stehenden Wellen oder sogenannten Moden kommen. Diese Sonderformen bilden eine punktuelle Schallverteilung im Raum aus, die anhand der Amplitudenänderungen, bezogen auf die Position des Zuhörers, wahrzunehmen ist. Dieses Phänomen ist frequenzabhängig, weshalb es auch als Resonanz- oder Eigenfrequenz bezeichnet wird. Die nachstehende Abbildung zeigt die Verteilung des Schalls einer stehenden Welle mit ihren Schwingungsknoten und Schwingungsbäuchen in einem quaderförmigen Raum (Römer 1994, S. 82).

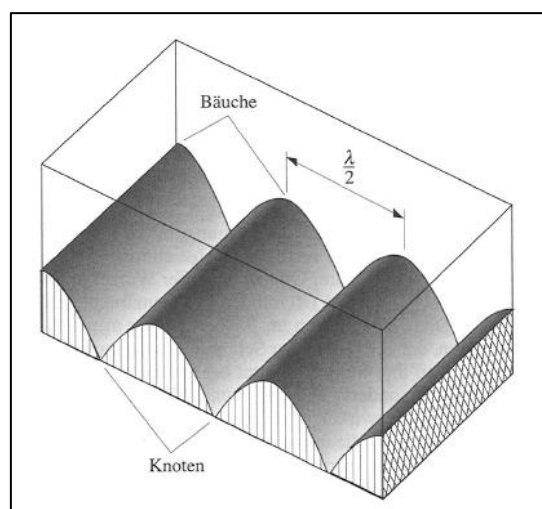


Abb. 17: Stehende Welle (Römer 1994, S. 83)

Das folgende Zitat von Marschall Long soll die Voraussetzungen zur Entstehung von Moden verdeutlichen.

„If the room dimensions are a low integer multiple of one another, then modal frequencies will coincide. Under these conditions the energy in the room will tend to coalesce into a few modes, which will strongly color the sound.“ (Long 2006, S. 295-296)

3.2. Statistische Raumakustik

Die statistische Raumakustik nimmt sich des Problems an, wie die Charakteristik eines Raumes mit physikalischen Vorgängen beschrieben werden kann (Cremer 1961, S. 10).

3.2.1. Nachhall

„Es ist der große Verdienst des amerikanischen Physikers WALLACE CLEMENT SABINE, erkannt und gezeigt zu haben, daß als eine derartige allgemeine Kennzeichnung der Hörsamkeit eines Raumes der Nachhall betrachtet werden kann, der nach plötzlichem Abschalten einer Schallquelle mehr oder weniger lang zu hören ist.“ (Cremer 1961, S. 10)

Aufgrund der Tatsache, dass die Nachhalldauer an allen Punkten eines Raumes den gleichen Wert beträgt, eignet sich dieses Kriterium zur Charakterisierung von Räumen. Wallace C. Sabine stellte dies durch Messungen des Nachhalls mittels einer Stoppuhr und Orgelpfeifen, die als Schallquelle dienten, fest (Cremer 1961, S. 10).

Der Nachhall ist somit die Summe der Schallvorgänge innerhalb eines Raumes nach dem Abschalten einer Schallquelle. Die folgende Grafik zeigt einen typischen Pegelverlauf eines Nachhallvorganges, ausgehend vom Abstellen der Schallquelle bis zum Ausklingen in den Störschallpegel. Die Zeit dazwischen wird als Nachhalldauer bezeichnet (Meyer 2004, S. 148).

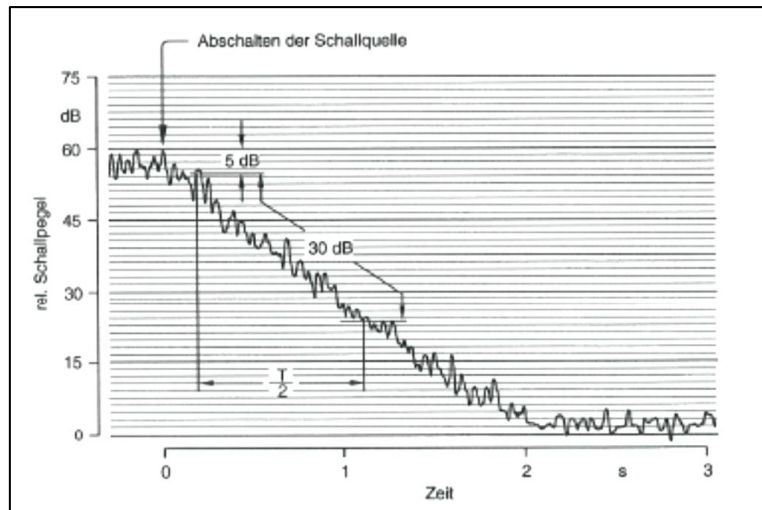


Abb. 18: Pegelverlauf des Nachhalls (Meyer 2004, S. 149)

Neben dem Direktschall empfängt das Ohr in einem Raum mit einer Schallquelle eine Vielzahl an Reflexionen, die sich zum einen als Hall bzw. Nachhall präsentieren und zum anderen bei einer Zeitdifferenz von 50 Millisekunden als Echo wahrzunehmen sind. Durch eine Abstandsverkürzung zur Schallquelle kann der Einfluss des Nachhalls minimiert werden. Mit größerem Abstand gehen die Anteile des Direktschalles verloren und der Hall überwiegt. Die Grenze, an der der Direktschall gleich dem Raumschallpegel ist, wird bei einer kugelförmigen Schallquelle als Hallradius bezeichnet (Veit 2003, S. 18-19).

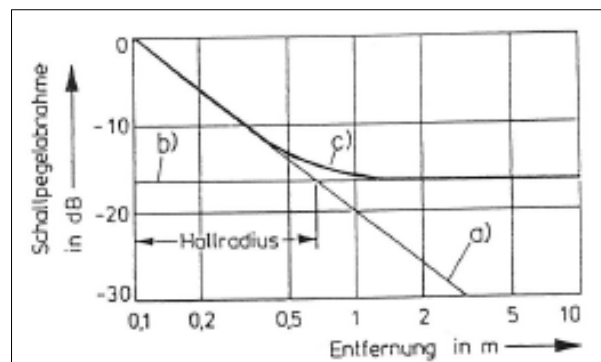


Abb. 19: Hallradius (Veit 2003, S. 19)

Abbildung 19 veranschaulicht den Hallradius bei unterschiedlichen räumlichen Gegebenheiten, wobei a) den Nachhall im freien Feld und b) den Nachhall im geschlossenen Raum darstellt. Der Kurve c) beschreibt den resultierenden

Schallpegelverlauf in einem geschlossenen Raum in Abhängigkeit vom Schallquellenabstand (Veit 2003, S. 19).

Der subjektiv empfundene Hall lässt sich auch objektiv darstellen, nämlich durch Messung der sogenannten Nachhallzeit. Dieser ist der Wichtigste und wohl auch aussagekräftigste Faktor, der in der Raum und Bauakustik als essentielle Kenngröße zum Einsatz kommt. Setzt man das Volumen und die Nachhallzeit eines Raumes oder Konzertsaals in Verbindung lässt sich die akustische Qualität bereits erahnen (Veit 2003, S. 19).

3.2.2. Nachhallzeit

„Die Nachhallzeit wurde dann als der Zeitraum bestimmt, der zwischen dem Abstellen des von der Orgelpfeife erzeugten Schalles und dem Zeitpunkt lag zu dem der Schall nicht mehr im Raum hörbar war. Dies entsprach gewöhnlich einer Änderung des Schallpegels von 60 dB, eine Schallpegeldifferenz, die seit damals für die Definition der Nachhallzeit benutzt wird.“ (Broch 1966, S. 4)

Eine genauere Definition der auf W. C. Sabine zurückgehenden Nachhallzeit beschreibt Weinzierl so:

„Die Nachhallzeit T ist nicht nur die älteste, sondern auch die bekannteste raumakustische Größe. Sie ist die Zeit, die nach dem Abschalten einer Schallquelle in einem Raum vergeht, bis die mittlere eingeschwungene Schallenergiedichte $w(t)$ auf $1/1.000.000$ des Anfangswertes w_0 oder der Schalldruck auf $1/1.000$, d.h. um 60 dB abgeklungen ist.“ (Weinzierl 2008, S. 188)

Oft wird die Nachhallzeit mit $RT_{(60)}$, für Reverberation Time gemessen über 60 dB abgekürzt und in Sekunden angegeben (Weinzierl 2002, S. 136). Die bis heute wichtigste Formel zur Berechnung dieser Zeitspanne stammt ebenfalls von Wallace C. Sabine, die meist als Formel von Sabine oder Sabinesche Nachhallformel bezeichnet wird (Dickreiter 2008, S. 26)

$$T = 0,163 \frac{V}{A} = 0,163 \frac{\text{Raumvolumen (m}^3\text{)}}{\text{Absorptionsvermögen (m}^2\text{)}}$$

T ist die Nachhallzeit in Sekunden und V das Raumvolumen (Dickreiter 2008, S. 26). A ist das Produkt aus dem Absorptionsgrad α (siehe Kapitel 3.2.3. Schallabsorption) und der geometrischen Flächengröße S (Römer 1994, S. 90).

$$A = \alpha \cdot S$$

Ein fiktives Beispiel soll die theoretischen Formeln verständlicher machen. Die Absorptionsgrade sind D. Hall entnommen (Hall 1997, S. 332). Angenommen ein Raum hat eine rechteckige Grundfläche von 15 Metern Länge, 11 Metern Breite und eine Höhe von 4,5 Metern. Die Decke besteht aus Holz und hat einen Absorptionsgrad von 0,2. Der Boden ist mit einem schweren Teppich versehen ($\alpha = 0,4$) und die Seitenwände sind mit speziellen Akustikputz verputzt und haben einen Absorptionsgrad von 0,6. Das Volumen des Raumes beträgt somit; $V = 15 \times 11 \times 4,5 = 742,5 \text{ m}^3$. Die Flächen der Seitenwände ergeben zusammen $(15 \times 4,5 \times 2) + (11 \times 4,5 \times 2) = 234 \text{ m}^2$. Die Boden und die Deckenfläche haben jeweils $15 \times 11 = 165 \text{ m}^2$. Mit dem Wissen um die Absorptionsgrade ergibt sich folgende Rechnung:

$$A = (165 \times 0,2) + (165 \times 0,4) + (234 \times 0,6) = 239,4 \text{ m}^2$$

Die Nachhallzeit wäre somit:

$$T = 0,163 \times (742,5/239,4) = 0,51 \text{ s (gerundet)}$$

Dieser Raum wäre wahrscheinlich am besten für Seminare oder Lesungen zu nutzen, da er für musikalische Darbietungen, ohne elektroakustische Verstärkung wahrscheinlich zu „trocken“ wäre. Neben den schon verwendeten absorptionsfähigen Materialien wären noch die Bestuhlung und das Publikum einzuberechnen, deren Absorptionsfähigkeit zu einer weiteren Verkürzung des Nachhalls beiträgt (Meyer 2003, S. 94).

Diese Formel zur Berechnung der Nachhallzeit ist genau festgelegt und ergibt physikalisch gesehen einen exakten Wert an. Trotzdem gibt sie keine Auskünfte über den Höreindruck. In der Regel können wir Menschen den Nachhall eines Wortes nicht mehr wahrnehmen, wenn ein Schallsignal um 15 dB abgefallen ist und ein neues Signal folgt (Hall 1997, S. 326).

Man spricht in diesem Zusammenhang von Verdeckung. Erklingen zwei Töne mit einer unterschiedlichen Lautstärke, so wird der Lautere den Leiseren verdecken, selbst wenn

Zweiter bei ruhiger Umgebung eindeutig wahrzunehmen ist, also oberhalb der Hörschwelle liegt. Die Schwelle über die der verdeckte Ton herausragen muss, um wahrgenommen werden zu können, wird als Mithörschwelle bezeichnet. Die folgende Abbildung zeigt, den Verlauf der Mithörschwelle eines Testtones bei einem Störpegel mit einer Frequenz von 1000 Hz und dem Pegel L_G (Meyer 2004, S. 19).

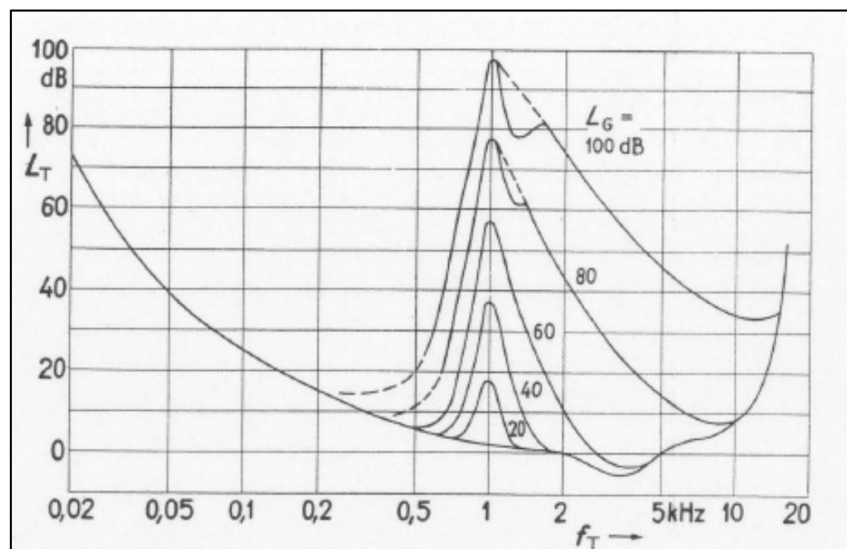


Abb. 20: Verdeckung (Zwicker 1967, S. 60)

Anhand dieser Grafik ist zu erkennen, dass der Verdeckungseffekt im Bereich um die Störfrequenz am stärksten ausgeprägt ist. Der Testton muss beinahe den Pegel des Störtones haben, um wahrgenommen werden zu können. Anhand der Mithörschwellen in der Grafik lässt sich außerdem erkennen, dass die Kurven zu den tiefen Frequenzen hin stark abfallen, jedoch im Frequenzbereich oberhalb des Störsignals flacher verlaufen. Bei einem sehr hohen Störschallpegel bilden sie sogar ein zweites Maximum im Bereich der Oktave der störenden Frequenz aus. Daraus lässt sich schließen, dass höhere Frequenzen von tiefen Tönen besser verdeckt werden, als umgekehrt (Meyer 2004, S. 19).

Angenommen ein Hörer befindet sich in einem Raum mit einer Nachhallzeit von 2 Sekunden, so würden die einzelnen Schallsignale je nach Frequenz eine Überlappungsdauer von 0,3 bis 0,5 Sekunden betragen (Hall 1997, S. 326). Erst bei einem Schallereignis, auf welches kein weiteres folgt, wäre die gesamte Nachhalldauer zu hören, wobei diese je nach Hörer subjektiv bereits nach einem Abfall um etwa 40 dB

für abgeschlossen gehalten wird. Dies ist mitunter auf ein ständig vorhandenes Hintergrundrauschen zurückzuführen, möglicherweise bedingt durch Umgebungslärm oder Klimaanlage und Lüftungen. Erst bei einem sehr lauten Schallereignis und bei geringem Hintergrundschallpegel wäre das volle Ausmaß der um die 60 dB abfallenden Nachhallzeit wahrzunehmen. Sehr laute Schallquellen, wie etwa der Schuss einer Schreckschusspistole oder das Zerplatzen eines Luftballons werden im Bereich der akustischen Messtechnik herangezogen, um die Nachhallzeit, vor allem in Räumen mit einem großen Volumen, zu bestimmen. Sehr geübte Akustiker können oft auch schon durch ein Klatschen mit den Händen annäherungsweise eine Nachhallzeit erhören. Diese Methode hat allerdings den Nachteil, dass keine frequenzabhängige Auskunft über den Nachhall gegeben werden kann (Hall 1997, S. 326).

Wie weiter oben bereits erwähnt werden Schallwellen gemäß ihrer Wellenlänge absorbiert, gebeugt oder reflektiert. Daher empfiehlt es sich die Messungen mit Hilfe eines Rauschgenerators durchzuführen. Dieser erzeugt ein breitbandiges Rauschen, das etwa dem musikalischen Frequenzbereich entspricht. Dieses wird während des Erklingens und nach dem Abschalten von einem genormten, Messmikrofon aufgenommen, welches das Signal mittels eines Schallpegelschreibers in ein Abbild des Nachhalls transformiert. Aus der Gleichmäßigkeit dieser Nachhallkurven lässt sich die gleichmäßige Schallverteilung im Raum ersehen. Sollten diese Kurven eine unregelmäßige Form aufweisen, so kann dies für eine schlechte Raumverteilung des Klanges sprechen (Hall 1997, S. 326-327).

Diese Besonderheit ist vor allem in Kirchen zu beobachten, da diese meist aus mehreren unterschiedlich stark abgetrennten Bereichen bestehen, obwohl diese zur gesamten Halligkeit der Kirche beitragen. Die abgetrennten Bereiche, die vorwiegend für die Laien bestimmt waren weisen jedoch in Bezug auf die Verständlichkeit Einbußen auf, da keine direkte Schallversorgung möglich ist. Durch die Reformation wurde diese starke Trennung zwischen Laien und dem Klerus aufgehoben, wodurch die Predigt in den Mittelpunkt des Gottesdienstes rückte, um nun möglichst viele Menschen zu erreichen (Meyer 2003, S. 91). Nichtsdestotrotz weisen Kirchen nach wie vor ein hohes Maß an Diffusität auf und haben eine lange Nachhallzeit, die auf das große Volumen

zurückzuführen ist. Zudem ist der schallabsorbierende Einfluss des Publikums geringer als bei Konzertsälen (Meyer 2003, S.94).

