

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).



DIPLOMARBEIT

Master Thesis

Schirmwirkung einer Feldahornhecke im belaubten und unbelaubten Zustand sowie Vergleich mit einer Lärmschutzwand

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bednar
und
Projektass. Dipl.-Ing. Hannes Konder

E 206
Institut für Hochbau und Technologie
Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz

Eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Stefan Mayerhofer
Matr.Nr.: 0530093
Zehnergasse 101/2
2700 Wiener Neustadt

Wien, am 06.06.2013

Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich sehr herzlich bei Ao.Univ.Prof. DI Dr.tech. Thomas Bednar bedanken, der mir durch sein Fachwissen eine große Hilfe bei der Erstellung dieser Arbeit war. Des Weiteren möchte ich DI Hannes Konder für die fachliche Unterstützung und die Hilfe bei den Messungen danken.

Ein Dank gilt auch der Firma Fellner (Ing. Wolfgang Fellner GmbH) für die Zurverfügungstellung und Herrn Petz (Fa. Fellner) für die Durchführung der Messungen mit der akustischen Kamera.

Des Weiteren möchte ich mich bei den Verantwortlichen vom Augarten Wien, die die Messungen am Grund der Bundesgebäudeverwaltung (Burghauptmannschaft Österreich) genehmigt haben, bedanken.

Kurzfassung

Schirmwirkung einer Feldahornhecke im belaubten und unbelaubten Zustand sowie Vergleich mit einer Lärmschutzwand

In dieser Arbeit wird die Schirmwirkung einer Feldahornhecke gemessen und analysiert. Die Messungen werden im belaubten und im unbelaubten Zustand durchgeführt, um eventuelle Auswirkungen der Erscheinungsform auf die Schirmwirkung feststellen zu können. Als Referenzwerte werden jene einer Lärmschutzwand herangezogen und vergleichend gegenübergestellt.

Es werden jene Grundbegriffe der Schallmesstechnik für Freifeldmessungen erläutert, welche zur Erstellung dieser Arbeit von Bedeutung sind. Dies sind in erster Linie allgemeine Aussagen über Schallschwingungen, wie Schalldruck und Schalleistung, und in weiterer Folge, was unter dem Begriff Lärm in der Literatur verstanden wird. Des Weiteren werden die Schallausbreitung im Freien und die Einwirkungen auf diese erklärt. Die Schalldämpfung durch Vegetation ist ebenfalls Thema dieser Arbeit.

Bei der Beschreibung der Messvorgänge wird auf die verwendeten Messgeräte, die gemessene Hecke, die Messaufbauten und den Messablauf im Detail eingegangen. Die Algorithmen bei der anschließenden Messauswertung werden ausführlich behandelt.

Die eigentlichen Messergebnisse werden in einem eigenen Kapitel ausführlich mit Tabellen dokumentiert, in Diagrammen graphisch aufbereitet und im Text kommentiert. Den unterschiedlichen Messergebnissen von Sommer- und Winteraspekt bei der Belaubung wird dabei besonderes Augenmerk eingeräumt. Der objektive Vergleich der Schirmwirkung einer Hecke mit der einer theoretischen Lärmschutzwand gleichen Ausmaßes lässt Rückschlüsse auf den Wirkungsgrad – unter Ausblendung der subjektiven Wahrnehmung – zu.

Die Untersuchungen in dieser Arbeit haben gezeigt, dass die Schirmwirkung der 1,0 Meter dicken und 2,2 Meter hohen Hecke mit Belaubung einen Summenpegel von maximal 2,0 dB erreicht. Dies liegt noch immer weit unter der Schirmwirkung einer Lärmschutzwand (etwa 17,5 dB). Ohne Belaubung erreicht der Summenpegel der Schalldämpfung nicht einmal die Hälfte von dem mit Belaubung. Er beträgt lediglich 0,7 dB, was für das menschliche Gehör nicht wahrnehmbar ist.

Die Werte gelten nur für diese Feldahornhecke mit den angegebenen Abmessungen und der vorgefundenen Dichte. Für Hecken aus anderen Baum- oder Straucharten (Laubholz) gelten diese Angaben nur näherungsweise, wenn die Abmessungen und die Dichte ähnlich sind.

Abstract

Shielding effect of a maple hedge in leafy and leafless condition and comparison with a noise protection wall

In this master thesis the shielding effect of a maple hedge is measured and analyzed. In order to determine the possible difference between hedges with foliage and hedges without foliage, the measurements are conducted for both states. The shielding effect of a noise protection wall is used as reference value.

Basic information on the topic of this research is worked out, which is of importance for the creation of this work. It is clarified what terms like sound pressure, sound power and noise exactly stand for. Furthermore the effects of sound propagation, sound absorption and sound attenuation by vegetation are explained.

The used measuring instruments, the measurement setup, the measurement process and the measured hedge itself are described in detail. The subsequent measurement analysis is also explained in detail.

The results of the conducted measurements are discussed in a separate chapter. The outputs are numerically shown by tables and graphically by diagrams. The difference between the shielding effect of a hedge with foliage and a hedge without foliage is obtained. Furthermore an objective comparison with the shielding effect of a theoretical noise protection wall the same dimensions is accomplished.

The conducted research shows, that the shielding effect of a 1.0 meter thick and 2.2 meters tall hedge with foliage reaches a total level of maximal 2.0 dB, which is far less than the shielding effect of a noise protection wall (about 17.5 dB). The total level of sound attenuation of a hedge without foliage is not even half of the sound attenuation of a hedge with foliage. With 0.7 dB the sound attenuation of a hedge without foliage is not perceptible to the human ear.

The obtained values are only valid for the investigated field maple hedge with given dimensions and given density. For hedges of other tree or shrub species the results are applicable only if dimension and density are similar.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	3
2.	Aufgabenstellung.....	4
3.	Grundlagen.....	5
3.1.	Schallschwingungen	5
3.1.1.	Frequenz und Wellenlänge.....	5
3.1.2.	Schalldruck und Schalldruckpegel.....	6
3.1.3.	Schalleistung und Schalleistungspegel.....	6
3.2.	Ton, Klang, Geräusch	8
3.2.1.	Lärm	9
3.2.2.	Beurteilung von Lärm	10
3.3.	Schallausbreitung im Freien.....	11
3.4.	Lärmimmissionsschutz.....	14
3.5.	Einwirkungen auf die Schallausbreitung im Freien	15
3.5.1.	Pegelminderung mit der Entfernung A_{div}	15
3.5.2.	Atmosphärische Absorption A_{atm}	16
3.5.3.	Bodendämpfung A_{gr}	16
3.5.4.	Abschirmung A_{bar}	17
3.5.1.	verschiedene andere Effekte A_{misc}	19
3.5.2.	Reflexionen	19
3.5.3.	Klimatische Einflüsse	21
3.6.	Schalldämpfung durch Vegetation	22
3.6.1.	Beschreibung der städtischen Gehölze.....	22
3.6.2.	Angaben in der ÖNORM ISO 9613-2	23
3.6.3.	Angaben in der Literatur	23
3.6.4.	Wirkungsweise	25
4.	Messungen	29
4.1.	Messinstrumente.....	29
4.1.1.	Schallmesssystem.....	29
4.1.2.	Freifeldmikrofon.....	31
4.1.3.	Kalibrierung	31
4.1.4.	Schallquelle	32
4.1.5.	Akustische Kamera	33
4.2.	Vorbereitende Messungen	34
4.2.1.	Richtcharakteristik horizontal.....	34
4.2.2.	Richtcharakteristik vertikal.....	36
4.2.3.	Schallausbreitung bei Abstandsverdoppelung.....	40
4.3.	Die Hecke	44
4.3.1.	Definition Hecke	44
4.3.2.	Zusatzkriterien für die Eignung als Schallschirm	44
4.3.3.	Gemessene Hecke	45

4.3.4.	Baumart.....	46
4.3.5.	Zustand der gemessenen Hecke aus akustischer Sicht.....	46
4.4.	Messungen an der Hecke	48
4.4.1.	Messtage.....	48
4.4.2.	Messaufbau.....	48
4.5.	Auswertung der Messungen	53
4.5.1.	Dämpfungseinflüsse aus der ÖNORM ISO 9613-2.....	53
4.5.2.	Auswertung der Messung im Augarten	54
5.	Messergebnisse	58
5.1.	Messergebnisse mit Belaubung.....	59
5.2.	Messergebnisse ohne Belaubung.....	61
5.3.	Akustische Kamera	63
5.4.	Beurteilung der Messergebnisse.....	65
5.4.1.	Vergleich mit und ohne Belaubung.....	66
5.4.2.	Vergleich mit einer Lärmschutzwand.....	67
5.4.3.	Akustische Kamera	67
5.4.4.	Gesamtbeurteilung.....	68
6.	Zusammenfassung.....	69
7.	Abbildungsverzeichnis	70
8.	Tabellenverzeichnis	72
9.	Literaturverzeichnis	73
10.	Anhang.....	75
10.1.	Fotos der vorbereitenden Messungen	75
10.2.	Messergebnisse vorbereitende Messungen.....	78
10.3.	Fotos der gemessenen Hecke	80
10.4.	Fotos der Messungen	81
10.5.	Verwendete Richtcharakteristiken.....	84
10.6.	Messergebnisse Strahlenmessung	85
10.7.	Messergebnisse Linienmessung.....	88
10.8.	Geräteliste.....	93
10.9.	Wetterdaten	94

1. Einleitung

„Sehr viel weniger wirksam als geschlossene Abschirmwände sind Sträucher, Bäume u. dgl., deren Wirkung oft stark überschätzt wird.“ [KUT04]

Täglich werden wir durch Lärm belästigt. Dies ist eine unerwünschte Begleiterscheinung unseres technischen Fortschritts. Trotz erfolgreicher Lärminderungsmaßnahmen in der Vergangenheit, hat diese Problematik nicht an Bedeutung verloren, sondern zugenommen. Lärm ist ein Geräusch, das störend wahrgenommen wird und das Gehör schädigen kann.

Mehr als drei Viertel der Bevölkerung fühlen sich durch Lärm in ihrer Umwelt belästigt. Des Weiteren steht die Lärmschwerhörigkeit bei den Berufskrankheiten noch immer ganz weit oben [FAS03].

Der Lärmschutz ist den stadt- und raumplanerischen Vorschriften unterworfen. Dennoch soll Lärmschutz – gerade im urbanen Siedlungsgebiet - das Stadtbild möglichst nicht beeinflussen und naturnahe wirken. Neben hoher Wirksamkeit, Ästhetik und Sicherheit soll Lärmschutz auch nachhaltig sein. All das würde sich durch eine Kombination von Lärmschutz mit Bepflanzung bzw. Bepflanzung als Lärmschutz realisieren lassen.

Hecken können möglicherweise all diese Forderungen und Rahmenbedingungen erfüllen. Trotz dieser Möglichkeiten gibt es kaum wissenschaftliche Untersuchungen, die sich ausschließlich mit der Schirmwirkung von Hecken befassen.

Nachdem eine Hecke eine geschlossene Oberfläche und entsprechende Höhe erreicht hat, tritt sofort ein psychologischer Nutzen ein. Dadurch, dass die Lärmquelle nicht mehr sichtbar ist, glaubt man die Lautstärke habe sich verringert und man fühlt sich weniger stark belästigt.

Da in der Literatur kaum Aussagen über die Schirmwirkung von Hecken gemacht werden, wird dies in dieser Arbeit an einer Hecke gemessen und berechnet. Die Messungen werden an einer bestehenden Hecke im Sommer (mit Belaubung) in der Natur durchgeführt. Die gleiche Messung (gleicher Messaufbau) wird für die gewählte Hecke ohne Belaubung wiederholt, um den Unterschied zwischen Hecke mit und ohne Belaubung berechnen zu können. Des Weiteren wird ein Vergleich mit einer standardisierten Lärmschutzwand angestellt.

Nachdem der psychologische Nutzen nicht eindeutig messbar ist, wird der physikalische Effekt ermittelt, um die in dem Zitat getätigte Aussage für eine Hecke quantifizieren zu können.

2. Aufgabenstellung

Es soll die Schirmwirkung an einer gepflanzten und laufend in Form gebrachten Hecke durch Messungen bestimmt werden. Die Messungen sollen an einer bestehenden Hecke vor Ort durchgeführt werden. Alle Messungen sollen ausgewertet und auf Plausibilität geprüft werden. Des Weiteren soll der Unterschied zwischen der Hecke mit Bepflanzung und ohne Bepflanzung gemessen und beschrieben werden. Aus diesem Grund ist es notwendig, eine Hecke zu wählen, welche im Sommer (mit Bepflanzung) und an der gleichen Stelle im Winter (ohne Bepflanzung) gemessen werden kann. Die Hecke soll auch die Mindestanforderungen, die zur Lärminderung erforderlich sind, erfüllen. Dies sind vor allem die Abmessungen und die Dichte.

Die gemessenen Schirmwirkungen sollen mit der rechnerisch ermittelten Schirmwirkung einer Lärmschutzwand verglichen werden. Dabei sollen die Abmessungen der Hecke und die bei den Messungen verwendeten Entfernungen beibehalten werden, um einen direkten Vergleich herstellen zu können.

Die relativen Abstände zwischen der Feldahornhecke und der Schallquelle bzw. den Mikrofonen sollen so gewählt werden, dass dies einer realistischen Situation in einem innerstädtischen Siedlungsgebiet entspricht. Dabei soll der Straßenverkehr (Linien-schallquelle) durch eine Punktschallquelle ersetzt werden.

Um die Aufgabenstellung erfüllen zu können, ist es notwendig, eine geeignete Hecke zu finden, an der alle Messungen ungestört durchgeführt werden können. Das bedeutet, dass möglichst keine Reflexionen die Messungen beeinflussen dürfen. Auch die Zugänglichkeit, Stromversorgung und Erlaubnis der Grundstückseigentümer muss gegeben sein.

Des Weiteren ist es erforderlich, mehrere vorbereitende Messungen zu machen, um plausible Berechnungen und Aussagen über die schalltechnisch erfasste Hecke machen zu können.

3. Grundlagen

3.1. Schallschwingungen

Als Schall werden mechanische Schwingungen in einem elastischen Medium bezeichnet. Mechanische Schwingungen sind Bewegungen von Teilchen um ihre Ruhelage. Hervorgerufen werden diese Bewegungen durch äußere Krafteinwirkung oder gestörte, turbulente Strömungen. Das elastische Medium kann gasförmig, flüssig oder fest sein. Der Schall ist an ein elastisches Übertragungsmedium gebunden. Die Form der Schallausbreitung hängt von den Eigenschaften des Mediums ab. Ohne Materie (z.B.: im Vakuum) ist keine Schallausbreitung möglich.

Das menschliche Ohr nimmt den Schall über die Luft (gasförmig) wahr. Wenn die Frequenz und der Druck der Schwingungen im Wahrnehmungsbereich des menschlichen Gehörs liegen, dann spricht man vom Hörschall. Deshalb sind Frequenz und Schalldruck die wichtigsten Parameter von Schallschwingungen [FAS03] [MAU09].

3.1.1. Frequenz und Wellenlänge

Die Anzahl der Schwingungen pro Zeiteinheit ist die Frequenz f . Sie wird in Hertz ([Hz] = 1/s) angegeben. Die Frequenz charakterisiert die Tonhöhe. Je höher die Frequenz, umso höher ist der Ton. Der wahrnehmbare Frequenzbereich des menschlichen Gehörs reicht von 16 Hz bis 20.000 Hz. Nach [MAU09] kann das menschliche Ohr Schallsignale nur bis 16.000 Hz wahrnehmen. Unter 16 Hz spricht man vom Infraschall und über 20 kHz vom Ultraschall.

Die Wellenlänge λ ist durch den Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Punkten des gleichen Schwingungszustandes einer sich ausbreitenden Welle definiert. Die Wellenlänge wird in Meter angegeben. Die Wellenlänge ist mit der Frequenz wie folgt verbunden:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

λ	Wellenlänge [m]
c	Schallgeschwindigkeit (≈ 340 m/s)
f	Frequenz [1/s]

Bei einer Frequenz von 100 Hz ergibt sich somit eine Wellenlänge von 3,4 m, bei 1.000 Hz von 34 cm und bei 10.000 Hz von 34 mm [FAS03].

3.1.2. Schalldruck und Schalldruckpegel

Eine weitere wichtige Kenngröße von Schallschwingungen ist der Schalldruck p . Der Schalldruck definiert die Amplitude des Schallereignisses. Das menschliche Gehör kann Druckwechsel von 20 μPa (Hörschwelle) bis ca. 20 Pa (Schmerzgrenze) wahrnehmen. Im Vergleich dazu liegt der statische, atmosphärische Druck (Ruhedruck) bei etwa 100 kPa. Die Wahrnehmungs- und Schmerzgrenzen sind frequenzabhängig. Zum Beispiel benötigen tieffrequente Schallvorgänge zur Wahrnehmung größere Schalldrücke als hochfrequente.

Das Gehör orientiert sich nicht an absoluten, sondern an relativen Schalldruckänderungen (10% Schalldruckänderung sind gerade noch wahrnehmbar). Aus diesem Grund wird in der Akustik nicht mit Schalldrücken, sondern mit daraus abgeleiteten logarithmischen Größen, Schalldruckpegeln L_p , gearbeitet:

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0} \quad (2)$$

L_p	Schalldruckpegel [dB]
p	Schalldruck [Pa]
p_0	Bezugswert des Schalldrucks; $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$

Die Einheit des Schalldruckpegels ist Dezibel [dB]. Durch den Bezugswert p_0 bewegen sich die Schalldruckpegel des Hörbereichs zwischen 0 dB (Hörschwelle) und 130 dB (Schmerzgrenze). Schalldruckpegeländerungen von 1 dB sind gerade noch wahrnehmbar [FAS03].

3.1.3. Schalleistung und Schalleistungspegel

Schalldruckpegel nehmen mit zunehmender Entfernung zur Schallquelle ab, d.h. sie sind ortsabhängig. Zur akustischen Beschreibung von Schallquellen müsste daher eine Ortsangabe angefügt werden. Aus diesem Grund werden Schallquellen durch die abgestrahlte Schalleistung W bzw. durch den Schalleistungspegel L_w beschrieben:

$$L_w = 10 \lg \frac{W}{W_0} \quad (3)$$

L_W	Schalleistungspegel [dB]
W	Schalleistung [W]
W_0	Bezugswert der Schalleistung [W]

$$W_0 = \frac{p_0^2}{\rho_0 c_0} \quad (4)$$

ρ_0	Dichte des Mediums (Dichte von Luft bei 20°C ist etwa 1,25 kg/m ³)
c_0	Schallgeschwindigkeit (Luft bei 20°C: $c_0 = 343$ m/s)

Um am Ohr einen Schallreiz hervorzurufen, genügen noch kleinere Werte als der Bezugswert (etwa 10^{-4} pW). Typische Schalleistungen und Schalleistungspegel von verschiedenen Schallquellen sind in Tabelle 1 angegeben [FAS03].

Tabelle 1: Beispiele für Schalleistungen W und Schalleistungspegel L_W von Schallquellen [FAS03]

Schallquelle	Schalleistung	Schalleistungspegel
	W [W]	L_W [dB]
Kühlschrank	10^{-7}	50
Unterhaltungssprache	10^{-5}	70
laute Sprache, lebhafte Schulklasse	10^{-3}	90
Flügel	10^{-1}	110
Preßlufthammer	1	120
Orgel	10	130
Großdiesel	10^2	140
Sirene	10^3	150
Strahltriebwerk	10^4	160
Raketentriebwerk	10^6	180

3.2. Ton, Klang, Geräusch

In der Praxis setzen sich die meisten Schallereignisse aus verschiedenen Anteilen unterschiedlicher Frequenz zusammen. In Abbildung 3.1 sind drei spezielle Signalformen dargestellt. Die Zeitfunktion in der linken Spalte zeigt den Schalldruck über die Zeit. Der rechte Teil zeigt das Signal als Frequenzspektrum. D.h. die enthaltenen Geräuschanteile sind mit ihrer entsprechenden Amplitude der Druckschwankung (Maß für die Lautstärke) über den zugehörigen Frequenzen aufgetragen.

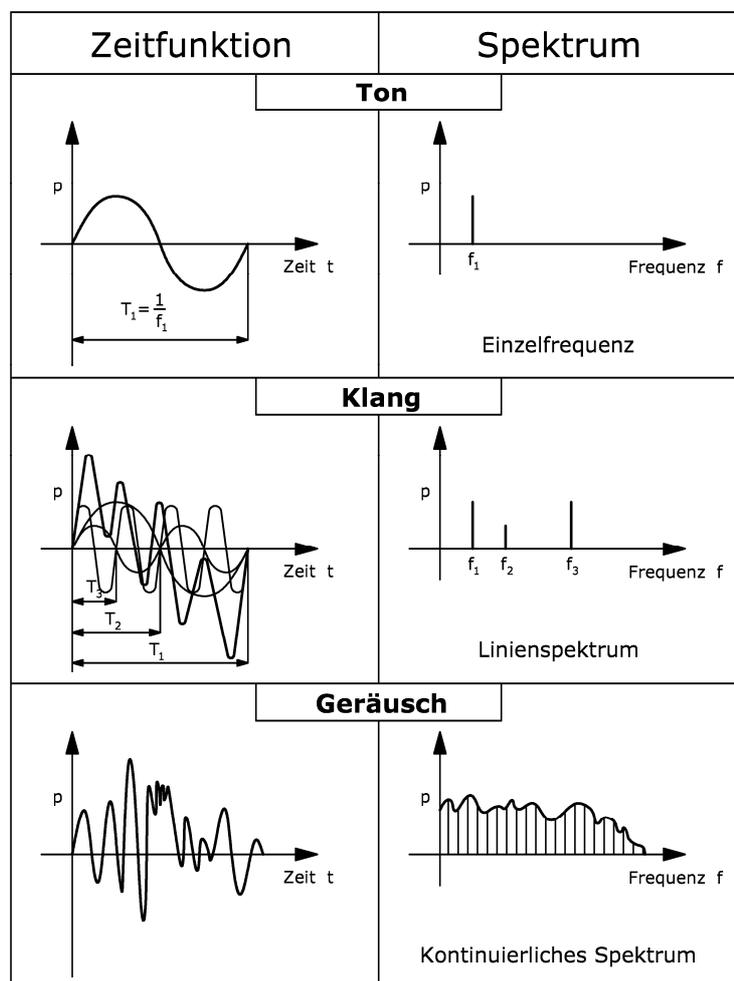


Abbildung 3.1: Darstellung von Ton, Klang und Geräusch in der Zeitfunktion und als Spektrum [MAU09]

Der Ton besteht aus einem sinusförmigen Schallsignal. Im Spektrum ergibt sich eine einzelne Linie, die durch ihre Lage die Frequenz und durch ihre Höhe die Amplitude beschreibt. Setzt sich das Schallereignis aus mehreren Einzeltönen zusammen, dann spricht man von einem Klang. Üblicherweise wird der Klang von Musikinstrumenten erzeugt. Bei den meisten technischen Schallquellen spricht man

von einem Geräusch. Dies entspricht einem regellos schwankenden Schalldrucksignal mit nahezu lückenlos, nebeneinander liegenden Teilfrequenzen unterschiedlicher Amplitude [MAU09].