3.2.3. Schallabsorption

Wie schon erwähnt geht einem Schallfeld, oder einer Schallwelle beim Auftreffen auf ein Hindernis Energie verloren. Wichtig bei der Schallabsorption ist jedoch die Unterscheidung zwischen Schalldämmung und Schalldämpfung. Die Schalldämpfung wird als Unterdrückung des Ausbreitens von Schall durch Absorption und in weiterer Folge als Umwandlung in Wärmeenergie angesehen, wogegen die Schalldämmung eine Behinderung der Ausbreitung von Schallwellen durch Reflexion bedeutet. Das Mitschwingen der Wände, das eine schallabsorbierende Wirkung hat, soll bei der Dämmung vermieden werden (Veit 2003, S. 22-23).

Der bereits erwähnte Absorptionsgrad gibt an, wie viel Prozent des auftreffenden Schalls auf eine Begrenzungsfläche absorbiert werden. Eine vollständige Absorption $\alpha = 1$ wird auch „Fläche offenes Fenster“ genannt, da der Raumschall hier nicht reflektiert, sondern vollständig geschluckt wird. Eine hundert prozentige Reflexion hat den Absorptionsgrad $\alpha = 0$ (Römer 1994, S. 90).

3.2.3.1. Absorbertypen

Schallabsorber sind Stoffe und Materialien mit einer schallschluckenden Wirkung, wobei hier zwischen porösen Schallabsorbern und Resonanzabsorber unterschieden werden muss (Veit 2003, S.23).

Poröse Schallabsorber bestehen meist aus offenporigen Materialien wie Vlies, Mineralfaser-, oder Holzwolleplatten. Die ankommenden Schallwellen dringen in die Materialien ein, wobei die Energie der sich bewegenden Luftteilchen durch Reibung in den Poren und Hohlräumen des Absorbers in Wärmeenergie umgewandelt wird und somit verloren geht (Werner 2009, S. 222). Poröse Absorber werden aufgrund ihrer Wirksamkeit auch Höhenabsorber genannt und haben typischerweise einen, wie in der linken Grafik der Abbildung 22 dargestellten frequenzabhängigen Absorptionsgrad (Meyer 2004, S. 147).

Die Wirkung von porösen Absorbern ist am größten:

„[...] , wo die Schallschnelle [...] der eintreffenden Schallwelle ihr Maximum aufweist; der Absorber muss daher nicht unmittelbar auf der Wandoberfläche befestigt sein, sondern kann in einem Abstand [...] von einer Massivwand so angeordnet werden, dass die Schallschnelle [...] genau im Absorber ihr Maximum aufweist [...].“ (Werner 2009, S. 222)

Um das vorhergehende Zitat leichter vorstellbar zu machen ist die nachstehende Grafik heranzuziehen.

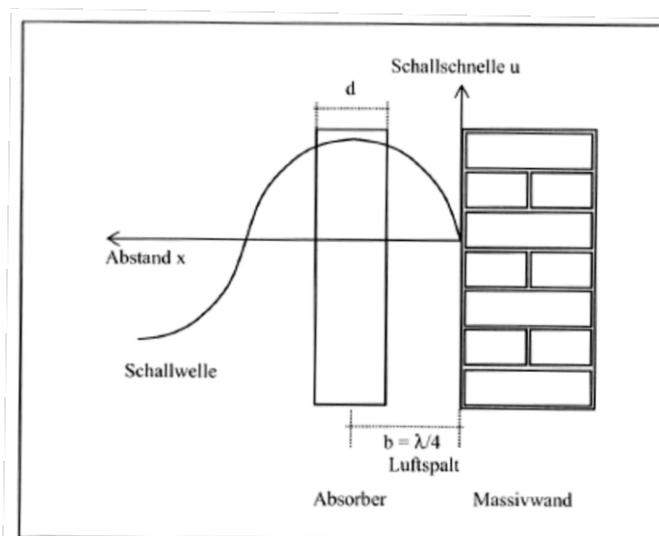


Abb. 21: Absorber am Schnellenmaximum (Werner 2009, S. 223)

Plattenabsorber bestehen aus einer biegsamen Platte die in einem gewissen Abstand vor einer schallharten Wand angebracht wird. Die durch die auftreffende Schallwelle zum Schwingen angeregte Platte entzieht dem Schall Energie, weshalb Plattenabsorber zu den sogenannten Resonanzabsorbern zählen. Der zwischen Platte und Wand eingeschlossene Hohlraum kann mit dämmenden offenporigen Materialien gefüllt werden, um den Absorptionsgrad zu erhöhen. Ihre größte Wirksamkeit haben sie im Bereich tiefer Frequenzen, da die hochfrequenten Schallanteile reflektiert werden (Werner 2009, S. 227-228). Die Wirkung des Absorbers rückt noch weiter in den tieffrequenten Bereich des ankommenden Schallereignisses, je tiefer der Hohlraum und umso schwerer die Platte ist. Dünne und leichte Platten, die teilweise mit Schlitzen oder auch Löchern versehen sind verlagern die Wirksamkeit in Richtung der mittleren Frequenzen. Daher werden sie auch als Mittenabsorber bezeichnet (Meyer 2004, S. 147). Die Abbildung 22 zeigt die Wirksamkeit der Absorber.

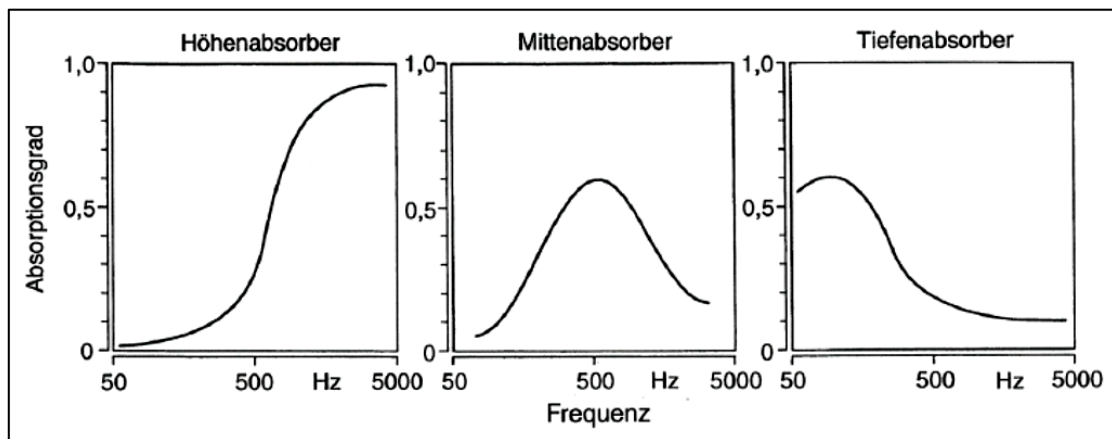


Abb. 22: Absorptionsgrad unterschiedlicher Absorbertypen (Meyer 2004, S. 147)

Helmholtzresonatoren, benannt nach Hermann von Helmholtz zählen aufgrund ihrer Funktionsweise ebenfalls zu den Resonanzabsorbern. Die absorbierende Wirkung wird hierbei durch das in Schwingung versetzte Luftvolumen im Hals des Absorbers erzielt. Die Wirkungsweise ist sehr schmalbandig. Daher werden Helmholtzabsorber häufig als selektive Absorber eingesetzt um einzelne Störfrequenzen herauszufiltern (Werner 2009, S. 229-230).

3.2.4. Hörsamkeit und Raumgeometrie

Die Hörsamkeit bezieht sich auf die akustische Eignung eines Raumes. Dies bedeutet, dass die raumakustischen Kriterien auf den Verwendungszweck, also in Bezug auf die Sprachverständlichkeit, Konzerte mit kleiner Besetzung, Orchesterwerke, oder zusätzliche Beschallung mit Hilfe von elektroakustischen Beschallungsanlagen, abgestimmt sind.

„Unter den Räumen, in denen musikalische Aufführungen stattfinden, nehmen die großen Säle für sinfonische Konzerte hinsichtlich ihrer akustischen Eigenschaften eine besondere Rolle ein, weil in ihnen das musikalische Erlebnis der Zuhörer am wenigsten durch visuelle Eindrücke beeinflusst wird.“ (Meyer 2004, S. 159)

Das wichtigste Kriterium sinfonischer Konzertsäle ist somit ihre klangliche Qualität, wobei den Zuhörern eine gute Sicht auf das Bühnengeschehen ermöglicht sein sollte. Zusätzlich spielt der visuelle Eindruck des Raumes selbst, zumindest für die subjektive Wahrnehmung des Raumklanges eine nicht zu unterschätzende Rolle (Meyer 2004, S.

159). Der wesentlichste Faktor ist hier die Nachhallzeit. Der Nachhall ist gemeinsam mit den nicht minder wichtigen ersten Reflexionen für ein volles und stimmiges Klangbild verantwortlich. Der Klang der einzelnen Instrumente und Instrumentengruppen soll je nach Komposition verschmelzen oder auch ganz differenziert hörbar sein und den Hörer umgeben und einbetten. Trotzdem sollten rhythmische Passagen sowie sehr leise Klänge unmittelbar nach sehr laut gespielten, nicht durch eine zu lange Nachhallzeit verschwimmen, oder verdeckt werden. Diese Bedingungen sollten natürlich auch für den Podiumsbereich, also für die Musiker sowie für den Dirigenten gelten, denn ist ein gutes gegenseitiges Hören der Musiker nicht gewährleistet leidet das gesamte musikalische Ereignis. Oft unterscheidet sich das Empfinden der Musiker in Bezug auf die Qualität des Klanges der einzelnen Konzertsäle wesentlich von dem der Zuhörer, da die Ansprüche an den Raum unterschiedlich sind (Meyer 2004, S. 159-160).

Die raumakustische Planung, bzw. die Raumgeometrie zielt auf eine bestmögliche akustische Funktionalität ab, wobei im Wesentlichen zwischen Primär- und Sekundärstruktur unterschieden werden muss. Die primäre Struktur umschließt die Faktoren Größe, Form, Volumen aber auch die innenarchitektonischen Gegebenheiten, wie den Anstieg des Publikumsbereiches, die Anordnung der Balkone und Galerien, aber auch den Bühnenbereich mit dessen Öffnung. Die Beschaffenheit der Wand und Deckenflächen, sowie deren schallabsorbierende, oder diffus wirkende Eigenschaft zählt zur Sekundärstruktur. Diese kann je nach Nutzung auch variable Elemente enthalten, um den Raum an die jeweiligen Bedürfnisse der Aufführungen anzupassen (Weinzierl 2008, S. 205-206). Eine nachträgliche Veränderung der Primärstruktur ist wesentlich invasiver und aus einer Vielzahl an Gründen, wie Denkmalschutz oder auch aus finanzieller Sicht oft gar nicht möglich, weshalb Weinzierl folgenden Schluss zieht: „Die Hörsamkeit, d. h. die Eignung eines Raumes für bestimmte akustische Darbietungen muss von der Nutzung des Raumes ausgehen.“ (Weinzierl 2008, S. 206).

Deshalb wird bei Sälen gemäß der häufigsten Verwendung unterschieden zwischen Räumen mit reiner Sprachnutzung, oder rein musikalischer Aufführungen, oder sogenannter Mehrzweckräume (Weinzierl 2008, S. 206).

Hörsäle und Kongresszentren sollten im Sinne der Sprachverständlichkeit eine geringere Nachhallzeit haben und kommen daher teilweise auch ohne elektroakustische

Verstärkung aus. Diese Räumlichkeiten sind allerdings bei größeren Konzertveranstaltungen auf eine Beschallungsanlage angewiesen (Weinzierl 2008, S. 206).

Sprechtheater mit ihrem hohen Grad an Sprachverständlichkeit sind zwar häufig mit einer Beschallungsanlage ausgestattet, diese dient allerdings meist nur zur Einspielung von Effekten oder Geräuschen und Stimmen aus dem Off. Sprechtheater zielen darauf ab, im gesamten Auditorium eine gute Sprachverständlichkeit zu haben, was impliziert, dass der Störschallpegel möglichst gering gehalten werden muss (Weinzierl 2008, S. 206).

Bei Opernhäusern ist, neben der Sprachverständlichkeit vor allem die Qualität der musikalischen Aufführung wichtig. Dadurch erreichen große Opernhäuser durchaus eine Nachhallzeit von bis zu 1,8 Sekunden (Weinzierl 2008, S. 207). Auch hier dienen die elektroakustischen Anlagen eher dazu, die Vorstellungen künstlerisch auszugestalten als zur Optimierung der Verständlichkeit. Die Lage des Orchestergrabens, genau zwischen Zuschauer- und Bühnenbereich, ermöglicht eine optimale Schallausbreitung sowohl für das Publikum als auch für die auf der Bühne befindlichen Sängerinnen und Sänger. Bei einer Konzertveranstaltung, die auf der Bühne stattfindet, empfiehlt es sich auch im Bühnenbereich bauliche Veränderungen zu treffen, um eine bestmögliche Übertragung des Schalls in den Zuschauerbereich zu gewährleisten (Weinzierl 2008, S. 207).

Mehrzweckhallen sind, sind durch ihre unterschiedlichen Verwendungszwecke nahezu immer auf die akustische Verbesserung mit Hilfe von elektroakustischen Anlagen angewiesen. Für die Verschiedenheit der Veranstaltungen, die von Sportveranstaltungen bis zu Konzerten reicht, ist eine Anpassung der Raumakustik durch variable Elemente aus finanzieller Sicht häufig nicht mehr realisierbar. Bei Mehrzweckhallen geht es somit meist um eine Kompromisslösung (Weinzierl 2008, S. 207).

Klassische Konzertsäle dienen ausschließlich der Aufführungen von Konzerten. Hierbei werden sowohl Solokonzerte, als auch große Orchesterwerke mit und ohne Chor dargeboten. Die Nachhallzeit soll ein Optimum erreichen. Die Wahl der Primärstruktur bringt meist auch gewisse klangliche Eigenheiten zum Vorschein, die mit der Sekundärstruktur nur schwer aufgelöst werden können. Auch die Unterstützung durch elektroakustische Anlagen wird in den meisten Fällen als störend empfunden und dient

somit auch hier wiederum meist nur, um kurze Reden akustisch zu verstärken (Weinzierl 2008, S. 207). Im Unterschied zu klassischen Konzertsälen ist die Verwendung der elektroakustischen Anlagen in allgemeinen Konzertsälen sogar erwünscht. Unabhängig von der Raumgröße ist es hierbei immer erstrebenswert eine geringe Nachhallzeit und dadurch eine große Klarheit zu erreichen (Weinzierl 2008, S. 207-208).

Sporthallen und Arenen sollen das Gemeinschaftsgefühl des sportlichen Ereignisses akustisch verstärken. Die akustische Unterstützung der Zuseher sollte sich ausreichend über das Spielfeld verteilen, jedoch aus Gründen des Lärmschutzes nicht zu sehr auf die Umgebung des Stadions ausbreiten. Bei Konzertveranstaltungen in Stadien und Arenen ist die Verstärkung durch Beschallungsanlagen unumgänglich (Weinzierl 2008, S. 208).

In sakralen Räumen, wie klassischen Kirchenräumen ergibt sich durch das große Volumen eine lange Nachhallzeit. Diese entspricht der Hörerwartung, weshalb es nicht ratsam ist, die Nachhallzeit durch Änderungen in der Sekundärstruktur zu verkürzen. Die musikalische Praxis ist ebenfalls den akustischen Verhältnissen in Kirchen angepasst. Um die Sprachverständlichkeit während der Predigt in Kirchen zu erhöhen werden elektroakustischen Anlagen verwendet. Moderne Kirchen verwenden diese auch zunehmend für musikalische Aufführungen bzw. für eine Kombination aus Sprache und Musik (Weinzierl 2008, S. 208).

Das Raumvolumen lässt sich relativ leicht errechnen, bzw. näherungsweise einschätzen, weshalb sich daraus sehr schnell theoretische Rückschlüsse auf die Akustik ziehen lassen. Am häufigsten geschieht dies mit Hilfe der Volumenkenzahl: Diese ergibt sich aus m^3/Platz , wobei hier zwar das Volumen des Bühnenbereichs, jedoch die Plätze des Orchesters nicht mitgerechnet werden. Bei Theatern wird ausschließlich mit dem Volumen des Publikumsbereiches gerechnet (Weinzierl 2008, S. 209).

Nr.	Hauptnutzung	Volumenkenn- zahl k in m ³ /Platz	Maximal wirksames Raumvolumen bei natürlicher Akustik in m ³
1	Sprachdarbietung, z. B. Sprechtheater, Kongress- und Hörsaal, Vortragsraum, Raum für audiovisuelle Darbietung	3 bis 6	5.000
2	Musik- und Sprechdarbietung, z. B. Musiktheater, Mehrzwecksaal, Stadthalle	5 bis 8	15.000
3	Musikdarbietung, z. B. Konzertsaal	7 bis 12	25.000
4	Räume für Oratorien und Orgelmusik	10 bis 14	30.000
5	Orchesterproberäume	25 bis 30	–

Abb. 23: Volumenkennzahlen (Weinzierl 2008, S. 209)

Die Volumenkennzahl sollte die in der Abbildung 23 angegebenen Werte, sowohl weder unter- noch überschreiten. Da bei einer Volumenkennzahl, die größer als das jeweilige Optimum ist, zusätzliche schallabsorbierende Materialien verbaut werden müssen, besteht die Gefahr, dass leise Schallquellen zu stark absorbiert werden und pianissimo Passagen an die Grenze des Störschalles kommen und somit möglicherweise verdeckt werden könnten. Wird die Volumenkennzahl unterschritten so besteht die Gefahr, dass die Lautstärke vor allem bei Orchesterproben zu groß werden könnte (Weinzierl 2008, S. 210).

Die Raumform ist ein sehr variabler Faktor, wobei hier im Wesentlichen zwischen rechteckigen und polygonalen Formen unterschieden wird. Das entscheidende Detail liegt in der ungehinderten Versorgung des Zuschauerbereiches mit Direktschall, sowie in den für den Raumeindruck entscheidenden Erstreflexionen, die laut Weinzierl (2008, S. 212) für Musikdarbietungen mit einer maximalen Laufwegdifferenz von 27 m am Ohr des Zuhörers auftreffen müssen.

Abbildung 24 zeigt schematisch die Ausbreitung des Direktschalls, der Seiten- und Deckenreflexion sowie die Reflexion von der Bühnenrückwand in Veranstaltungsräumen.