3.2.1. Lärm

„Lärm ist ein unerwünschtes Geräusch, das zu einer Belästigung, Störwirkung, Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit, besonderen Unfallgefahren oder Gesundheitsschäden führt.“ [MAU09]

Lärm ist störender oder schädigender Schall. Lärm lässt sich nicht durch eine physikalische Größe beschreiben. Ob der Mensch ein Schallereignis als angenehm oder belästigend wahrnimmt, ist von vielen subjektiven Einflussfaktoren abhängig [FAS03] [MAU09].

„Nicht die Lautstärke, sondern die Einstellung des Hörers macht also ein Geräusch zum Lärm.“ [MAU09]

Störungen durch Lärm treten in Form von Schlafstörungen, von Konzentrationsstörungen, von verminderter Leistungsfähigkeit oder von verschlechterten Kommunikationsbedingungen und Hörverhältnissen auf. Diese Arten der Beeinträchtigung schädigen das Gehör nicht. Verursacht der Lärm einen Hörschaden, dann spricht man von Lärmschädigung. Schwerhörigkeit ist nach wie vor einer der häufigsten Berufskrankheiten [FAS03].

Es gibt mehrere Arten von Lärm. Grundsätzlich kann in Industrie- und Gewerbelärm, Baulärm, Verkehrslärm und Sport- und Freizeitlärm unterschieden werden. Der Verkehrslärm kann von Straßenwegen, Schienenwegen und Verkehrsflughäfen ausgehen.

Im Alltag kommen wir nicht mit allen Lärmquellen gleichermaßen in Berührung. Abbildung 3.2 zeigt die Bevölkerungsanteile in Prozent, die sich durch Lärm gestört fühlen und die dazugehörige Verteilung der Lärmquellen bzw. Ursachen. Die Daten stammen aus einer Umfrage in der Bundesrepublik Deutschland 2004 [MAU09].

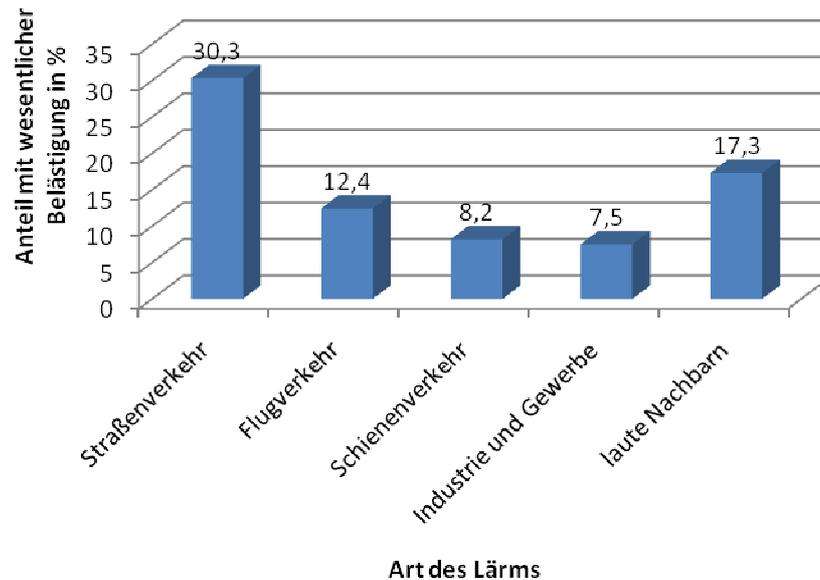


Abbildung 3.2: Bevölkerungsanteile mit einer wesentlichen Belästigung durch Umweltlärm, differenziert nach Verursachern [MAU09]

3.2.2. Beurteilung von Lärm

Jedes Geräusch ist durch seine Lautstärke und durch seine Lästigkeit charakterisiert. Mit steigender Lautstärke nimmt auch die Lästigkeit zu. Bei zwei Geräuschen gleicher Herkunft mit ähnlicher Frequenzverteilung wird das lautere als unangenehmer empfunden. Im Gegensatz dazu kann bei zwei verschiedenen Geräuschen das lautere als angenehmer empfunden werden.

Die Lästigkeit lässt sich nicht eindeutig beschreiben und es ist nicht möglich, eine Messgröße zur Beschreibung der Störwirkung, zu definieren. Eine Vielzahl an physikalischen und psychologischen Einflüssen bestimmt die Lästigkeit eines Geräusches. Dabei sind vor allem die Frequenzverteilung, die Zeitdauer der Einwirkung, der Pegelverlauf über die Zeit, die Umgebungsbedingungen, der Informationsgehalt der Schallquelle, die gerade ausgeführte Tätigkeit, die seelische Verfassung des Belästigten, die persönliche Einstellung dem Geräusch gegenüber und ähnliche Einflüsse von Bedeutung [FAS03] [HEN99] [MAU09].

3.3. Schallausbreitung im Freien

In unmittelbarer Nähe der Schallquelle befindet sich das sogenannte freie Schallfeld, d.h. in diesem Bereich ist die Schallausbreitung nicht durch Reflexion, Abschattungen oder Absorption gestört. Die Schallwellen breiten sich im freien Schallfeld kugelförmig aus. Im Zentrum dieser Kugel befindet sich die Schallquelle. In der Praxis befindet sich die Quelle meist vor einer reflektierenden Fläche (z.B.: Boden). In diesem Fall erfolgt die Abstrahlung in den Halbraum.

Direkt neben der Oberfläche der Schallquelle kann eine Ungleichförmigkeit der Schalleistung auftreten. Dieser Bereich wird Nahfeld genannt und ist etwa eine halbe Wellenlänge breit. In dieser Zone kann durch ein Hin- und Herpendeln von Schallenergie die Schalleistung vergrößert, durch Abschattung oder Beugung (hervorgerufen durch vorstehende Teile an der Quellenoberfläche) das Schallfeld beeinflusst oder durch Überlagerungen die Schalleistung verringert oder vergrößert werden. An das Nahfeld grenzt das Fernfeld [FAS03].

Die folgenden Erläuterungen gelten - mit ausreichender Genauigkeit für die Praxis - für das Fernfeld. Für das Nahfeld stellen sie eine grobe Näherung dar [FAS03].

Bei einer ungehindert kugelförmigen Schallausbreitung errechnet sich der quadratische Schalldruck mit folgender Formel

$$p^2 = \frac{Wc_0\rho_0}{S} \quad (5)$$

p^2	Quadrat des Schalldruckes [Pa ²]
$c_0\rho_0$	Schallkennimpedanz ≈ 430 Ns/m ³
W	Schalleistung [W]
S	Hüllfläche [m ²]

Wird nun die gesamte Gleichung (5) durch p_0^2 (p_0 : Bezugswert des Schalldrucks; $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$) dividiert, erhält man folgenden Ausdruck

$$\frac{p^2}{p_0^2} = \frac{Wc_0\rho_0}{p_0^2 S} \quad (6)$$

Wird die Gleichung (6) logarithmiert und mit 10 multipliziert, kann durch Herausheben von der Hüllfläche S aus dem Nenner folgender Ausdruck angeschrieben werden

$$10\lg \frac{p^2}{p_0^2} = 10\lg \frac{Wc_0\rho_0}{p_0^2} - 10\lg S \quad (7)$$

Durch Anwenden der Formeln (2) und (4) ändert sich die Gleichung (7) zu folgendem Ausdruck

$$L_p = 10\lg \frac{W}{W_0} - 10\lg S \quad (8)$$

Wird anschließend noch die Formel (3) angewandt, dann lässt sich folgende Gleichung anschreiben

$$L_p = L_W - 10\lg S \quad (9)$$

Die Hüllfläche S lässt sich durch $4\pi s^2$ (s = Abstand zwischen Quelle und Empfänger) ersetzen. Durch anschließende Umformungen ergeben sich die Formeln (10) bis (12), wobei $10\lg 4\pi = 11$, ist

$$L_p = L_W - 10\lg 4\pi s^2 \quad (10)$$

$$L_p = L_W - 10\lg s^2 - 11 \quad (11)$$

$$L_p = L_W - 20\lg s - 11 \quad (12)$$

Somit ist eine Beziehung zwischen dem Schalldruckpegel und dem Schalleistungspegel, in Abhängigkeit von der Entfernung, hergestellt. Gleichung (12) gilt allerdings nur für kugelförmig abstrahlende Schallquellen. Bei halbkugelförmig abstrahlenden Quellen erhöht sich der Schalldruckpegel, bei gleichem Abstand s , um 3 dB.

$$L_p = L_W - 20\lg s - 8 \quad (13)$$

Wird der Abstand von der Schallquelle und damit auch die Hüllfläche vergrößert, so verteilt sich die abgestrahlte Schalleistung auf einer größeren Fläche und der Schalldruckpegel nimmt ab. Um eine Pegelabnahme von 10 dB zu erreichen, muss die

Hüllfläche S um das 10-fache vergrößert werden. Die Schallpegelabnahme $L_{p1} - L_{p2}$ errechnet sich aus

$$L_{p1} - L_{p2} = 10 \lg \frac{S_2}{S_1} \quad (14)$$

Führt man anstatt der Hüllfläche den Radius der kugelförmigen oder halbkugelförmigen Hüllfläche ein, dann ergibt sich folgender Ausdruck

$$L_{p1} - L_{p2} = 20 \lg \frac{s_2}{s_1} \quad (15)$$

Verdoppelt man den Abstand s_1 ($s_2 = 2s_1$) zur Schallquelle ergibt sich folgender Ausdruck

$$L_{p1} - L_{p2} = 20 \lg \frac{2s_1}{s_1} \quad (16)$$

Der rechte Term in Gleichung (16) ergibt 6. Demnach bedeutet eine Abstandsverdoppelung eine Pegelminderung von 6 dB. Diese Kenngröße erweist sich als praktischer Wert bei der Abschätzung der Schallpegel im freien Schallfeld.

Ist die Schallquelle nicht ungerichtet, sondern besitzt eine bestimmte Richtcharakteristik, dann gilt für jede Ebene mit zugehörigem Richtungsmaß D in Abhängigkeit vom Winkel δ für den Schalldruckpegel (abgeleitet aus Formel (12))

$$L_{p(\delta)} = L_w - 20 \lg s - 11 - D(\delta) \quad (17)$$

[FAS03].

3.4. **Lärmimmissionsschutz**

Immissionsnachweise werden frequenzabhängig geführt (üblicherweise in Oktav- oder Terzschritten), um Lärmschutzmaßnahmen detaillierter festlegen zu können. Beim Spektrum von Straßenverkehrsgeräuschen fällt der Verlauf in Richtung hoher Frequenzen je Oktave um etwa 4 dB ab. Demnach sind die tieffrequenten Geräuschanteile entscheidend. Unter Berücksichtigung der A-Bewertung erweisen sich Geräusche in dem Frequenzbereiche 500 bis 1000 Hz als besonders störend. Dem entsprechend müssen Lärmschutzmaßnahmen an Straßen besonders die tiefen Frequenzen abhalten um wirksam zu sein [FAS03].

3.5. Einwirkungen auf die Schallausbreitung im Freien

Zur Nachweisführung des Lärmimmissionsschutzes müssen einige Einflussgrößen berücksichtigt werden, die die verlustfreie Schallausbreitung im Freien unterbinden. In der Regel bewirken diese Einwirkungen eine Verminderung des Schalldruckpegels am Immissionsort.

Die in diesem Kapitel angegebenen Formeln stammen aus der ÖNORM ISO 9613 Teil 2 [ONO08]. Diese ÖNORM bietet ein allgemeines Verfahren zur Berechnung der Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien.

Die Summe der Einflüsse auf die Schallausbreitung errechnet sich aus

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc} \quad (18)$$

A	Oktavband-Dämpfung, die während der Ausbreitung von der Punktschallquelle zum Empfänger auftritt [dB]
A_{div}	Pegelminderung mit der Entfernung [dB]
A_{atm}	Atmosphärische Absorption [dB]
A_{gr}	Bodendämpfung [dB]
A_{bar}	Abschirmung [dB]
A_{misc}	verschiedene andere Effekte [dB]

Die Dämpfung infolge verschiedener anderer Effekte A_{misc} kann durch Bewuchs, industrielle Anlagen oder bebaute Gebiete hervorgerufen werden.

Die Berechnung und der Geltungsbereich der Ausdrücke in Gleichung (18) werden in den folgenden Abschnitten erläutert [ONO08].

3.5.1. Pegelminderung mit der Entfernung A_{div}

Die Pegelminderung mit der Entfernung entspricht einer sphärischen Ausbreitung im freien Feld von einer Punktschallquelle:

$$A_{div} = 20 \lg \frac{d}{d_0} + 11 \quad (19)$$

d	Entfernung von der Quelle zum Empfänger [m]
d_0	Bezugsentfernung; $d_0 = 1$ m

Diese Formel gilt nur für den Fall der kugelförmigen Schallausbreitung.

Das bedeutet, je Abstandsverdopplung erfährt der Schall eine Reduktion um 6 dB (vergleiche Punkt 3.3, Formel (16)) [FAS03] [ONO08].

3.5.2. Atmosphärische Absorption A_{atm}

Bei der Schallausbreitung in der Luft kommt es durch Reibungs-, Zähigkeits- und Wärmeleitungsverluste zu einer Schallabsorption. Diese ist besonders bei hohen Frequenzen in großer Entfernung zur Schallquelle von Bedeutung.

Der Grad der Schallabsorption wird mittels Schallabsorptionskoeffizienten in Dezibel je Kilometer angegeben. In Tabelle 2 sind atmosphärische Dämpfungskoeffizienten in Abhängigkeit der Temperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit und der Oktavband-Mittenfrequenz angegeben [FAS03] [ONO08].

Die atmosphärische Absorption errechnet sich aus

$$A_{\text{atm}} = \frac{\alpha d}{1000} \quad (20)$$

α atmosphärischer Dämpfungskoeffizient [dB/km]

Tabelle 2: Atmosphärischer Dämpfungskoeffizient α für Schall je Oktavband-Mittenfrequenz

Temperatur	rel. Luftfeuchtigk.	Atmosphärischer Dämpfungskoeffizient α [dB/km]							
		Oktavband-Mittenfrequenz [Hz]							
T [°C]	RH [%]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
10	70	0,1	0,4	1	1,9	3,7	9,7	32,8	117
20	70	0,1	0,3	1,1	2,8	5	9	22,9	76,6
30	70	0,1	0,3	1	3,1	7,4	12,7	23,1	59,3
15	20	0,3	0,6	1,2	2,7	8,2	28,2	88,8	202
15	50	0,1	0,5	1,2	2,2	4,2	10,8	36,2	129
15	80	0,1	0,3	1,1	2,4	4,1	8,3	23,7	82,8

3.5.3. Bodendämpfung A_{gr}

Durch die Reflexion von Schall an der Bodenoberfläche kommt es zu Überlagerungen mit den Schallwellen, die sich direkt zwischen Quelle und Empfänger ausbreiten. Auf Grund dieser Überlagerungen erfährt der Schall eine Dämpfung. Die Dämpfung kann auch negativ werden – abhängig vom Bodenreflexionsgrad – und somit zu einer Erhöhung des Schalldrucks am Immissionsort führen.

Dieses Verfahren ist nur auf ebenem Boden (in der Horizontalen oder mit einer gleichmäßigen Neigung) anwendbar. Die Dämpfung wird hauptsächlich von den

Bodenoberflächen nahe der Quelle und dem Empfänger bestimmt. Dies wird durch den abwärts gekrümmten Ausbreitungsweg (Mitwind) sichergestellt.

Es werden drei Kategorien mit unterschiedlichen akustischen Eigenschaften von Oberflächen unterschieden. Diese werden durch einen Boden-Faktor G spezifiziert. Die drei Kategorien sind in Tabelle 3 beschrieben [ONO08].

Tabelle 3: Kategorien des Boden-Faktors G

$G = 0$	Harter Boden	Pflasterungen, Beton, Wasser, Eis und alle anderen Bodenoberflächen, die eine niedrige Durchlässigkeit haben.
$G = 0-1$	Gemischter Boden	Besteht der Boden aus harten und porösen Oberflächen, dann ist G ein Wert zw. 0 und 1 entsprechend des porösen Anteils.
$G = 1$	Poröser Boden	Boden, der von Gras, Bäumen und anderer Vegetation bedeckt wird (auch landwirtschaftliche Flächen).

$$A_{gr} = A_S + A_R + A_m \quad (21)$$

A_{gr}	Bodendämpfung
A_S	Teildämpfung für den Quellbereich
A_R	Teildämpfung für den Empfängerbereich
A_m	Teildämpfung für den Mittenbereich

Die in Formel (21) angegebenen Bereiche sind in Abbildung 3.3 dargestellt. Die weitere Berechnung der Ausdrücke A_S , A_R und A_m ist der ÖNORM ISO 9613-2 zu entnehmen [ONO08].

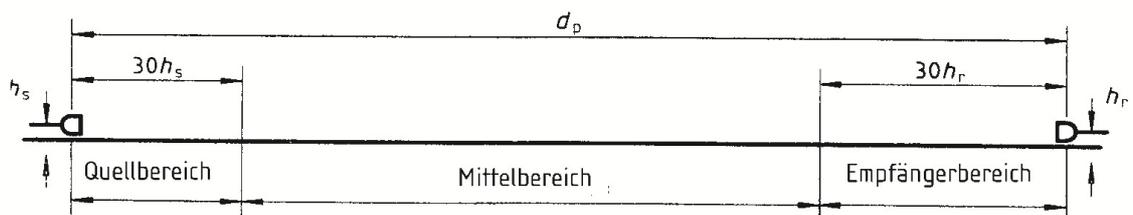


Abbildung 3.3: drei Bereiche zur Ermittlung der Bodendämpfung

3.5.4. Abschirmung A_{bar}

Nach ÖNORM ISO 9613 Teil 2 [ONO08] wird ein Gegenstand als abschirmendes Hindernis berücksichtigt, wenn folgende Bedingungen zutreffen:

- Die flächenbezogene Masse muss größer als 10 kg/m^2 sein.
- In der Oberfläche dürfen keine großen Spalten oder Lücken sein.

- Die Breite des Gegenstandes muss größer als die akustische Wellenlänge λ des interessierenden Oktavbandes sein.

Sind diese drei Bedingungen erfüllt, dann wird der Gegenstand als Schirm bezeichnet. Ein Schirm besitzt vertikale und horizontale Ränder, letzterer kann geneigt sein. Die Dämpfung durch einen Schirm wird mittels der Einfügungsdämpfung angegeben. Dabei kann die Beugung des Schalls sowohl über den oberen als auch über den seitlichen Rand von Bedeutung sein. Bei Mitwind-Schallausbreitung berechnet sich die Beugung über den oberen Rand nach

$$A_{bar} = D_z - A_{gr} > 0 \quad (22)$$

und für die Beugung um den seitlichen Rand nach

$$A_{bar} = D_z > 0 \quad (23)$$

D_z Abschirmungsdämpfung für jedes Oktavband
 A_{gr} Bodendämpfung bei Abwesenheit des Schirmes

Die Abschirmungsdämpfung berechnet sich aus Gleichung (24):

$$D_z = 10 \lg [3 + (C_2 / \lambda) C_3 z K_{met}] \quad (24)$$

$C_2 = 20$ schließt den Effekt der Boden-Reflexionen ein
 $C_3 = 1$ für einfache Beugung
 z Differenz zwischen den Schallweglängen des direkten und des gebeugten Schalls, nach Gleichung (25)
 K_{met} Korrekturfaktor für meteorologische Effekte, gemäß Gleichung

Für den Fall der Einzel-Beugung errechnet sich die Differenz der Schallweglängen gemäß Gleichung (25)

$$z = \sqrt{(d_{SS} + d_{SR})^2 + a^2} - d \quad (25)$$

d_{SS} Abstand von der Quelle zur Beugungskante [m]
 d_{SR} Abstand von der Beugungskante zum Aufpunkt [m]
 a Abstandskomponente parallel zur Schirmkante zwischen Quelle und Aufpunkt [m]

Der Korrekturfaktor für die meteorologischen Bedingungen errechnet sich für $z > 0$ aus

$$K_{met} = 10^{-\left(\frac{1}{2000}\right)^* \sqrt{\frac{d_{SS} d_{SR} d}{2 * z}}} \quad (26)$$

Für $z \leq 0$ ist $K_{met} = 1$.

Die angegebenen Formeln beziehen sich auf den Fall der Einzel-Beugung (dünne Schirme). Bei doppelter Beugung (dicke Schirme oder zwei dünne Schirme im Abstand e) sind die Formeln der ÖNORM ISO 9613 Teil 2 [ONO08] zu entnehmen. In [ONO08] werden keine Angaben darüber gemacht, ab wann ein Schirm als dick zu bewerten ist [ONO08].

3.5.1. verschiedene andere Effekte A_{misc}

Andere Effekte, die die freie Schallausbreitung verhindern, können Bewuchs (Wälder), industrielle Anlagen oder Bebauungen sein. Die Berechnung der Dämpfung durch Bewuchs wird in dieser Arbeit in Punkt 0 erläutert. Die restlichen Einflüsse werden hier nicht näher behandelt, da sie in dieser Arbeit nicht von Bedeutung sind.