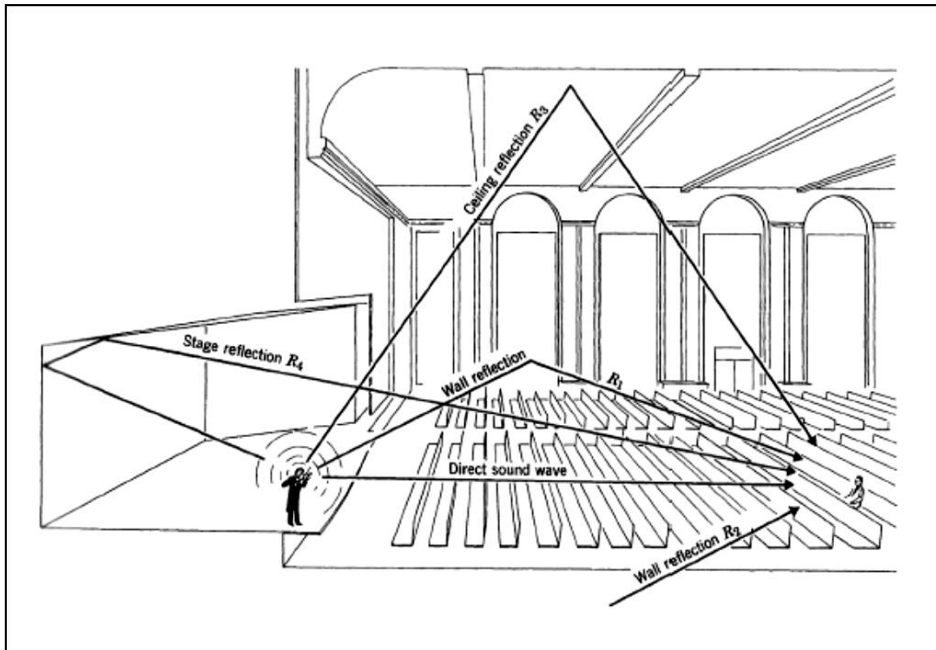


Abb. 24: Direktschall und Reflexionen (Beranek 2004, S. 21)

Teilweise abgetrennte Räume oder zu tief liegende Publikumsbereiche sind problematisch in Bezug auf eine gute Schallversorgung. Der wesentliche Unterschied bezüglich der Form liegt darin, dass Sälen mit sogenannter Schuhkartonform, wie etwa dem goldenen Musikvereinssaal mehr Wärme und den polygonalen Formen eine höhere Brillanz zugeschrieben wird (Weinzierl 2008, S. 211-212).

Hinsichtlich des Grundrisses gilt bezüglich der Seitenschallreflexionen die Form des Schuhkartons als ideal, allerdings unter der Bedingung, dass die Seitenwände einen Abstand von etwa 20 Metern nicht überschreiten sollten (Weinzierl 2008, S. 212).

Außerdem sollte das Podium bzw. der Bühnenbereich an der Stirnseite des Raumes sein, da möglicherweise das Zusammenspiel der Musiker leidet, bzw. diese sich selbst nicht gut hören, weil die notwendigen Reflexionen der Seitenwände fehlen. Bei einer kleineren Besetzung ist dies jedoch möglich, sofern Verbesserungen der Sekundärstruktur unternommen wurden, die die Klarheit auf der Bühne erhöhen und auch optisch das Bühnenbild bzw. den Blick auf die Bühne nicht stören (Weinzierl 2008, S. 212).

Die Beschaffenheit der Decke ist wohl der wesentlichste Faktor, wenn es darum geht eine hohe Deutlichkeit bei Sprache bzw. Klarheit bei Musik zu erzielen. Die Übertragung der Schallwellen passiert zu einem großen Teil mit Hilfe der Decke. Sie ist es, welche die

für die Sprachverständlichkeit essentiellen Erstreflexionen in den hinteren und mittleren Bereich des Saales weiterleitet. Aus diesem Grund muss die Decke an die akustischen Bedürfnisse angepasst werden.

Für musikalische Darbietungen sollte die Deckenhöhe so gewählt sein, dass die Volumenkenzahl möglichst dem Optimum entspricht. Außerdem sollten die Geometrie und die Sekundärstruktur der Decke so beschaffen sein, dass sich eine optimale Nachhallzeit realisieren lässt. Des Weiteren sollte die Form der Decke die Schallversorgung im hinteren und mittleren Bereich der Zuschauer sicherstellen und zugleich mögliche störende Reflexionen. Handelt es sich um eine ebene Deckenanordnung, so wird der Schall vor allem an die mittleren bis hinteren Reihen des Parterres weitergeleitet, was erwünscht ist. Die ersten Reihen werden ausreichend mit Direktschall versorgt. Problematisch allerdings könnte die Ansammlung der Reflexionen im Bereich der Rückwand werden, da diese möglicherweise ein störendes Echo zum Bühnenbereich zurückwerfen könnte. Dies wird Theaterecho genannt und stört sowohl Sprecher als auch Zuhörer am Bühnenrand. Im Optimalfall sollte die Deckenform in kleinere Elemente aufgeteilt werden, wobei jedes normal zum mittleren Bereich des Raumes ausgerichtet sein sollte (Weinzierl 2008, S. 217-218).

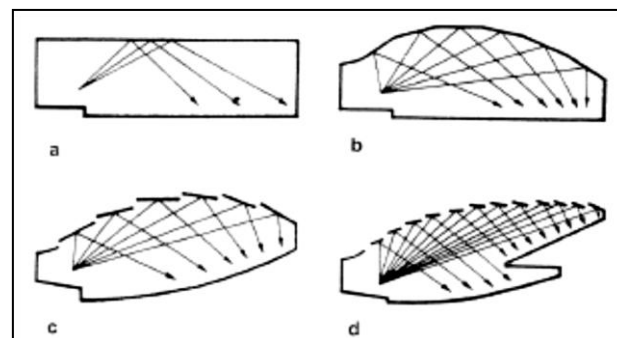


Abb. 25: Deckenformung (Weinzierl 2008, S. 219)

Die in Abbildung 25 dargestellten Raumformen zeigen, wie sich die Reflexionen gemäß der Deckengestaltung über den Publikumsbereich ausbreiten. Im Fall a ist zu erkennen, dass sich die Reflexionen eher über den hinteren Publikumsbereich ausbreiten, wogegen sich die Reflexionen bei einer Deckenform, wie im Fall d dargestellt gleichmäßig über den Bereich der Zuschauer ausbreiten. Eignet sich eine gewölbte Decke auch bei sehr großen Räumen, ist ab einer bestimmten Größe von einer Decke, wie im Fall a

dargestellt abzusehen, da die Laufzeitdifferenz zwischen Direktschall und den Deckenreflexionen zu groß wird.

Ist die Form der Decke konkav so kann dies im Bereich des Brennpunktes zu störenden Fokussierungen des Schalls führen. Daher sollte bei gebogenen Decken der Brennpunkt außerhalb des Raumes, also unterhalb des Bodens bzw. oberhalb der halben Höhe des gesamten Raumes liegen (Weinzierl 2008, S. 219).

Um den Musikern ein ideales Klangbild auf der Bühne zu ermöglichen, also ein gegenseitiges Hören zu gewährleisten, sollte die Decke im Podiumsbereich etwa eine Höhe von 12 Metern nicht überschreiten und nicht niedriger sein als 4 Meter (Weinzierl 2008, S. 219).

Auch hier spielen die Laufzeitdifferenz sowie die Echovermeidung, eine gute Klarheit durch ausreichend Direktschall und notwendige Erstreflexionen eine entscheidende Rolle für die Abmessungen.

Balkone, Galerien und Ränge können durch die diffuse Schallreflexion ebenfalls zur Verbesserung der Raumakustik beitragen. Allerdings besteht auch die Gefahr, dass sie für unerwünschte Reflexionen verantwortlich sein können, die sich an der Rückwand und den Deckenflächen der einzelnen Balkone oder Galerien bilden könnten. Außerdem ist darauf zu achten, dass bei zu großer Dimensionierung der Balkone oder Ränge und bei zu niedriger Deckenhöhe die Direktschallversorgung trotzdem ausreichend gegeben ist. Erreichen die notwendigen Deckenreflexionen diesen Bereich des Konzertsaals nicht, kann ein eigenständiges, minderwertiges Klangbild die Folge sein (Weinzierl 2008, S. 220-221).

Ähnlich verhält es sich mit der Sitzreihenüberhöhung. Ein Großteil der Schallabsorption innerhalb des Konzertsaaes erfolgt durch das Publikum. Da die hinteren Reihen nicht nur akustisch sondern auch optisch benachteiligt sind, empfiehlt es sich die Sitzreihen zu erhöhen. Meist geschieht diese Erhöhung in Form einer Kurve oder auch in Form von Terrassen, wobei die Unterschiede in der Sehstrahlüberhöhung durchschnittlich 12 Zentimeter betragen sollten, um auch akustisch die besten Ergebnisse zu erzielen. Im Falle eines Parketts ohne Erhöhung, wie es in den klassischen Konzertsälen vorhanden ist, muss der Ausgleich durch ein erhöhtes Podium stattfinden (Weinzierl 2008, S. 221-222). So beschreibt Weinzierl folgenden Zusammenhang zwischen ebenem Parkett und

der notwendigen Überhöhung des Podiums bei einer durchschnittlichen Bühnenhöhe von 0,6m bis 0,8m:

„Bei einer bestuhlten Saallänge von ca. 14 m ist eine maximale Höhenstaffelung auf dem Podium bis ca. 3 m, bei 18 m schon bis ca. 4 m anzustreben. Diese Werte sind im Allgemeinen kaum realisierbar, zeigen aber die Notwendigkeit einer großen Höhenstaffelung innerhalb des Klangkörpers auf dem Konzertpodium bei Sälen mit ebener Parkettanordnung.“ (Weinzierl 2008, S. 223)

Das Podium selbst ist ein ebenfalls wesentlicher Teil für die gesamte Akustik des Raumes. Daher gibt es auch hier optimale Formen, die ein bestmögliches Zusammenspiel der Musiker sowie eine gute Verteilung der Klänge über den gesamten Raum zulassen. Das sogenannte Konzertzimmer sollte nicht zu klein sein, so dass die Musiker mit ihren jeweiligen Instrumenten genügend Platz haben. Außerdem sollten die Begrenzungsflächen so gestaltet sein, dass genügend Schallenergie reflektiert wird, aber von parallelen Wänden abzusehen ist, da diese bekannterweise die Flatterechobildung fördern. Möglichst diffus reflektierende Seitenflächen sind wünschenswert. Neben der entscheidenden Größe, die laut Weinzierl für ein gesamtes Orchester 200 m² nicht unterschreiten sollte (Weinzierl 2008, S. 225), ist essentiell, dass das Podium zur Rückwand hin erhöht ist. Gerade bei Sälen mit einem nahezu ebenen Parkett muss die Überhöhung schon innerhalb der Streichergruppen erfolgen, sowie weitere größere Stufen bei den Blechbläsern, jedoch nur Stufenerhöhungen von etwa 15 cm beim Schlagwerk. Ein Chor, der meist hinter dem Orchester aufgestellt wird, kann daher nur von den Reflexionen der Seitenwände und der Decke profitieren, da das Orchester selbst schallabsorbierend wirkt. Deshalb empfiehlt es sich auch hier eine stark überhöhte Aufstellung einzunehmen, um mehr Klarheit und Deutlichkeit im Chorklang zu ermöglichen. Im allgemeinen gilt die Regel, dass ein Chor bei einer stark erhöhten Anordnung für mehr Deutlichkeit in der Artikulation sorgt, wogegen eine flachere Aufstellung der Halligkeit zu Gute kommt, was bei eher trockenen Räumen von Vorteil sein kann, aber bei Sälen die bereits ein lange Nachhallzeit haben als unangenehm und störend empfunden werden kann (Weinzierl 2008, S. 224-225).

3.2.5. Messtechnik und Messgrößen

Die Möglichkeiten in Bezug auf die akustische Messtechnik wachsen ständig, wobei laut Römer (1994, S. 28) das wichtigste Instrument der Akustik der Schallpegelmesser ist. Dies gilt vor allem zur Bestimmung des Hintergrundschallpegels, aber auch zur Bestimmung der Dämmleistung von verbauten Materialien (Römer 1994, S. 28).

Eine der häufigsten Methoden bzw. der erste Ausgangspunkt der Messungen ist die Untersuchung der Raumimpulsantwort (Weinzierl 2002, S. 140).

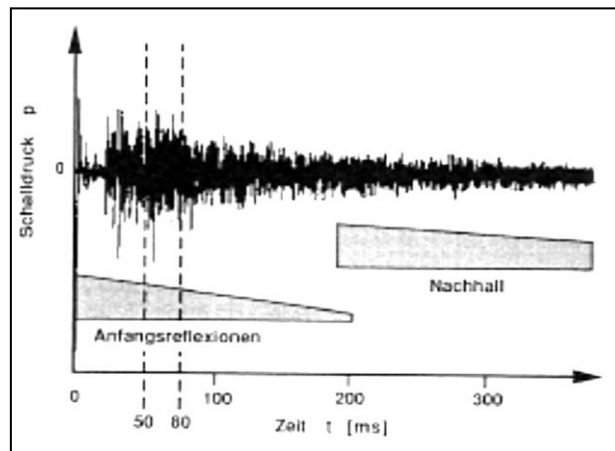


Abb. 26: Raumimpulsantwort (Fasold, Veres 2003, S. 135)

Dies ist die Aufnahme des Raumschalles während und nach einem sogenannten Dirac-Impuls, also nach einem impulshaften, lauten Schallereignis, wie z.B. einem Pistolenschuss oder dem Knallen eines zerplatzenden Luftballons. Eine weitere Möglichkeit ist die Wiedergabe von weißen oder rosa Rauschen, wodurch gleichzeitig ein Blick auf die Absorption in den unterschiedlichen Frequenzen ermöglicht wird (Weinzierl 2002, S. 140). Ein weißes Rauschen ist ein Rauschen mit einer konstanten statistisch verteilten Amplitude pro Frequenzbandbreite (Weinzierl 2008, S. 12). Trotz der Möglichkeit ein weißes Rauschen zur Analyse der Raumakustik zu verwenden, sollte man sich vor allem in Bezug auf eine subjektive Bewertung vor Augen halten, dass das menschliche Gehör erst bei einer sehr hohen Lautstärke ein annähernd ebenen Frequenzgang hat. Bei niedrigerem Schallpegel ist das Lautstärkeempfinden teilweise stark von der Frequenz abhängig (Römer 1994, S. 30). Wie in Abbildung 27 verdeutlicht,

ist die Frequenzabhängigkeit des Gehörs in Bezug auf das Lautstärkeempfinden zu erkennen, wobei A als Reiz- und B als Schmerzschwelle anzusehen ist.

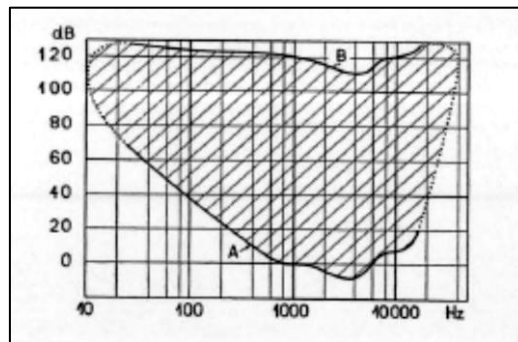


Abb. 27: Hörfläche (Furrer 1956, S. 30)

Die wichtigste messbare Kenngröße hierfür ist erneut die Nachhallzeit. Dieser eine Messwert, der als wichtigster der letzten Jahrzehnte gilt, genügt allerdings den heutigen Anforderungen an die Raumakustik nicht mehr, weshalb mittlerweile eine Mehrzahl an Kriterien gebräuchlich geworden ist. Ausgehend von der Raumimpulsantwort werden weitere Messgrößen zur Bestimmung der Eignung eines Raumes oder Saals ausgearbeitet (Weinzierl 2002, S. 135).

Diese sind unter anderem neben der Nachhallzeit das Baßverhältnis, das Stärkemaß, das Klarheitsmaß und der Seitenschallgrad. Diese Kriterien sollen eine ganzheitlichere Auskunft über das Klangbild eines Konzertsaaes geben (Weinzierl 2002, S. 135).

Neben einer Erweiterung dieser Kriterien half die Entwicklung der Kunstkopfstereophonie den sonst nur subjektiv wahrnehmbaren Eindruck von Räumlichkeit aufzunehmen und zu analysieren. Diese hier eingesetzte Nachbildung eines menschlichen Kopfes ist an beiden Ohren mit Messmikrofonen versehen, was es ermöglicht, den Höreindruck auch außerhalb des zu beurteilenden Raumes über Kopfhörer wiederzugeben (Weinzierl 2008, S. 186).

Trotz des Einsatzes der sogenannten head-related transfer function (HRTF) (Blauert 1999, S. 373) ist es selbst mit Hilfe der Kunstkopfstereophonie nicht vollständig möglich eine absolute Aufnahme des akustischen Eindruckes eines Raumes zu erhalten. Die HRTF beschreibt die Auswirkung des Außenohres und des Kopfes sowie der Hörerfahrung auf die Wahrnehmung von Klängen (Blauert 1999, S. 373-374). Die individuellen

Erfahrungen der Menschen sowie deren persönliche Empfindungen sind selbst mit der Kunstkopfstereophonie nicht messbar.

3.2.5.1. Die Nachhallzeit T

Die Nachhallzeit ist wie schon im Kapitel 3.2.2. Nachhallzeit genauer beschrieben, die Zeit in der der Schalldruck nach dem impulshaften Erklingen eines Schallereignisses um ein Tausendstel abfällt. Dies, so Weinzierl, entspricht in etwa der Zeit zwischen einem sehr laut gespieltem Schlussakkord eines Orchesters, bis zur Reizschwelle des Hörers oder auch bis zum Störpegel innerhalb des Raumes (Weinzierl 2002, S. 137 - 138).

Problematisch ist dieser Dynamikumfang vor allem im Bereich tiefer Frequenzen, weshalb häufig auch die Zeit bestimmt wird, in der das Schallereignis um 30 dB abfällt und danach verdoppelt wird (Weinzierl 2008, S. 188).

Neben den absorbierenden Begrenzungsflächen eines Raumes haben auch die Bestuhlung des Publikumsbereiches sowie die Zuhörer selbst einen wesentlichen Einfluss auf die Nachhallzeit, da diese einen Großteil der mittleren und hohen Frequenzen absorbieren. Dies ist vor allem ein interessantes Detail aus der Zeit, wo Konzertsäle noch nicht den heutigen Maßstäben entsprachen, es keine fixen Sitzreihen gab und das Publikum stehend dem Konzert beiwohnte. Der Unterschied zwischen einem leeren, unbestuhltem und einem voll besetztem Veranstaltungsraum wird vor allem bei den Orchesterproben zu einem merklichen Problem, weshalb in den Sälen, in welchen auch geprobt wird die Sitzbänke dauerhaft angebracht sind. Meist sind hierbei die Unterseiten oder teilweise sogar die gesamten Sitzflächen mit Stoff bezogen, um dem Orchester bei Proben aus akustischer Sicht das Gefühl eines besetzten Saales zu vermitteln und die Unterschiede in der Nachhallzeit je nach besetztem oder unbesetztem Zustand anzugleichen (Weinzierl 2002, S. 137 - 138).

Die optimale Nachhallzeit sollte laut Dickreiter für Konzertsäle 2 Sekunden betragen (Dickreiter 2008, S. 28). Weinzierl (2008, S.189) empfiehlt je nach Nutzung und Volumen Nachhallzeiten, wie in der folgenden Abbildung dargestellt:

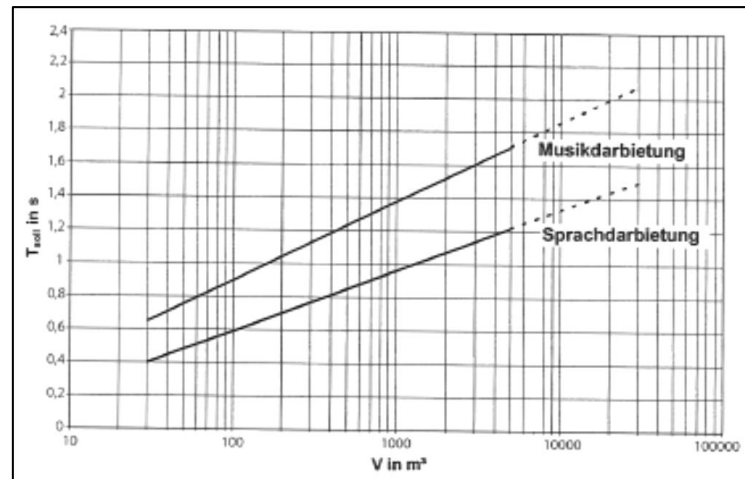


Abb. 28: Optimale Nachhallzeiten (Weinzierl 2008, S. 189)

3.2.5.2. Early Decay Time EDT

Die Anfangsnachhallzeit oder auch Early Decay Time soll dazu dienen, eine Auskunft über die Anfangsphase des Abklingvorganges zu erhalten. Vor allem bei schnell gespielten Passagen bzw. bei zu langer EDT besteht die Gefahr, dass einzelne Töne durch Vorangegangene verdeckt werden, wie in Abbildung 29 dargestellt (Beranek 2004, S. 23).

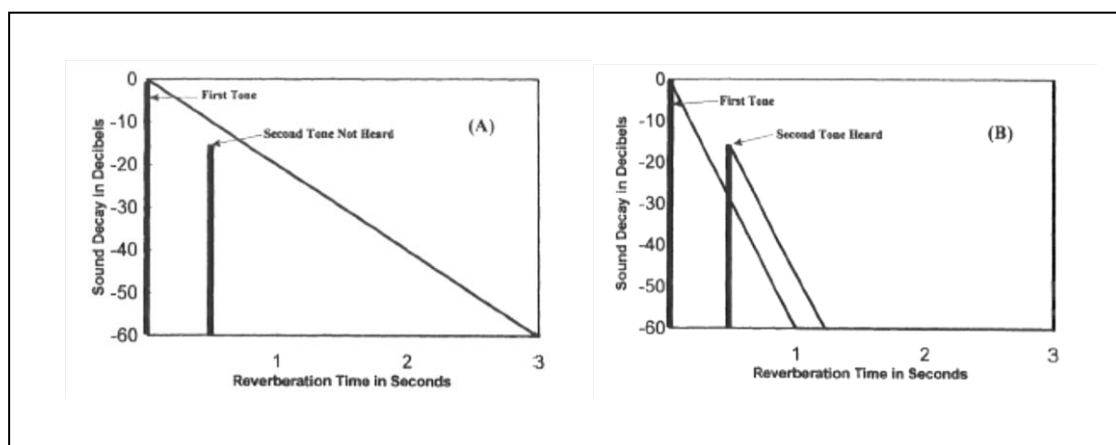


Abb. 29: Early Decay Time (Beranek 2004, S. 24)

Die Early Decay Time, welche einen Bereich zwischen 0 und -10 dB umschließt, gibt somit eine sehr gute Auskunft über die subjektiv empfundene Nachhalldauer, die sich

vor allem bei geringen Lautstärken zeigt (Weinzierl 2008, S. 188). Laut Beranek (2004, S. 23), wird die Zeitspanne nach einem Abfall um 10 dB mit dem Faktor 6 multipliziert, um erneut auf den gesamten, wie für die Nachhallzeit definierten Dynamikumfang von 60 dB zu kommen. Im Gegensatz zur Nachhallzeit sollten diese Ergebnisse eine bessere Darstellung über die akustische Qualität eines Konzertsaaes zulassen, da sehr häufig vorkommende, schnell aufeinanderfolgende Töne besser beurteilt werden können (Beranek 2004, S. 23-24).

3.2.5.3. Das Bassverhältnis BR

Das Bassverhältnis gibt Auskunft über die Nachhallzeit in Bezug auf den Frequenzgang und in weiterer Folge auch über die Klangfarbe. Das Verhältnis des Basses steigt, indirekt proportional zur Anzahl der Zuhörer, da diese für die Absorption der höheren Frequenzen verantwortlich sind. Der Unterschied ist jedoch nicht so eklatant, wenn es sich um einen bestuhlten Saal handelt. Deshalb sollte dieser Faktor sowie die Reverberation Time sowohl für den besetzten als auch für den unbesetzten Saal angegeben werden (Weinzierl 2002, S. 138). „Das Bassverhältnis BR nach (Beranek 1962) errechnet sich als Verhältnis der Nachhallzeiten bei Oktavmittenfrequenzen von 125 Hz und 250 Hz zu Oktavmittenfrequenzen von 500 Hz und 1000 Hz“ (Weinzierl 2008, S. 191):

$$BR = \frac{T(125\text{Hz}) + T(250\text{ Hz})}{T(500\text{Hz}) + T(1000\text{Hz})}$$

Die optimalen Werte in Bezug auf das Bassverhältnis und unter der Berücksichtigung der Nutzung sollten bei musikalischen Aufführungen zwischen 1,0 und 1,3 und für Sprachdarbietung zwischen 0,9 und 1,0 liegen (Weinzierl 2008, S. 191).

3.2.5.4. Das Klarheitsmaß für Musik C_{80}

Die Deutlichkeit der Stimme und die Durchsichtigkeit bzw. Klarheit einzelner nacheinander erklingender Töne werden mit Hilfe des Klarheitsmaßes bemessen. Das Klarheitsmaß setzt die Schallenergie innerhalb der ersten 80 ms mit der Energie später

eintreffender Reflexionen in ein Verhältnis. Die 80 ms bilden die Grenze für die Klarheit des Klanges. Die Energie, die innerhalb dieser Zeitspanne auf den Hörer oder das Messmikrofon eintrifft, wirkt verstärkend für die Transparenz, wogegen später eintreffende Reflexionen eher die Verständlichkeit erschweren. Das Klarheitsmaß ist ebenfalls eine von der Anwesenheit des Publikums abhängige Messgröße und wird, wie auch die beiden oberen Kriterien, für den unbesetzten und den besetzten Saal angegeben (Weinzierl 2002, S. 138).

Die als optimal geltenden Messgrößen des Klarheitsmaßes sind sogar von der musikalischen Stilrichtung abhängig. Daraus ergibt sich, dass Werte die größer oder gleich -4,6 dB erreichen, optimal für die Musik der Romantik eignen, wobei für klassische Musik Ergebnisse um -1,6 dB als Optimum anzusehen sind (Weinzierl 2008, S. 199).

3.2.5.5. Das Stärkemaß G

Das Stärkemaß ist für die Lautstärkeempfindung und auch für die Präsenz der Musik im Raum maßgebend. Hierbei wird der Schalldruck einer Schallquelle in 10 Metern Entfernung gemessen und mit der Energie einer Schallquelle in einem freien Feld ohne Reflexionen verglichen. Das Ergebnis gibt somit Auskunft über die schallverstärkende Wirkung durch die Reflexionen der Begrenzungsflächen des Raumes (Weinzierl 2002, S. 139).

„Nach Beranek (1996) liegen die Stärkemaße im mittleren Frequenzbereich in als „exzellent“ bewerteten Konzertsälen in einem Bereich zwischen 4...5,5 dB, d.h. die Lautstärke an einem beliebigen Zuhörerplatz soll etwa doppelt so laut sein wie im Freien bei 10 m Abstand von der Schallquelle.“ (Weinzierl 2008, S. 201)

3.2.5.6. Das Deutlichkeitsmaß für Sprache C_{50}

Ähnlich wie beim Klarheitsmaß beruht C_{50} auf der Theorie, dass die bis 50 ms nach dem Direktschall eintreffenden Reflexionen die Sprachverständlichkeit fördern. Spätere Reflexionen wiederum hindern die Deutlichkeit von Sprache. Gemessen wird das Deutlichkeitsmaß in einem Frequenzbereich zwischen 500 Hz und 4000 Hz, wobei es in drei Oktaven innerhalb dieses Bereiches aufgeteilt wird und im Optimalfall einen Wert

von -2 dB nicht unterschreiten sollte, um eine gute Verständlichkeit zu gewährleisten (Weinzierl 2008, S. 193).

3.2.5.7. Seitenschallgrad LF

Die für den Raumeindruck und zur Verbesserung der akustischen Qualität so wichtigen Seitenreflexionen lassen sich mit Hilfe des Seitenschallgrades Lateral Fraction (LF) nach Barron (2003) errechnen (Weinzierl 2008, S. 204). Hierbei werden die über die seitlichen Begrenzungsflächen des Raumes eintreffenden Schallwellen in einer Zeitspanne zwischen 5 ms und 80 ms nach dem Schallereignis mit dem Direktschall in ein Verhältnis gebracht. Als optimal gelten die Werte zwischen 0,1 und 0,25 (Weinzierl 2008, S. 204).

„Je größer der Seitenschallgrad ist, desto akustisch breiter wirkt die Schallquelle. [...] Nach Barron u. Long (1981) sind die seitlichen Schallreflexionen in einem Frequenzbereich von 125 Hz bis 500 Hz für die Empfindung des „Eingehülltseins“ (Envelopment) verantwortlich, während der Seitenschallgrad in einem Frequenzbereich von 500 Hz bis 4000 Hz eher eine Quellenverbreiterung begünstigt.“ (Weinzierl 2008, S. 204)

4. Akustische Messungen an ausgewählten Beispielen

In diesem Kapitel werden zwei beispielhafte Konzertsäle hinsichtlich ihrer raumakustischen Eigenheiten untersucht. Ausschlaggebend für die Wahl der beiden Konzertsäle, nämlich den goldenen Saal des Wiener Musikvereins und den großen Saal des Konzerthauses in Wien, war die Teilnahme an einer praktischen Lehrveranstaltung des Institutes für Musikwissenschaft der Universität Wien im Sommersemester 2012. Hierbei wurden diese beiden Säle akustisch vermessen und die wesentlichen Grundlagen der akustischen Messtechnik gelehrt. Die Ergebnisse sollen in diese Arbeit mit einfließen und bei der Bewertung der Raumakustik der ausgewählten Konzertsäle dienlich sein. Neben einem historischen Teil zu den beiden Häusern sowie deren raumakustische Eigenheiten sollen vorangegangene Messungen der besseren Vergleichbarkeit dienen.

4.1. Das Musikvereinsgebäude

Als 1857 Kaiser Franz Joseph I. die Schleifung der alten Befestigungen rund um die Stadt veranlasste, um sie durch eine repräsentative Straße, gesäumt von prunkvollen und prächtigen Gebäuden zu ersetzen, gewann der Architekt Ludwig Förster die Ausschreibung für die Planung des heute als Wiener Ringstraße bekannten Boulevards. Dieser übergab die Planung des Musikvereinsgebäudes an seinen Schwiegersohn Theophil Ritter von Hansen. Mit eben dieser Überlassung des heute als Musikvereinsplatzes bekannten Areals gegenüber dem Karlsplatz in Wien (nach Kaiser Franz Joseph I.), war der Grundstein für die Errichtung des Musikvereinsgebäudes gelegt. Das von dem aus Dänemark stammenden Architekten Theophil Ritter von Hansen geplante Musikvereinsgebäude wurde in den Jahren 1867 bis 1869 errichtet und schließlich von der Gesellschaft der Freunde der Musik am 5. Januar 1870 eröffnet (Forsyth 1992, S. 207 – 208).

Eine wichtige Ausführung stammt von Pamela Clements, die in ihrem Artikel über die feuerpolizeilichen Veränderungen des Musikvereins schreibt, welche möglicherweise essentielle Auswirkungen auf die heutige Akustik gehabt haben können. 1911 wurden am Großen Musikvereinssaal einige Veränderungen, wie die Erneuerung der Decke sowie des Podiums vorgenommen. Außerdem wurde die Beleuchtung von den Balkonen

entfernt und die Karyatiden, welche sich ursprünglich an der Vorderkante der Empore befanden, zurückversetzt (Clements 1999).

4.1.1. Der große Saal, Raumgeometrie und vorhandene Materialien

Der große Saal, welcher wegen seiner goldenen Verzierungen und der guten Akustik auch goldener Saal genannt wird hat eine rechteckige Grundfläche. Dieser Typ von Saal wird in der Literatur seiner Form wegen als Schuhschachtel bezeichnet. Im Wesentlichen also eine rechteckige Grundfläche mit einer Seitenlänge von 48,8 m eine Breite von 19,1 m und eine Höhe von 17,75 m und damit einem Volumen von 16.544 m^3 .

(<http://www.musikverein.at/dermusikverein/musikvereinssaal.php>)

Die auf dem Parkett befindlichen Holzstühle, die leicht erhöhten Galerien an den Seitenwänden sowie die um den gesamten Saal verlaufende Empore, die über der Bühne einen Orgelchor bildet, bietet Sitzplätze für 1.680 Menschen. Die Empore wird an den Seitenwänden von 32 vergoldeten Karyatiden und an der Rückseite von ionischen Säulen getragen. An der gegenüberliegenden Seite der Bühne befindet sich oberhalb der Empore eine weitere Galerie, sowie darunter einen kleineren etwas abgetrennten Raum, der den Publikumsbereich um Stehplätze erweitert. Oberhalb der Zugänge zur Empore befinden sich Statuetten, die auf Giebelfeldern angebracht sind. Die großen Kristallluster sorgen neben den 40 stockwerk hohen Fenstern für Licht. Die ebenfalls reich verzierte Orgel befindet sich bühnenseitig und ist wie auch die Ein- bzw. Ausgänge zur Empore mit einer Giebelform und Statuen versehen. Die Stuckdecke, welche ebenfalls vergoldet ist, liegt auf erkennbaren Trägerbalken (Forsyth 1992, S. 208). Laut Beranek sind nur etwa 15 Prozent des Interieurs aus Holz. Die Seitenwände bestehen aus verputzten Ziegelmauern und die Balkone und die Decke sind mit verputzten Holzlatten versehen (Beranek 2004, S. 174). Der Boden sowie das Podium bestehen aus Holz, wobei keine Teppiche verlegt sind. Die einzig nachträglich hinzugefügten absorbierenden Materialien sind insgesamt $18,5\text{ m}^2$ wandteppichartige Stoffe an den Vorderseiten der Balkone (Beranek 2004, S. 176).



Foto: Großer Musikvereinssaal, Peter Zanzinger, 29.06.2012



Foto: Großer Musikvereinssaal, Peter Zanzinger 29.06.2012

Auf den folgenden Abbildungen sind der Grundriss sowie der Grundriss der Empore und der Längsschnitt des Saales zu sehen.