3.5.2. Reflexionen

In der ÖNORM ISO 9613 Teil 2 [ONO08] werden Reflexionen durch Spiegelschallquellen berücksichtigt. Die Reflexionen erfolgen an Decken oder vertikalen Oberflächen (z.B.: Wänden). Reflexionen am Boden werden nicht berücksichtigt, da diese bereits bei der Bodendämpfung A_{gr} Eingang finden. Durch Reflexionen des Schalls erhöht sich am Immissionsort der Schalldruckpegel. Die Reflexionen werden für alle Oktavbänder berechnet, für die folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Eine Spiegelung, wie in Abbildung 3.4 dargestellt, lässt sich konstruieren.
- Der Schallreflexionsgrad ist größer als 0,2.
- Die Oberfläche ist so groß, dass bei der betrachteten Oktavband-Mittenfrequenz die Wellenlänge λ Gleichung (27) erfüllt ist.

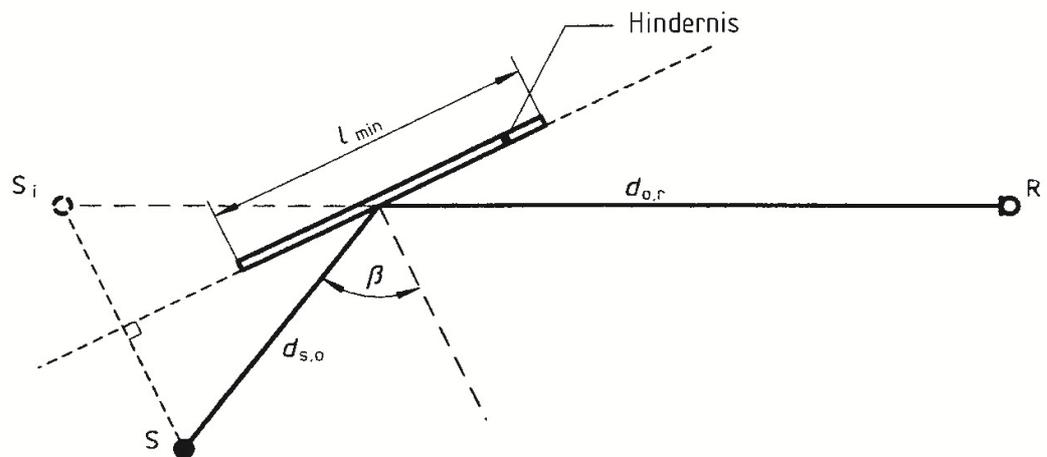


Abbildung 3.4: Skizze zum Konstruieren von Spiegelschallquellen

$$1/\lambda > [2/(l_{\min} \cos \beta)^2][d_{s,o}d_{o,r}/(d_{s,o} + d_{o,r})] \quad (27)$$

λ	Wellenlänge des Schalls [m]
$d_{s,o}$	Entfernung zw. Quelle und Reflexionspunkt
$d_{o,r}$	Entfernung zw. Reflexionspunkt und Empfänger
β	Einfallswinkel [rad] (gemäß Abbildung 3.4)
l_{\min}	geringste Abmessung (Länge oder Höhe) der reflektierenden Oberfläche (gemäß Abbildung 3.4)

Ist eine dieser Bedingungen für ein gegebenes Oktavband nicht erfüllt, dann werden keine Reflexionen berücksichtigt.

Die eigentliche Schallquelle und die Spiegelschallquelle werden getrennt voneinander behandelt. Mit Gleichung (28) lässt sich der Schalleistungspegel der Spiegelschallquelle berechnen

$$L_{W,im} = L_W + 10 \lg(\rho) + D_{lr} \quad (28)$$

ρ	Schallreflexionsgrad
D_{lr}	Richtwirkungsmaß der Quelle in der Richtung des Spiegelpunktes

Um den vorherrschenden Schallreflexionsgrad bestimmen zu können, sind in Tabelle 4 drei gebräuchliche Schallreflexionsgrade angegeben.

Tabelle 4: Angaben zur Abschätzung des Schallreflexionsgrades

Objekt	ρ
gerade, harte Wände	1
Gebäudefassaden mit Fenstern und Gliederungen	0,8
Gebäudewände von Industrieanlagen mit 50 % Fensteranteil, Öffnungen oder Installationen und Rohren	0,4

Die in der Formel (18) angegebenen Dämpfungs-Ausdrücke müssen für die Spiegelschallquelle - entsprechend des Ausbreitungsweges - separat bestimmt werden [ONO08].

3.5.3. Klimatische Einflüsse

Bei Messungen, bei denen der Abstand zwischen Quelle und Empfänger sehr groß wird, können die klimatischen Randbedingungen die Schallausbreitung beeinflussen. Dies wird allerdings erst bei Entfernungen größer 300 Meter relevant [BUC06-2] [FAS03].

In [ONO08] wird ein meteorologischer Korrekturwert bereits ab einer Entfernung zwischen Quelle und Empfänger von dem Zehnfachen der Summe aus Quellenhöhe und Empfängerhöhe berücksichtigt.

3.6. Schalldämpfung durch Vegetation

3.6.1. Beschreibung der städtischen Gehölze

Bäume und Sträucher werden im Städtebau aus vielerlei Hinsicht gepflanzt. Sie spielen eine wichtige soziale, ästhetische, kulturelle, belehrende/ pädagogische oder klimatische Rolle. Sie erzeugen Sauerstoff, dienen als Sicht- und Windschutz, bieten Lebensraum für Vögel und Insekten und sind strukturierende und abgrenzende Elemente.

In Anlehnung an das botanische System zur Klassifizierung, lassen sich Bäume und Sträucher in zwei Gruppen einteilen: die immergrünen Nadelgehölze (Weichholz) und die sommergrünen Laubgehölze (Hartholz), welche im Winter ihre Blätter verlieren. Die Wuchsform der beiden Gehölze unterscheidet sich grundlegend. Während sich bei den Nadelgehölzen ein gerader zentraler Stamm ausbildet, ist dies bei Laubbäumen nicht immer der Fall. Auch durch die Kronenausbildung lassen sich die beiden Gehölzarten gut unterscheiden. Nadelbäume besitzen eine kegel- oder säulenförmige Krone. Im Gegensatz dazu haben Laubbäume eine voluminöse, kugelförmige Krone mit durchwegs langen Ästen. All diese Faktoren beeinflussen die Schalldämpfung positiv oder negativ [BUC06-1].

Um eine signifikante Schalldämpfung zu erzielen, muss die Oberfläche des Vegetationsstreifens geschlossen sein. D.h. der Vegetationsstreifen bzw. die Hecke muss blickdicht sein. Ist dies nicht der Fall, gelangt ein zu großer Anteil des Schalls ungehindert, ohne gestreut oder absorbiert zu werden, durch den Bewuchs. Die Blickdichtheit als solches ist jedoch ein unbrauchbares Maß für die zu erwartende Schalldämpfung. Neben der Dichte an der Oberfläche des Vegetationsstreifens ist auch die Dichte im Inneren des Gürtels von Bedeutung. Zusätzlich zu der Dichtheit und der Breite, sind die Höhe und die Länge des Vegetationsgürtels zwei weitere wichtige Parameter [BEC66] [VAN12].

In [FUN12] sind einige Straucharten aufgelistet, welche sich für Schallschutzhecken eignen. Darunter fallen unter anderem

- Zypressen
- Wacholder
- Zedern
- Thujen

3.6.2. Angaben in der ÖNORM ISO 9613-2

Die ÖNORM ISO 9613 Teil [ONO08] bietet eine Methode zur Berechnung der Schirmwirkung von dichtem Bewuchs. Das Verfahren ist frequenzabhängig, eignet sich allerdings lediglich für Wälder mit größerer Ausdehnung und keinesfalls für schmale Grünstreifen oder gar Hecken (vgl. Abbildung 3.5).

In Abbildung 3.5 ist der Ausbreitungsweg d_f durch den Bewuchs graphisch dargestellt. Zur Berechnung von d_1 und d_2 kann ein Radius von 5 km angenommen werden. Mit dem ermittelten Wert d_f kann aus Tabelle 5 die entsprechende Dämpfung je Oktavband abgelesen werden.

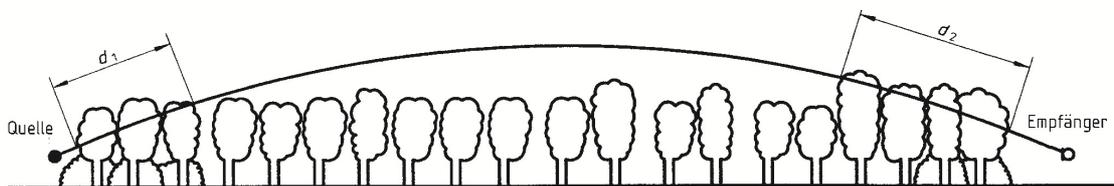


Abbildung 3.5: Dämpfung der Schallausbreitung durch den Bewuchs

Tabelle 5: Dämpfung der Schallausbreitung je Oktavband durch dichten Bewuchs

Ausbreitungsentfernung	Oktavband-Mittenfrequenz [Hz]							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
d_f [m]								
$10 \leq d_f \leq 20$	Dämpfung [dB]							
	0	0	1	1	1	1	2	3
$20 \leq d_f \leq 200$	Dämpfung [dB/m]							
	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,09	0,12

3.6.3. Angaben in der Literatur

In der Literatur werden stark voneinander differierende Angaben bezüglich der Schalldämpfung von Vegetation gemacht. Dabei ist von nahezu keinem Einfluss bis hin zu Dämpfungen von bis zu 15 Dezibel die Rede. Wobei in den wenigsten Fällen von Hecken ausgegangen wird. Vielmehr sind die meisten Angaben auf Baum- bzw. Strauchreihen mit Breiten zwischen einem und 15 Meter bezogen, was eher einem Windschutzgürtel gleichkommt.

Bei Flächen mit immergrünen Pflanzen und einer Breite von mindestens sechs Meter können nach [BUC06-2] Einfügedämpfungen von 2 bis 4 dB erreicht werden.

Wird die Tiefe auf 30 Meter erhöht, steigt die Schirmwirkung auf 7 bis 11 dB. Die Werte gelten für Schallereignisse zwischen 125 und 8000 Hz.

Laut [VAN12] kann die Vermutung angestellt werden, dass durch Vegetationsstreifen (Bäume und Sträucher) mit einer Breite von 15 Meter der gleiche akustische Effekt erzielt wird wie bei klassisch dünnen Lärmschutzwänden (auf Grünland) mit einer Höhe von 1 bis 1,5 Meter.

Aylor [AYL72] (gelesen in [VAN12]) untersucht die Schallausbreitung durch Vegetation an einem Maisfeld, an einer Tannenkultur, an einem Kiefernwald und in einem Hartholzwald. Er folgert, dass die Blattdichte möglichst hoch und die Blätter möglichst breit und dick sein sollten, um eine hohe Einfügedämpfung erzielen zu können.

Laut Kragh [KRA81] (gelesen in [VAN12]) ist die Schalldämpfung durch Vegetationsgürtel sehr gering. In seiner Arbeit wird die Schallausbreitung durch einen Vegetationsgürtel mit der Schallausbreitung über einer Wiese, bei gleicher Distanz, verglichen. Eine deutliche Reduktion ist erst ab einer Frequenz von 2 kHz zu erkennen.

Auch bei den Angaben zu den maßgebenden Parametern (Dichte, Breite, Höhe und Länge) sind unterschiedliche Angaben über die positiven oder negativen Auswirkungen zu finden. Laut Pathak et al. [PAT08] (gelesen in [VAN12]) korrelieren die Breite und die Höhe positiv mit der Reduktion von Verkehrslärm.

Pal et al. [PAL00] (gelesen in [VAN12]) hat festgestellt, dass die durchschnittliche Höhe und Dichte eine sehr geringe Wirkung hat. Große Baumhöhen können sich laut [PAL00] sogar negativ auswirken, da durch Reflexionen der Schall nach unten zum Empfänger geleitet wird [VAN12].

Speziell auf Hecken bezogen werden in [SPA11] 4 unterschiedliche Gehölzarten (Efeu, Lorbeere, Hainbuche und Buchsbaum) untersucht. Dabei werden Einfügedämpfungen zwischen 0,2 und 0,8 dB (A-bewerteter Summenpegel) erreicht. Die Schirmwirkungen der betrachteten Baumarten sind ähnlich. Die zu erwartende stärkere Dämpfung bei Frequenzen ab 2000 Hz kann ebenfalls nachgewiesen werden.

[SPA11] ist die einzige gefundene Literaturquelle, die sich speziell mit Hecken befasst. Den Skizzen der Messaufbauten und den Fotos ist jedoch zu entnehmen, dass diese Messungen im dicht bebauten Siedlungsgebiet durchgeführt werden. Dabei kommt es zu einer Vielzahl von Reflexionen an Bäumen, Sträuchern und Häusern. Des Weiteren sind die untersuchten Hecken in ihrer Längsausdehnung sehr begrenzt und nicht alle sind in Form gebracht, wie es für Hecken üblich ist. Aus diesen Gründen werden die angegebenen Messergebnisse kritisch betrachtet.

3.6.4. Wirkungsweise

Um die Schalldämpfung von Pflanzen verstehen zu können, ist es notwendig, die vielen - die Schalldämpfung beeinflussenden Eigenschaften - zu erläutern. Beim Einfluss auf die Schallausbreitung spielt die Bodenoberfläche eine ebenso wichtige Rolle wie der organische Bewuchs (Stämme, Äste, Zweige und Blätter/Nadeln).

Grundsätzlich wird der Schall in dreierlei Hinsicht reduziert. Erstens wird der Schall durch Stämme, Äste, Zweige und Blätter/Nadeln reflektiert oder gestreut. In Ausnahmefällen kann dieser Effekt durch Überlagerung der Schallwellen zu einer Erhöhung des Schallpegels führen. Im Regelfall wird der Schall von der Verbindungslinie zwischen Quelle und Empfänger abgebracht, was den Schallpegel am Immissionsort verringert. Der zweite Grund für die Schalldämpfung ist die Absorption. Hierbei werden die Stämme, Äste und Blätter/Nadeln durch den Schall in Schwingungen versetzt. Als dritten Mechanismus kann die destruktive Interferenz mit dem Boden erwähnt werden. Die Wirkungsweise dieser drei Dämpfungsformen ist in 3.6.4.1, 3.6.4.2 und 3.6.4.3 näher erläutert [BUC06-1] [VAN12] [SPA11].

Zusätzlich zu diesen drei direkten Effekten können an dieser Stelle auch einige indirekte Effekte erwähnt werden. In [VAN02] (gelesen in [VAN12]) wird gezeigt, dass durch eine Baumreihe hinter einer Lärmschutzwand der Schalldruckpegel nochmals verringert wird. Dabei spielt die spezifische Verteilung der Biomasse in den Baumkronen eine Rolle.

Laut Fricke [FRI84] (gelesen in [VAN12]) wird die Schalldämpfung in Wäldern zu einem wesentlichen Teil von der relativen Luftfeuchte beeinflusst, in einer Weise, die nicht durch die Wirkung der atmosphärischen Absorption oder durch Änderungen in der Bodenfeuchte erklärt werden kann.

Nach [VAN12] ist die Wirksamkeit immer frequenzabhängig. Tiefe Frequenzen, die typischerweise beim Straßenverkehrslärm auftreten, werden eher schlecht gedämpft. Größere Einfügedämpfungen werden erst ab 2 kHz festgestellt.

Abbildung 3.6 zeigt alle relevanten Faktoren und deren Zusammenhänge, die die Schalldämpfung in Wäldern und bepflanzten Flächen beeinflussen [BUC06-1].

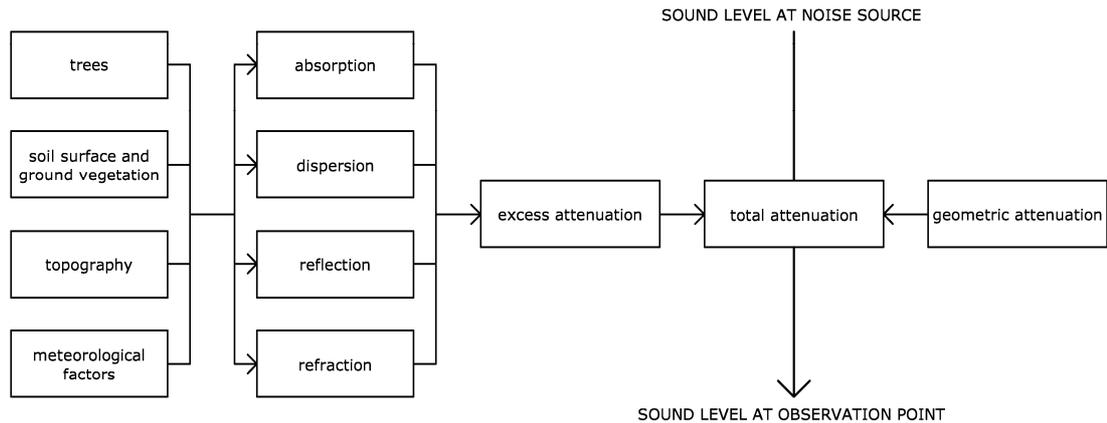


Abbildung 3.6: Einflussfaktoren auf die Schalldämpfung durch Vegetation [BUC06-1]

3.6.4.1. Reflexion und Streuung der Schallwellen durch Vegetation

Die Äste und die Blätter/Nadeln streuen die einfallende Schallenergie zur Seite, nach oben und nach unten oder reflektieren diese zurück, wodurch eine Schattzone hinter der Vegetation entsteht. Die Reflexions- und Streuungseffektivität – und damit die Schalldämpfung – ist stark von der Geometrie und der Dichte der Stämme, Äste, Zweige und Blätter/Nadeln abhängig. Die Blätter/Nadeln sollen möglichst breit und dick sein. Des Weiteren ist die schalldämpfende Wirkung umso größer, je höher die Frequenz und je kleiner das streuende Objekt ist. Das bedeutet, dass bei dünnen Ästen und bei höheren Frequenzen eine größere Einfügedämpfung zu erwarten ist als bei niedrigeren Frequenzen.

Die Streuung der Schallwellen ist in der horizontalen Ebene anders als in der vertikalen. Während in der horizontalen Richtung die Schallwelle mehrfach gebrochen wird, ist es vorstellbar, dass es in der vertikalen Ebene nach der ersten Beugung zu keiner weiteren Streuung kommt, weil der gebeugte Schall am Boden auftrifft oder nach oben aus der Vegetation geleitet wird.

Weiters ist auf Grund der Wuchsform von Sträuchern und Bäumen der Streuungsgrad in der Krone anders als im Stammansatz, nahe dem Boden [AYL72] [BUC06-1] [SPA11] [VAN12].

3.6.4.2. Absorption der Schallwellen durch Vegetation

Ein zweiter wesentlicher Faktor zur Dämpfung von Schall durch Vegetation ist die Absorption. Dabei können Stämme, Äste, Zweige und Blätter/Nadeln in Schwingungen - durch Schallwellen hervorgerufen - versetzt werden. Mittels innerer Dämpfung wird der Schallpegel reduziert. Dies geschieht durch Umwandlung der Schallenergie in Wärme [BUC06-1] [SPA11] [VAN12].

3.6.4.3. Bodendämpfung mit Bepflanzung

Typische Waldböden können in den meisten Fällen als akustisch „weich“ angenommen werden. Ihre Oberfläche besteht hauptsächlich aus abgefallenem Laub, Nadeln, Zweigen und Baumrinden. Bei Grünstreifen in urbanen Bereichen kann es sein, dass der Boden als akustisch „hart“ angenommen werden muss, da in vielen Fällen aus optischen oder verkehrssicherheitstechnischen Gründen abgefallenes Laub und Äste entfernt werden.

Bei der Schallausbreitung über dem Boden kommt es bzw. kann es zu einer Überlagerung zwischen dem direkten und dem am Boden reflektierenden Schall kommen. Dies ist in Abbildung 3.7 graphisch dargestellt. Je glatter und härter die Oberfläche ist, desto mehr Schall wird reflektiert. Der restliche Schall wird vom Boden absorbiert. Vegetation trägt dazu bei, dass der Absorptionsgrad gehoben wird. Weiche Böden haben vor allem bei tieferen Frequenzen (< 500 Hz) einen großen Einfluss.

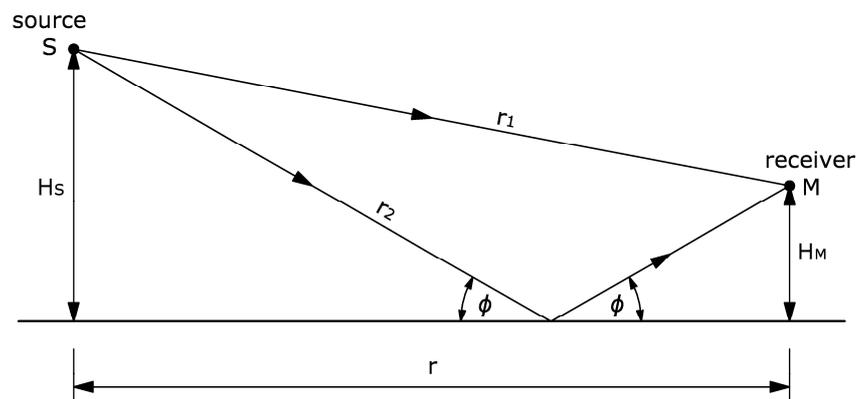


Abbildung 3.7: Reflexion von Schallwellen am Boden

Durch die unterschiedlichen Weglängen, die der direkte und der reflektierte Schall von der Quelle zum Empfänger zurücklegen müssen, kann es vorkommen, dass der reflektierte Schall um eine Wellenlänge verschoben ist. Somit kann es auf Grund aufeinander folgender Schallwellen zu lokal erhöhten Lautstärken kommen. Dieser Effekt wird durch eine weiche Bodenoberfläche verhindert oder zumindest abgemindert [BUC06-1] [VAN12].

Der gesamte Effekt der Bodendämpfung wird in der ÖNORM ISO 9613 Teil 2 berücksichtigt (siehe 3.5.3).