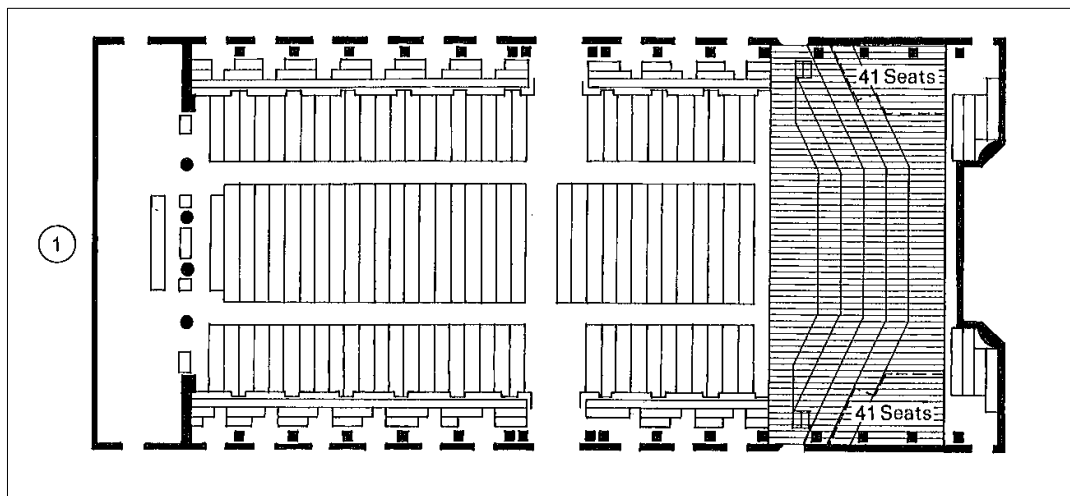


Abb. 30.1

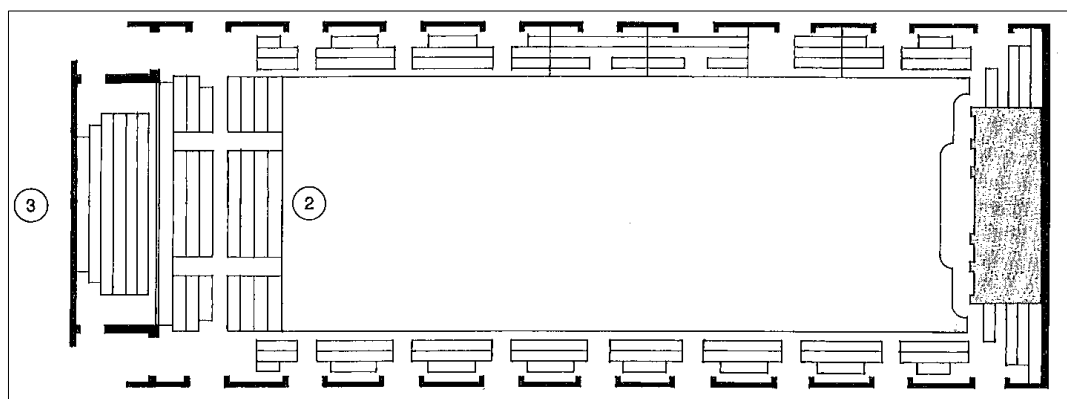


Abb. 30.2

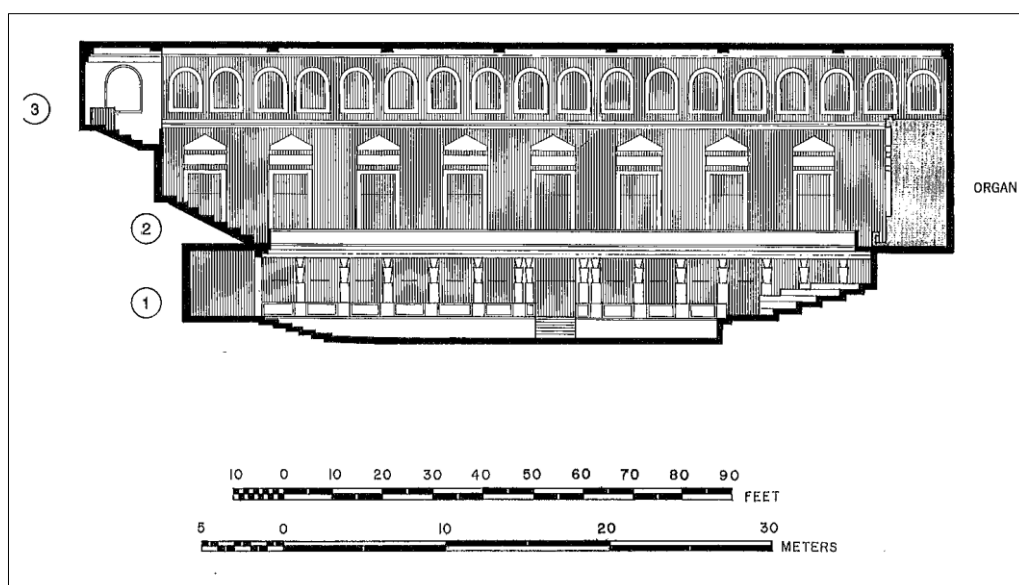


Abb. 30.3

Abb. 30.1 – 30.3: Großer Musikvereinssaal (Beranek 2004, S. 174)

4.1.2. Messsituationen

Während der am 29.06.2012 durchgeführten Messungen war der Saal unbesetzt aber bestuhlt. Eine Temperatur von 26°C und eine relative Luftfeuchtigkeit von 52.5% konnte gemessen werden. Als Schallquelle dienten die Geräusche zerplatzender Luftballons sowie ein mittels Rauschgenerator erzeugtes rosa Rauschen. Die omnidirektionalen Messmikrofone wurden mit Hilfe eines geeichten Schallpegelkalibrators kalibriert. Die Aufnahmen der Impulsantworten wurden zeitgleich an mehreren festgelegten Positionen (siehe Messprotokoll 1 im Anhang) durchgeführt. Cool Edit 96 mit Aurora Plug-In diente als Software zur Berechnung der Ergebnisse.

4.1.3. Verwendete Messgeräte

Bei der Durchführung der Messungen wurden folgende Messgeräte verwendet:

- | | |
|--|---------------------------------|
| • Rauschquelle für Nachhallzeitmessungen, | Typ SPA 600, NTI Instruments |
| • Digitalrekorder, | Typ Tascam DA-P1 |
| • Kalibrierter Schallpegelmesser Klasse 1, | Typ Brüel & Kjaer 2233 |
| • Schallpegelkalibrator Klasse 1, | Typ Norsonic 1250, DP 9 |
| • Kalibrierte Messmikrofone, | Typ Esper K4 |
| • Messlautsprecher, | Typ Meyer MM4 |
| • Analoginterface mit Mikrofonvorverstärker, | Typ Stage Accompany AI 110 |
| • Leistungsverstärker, | Typ HiFi Sony TA-AX22, SPA 600X |

4.1.4. Messergebnisse

Neben den Nachhallzeiten (T_{30}) wurden im Zuge der Messungen auch die Early Decay Time (EDT) sowie das Klarheitsmaß für Musik (C_{80}) und das Deutlichkeitsmaß für Sprache (C_{50}) sowohl eigens für den Bühnenbereich, den Publikumsbereich, als auch für den gesamten Saal ermittelt. Das Bassverhältnis (BR) wurde nur für den gesamten Saal ermittelt.

Frequenz / Hz	125	250	500	1000	2000	4000	500- 2000	125- 4000
Nachhallzeit T_{30}/s , räumlicher Mittelwert	3,21	3,05	2,91	2,99	2,81	2,35	2,9	2,89

	Podium	Publikumsbereich	Gesamter Saal
T_{30}/s	2,87	2,88	2,85
EDT/s	2,02	2,81	2,53
C_{80}/dB	3,71	-4,56	-0,07
BR			1,06
C_{50}/dB	2,14	-7,62	-4,37

Beranek veröffentlichte im Jahre 2004 folgende Ergebnisse:

Attribute	Measured by	Year of Data	Center Frequencies of Filter Bands					
			125	250	500	1,000	2,000	4,000
			Hertz					

Abb. 31.1

30. VIENNA, GROSSER MUSIKVEREINSSAAL (Opened 1870, 1,680 seats)								
RT, unoccupied	Various agencies	1958	3.10	3.30	3.60	3.50	3.10	2.20
(There were changes in the seats between 1960 and 1980.)								
RT, unoccupied	Gade	1987	3.00	3.20	3.20	3.20	2.60	2.10
	Tachibana	1987	2.85	2.85	2.90	2.95	2.70	2.00
	Takenaka	1993	2.97	2.95	3.04	2.99	2.67	2.21
	Bradley	1987	3.05	3.11	3.11	3.04	2.72	2.09
	Average		2.97	3.03	3.06	3.05	2.67	2.10
	Matsuzawa (rehearsal)	1992	2.61	2.62	2.56	2.42	2.22	1.91
RT, occupied	M.A.A. (various)	1959	2.40	2.20	2.10	2.00	1.90	1.60
	Tachibana	1987	2.20	2.20	2.00	1.95	1.80	1.70
	Matsuzawa	1992	2.14	2.15	2.01	1.94	1.71	1.55
	Average		2.25	2.18	2.04	1.96	1.80	1.62
EDT, unoccupied	Gade	1987	2.93	3.37	3.31	3.18	2.77	2.08
	Bradley	1987	2.93	3.06	3.06	3.03	2.70	2.00
	Takenaka	1993	2.98	3.01	3.03	2.99	2.71	2.17
	Average of Taka & Bradley		2.96	3.04	3.05	3.01	2.71	2.09
IACC _N , unoccupied	Takenaka	1993	0.89	0.68	0.20	0.11	0.17	0.26
IACC _E , unoccupied	Takenaka	1993	0.92	0.76	0.42	0.32	0.34	0.40
IACC _L , unoccupied	Takenaka	1993	0.88	0.66	0.17	0.09	0.07	0.07

Abb. 31.2

30. VIENNA, GROSSER MUSIKVEREINSSAAL, continued								
LF, unoccupied	Bradley	1987	0.14	0.17	0.19	0.16	0.12	0.21
	Gade	1988	0.12	0.16	0.19	0.17	—	—
	Average		0.13	0.17	0.19	0.17	—	—
C ₈₀ , dB, unoccupied	Bradley	1987	-5.71	-4.74	-4.00	-3.18	-2.98	-1.18
	Takenaka	1993	-5.10	-5.10	-4.70	-4.00	-3.10	-1.60
	Gade	1987	-5.02	-6.56	-5.45	-4.68	-3.88	-1.93
	Average		-5.28	-5.47	-4.72	-3.95	-3.32	-1.57
G, dB, unoccupied	Takenaka	1993	8.10	7.40	7.80	7.90	6.80	6.10
	Bradley	1987	6.10	6.04	5.97	6.57	6.04	4.51

Abb. 31.3

Abb.31.1 – 31.3: Ergebnisse (Beranek 2004, S. 594 – 595)

K. H. Lorenz - Kierakiewitz und M. Vercammen veröffentlichten im Jahre 2009 folgende Ergebnisse in ihrem Abstract, in dem 25 Europäische Konzertsäle vermessen wurden.

Octave band / Hz	125	250	500	1000	2000	4000	500-2k	125-4k
Hall								
Royal Festival Hall (03)	1,4	1,4	1,5	1,6	1,6	1,4	1,5	1,5
Bad Kissingen [□]	1,1	1,4	1,7	1,7	1,7	1,4	1,7	1,5
Aula Universität zu Köln	1,5	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5	1,7	1,6
Tonhalle Düsseldorf (2006)	1,9	1,9	1,8	1,9	1,9	1,5	1,9	1,8
Kurhaus Wiesbaden [□]	2,0	2,0	2,1	2,0	1,9	2,0	2,0	2,0
Herkulesaal [□]	2,1	2,0	2,1	2,1	2,1	1,7	2,1	2,0
De Doelen Rotterdam	2,0	2,0	2,3	2,3	2,2	1,8	2,3	2,1
Philharmonie am Gasteig	2,3	2,1	2,1	2,1	2,1	2,0	2,1	2,1
Stadtcasino Basel [□]	2,5	2,6	2,1	2,1	2,0	1,7	2,1	2,2
Mercatorhalle (2001)	1,9	2,2	2,4	2,3	2,3	1,8	2,3	2,2
Concertgebouw A'dam [□]	2,8	2,4	2,3	2,4	2,2	1,8	2,3	2,3
Musikverein Wien [□]	2,6	2,6	2,5	2,5	2,3	1,9	2,4	2,4
Rudolfinum Prag [□]	2,2	2,4	2,7	2,9	2,8	2,3	2,8	2,5
Tonhalle Zürich [□]	3,2	3,2	2,8	2,5	2,2	1,8	2,5	2,6
Minimum	1,1	1,4	1,5	1,6	1,6	1,4	1,5	1,5
Average	2,3	2,3	2,2	2,2	2,1	1,8	2,2	2,1
Maximum	4,2	3,6	3,2	2,9	2,8	2,3	2,8	3,0

Abb. 32: Ergebnisse (Lorenz-Kierakiewitz, Vercammen 2009, S. 1)

Bei den hier durchgeführten Messungen war der Konzertsaal nicht besetzt, allerdings die Bestuhlung im Publikumsbereich mit Stoffbahnen bedeckt, um einen besetzten Raum zu simulieren (Lorenz - Kierakiewitz, Vercammen 2009, S. 1).

Octave band /Hz	C_{80} /dB	T_{center} /ms	AL_{cons} /% hall	AL_{cons} /% stage
Hall				
Royal Festival Hall (2003)	3,1	82	7,7	5,8
Philharmonie am Gasteig	1,6	131	12,2	8,0
Aula Universität zu Köln	0,5	124	10,2	7,6
Kurhaus Wiesbaden [□]	0,2	117	9,0	8,6
Tonhalle Düsseldorf (2006)	-0,6	119	9,1	6,8
Bad Kissingen [□]	-0,6	124	9,7	8,0
Stadtcasino Basel [□]	-1,0	141	12,2	8,8
De Doelen Rotterdam	-1,2	144	12,4	8,8
Herkulesaal [□]	-1,5	153	12,6	10,9
Concertgebouw A'dam [□]	-1,6	158	12,3	9,8
Mercatorhalle (2001)	-1,8	152	15,0	12,6
Tonhalle Zürich [□]	-2,0	168	13,5	9,2
Musikverein Wien [□]	-2,3	177	14,5	10,0
Rudolfinum Prag [□]	-2,9	188	16,5	11,4
Minimum	-2,9	82	7,7	5,8
Average	-0,7	141	11,9	9,0
Maximum	3,1	187	16,5	12,6

Abb. 33: Ergebnisse (Lorenz-Kierakiewitz, Vercammen 2009, S. 2)

4.2. Das Wiener Konzerthaus

Das Wiener Konzerthaus wurde von den Architekten Ludwig Baumann, Ferdinand Fellner und Hermann Gottlieb Helmer geplant und in den Jahren 1911 bis 1913 errichtet. Im Gegensatz zum traditionsverbunden Musikverein sollte mit dem Konzerthaus ein Veranstaltungsort errichtet werden, in dem ein breit gefächertes Repertoire aufgeführt werden kann. Dies sollte schon bei der Eröffnung durch die Aufführungen des festlichen Präludiums von Richard Strauss (also einem damals zeitgenössischem Werk) sowie durch Beethovens neunte Symphonie (als klassisches Meisterwerk) unterstrichen werden. Neben den drei Sälen im Konzerthaus, welche zur gleichen Zeit bespielt werden können, sollten neue Maßstäbe in Bezug auf das gesellschaftliche Leben gesetzt werden. Die Möglichkeit zu schaffen, Konzerte nahezu aller Stilrichtungen veranstalten zu können war das Bestreben der Gesellschaft des Konzerthauses. Bei der Generalsanierung in den Jahren 1998 bis 2001 wurde das Konzerthaus um einen Saal erweitert, und es wurden einige Verbesserungen in Bezug auf die Akustik durchgeführt.

(<http://konzerthaus.at/konzerthaus/institution/>)

Im großen Saal wurde vor allem die zu lange Nachhallzeit, speziell bei den tieferen Frequenzen kritisiert, welche durch strukturelle Veränderungen und die Verwendung

schallabsorbierender Materialien bei 125 Hz und im voll besetztem Zustand von 2,7 auf 2,3 Sekunden verkürzt werden konnte (Beranek 2004, S. 177).

4.2.1. Der große Saal, Raumgeometrie und vorhandene Materialien

Der quaderförmige Große Saal hat ein Gesamtvolumen von 16.600 m³ (Beranek 2004, S. 180). Der Saal verfügt über eine Bestuhlung am Parkett, welche 1.116 Zuhörern Platz bietet. Die Seitenwände und die Rückwand sind mit einem Balkon ausgestattet, wobei die Logen entlang der Seiten durch Säulen, die bis zum Deckenansatz ragen, getrennt sind. Die Galerie befindet sich über dem Balkon an der Rückseite des Raumes. Dadurch ergibt sich eine Gesamtkapazität von 1.865 Plätzen.

(http://konzerthaus.at/konzerthaus/virtueller_rundgang/)

Die an den Rändern konkav gewölbte Decke des großen Saals besteht aus verstärkten Gipsplatten, die auf hölzernen Rahmen angebracht sind. Die Seitenwände sind aus Beton. Allerdings wurden auch hier Holzplatten mit Gips verputzt und mit einem Abstand von 8 cm vor den schallharten Betonwänden angebracht. Der Vorderseite des Balkons und der Galerie sind ebenfalls aus, mit Gips verputztem Holz gefertigt. Die Rückwand besteht aus perforierten Metallpanelen, die mit Stoff überzogen und wie auch bei den Seitenwänden mit einem Abstand zur Betonwand angebracht wurden. Die Wände an der Bühnenseite sind aus Holz. Die Rückwand an der Bühnenseite hat ebenfalls eine gewölbte Form. Der Boden besteht aus einer 2,2 cm starken Schicht Parkett, die über eine 3,5 cm dicke Schicht Sperrholz gelegt ist. Außerdem befinden sich im Boden 500.000 kleine Löcher, die der Luftzufuhr dienen. Teppiche sind am Gang hinter den offenen Logen, entlang des an den Seitenwänden befindlichen Balkons zu finden. Die Sitze sind mit einer dünnen Stoffschicht überzogen (Beranek 2004, S. 180).



Foto, Großer Saal im Wiener Konzerthaus, Peter Zanzinger, 20.04.2012

Auf den folgenden Abbildungen ist der große Saal des Wiener Konzerthauses im Grundriss, im Längsschnitt und im Querschnitt dargestellt. Außerdem ist die Galerie separat im Grundriss zu sehen.