Die Ergebnisse aus theoretischen und in-situ Untersuchungen über die Wirkung von Waldböden mit einer typischen Oberfläche auf die Reduktion des Schallpegels bei Straßenlärm sind in Abbildung 3.8 dargestellt. Bei dieser Studie werden drei verschiedene Fälle (Freifeld, Wiese/Weide und Kiefernwald) untersucht. Die Linienschallquelle befindet sich in 100 Meter Entfernung. Für nahezu alle Frequenzen ist ersichtlich, dass beim Kiefernwald niedrigere Pegel als im Freifeld oder auf der Wiese erzielt werden. Der gesamte A-bewertete Schallpegel im Kiefernwald ist in diesem Fall um 9,9 dB geringer als bei der Wiese. Dies spricht dafür, dass die Einfügedämpfung nicht allein aus der Bewaldung zu erklären ist, sondern auch der Boden zur Dämpfung des Schalls beiträgt.

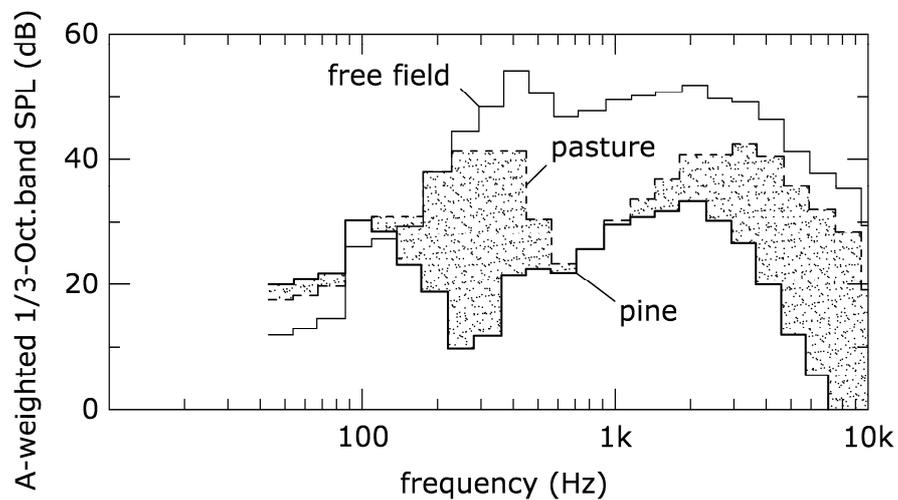


Abbildung 3.8: Immissionspegel für Freifeld, Wiese und Kiefernwald aus Straßenlärm mit folgenden Parametern: Höhe der Linienschallquelle 0,75 Meter, Länge der Linienschallquelle 600 Meter, Mikrofonhöhe 1 Meter, Abstand von der Linienschallquelle 100 Meter [BUC06-1].

4. Messungen

4.1. **Messinstrumente**

Bei allen durchgeführten Messungen werden hauptsächlich Messgeräte der Firma Norsonic AS verwendet. Die verwendeten Messgeräte und das Zubehör stehen im Eigentum der TU Wien, Institut für Hochbau und Technologien (Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz). Für die Dauer der Messungen wird die benötigte Ausrüstung zur Verfügung gestellt. Ein Lautsprecher zur Anregung mittels Dauerschall wird von der Firma Fellner (Ing. Wolfgang Fellner GmbH) geliehen. Zusätzlich werden Messungen mit einer akustischen Kamera an der Hecke vorgenommen. Die akustische Kamera steht ebenfalls im Eigentum der Firma Fellner.

Eine ausführliche Liste aller verwendeten Messgeräte befindet sich im Anhang 39.

4.1.1. Schallmesssystem

Um die Messungen praktikabel und mit größtmöglicher Genauigkeit durchführen zu können, ist es notwendig, ein Mehrkanalsystem zu verwenden. Dadurch lässt sich der Schalldruckpegel an mehreren Immissionsorten gleichzeitig messen, wodurch die Messgenauigkeit gesteigert wird. Um diese Anforderung erfüllen zu können, werden zwei Nor850 Racks der Firma Norsonic verwendet. Ein Symbolfoto eines Nor850 Racks zeigt Abbildung 4.1.



Abbildung 4.1: Norsonic Nor850 Rack (Quelle: www.schallmessung.com/index.php/de/produkteprogramme/mehrkanalanalysatoren/nor850, Zugriff: 04.03.2013)

In jedem der beiden Racks sind fünf Nor140 Universalanalysatoren verbaut. Somit können insgesamt 10 Kanäle gleichzeitig gemessen werden. Über einen Netzwerkrouter ist es möglich die Messeinheiten mit einem Laptop oder PC zu verbinden. Auf der entsprechenden Hardware befindet sich die zugehörige Software der Firma Norsonic, Nor850 Version 1.4. Mit diesem Programm können alle Einstellungen getroffen werden. Die Messung wird ebenfalls direkt in dem Programm gestartet. Des Weiteren ist es möglich die Messergebnisse jeder einzelnen Messung in eine Excel- oder Textdatei zu exportieren. Abbildung 4.2 zeigt einen Screenshot von der Benutzeroberfläche der Software.

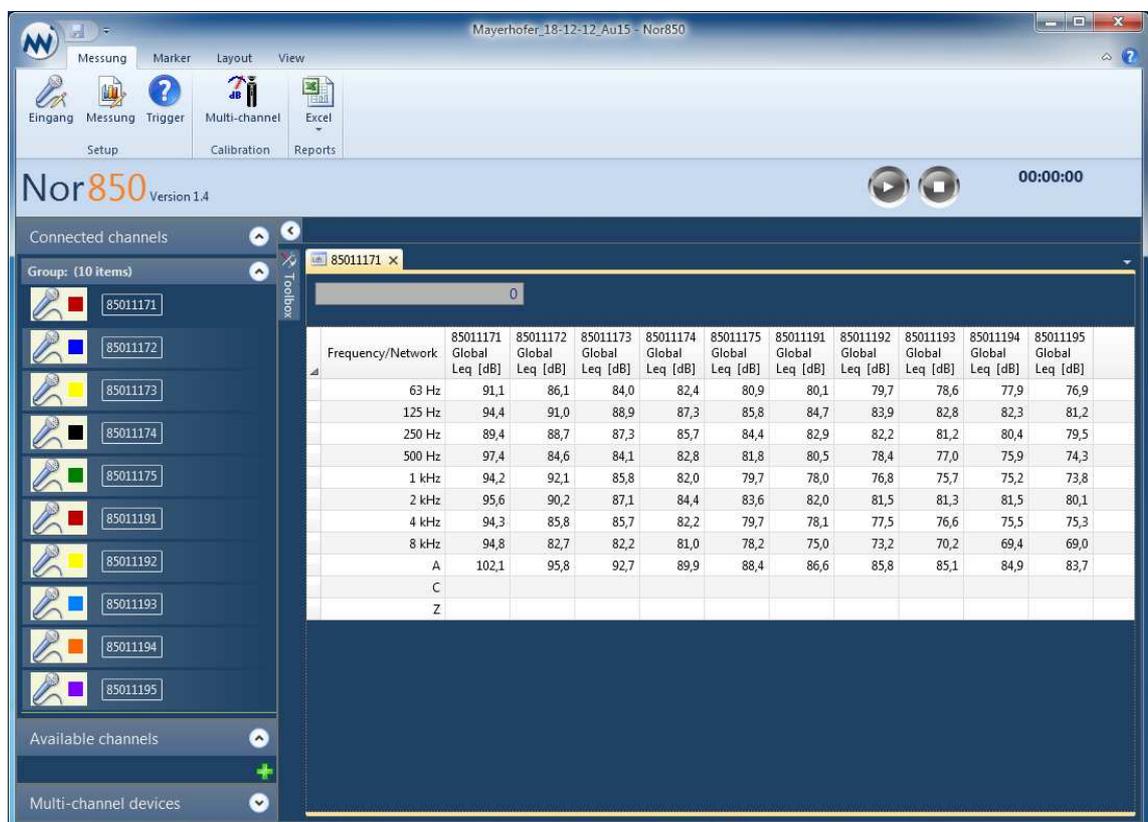


Abbildung 4.2: Screenshot der Benutzeroberfläche der Messsoftware Nor850

Im linken Teil der Abbildung 4.2 sind die angeschlossenen Kanäle (Connected channels) gelistet. Im Hauptteil der Benutzeroberfläche sind die Messwerte angegeben. Darin können unterschiedliche Werte wiedergegeben werden. Bei der Wiedergabe dieser Messwerte kann man unter anderem zwischen Oktaven oder Terzen, Global oder Periode und Diagramm oder Tabelle wählen. Für die im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführten Messungen ist lediglich der energieäquivalente Dauerschalldruckpegel L_{eq} , je Oktavband (63 bis 8000 Hz), global (Summenpegel über die eingestellte Messdauer) und Tabellenwerte von Bedeutung.

Nachteil des verwendeten Messsystems ist, dass es nicht möglich ist, die Messung über einen externen Trigger zu starten. Weiters beginnen die einzelnen Kanäle mit der Aufzeichnung zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Diese Zeitunterschiede liegen zwar im Millisekundenbereich, dennoch lässt sich eine einzelne Schallwelle, aus einem Impuls erzeugt, nicht exakt aufzeichnen. Diese Gegebenheit wird bei den vorbereitenden Messungen auf dem Institutsgelände (Aspanggründe) festgestellt (siehe Kapitel 4.2).

Somit ist es nicht möglich einen Impuls als Schallquelle zu verwenden, da in diesem Fall nicht sichergestellt werden kann, dass bei allen Kanälen die Schallspitzen aufgezeichnet werden. Daher wird eine Dauerschallquelle (Lautsprecher) zur Schallanregung verwendet.

4.1.2. Freifeldmikrofon

Als Mikrofone werden ½ Zoll Freifeldmikrofone mit aufgeschraubtem Vorverstärker der Firma Norsonic des Typs 1225 bzw. 1209 verwendet. Jeder Vorverstärker ist einem Mikrofon zugeordnet. Diese bilden eine Einheit, welche während der gesamten Messungen nicht voneinander getrennt. Die Mikrofone werden mittels Stativ an der vorgesehenen Position standsicher aufgestellt. Bei allen Messungen werden Windschirme auf die Mikrofone aufgesteckt. Abbildung 4.4 zeigt ein Freifeldmikrofon mit Windschirm vor der verwendeten Schallquelle.

4.1.3. Kalibrierung

Eine Kalibrierung der Messkanäle vor jeder Messeinheit ist unerlässlich. Mikrofone können bei den Messungen nicht immer an den gleichen Messkanal angeschlossen werden. Es werden auch unterschiedliche Mikrofonkabelängen verwendet.

Zur Kalibrierung wird ein Kalibrator der Firma Norsonic (Typ 1251) verwendet. Abbildung 4.3 zeigt diesen.



Abbildung 4.3: verwendeter Kalibrator Norsonic 1251

4.1.4. Schallquelle

Wie in 4.1.1 erläutert, ist es notwendig, eine Schallquelle zu verwenden, die einen konstanten Dauerschallpegel erzeugt. Die Schalleistung muss ebenfalls ausreichend groß sein, um mit dem erzeugten Schalldruckpegel möglichst weit über dem etwaiger Fremdschallquellen (Grundgeräuschpegel) zu liegen.