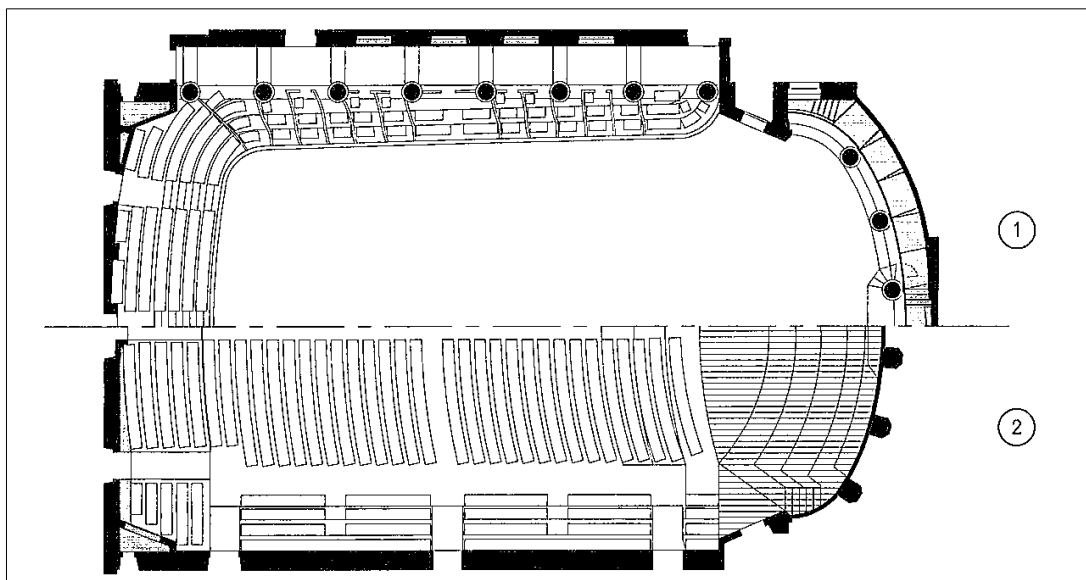


Abb. 34: Grundriss mit Balkon (Beranek 2004, S. 178)

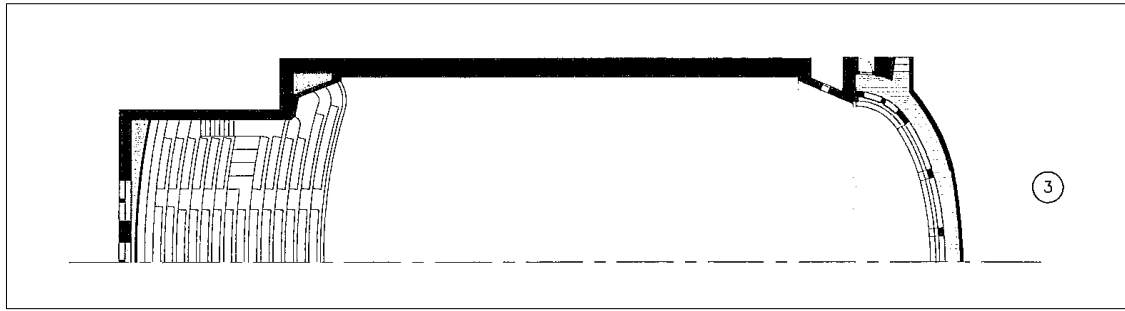


Abb. 35: Galerie (Beranek 2004, S. 178)

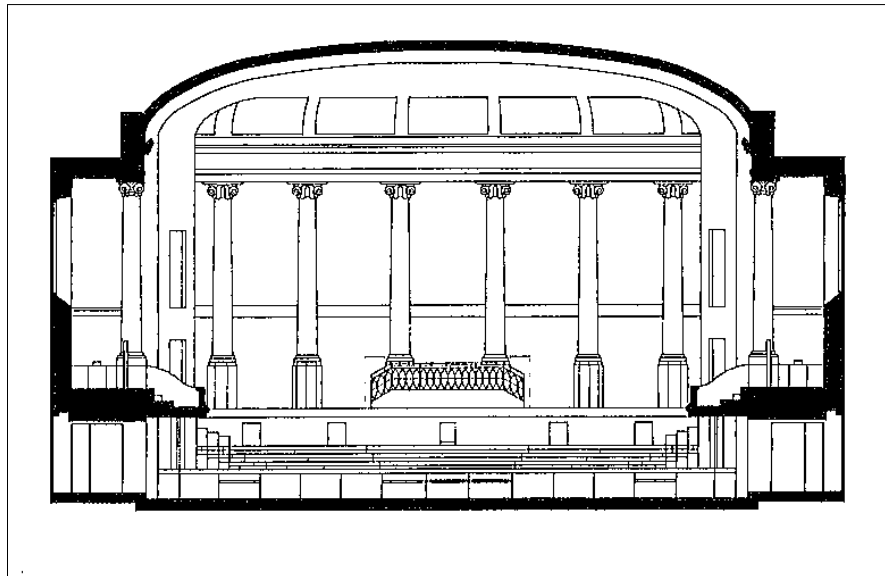


Abb. 36: Querschnitt - Bühnenansicht (Beranek 2004, S. 178)

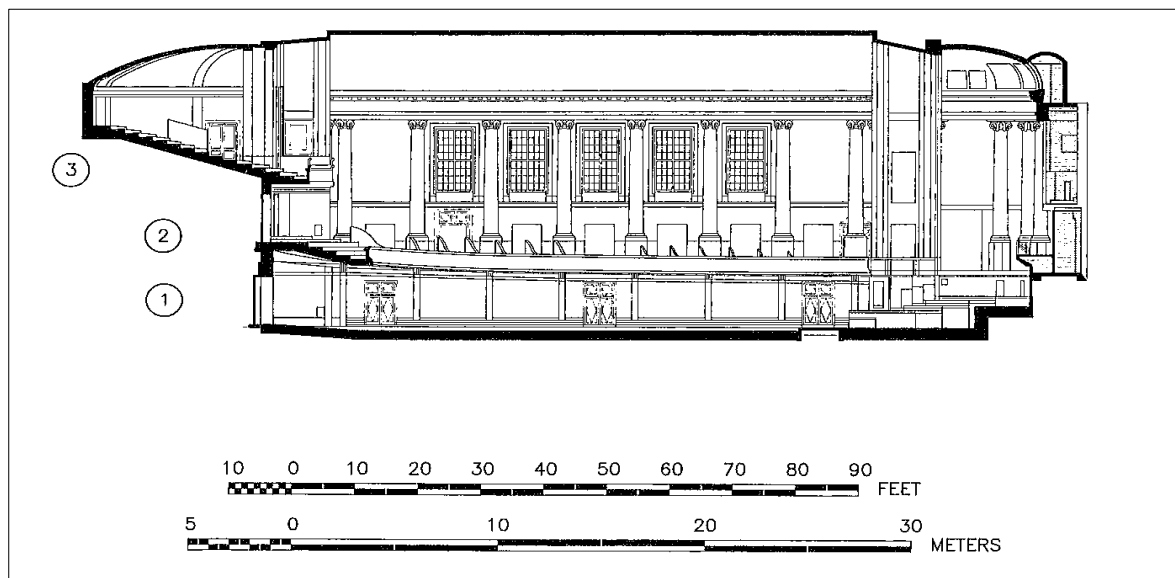


Abb. 37: Längsschnitt (Beranek 2004, S. 178)

4.2.2. Messsituation

Während der am 20.04.2012 durchgeführten Messungen war der Saal unbesetzt. Als Schallquelle für den Dirac-Impuls dienten die Geräusche zerplatzender Luftballons sowie ein mittels Rauschgenerator erzeugtes rosa Rauschen, welches von einer Punktschallquelle abgestrahlt wurde. Die Messmikrofone wurden je nach Schallquelle auf 114 dB, bei den Messungen mit Ballons und 94 dB, bei den Messungen mit rosa Rauschen mittels geeichtem Schallpegelkalibrator kalibriert. Bei diesen Messungen wurden dieselben, wie im Kapitel Messgeräte beschriebenen Utensilien verwendet. Die Aufnahmen der Impulsantworten wurden wie auch im Musikverein zeitgleich an mehreren festgelegten Positionen (siehe Messprotokoll 2 und 3 im Anhang) durchgeführt und ausgewertet.

Der große Saal des Konzerthauses verfügt, wie in den folgenden Fotos zu sehen, über einen Absorptionsvorhang, der je nach Bedarf und musikalischer Stilrichtung herabgelassen werden kann, um die Reflexionen an der Podiumsrückwand zu minimieren. Die Messungen wurden sowohl bei herabgelassenem Vorhang, als auch bei freier Bühnenrückwand durchgeführt.

4.2.3. Messergebnisse

Neben den Nachhallzeiten (T_{30}) wurden auch im Konzerthaus im Zuge der Messungen die Early Decay Time (EDT) sowie das Klarheitsmaß für Musik (C_{80}) und das Deutlichkeitsmaß für Sprache (C_{50}) sowohl eigens für den Bühnenbereich, als auch für den Publikumsbereich sowie für den gesamten Saal ermittelt. Das Bassverhältnis (BR) wurde jeweils nur für den gesamten Saal errechnet.

4.2.3.1. Messungen ohne Akustikvorhang



Foto, Peter Zanzinger, Großer Saal ohne Absorptionsvorhang, 20.04.2012

Frequenz / Hz	125	250	500	1000	2000	4000	500- 2000	125- 4000
Nachhallzeit T_{30}/s , räumlicher Mittelwert	2,48	2,63	2,19	2,1	1,92	1,56	2,07	2,15

	Podium	Publikumsbereich	Gesamter Saal
T_{30}/s	2,07	2,06	1,97
EDT/s	2,12	1,89	1,99
C_{80}/dB	2,31	1,58	3,04
BR			1,19
C_{50}/dB	0,65	-3,88	-1,08

4.2.3.2. Messungen mit Absorptionsvorhang



Foto Peter Zanzinger, Großer Saal mit Absorptionsvorhang, 20.04.2012

Frequenz / Hz	125	250	500	1000	2000	4000	500-2000	125-4000
Nachhallzeit T_{30}/s , räumlicher Mittelwert	2,28	2,42	1,89	1,8	1,66	1,36	1,78	1,9

	Podium	Publikumsbereich	Gesamter Saal
T_{30}/s	1,78	1,78	1,83
EDT/s	2,03	1,58	1,82
C_{80}/dB	3,35	0,51	3,16
BR			1,27
C_{50}/dB	2,11	-4,24	-0,71

Die von Beranek 2004 veröffentlichten Ergebnisse der Messungen, die im Wiener Konzerthaus durchgeführt wurden, sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

			Center Frequencies of Filter Bands						
Attribute	Measured by	Year of Data	125	250	500	1,000	2,000	4,000	
			Hertz						
31. VIENNA KONZERTHAUS (Opened 1913; renovated 2000; 1,865 seats)									
RT, unoccupied	Müller-BBM, Takenaka	1991–97	3.64	3.24	2.55	2.45	2.32	1.90	
	{b.r.}								
RT, occupied	Müller-BBM	2001	2.92	2.89	2.30	2.09	1.96	1.69	
	Müller-BBM	1997	2.73	2.41	2.03	1.80	1.69	1.42	
	Müller-BBM	2001	2.31	2.14	1.96	1.79	1.62	1.36	
EDT, unoccupied	Müller-BBM, Takenaka	1991–97	3.16	3.04	2.46	2.42	2.30	1.76	
	Müller-BBM	2001	2.60	2.64	2.18	2.05	1.88	1.47	
EDT, occupied	Müller-BBM	1997	2.32	2.49	2.01	1.95	1.82	1.62	
	Müller-BBM	2001	2.20	1.98	1.94	1.97	1.72	1.44	
C ₅₀₀ , dB, unoccupied	Müller-BBM, Takenaka	1991–97	4.0	4.8	0.5	−2.2	0.6	−0.1	
	Müller-BBM	2001	−2.5	−2.7	−1.3	−1.0	−0.3	1.2	
C ₅₀₀ , dB, occupied	Müller-BBM	1997	−3.5	−2.2	−2.0	−0.5	0.0	1.9	
	Müller-BBM	2001	−2.0	−0.9	−0.6	−0.3	−0.7	1.1	
G, dB, unoccupied	Müller-BBM	1997	3.8	6.0	5.3	4.7	5.8	4.3	
	Müller-BBM	2001	6.6	4.6	4.6	3.0	5.6	1.0	
G, dB, occupied	Müller-BBM	1997	2.3	3.4	2.4	2.0	3.3	3.5	
	Müller-BBM	2001	4.8	3.7	3.9	2.2	5.4	1.9	
IACC _r , unoccupied	Müller-BBM	1997				0.43			
	Müller-BBM	2001				0.34			

Abb. 38: Ergebnisse (Beranek 2004, S. 595)

4.3. Beurteilung der Messergebnisse

4.3.1. Musikverein

Die vermessenen Konzertsäle sollen in der folgenden Zeilen nicht verglichen, sondern nur in Bezug zu den Werten, die als optimal für das jeweilige Nutzungsprofil gelten, gesetzt werden. Die optimalen Werte wurden bereits im Kapitel zur Hörsamkeit und zu den Messgrößen behandelt. Ein direkter Vergleich der Konzertsäle wäre nicht sinnvoll, da sie sich hinsichtlich ihrer Nutzung unterscheiden und daher andere Anforderungen zu erfüllen haben.

Der goldene Saal hat in Abhängigkeit zur Frequenz und in unbesetztem Zustand den selbst durchgeführten Messungen zu folge eine Nachhallzeit von etwa 2,9 Sekunden. Diese verkürzt sich bei besetztem Publikumsbereich laut Beranek auf etwa 2 Sekunden (Beranek 2004, S. 594). Die Nachhalldauer auf der Bühne entspricht beinahe den im Publikumsbereich gemessenen Ergebnissen. Diese Werte liegen unter Berücksichtigung des Volumens an der oberen Grenze der optimalen Nachhallzeit, was jedoch für einen Konzertsaal, in dem vorwiegend romantische Musik aufgeführt wird, durchaus als positiv bewertet werden kann.

Die Early Decay Time, die im Bereich der Bühne verglichen mit dem Rest des Raumes einen geringeren Wert erreicht, lässt eine für die Musiker optimale Akustik vermuten.

Das Bassverhältnis liegt mit einem Wert von $BR = 1,06$ im, für Musik idealem Bereich, was in Kombination mit den längeren Nachhallzeiten der tiefen Frequenzen dem Saal mehr Wärme verleiht.

Die Ergebnisse bezüglich des Klarheitsmaßes liegen mit $-0,07$ dB im gesamten Raum bzw. $-4,56$ dB im Zuschauerbereich und $3,71$ dB am Podium knapp unter dem Optimum, welches für romantische Musik größer oder gleich $-4,6$ dB betragen sollte.

Der im Zuge der Messungen ermittelte Wert für die Deutlichkeit von Sprache liegt mit $-4,37$ ebenfalls unterhalb des Ideals, was jedoch in einem Raum mit dieser Hörsamkeit nicht besonders negativ zu beurteilen ist.

Die für den goldenen Saal ermittelte Volumenkenzahl von $9,8$ liegt ebenfalls im gewünschten Bereich.

Werden die wichtigsten Ergebnisse aus den Messungen von Beranek und Lorenz - Kierakiewicz und Vercammen, wie etwa der Seitenschallgrad oder das Stärkemaß mit den als optimal beschriebenen Werten verglichen, so lässt sich erkennen, dass ein Großteil der Messgrößen zumindest im Bereich um den als ideal festgelegten Wert liegen, teilweise diesen aber auch unter -, bzw. überschreiten.

Auditiv beurteilt hat der Raum im unbesetzten Zustand einen durchaus halligen Charakter, wobei sich der Schall zumindest nach Dirac-Impulsen den subjektiven Empfindungen zu folge gut über den gesamten Innenraum ausbreitet.

Bezogen auf die Raumform fällt der Musikvereinssaal in die Kategorie der „Schuhschachtel – Konzertsäle“ (Forsyth 1992, S. 200). Die schmalen Seitenwände, sowie deren bereits erwähnte Beschaffenheit sorgen für einen im idealen Bereich

liegenden Seitenschallgrad. Die hohe Decke ist zum einen für das trotz der schmalen Grundfläche, große Volumen und somit für die lange Nachhallzeit verantwortlich und andererseits für eine gute Schallversorgung im hinteren Bereich der Saals. Die vielen diffus wirkenden Oberflächen der zahlreichen Verzierungen tragen möglicherweise zu einer guten Verteilung des Schalls über den Publikumsbereich bei und hindern vermutlich auch die Echobildung, die bei der Form des Saales sonst wahrscheinlich wäre. Eine gute Direktschallversorgung des sehr kompakten Publikumsbereiches am Parkett sowie auf den Balkonen oder der Empore ist gewährleistet.

Der durch die Säulen abgetrennte Bereich im hinteren Teil des Raumes könnte für die Entstehung von Theaterechos hinderlich sein, allerdings besteht auch die Gefahr der Schallschattenbildung für die Zuhörer in eben diesem Bereich.

Trotz der Abweichung von den optimalen Messwerten wird der goldene Musikvereinssaal unter Berücksichtigung des vorwiegend aufgeführten Musikstiles in der Literatur als besonders herausragend gelobt (Meyer 2004, S. 161).

„Die Konzertsaalakustik hat in vergangenen Jahrhunderten ebenfalls Räume höchster mus. Qualität geschaffen, so der Wiener Musikvereinssaal, der nach wie vor als das non plus ultra für des Erleben von Musik gilt.“ (Schröder, Eilemann 1994, S. 411)

Zur besseren Übersicht zeigen die folgenden Nachhallkurven, gemessen in Sekunden bei den angegebenen Frequenzbändern, die Unterschiede der einzelnen Messungen. Die Differenzen sind auf den jeweiligen Besetzungsgrad bzw. auf Messungenauigkeiten zurückzuführen, wobei sich der Kurvenverlauf ähnlich darstellt.

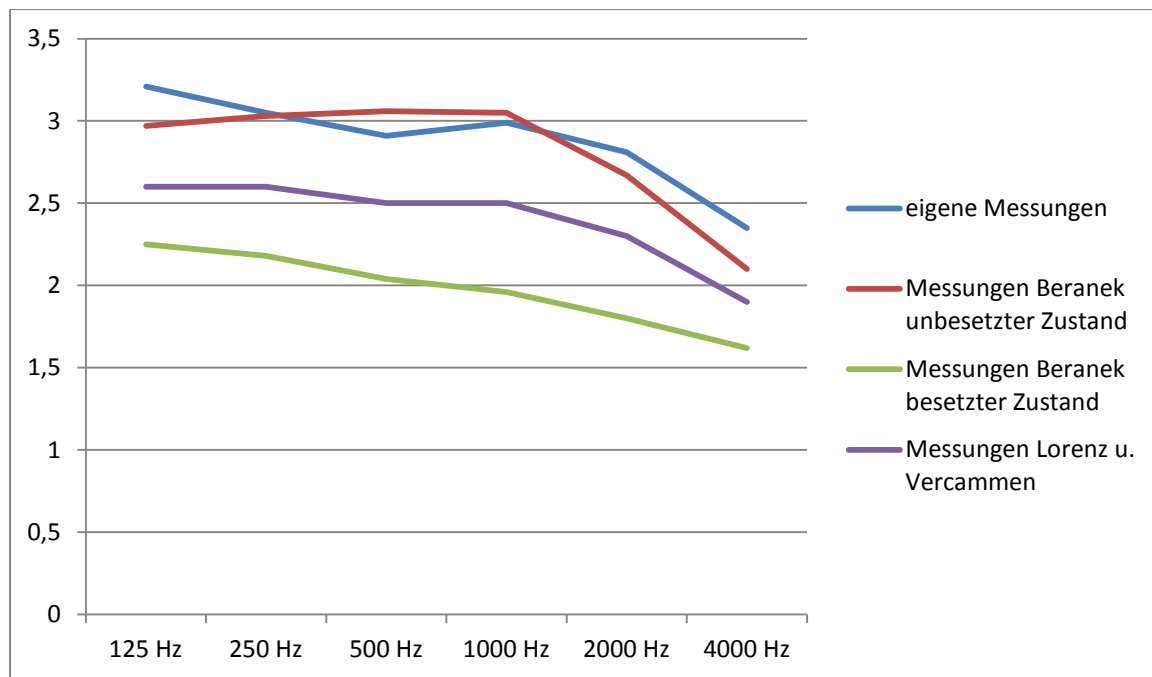


Abb. 39: Nachhallkurven Musikverein (Zanzinger 2013)

4.3.2. Konzerthaus

Die Messergebnisse des großen Saals des Wiener Konzerthauses müssen aufgrund der veränderbaren Akustik durch den variabel einsetzbaren Absorptionsvorhang unterschiedlich bewertet werden. Der Absorptionsvorhang hat durchschnittlich eine Verkürzung der Nachhallzeit um 0,2 s zur Folge. Das Klarheitsmaß verschlechtert sich um etwa 1 dB bei der Saalnutzung mit verhängter Bühnenrückwand. Die weiteren Auswirkungen des Akustikvorhangs sind anhand der oben angeführten Werte leicht zu erkennen.

Die folgenden Zeilen beziehen sich auf die Ergebnisse der Messungen, die mit freier Bühnenrückwand gemacht wurden.

Bei reflektierender Podiumsrückwand hat der große Saal im unbesetztem Zustand eine durchschnittliche Nachhallzeit von 2,1 Sekunden, was bei einem Volumen von 16.600 m³ etwas unter dem Ideal für klassisch-romantische Musik liegt, jedoch für zeitgenössischere Konzertveranstaltungen durchaus vorteilhaft sein könnte. RT nach Beranek (2004, S. 595) reduziert sich laut den Ergebnissen, bei den von der Firma Müller-BBM durchgeführten Messungen im Jahre 1997 auf 2,01 und 2001 sogar auf 1,86 Sekunden (Beranek 2004, S. 595). Diese Differenzen sind auf die 2000 stattgefundenene

Renovierung und die bereits erwähnten Änderungen in Bezug auf die Raumakustik zurückzuführen. Die Zeiten des Nachhalls sind sowohl auf der Bühne, als auch im Publikumsbereich annähernd gleich, was durchaus positiv ist. Etwas kritischer zu beurteilen sind die Unterschiede der Nachhallzeiten hinsichtlich des Frequenzganges. So könnte die stark verkürzte Nachhallzeit in den hohen Frequenzen für einen dumpfen Charakter des Raumklanges verantwortlich sein.

Die Early Decay Time ist der Nachhallzeit ähnlich, jedoch auf dem Podium länger als im Publikumsbereich, was den Anforderungen an die Bühnenakustik eigentlich widerspricht.

Das Klarheitsmaß, das bekanntermaßen gleich, oder größer als -4,6 dB sein sollte ist mit 3,04 dB deutlich zu hoch. Vor allem ist auch hier wieder ein eklatanter Unterschied zwischen Publikumsbereich und Bühne auszumachen. In besetztem Zustand erreichte der Wert laut Müller-BBM nach den Umbauarbeiten sogar einen Wert von -3,4 dB.

Das Bassverhältnis liegt bei $BR = 1,19$, was dem optimalen Bereich, der zwischen $BR = 1,0$ und $BR = 1,3$ entspricht, nahe kommt.

Die für die Deutlichkeit von Sprache errechneten Ergebnisse ergeben gemittelt einen Wert von -1,08. Das Optimum liegt bei -2, was vermuten lässt, dass eine gute Sprachverständlichkeit durchaus gegeben ist.

Die Auswirkungen des Akustikvorhanges sind in den Messergebnissen zu sehen, die in den folgenden Zeilen genauer beschrieben werden.

$T_{(30)}$ erreicht mit herabgelassenem Vorhang eine Dauer von 1,9 Sekunden. Die Nachhallzeit schwankt jedoch zwischen 2,28 s bei einer Frequenz von 125 Hz, 1,8 s bei 1000 Hz und 1,36 s bei 4 kHz. Wie schon bei den vorangegangenen Messungen ist diese kurze Nachhalldauer bei den hohen Frequenzen auch hier zu beobachten, wobei der Absorptionsvorhang die Nachhalldauer durchschnittlich um 0,2 Sekunden, wie bereits erwähnt verkürzt und dadurch an die von Müller-BBM gemessenen Zeiten bei besetztem Zustand herankommt.

Die Early Decay Time ist bei diesen Messungen verglichen mit den Ergebnissen bei freier Rückwand näher am Optimum, was den Schluss zulässt, dass der Vorhang den Bühnenklang zwar verbessert, allerdings eine negative Auswirkung auf die Schallverteilung im Raum hat.

3,35 dB auf dem Podium und 0,51 dB sind die Werte, die bei der Bestimmung des Klarheitsmaßes für Musik erhoben werden konnten. C_{80} für den gesamten Konzertsaal beträgt 3,16 dB. Hierbei lässt sich leicht erkennen, dass sich die ermittelten Größen durch den Absorptionsvorhang noch weiter vom optimalen Wert entfernen, was bedeutet, dass sich die verdeckte Bühnenrückwand negativ auf die Klarheit der Klänge auswirkt.

Das Bassverhältnis ist aufgrund der Beschaffenheit des Absorbers, wie im Kapitel Absorbertypen beschrieben immer noch im gewünschten Bereich.

In Bezug auf die Sprachverständlichkeit hat der Akustikvorhang möglicherweise ebenfalls negative Auswirkungen, was durch den Wert von -0,71 ersichtlich wird.

Auditiv wirkt der Raum trotz seines großen Volumens nicht sehr hallig, was auf die massiven bauakustischen Veränderungen, die im Jahre 2000 durchgeführt wurden, zurückzuführen ist. Die, für diese Bauform typische Akustik wurde laut Beranek vor dem Umbau stark kritisiert und als nicht mehr Zeitgemäß empfunden (Beranek 2004, S. 177).

Die zahlreichen Veränderungen des Innenraumes sorgen für diese in Anbetracht des Volumens „trockene“ Akustik. Eine gute Direktschallversorgung des Publikums ist auch in diesem Konzertsaal gegeben, wobei die konkav gewölbte Rückwand an der Seite des Podiums die Schallverteilung im Raum verbessert, aber durch diese Form die Gefahr der Brennpunktbildung besteht. Aus diesem Grund ist auch die Deckenform kritisch zu beurteilen. Abgesehen von den verkürzten Nachhallzeiten im Bereich der hohen Frequenzen konnten bei den Messungen an mehreren Positionen im Parkettbereich des Raumes Echos und sogar Flatterechos erfasst werden. Diese sind möglicherweise auf die Wölbung der Decke oder die zu wenig diffus wirkende Innenraumgestaltung oder die seitlich einfallenden Balkone zurückzuführen. Akustische Probleme wie Echos sind leider auch der Beweis, dass selbst große akustikbezogene Verbesserungsarbeiten die Form oder Grundfläche und die damit einhergehenden Probleme eines Konzertsaaes nicht aufheben können. Diese Echos konnten allerdings primär in den Bereichen zwischen den bestuhlten Flächen unterhalb der Balkone oder an der Rückwand ausgemacht werden.

Trotz der Abweichungen vom Optimum ist der große Saal des Wiener Konzerthauses vor allem durch seine Variabilität als sehr guter Konzertsaal zu bewerten.

Die folgende Grafik zeigt ebenfalls die Verschiedenheiten in den Nachhallkurven, gemessen in Sekunden und verteilt über die angegebenen Frequenzbänder. Auch hier lassen sich die Unterschiede auf Messungenauigkeiten zurückführen.

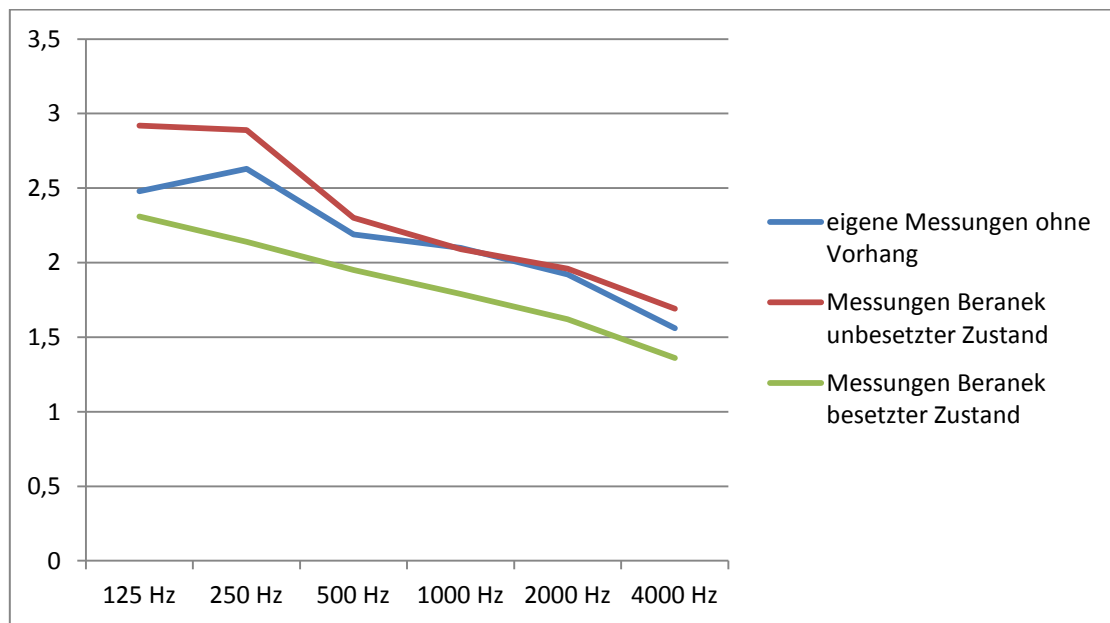


Abb. 40: Nachhallkurven Konzerthaus (Zanzinger 2013)

Im Anhang 1 sind nochmals alle Messergebnisse gesammelt und somit zur besseren Vergleichbarkeit dargestellt.

Zusammenfassend soll nochmals erwähnt werden, dass die Beurteilung der Akustik von Konzertsälen immer mit subjektiven Empfindungen verknüpft ist.

„Jedermann kann erklären, daß er mit der „Akustik“ unzufrieden ist. Es nützt nichts, ihm noch so angemessene Nachhallzeiten oder ausgeglichene Frequenzgänge oder gar Echogramme entgegenzuhalten; für ihn ist sein Ohr entscheidend, und das mit Recht.“ (Cremer 1978, S. 361)

5. Zusammenfassung

Die Frage nach den Möglichkeiten der Bewertung von Konzertsälen sowie deren Eigenheiten lässt sich nicht gänzlich beantworten. Sehr wohl gibt es unzählige Kriterien die einen Einfluss auf die Akustik haben, die gemessen werden können und für die optimale Werte definiert sind. Trotz des Wissens um die Entstehung von Schallereignissen, deren Ausbreitung, das Verhalten von Schallwellen im Raum und die Möglichkeiten der Messtechnik gibt es Umstände die nicht fassbar, erklärbar oder messbar, aber sehr wohl wahrnehmbar sind. Es ist eben nicht die Akustik, die gemessen werden kann, sondern nur die Faktoren die einen Einfluss auf sie haben, weshalb die Beurteilung eben dieser immer zu einem großen Teil subjektiver Natur ist, abhängig von Tradition, Gewohnheiten und Idealen. Diese Arbeit diente im Wesentlichen der Erläuterung, wie die akustische Qualität von Konzertsälen beurteilt und kategorisiert werden kann, jedoch aber auch um zu zeigen, dass dies nur mit Einschränkungen möglich ist.

Das wird vor allem durch die Tatsache klar, dass die erhobenen Werte der beiden Säle nicht immer im optimalen Bereich liegen, sie sich trotzdem als Rahmen für musikalische Veranstaltungen hervorragend eignen.

Nicht außer Acht zu lassen ist in diesem Zusammenhang die Tatsache, dass es sich bei den untersuchten Sälen um über hundert Jahre alte Konzertsäle handelt. Eben diese Konzertsäle stehen hinsichtlich Hörsamkeit und Qualität der Akustik, modernen Konzerträumen in denen das gesamte heutige Wissen um die Raumakustik steckt, um nichts nach.

Es sind also nicht nur Zahlen, Fakten oder Strukturen, die die Konzerte zu einem Genuss machen, sondern auch die Empfindungen, die damit einhergehen. Ein wesentlicher Punkt in diesem Zusammenhang ist sicherlich die Koinzidenz des weltberühmten Wiener Musiklebens und Konzertsälen mit hervorragender Akustik.

Aus diesem Grund sollte jeder Zuhörer angehalten sein, sich bei der Wahl des Veranstaltungsrahmens nicht alleine von Bewertungen leiten zu lassen, sondern auch die subjektiven akustischen Eindrücke, die während des Konzertes gewonnen werden können, in das Gesamtbild miteinzubeziehen.

Es wäre erstrebenswert, das theoretische Wissen um die Wirkung raumakustischer Strukturen praktisch anwenden zu können, eventuelle Veränderungen sowohl visuell als auch auditiv zu erkennen und zugleich zu beurteilen. Dieses Ziel wäre jedoch nicht nur für Akustiker anzustreben, sondern auch für Personen, die eine intensivere Auseinandersetzung mit dieser Thematik anstreben.

Ein weiterführender Forschungsansatz wäre eine musikpsychologische Untersuchung der Empfindungen des Publikums während eines Konzertereignisses bei variierenden raumakustischen Faktoren. Dies würde vor allem Aufschlüsse über die als optimal empfundene Akustik geben und die Ergebnisse dieser Forschung könnten rückwirkend auf das Wissen um den Einfluss der raumakustischen Faktoren hilfreich für den Entwurf neuer und moderner Konzertsäle sein.

6. Quellenverzeichnis

6.1. Literaturverzeichnis

AUHAGEN, Wolfgang: Akustische Grundbegriffe. In: Die Musik in Geschichte und Gegenwart (Sachteil 1). Kassel: Bärenreiter 1994, S. 367-376

BERANEK, Leo: Concert Halls an Opera Houses. Music, Acoustics, and Architecture. New York: Springer 2004

BERGEIJK, Willem a. van; et.al.: Die Schallwellen und wir. Wie und was wir hören. München: Verlag Kurt Desch 1960

BLAUERT, Jens: Spatial Hearing. The Psychophysics of Human Sound Localisation. Cambridge: The MIT Press 1999

BROCH, Jens Trampe; JENSON, Viggo Neble: On the Measurement of Reverberation. In: Technical Review (Nr. 4) 1966

CLEMENTS, Pamela: Great Halls: Great renovations. Renovation of Europe's two most famous concert halls – the Grosser Musikvereinssaal in Vienna and the Concertgebouw in Amsterdam. In: Journal of Acoustical Society of America, Vol. 106, No. 4, Pt. 2, October 1999, 2300

CREMER, Lothar: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik. Geometrische Raumakustik Band 1. Stuttgart: Hirzel Verlag 1948

CREMER, Lothar: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik. Statistische Raumakustik Band 2. Stuttgart: Hirzel Verlag 1961

CREMER, Lothar: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik. Band 1. Stuttgart: Hirzel Verlag 1978

DICKREITER, Michael et.al.: Handbuch der Tonstudioteknik. Band 1. München: Saur Verlag 2008

FASOLD, Wolfgang; VERES, Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen. Berlin: Huss-Medien 2003

FORSYTH, Michael: Bauwerke für Musik. Konzertsäle und Opernhäuser, Musik und Zuhörer vom 17. Jahrhundert bis zur Gegenwart. München: Saur Verlag 1992

FURRER, Willi: Raum- und Bauakustik für Architekten. Basel: Birkhäuser Verlag 1956

HALL, Donald: Musikalische Akustik. Ein Handbuch. Mainz: Schott Musik International 1997

KUTTRUFF, Heinrich: Room Acoustics. London: Spon-Press 2009

LONG, Marschall: Architectural Acoustics. Burlington: Elsevier Academic Press 2006

LORENZ-KIERAKIEWITZ, Klaus Hendrik; VERCAMMEN, Martijn: Acoustical Survey of 25 European Concert Halls. Düsseldorf: Peutz Consult GmbH 2009

MEYER Jürgen: Kirchenakustik. Frankfurt am Main: Verlag Erwin Bochinsky 2003

MEYER, Jürgen: Akustik und musikalische Aufführungspraxis. Leitfaden für Akustiker, Tonmeister, Musiker, Instrumentenbauer und Architekten. Bergkirchen: Edition Bochinsky 2004

RÖMER, Claus: Schall und Raum. Eine kleine Einführung in die Welt der Akustik. Berlin: vde-Verlag 1994

SCHRÖDER, Manfred; EILEMANN, Andreas: Raumakustik. In: Die Musik in Geschichte und Gegenwart (Sachtteil 1). Bärenreiter: Kassel 1994, S. 406-411

VEIT, Ivar: Bauakustik. Schallschutz im Hochbau. Renningen: Expert Verlag 2003

WEINZIERL, Stefan: Beethovens Konzerträume. Raumakustik und symphonische Aufführungspraxis an der Schwelle zum modernen Konzertwesen. Frankfurt am Main: Verlag Erwin Bochinsky 2002

WEINZIERL, Stefan: Handbuch der Audiotechnik. Berlin: Springer 2008

WERNER, Ulf: Schallschutz und Raumakustik. Handbuch für Theorie und Praxis. Berlin: Bauwerk Verlag 2009

ZWICKER, Eberhard; FELDTKELLER, Richard: Das Ohr als Nachrichtenempfänger. Stuttgart: Hirzel Verlag 1967

6.2. Internetquellen

Musikverein

<http://www.musikverein.at/dermusikverein/musikvereinssaal.php>

(aufgerufen am 02.01.2013)

Konzerthaus

<http://konzerthaus.at/konzerthaus/institution/>

(aufgerufen am 02.01.2013)

http://konzerthaus.at/konzerthaus/virtueller_rundgang/

(aufgerufen am 02.01.2013)

Anhang 1: Tabelle – Messergebnisse

Die Ergebnisse beziehen sich jeweils auf die jüngsten Messungen des Konzerthauses bzw. die durchschnittlichen Messungen des Musikvereins bei einer Frequenz von 1 kHz.

	Musikverein eigene Messungen	Musikverein Beranek unbesetzt	Musikverein Beranek besetzt	Musikverein Lorenz und Vercammen	Konzerthaus mit Vorhang - eigene Messungen	Konzerthaus ohne Vorhang - eigene Messungen	Konzerthaus Beranek unbesetzt	Konzerthaus Beranek besetzt
RT	2,99	3,05	1,96	2,5	1,8	2,1	2,45	1,79
EDT	2,53	3,01	-	-	1,82	1,99	2,05	1,97
C ₈₀	-0,07	-3,95	-	-2,3	3,16	3,04	-1,0	-0,3
BR	1,06	-	-	-	1,27	1,19	-	-
C ₅₀	-4,37	-	-	-	-0,71	-1,08	-	-
LF	-	0,17	-	-	-	-	-	-
G	-	6,57	-	-	-	-	3,0	2,2

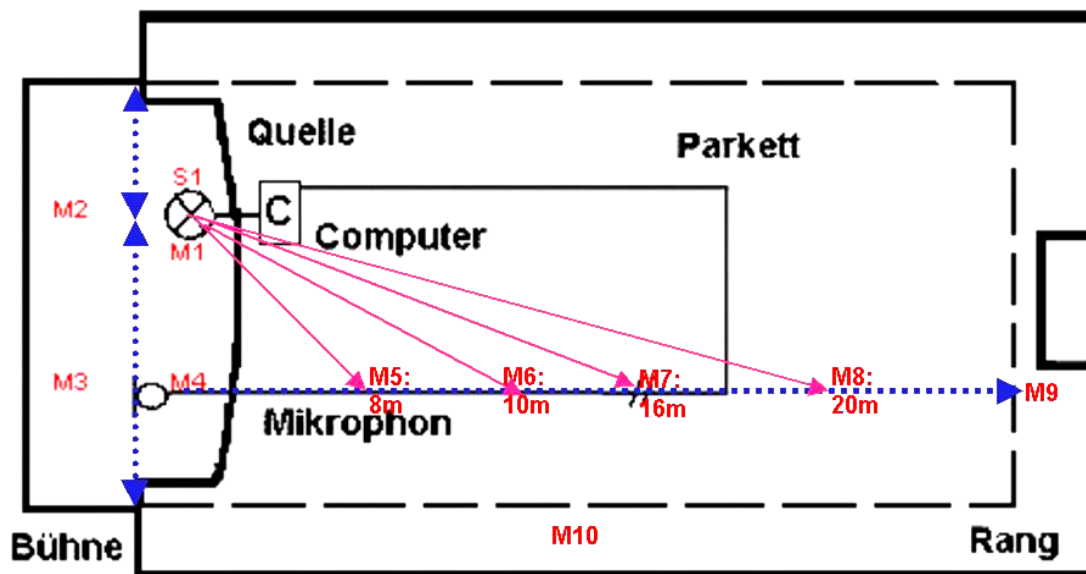
Anhang 2: Messprotokolle

Messprotokoll 1: Auszug aus dem Protokoll zum Musikverein

Raumakustik-Messprotokoll, Universität Wien, SoSe 2012 LV: 160147

NAME: Zanzinger Matr.Nr.: 0542540	Mikrofon: <u>Esper K4</u> Vorverstärkung: _____ d B	SAAL: <u>Goldener Saal</u> <u>Musikverein</u> DATUM: 29.06.12
L [m] <u>50</u> B [m] <u>19</u> H [m] <u>17</u> V [m ³] <u>16150</u> # Plätze <u>1650</u> Spez.Vol./m ³ /Platz <u>9,3</u> # Besetzt _____		
Materialien Wände: <u>Holz, Stein</u> Decke: <u>Holz</u> Boden: <u>Holz</u> Podium: <u>Holz</u> Stühle: <u>Holz</u>		
Beschreibung Situation: _____ unbesetzt, Messungen mit Ballons 26°C, 52,5% Luftfeuchtigkeit _____		

Skizze Messpfade:



Mic	Saalebereich	Reihe	Stuhl	d(Q1) /m	T ₃₀ Mid /s	EDT Mid /s	C ₈₀ Mid / dB	C ₅₀ Mid / dB	D ₅₀ Mid / %	L / dB	G /dB	AL _{con} s / %
M1	Podium			1	2,68	-	13,26	12,34	94,23			
M2	Podium				2,85	1,77	4,8	2,92	63,81			
M3	Podium				2,88	2,07	2,9	1,06	56,01			
M4	Podium				2,89	2,23	3,43	2,46	63,2			
M5	Saal vorne			8	2,87	2,65	-2,45	-4,24	28,87			
M6	Saal Mitte			10	2,83	2,58	-1,76	-3,57	32,36			
M7	Saal Mitte			16	2,9	2,91	-4,63	-7,9	18,17			
M8	Saal hinten			20	2,85	2,77	-4,93	-8,74	15,96			
M9	Rang hinten			25	2,88	2,79	-6,12	-9,96	12,63			
M10	Rang Seite				2,87	3	-5,22	-8,32	13,72			
MW	Podium M2-4				2,87	2,02	3,71	2,14	61			
MW	Saal				2,87	2,72	-3,44	-6,11	23,84			
MW	Rang				2,88	2,9	-5,67	-9,14	13,18			

Frequenz / Hz	125	250	500	1000	2000	4000	500-2000	125-4000
Nachhallzeit T ₃₀ /s, räumlicher Mittelwert	3,21	3,05	2,91	2,99	2,81	2,35	2,9	2,89

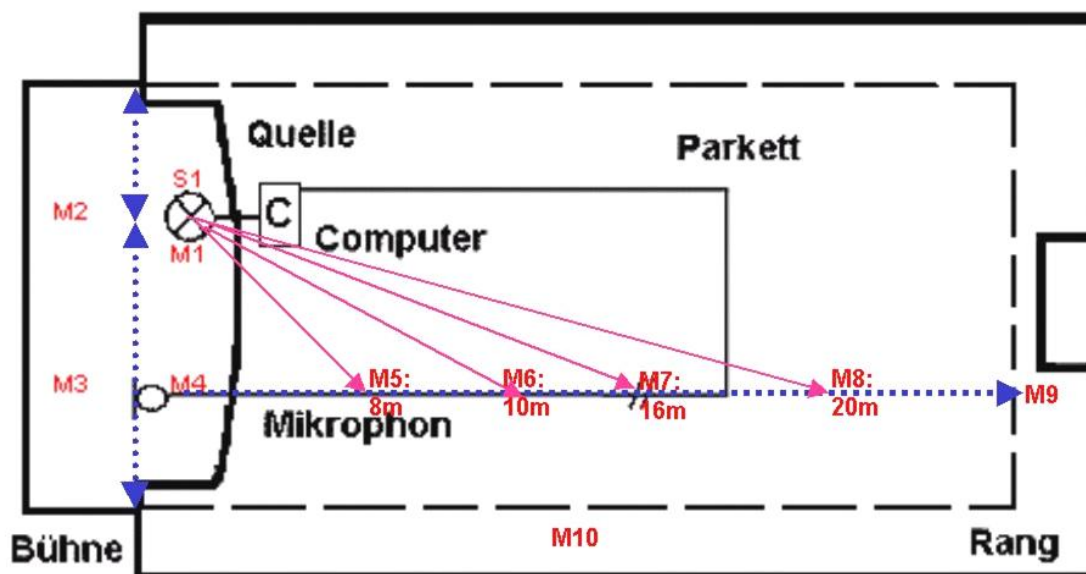
Messprotokoll 2: Auszug aus dem Protokoll zum Konzerthaus (mit Vorhang)

Raumakustik-Messprotokoll, Universität Wien, SoSe 2012

LV: 160147

NAME: Zanzinger Matr.Nr.: 0542540	Mikrofon: <u>Esper K4</u> Vorverstärkung: _____ dB	SAAL: <u>Großer Saal</u> <u>Konzerthaus</u> — DATUM: 20.04.2012
L [m] B [m] _____ H [m] _____ V [m ³] <u>16600</u> # Plätze <u>1865</u> Spez.Vol./m ³ /Platz <u>8,6</u> # Besetzt _____		
Materialien Wände: <u>Beton, Holz, Gipsplatten</u> Decke: <u>Gips, Holz</u> Boden: <u>Parkett</u> Podium: <u>Holz</u> Stühle: <u>Holz</u>		
Beschreibung Situation: _____ Konzerthaus mit Vorhang		

Skizze Messpfade:



Mic	Saalebereich	Reihe	Stuhl	d(Q1) /m	T ₃₀ Mid /s	EDT Mid /s	C ₈₀ Mid / dB	C ₅₀ Mid / dB	D ₅₀ Mid / %	L / dB	G /dB	AL _{con} s / %
M1	Podium			1	1,84	-	18,16	17,54				
M2	Podium				1,79	2,58	6,86	6,28				
M3	Podium				1,75	1,83	2,16	0,35				
M4	Podium				1,80	1,69	1,03	-0,3				
M5	Saal vorne			8	1,76	1,66	0,63	-1,42				
M6	Saal Mitte			10	1,83	1,56	0,51	-2,24				
M7	Saal Mitte			16	1,77	1,55	0,37	-2,57				
M8	Saal hinten			20	1,82	1,53	0,53	-2,12				
M9	Rang hinten			25	-	-	-	-				
M10	Rang Seite				2,09	2,13	-1,76	-6,39				
MW	Podium M2-4				1,78	2,03	3,35	2,11				
MW	Saal				1,78	1,58	0,51	-2,09				
MW	Rang				2,09	2,13	-1,76	-6,39				

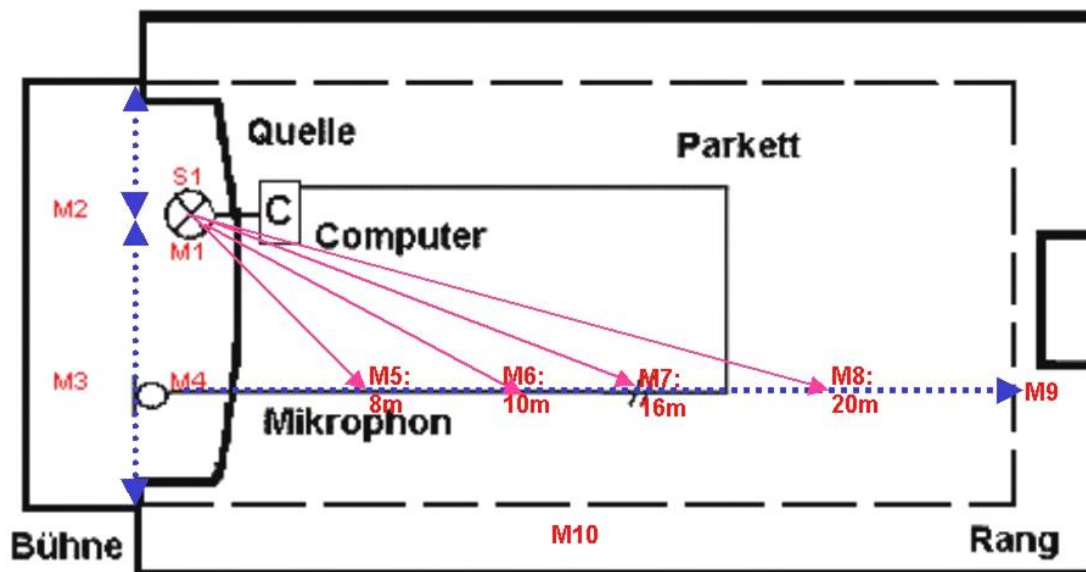
Frequenz / Hz	125	250	500	1000	2000	4000	500-2000	125-4000
Nachhallzeit T ₃₀ /s, räumlicher Mittelwert	2,28	2,42	1,89	1,8	1,66	1,36	1,78	1,9

Messprotokoll 3: Auszug aus dem Protokoll zum Konzerthaus (ohne Vorhang)

Raumakustik-Messprotokoll, Universität Wien, SoSe 2012

LV: 160147

NAME: Zanzinger Matr.Nr.: 0542540	Mikrofon: <u>Esper K4</u> Vorverstärkung: _____ d B	SAAL: <u>Großer Saal</u> <u>Konzerthaus</u> — DATUM: 20.04.2012
L [m] B [m] _____ H [m] _____ V [m ³] <u>16600</u> # Plätze <u>1865</u> Spez.Vol./m ³ /Platz <u>8,6</u> # Besetzt _____		
Materialien Wände: <u>Beton, Holz, Gipsplatten</u> Decke: <u>Gips, Holz</u> Boden: <u>Parkett</u> Podium: <u>Holz</u> Stühle: <u>Holz</u>		
Beschreibung Situation: _____ Konzerthaus ohne Vorhang _____		

Skizze Messpfade:


Mic	Saalebereich	Reihe	Stuhl	d(Q1) /m	T ₃₀ Mid /s	EDT Mid /s	C ₈₀ Mid / dB	C ₅₀ Mid / dB	D ₅₀ Mid / %	L / dB	G /dB	AL _{co} ns / %
M1	Podium			1	1,20	-	17,04	16,33				
M2	Podium				2,15	2,51	6,37	5,37				
M3	Podium				2,06	1,88	-0,40	-2,53				
M4	Podium				2,01	1,96	0,96	-0,88				
M5	Saal vorne			8	2,05	1,89	1,61	-0,13				
M6	Saal Mitte			10	2,06	2,03	1,98	-0,19				
M7	Saal Mitte			16	2,07	1,81	1,55	-2,60				
M8	Saal hinten			20	2,06	1,83	1,16	-1,75				
M9	Rang hinten			25	2,08	2,01	-2,95	-6,59				
M1 0	Rang Seite				-	-	-	-				
M W	Podium M2-4				2,07	2,12	2,31	0,65				
M W	Saal				2,06	1,89	1,58	-1,17				
M W	Rang				2,08	2,01	-2,95	-6,59				

Frequenz / Hz	125	250	500	1000	2000	4000	500- 2000	125- 4000
Nachhallzeit T ₃₀ /s, räumlicher Mittelwert	2,48	2,63	2,19	2,10	1,92	1,56	2,07	2,15

Abstract

Den akustischen Eigenheiten von Konzertsälen sowie der Frage nach den Ursachen für eine gute Akustik wird in dieser Arbeit auf den Grund gegangen.

Im Zuge einer universitären Lehrveranstaltung wurden unter anderem der große (goldene) Saal des Wiener Musikvereines und der große Saal des Konzerthauses in Wien hinsichtlich der Akustik vermessen. Diese Beispiele sollen die theoretischen Abhandlungen der Themen Raumakustik sowie die physikalischen Grundlagen der Schallausbreitung verdeutlichen.

Die Ergebnisse der Messungen werden in dieser Arbeit präsentiert und zugleich mit den optimalen Werten für Veranstaltungsräume mit demselben Nutzungsprofil verglichen, um der Beantwortung der Frage nach den Kriterien für eine gute Akustik näher zu kommen.

Lebenslauf

Name: Peter Karl Zanzinger

Schulbildung

09/1990 – 06/1994	Volkschule, 3620 Spitz an der Donau
09/1994 – 10/2004	Bundesrealgymnasium Krems Ringstraße, 3500 Krems
20.10.2004	Reifeprüfung

Studienverlauf

03/2008 – 01/2013 Universität Wien: Fachrichtung Musikwissenschaft
 (Diplomstudium)

Studienschwerpunkte:
Systematische Musikwissenschaft
Ethnomusikologie

Titel der Diplomarbeit:
„Akustische Eigenheiten von Konzertsälen – am Beispiel des
großen Musikvereinssaals sowie des großen Saals des
Wiener Konzerthauses“

Auslandsaufenthalte zu Studienzwecken

02/2010 – 03/2010 Feldforschung in Brasilien- -Recife im Zuge der
Lehrveranstaltung: EX Karneval in Brasilien 2010

Weitere Qualifikationen

Fremdsprachen	Englisch fließend in Wort und Schrift
10/2005 – 2007	Medizinische Universität Wien Fachrichtung: Humanmedizin, abgebrochen
10/2007 – 06/2008	Universität Wien Theater-, Film- und Medienwissenschaft, abgebrochen

Zusätzliche Informationen

10/2009 – 07/2011	Mitarbeit bei der Studienrichtungsvertretung Musikwissenschaft
2000 – 2011	Mitarbeit beim Tourismusverein Naturfreunde Spitz an der Donau
2006 - 2007	Mitarbeit beim Roten Kreuz Spitz an der Donau