Nach einigen Tests wird ein gerichteter Aktivlautsprecher der Firma IMG Stage Line des Typs MAB-150AK verwendet (siehe Abbildung 4.4). Diese Schallquelle hat einen Verstärker bereits eingebaut, um den erforderlichen Schalleistungspegel erzeugen zu können. Mittels eines Nor140 der Firma Norsonic wird ein rosa Rauschen erzeugt und über den Lautsprecher ausgestrahlt.



Abbildung 4.4: gerichteter Aktivlautsprecher (Schallquelle) und Freifeldmikrofon mit Windscreen

Auch der Aktivlautsprecher hat einen Nachteil, der bei den Messungen und den Messauswertungen berücksichtigt gehört. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass bei jeder Messung ein gleich großer Schalleistungspegel abgegeben wird. Grund dafür ist, dass der Lautsprecher nicht geeicht ist. Eine Vielzahl an Regelungsmöglichkeiten am Lautsprecher, die die Frequenz verändern, aber nicht abgespeichert werden können, führt ebenfalls zu unterschiedlichen Schalleistungen. Die abgegebene Schalleistung wird nicht angezeigt und kann daher auch nicht kontrolliert werden. Somit ist es notwendig, bei jeder Messung den Schalleistungspegel durch ein Referenzmikrofon zu bestimmen.

Als weiterer Nachteil muss die Richtungsgebundenheit des Lautsprechers genannt werden. Die Richtcharakteristiken (horizontal und vertikal) werden bei vorbereitenden Messungen bestimmt und in dieser Arbeit in den Kapiteln 4.2.1 und 4.2.2 erläutert. Die Richtcharakteristik vertikal soll sich in späterer Folge noch als Problem herausstellen.

4.1.5. Akustische Kamera

Die verwendete akustische Kamera der Firma Fellner wird von der Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik (GFal) hergestellt und vertrieben. Dieses System besteht aus einem Datenrekorder mcdRec 721 und einem ringförmigen Mikrofonarray. Als Software wird NoiselImage 4 verwendet.

Abbildung 4.5 zeigt die verwendete akustische Kamera, bestehend aus dem ringförmigen Mikrofonarray, dem Datenrekorder und einem Laptop mit entsprechender Software.



Abbildung 4.5: verwendete akustische Kamera

4.2. Vorbereitende Messungen

Bei allen Messungen wird der energieäquivalente Schalldruckpegel L_{eq} gemessen. Betrachtet werden die Oktavbänder von 63 Hz bis 8 kHz. Dies wird aus der ÖNORM ISO 9613 Teil 2 [ONO08] übernommen. Die logarithmische Summe dieser acht Oktavbänder (Summenpegel) wird durch den tiefgestellten Indizes „Sum“ abgekürzt. Eine A-Bewertung wird nicht vorgenommen.

Bevor mit den Messungen an der Hecke begonnen wird, ist es notwendig, verschiedenste vorbereitende Messungen durchzuführen. Dabei soll unter anderem die Richtcharakteristik der Schallquelle (horizontal und vertikal) sowie das Verhalten der Schallausbreitung bei Abstandsverdoppelung ermittelt und überprüft werden. Bei diesen Messungen werden die in Punkt 4.1.1 beschriebenen Nachteile des Messsystems festgestellt. Im Zuge dieser Messungen wird versucht, diese Probleme zu beheben bzw. zu lösen.

Diese vorbereitenden Messungen werden am Institutsgelände (Adolf-Blamauergasse 1-3, 1030 Wien) im August und September 2012 durchgeführt.

4.2.1. Richtcharakteristik horizontal

Bei den Messungen der Hecke kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich seitlich oder rückwärts der Quelle Objekte befinden, welche Reflexionen verursachen. Zur anschließenden Berechnung muss der Schallleistungspegel der Spiegelschallquelle eingesetzt werden. Somit muss auch die Schallleistung in alle Richtungen bekannt sein. Da die verwendete Schallquelle ein gerichteter Lautsprecher ist, wird die horizontale Richtcharakteristik ermittelt.

Die Messungen werden am 05. September 2012 am Institutsgelände (Aspanggründe) durchgeführt. An diesem Tag ist es sonnig bei 26,6°C Lufttemperatur. Die entsprechenden Wetterdaten sind in Anhang 40 gelistet. Der Lautsprecher steht direkt am Boden. Die Oberfläche des Bodens ist eine gemähte Wiese. Fotos dieser Messungen sind im Anhang 1 und Anhang 2 abgebildet.

Es werden sieben Freifeldmikrofone an die zwei Nor-850 Racks angeschlossen. Die sieben Mikrofone werden im Halbkreis um den Lautsprecher in einem Abstand von drei Meter aufgestellt (siehe Abbildung 4.6). Dabei ergibt sich ein Brechungswinkel von 30 Grad zwischen den Mikrofonen. Es werden zwei Messungen zu je 20 Sekunden durchgeführt und abgespeichert. Anschließend wird der Lautsprecher sechsmal um 30 Grad gedreht und es werden ebenfalls jeweils zwei Messungen zu je 20 Sekunden

vorgenommen. Die Messergebnisse der Mikrofone mit gleichen relativen Orientierungen zum Lautsprecher werden anschließend je Oktavband logarithmisch gemittelt. Die gemessenen und logarithmisch gemittelten Schalldruckpegel sind im Anhang 6 angeführt.

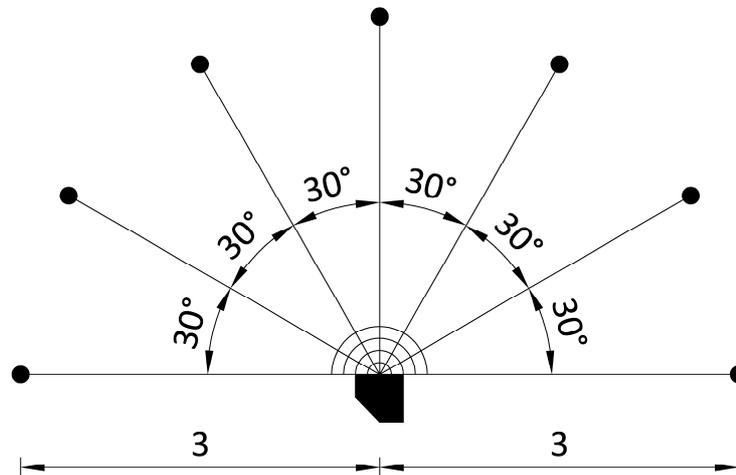


Abbildung 4.6: Messaufbau zur Bestimmung der horizontalen Richtcharakteristik

Werden die Differenzen zwischen den Messergebnissen bei 0° und allen anderen Richtungen (alle 30°) auf dem jeweiligen Strahl je Oktavband aufgetragen, ergibt sich eine Darstellung wie in Abbildung 4.7 abgebildet. Dabei stellt der 0° -Strahl die Vorderseite des Lautsprechers dar. Somit sind bei 0° alle Differenzen gleich Null.

Auf Basis dieser Messungen kann gesagt werden, dass der verwendete Lautsprecher nicht ganz symmetrisch abstrahlt (siehe Abbildung 4.7). Grund dafür ist die Bauform des Lautsprechers. Abbildung 4.8 zeigt den Grundriss des Lautsprechers.

Betrachtet man den Summenpegel (Sum) kann gesagt werden, dass es bei -30° und $+30^\circ$ zu keiner Pegelabnahme kommt und daher ist die Abstrahlung für diesen Bereich als symmetrisch anzusehen. Bis zu einem Winkel von $+60^\circ$ und -60° im Bezug auf die Abstrahlrichtung bei 0° , ist der Schalleistungspegel kaum reduziert (≤ 1 dB). Erst ab 120° verringert sich der Schalleistungspegel um drei bis vier Dezibel. Werden die einzelnen Frequenzbänder miteinander verglichen, fällt auf, dass je höher die Frequenz, umso größer ist auch die Schalleistungspegelabnahme.

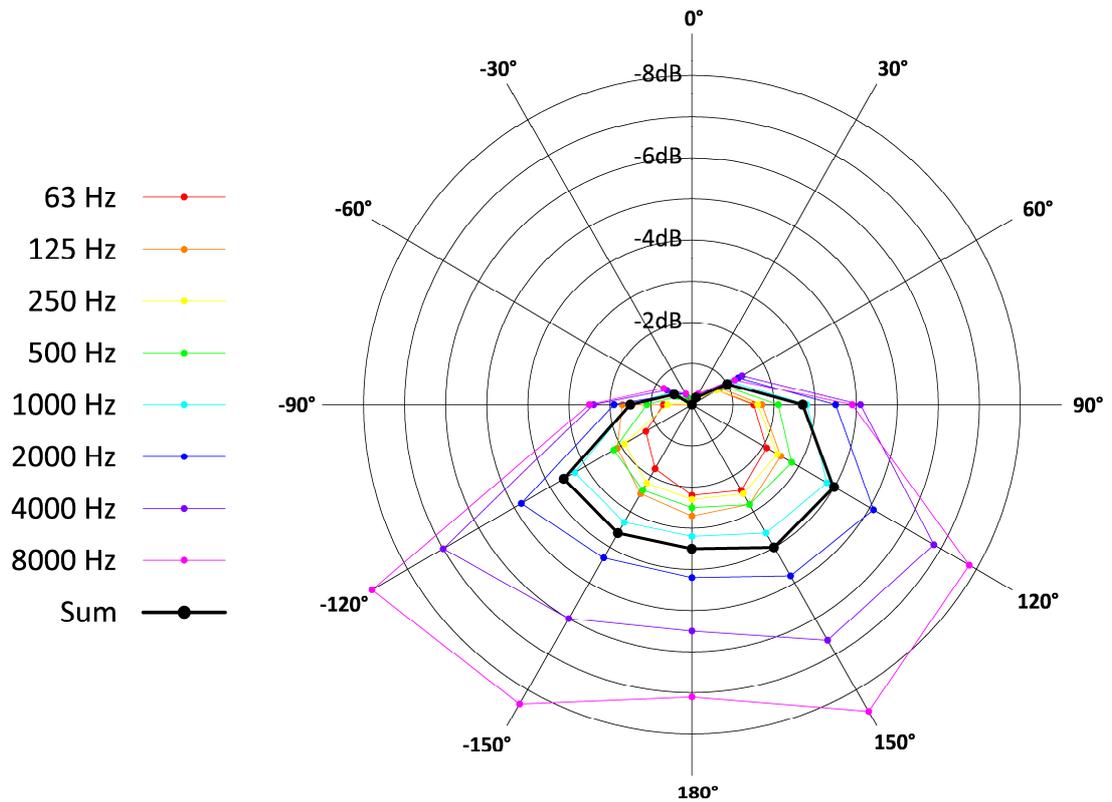


Abbildung 4.7: Richtcharakteristik horizontal

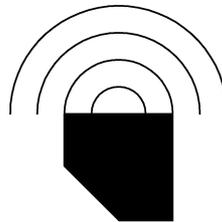


Abbildung 4.8: Grundriss des Lautsprechers

4.2.2. Richtcharakteristik vertikal

Auch in der vertikalen Ebene muss die Richtcharakteristik ermittelt werden. Dabei wird die Richtcharakteristik vertikal nach oben und vertikal nach unten getrennt voneinander bestimmt. Bei diesen Messungen können die herkömmlichen Mikrofonstative nicht mehr eingesetzt werden, weil diese nicht hoch genug sind. Somit wird eine Holzkonstruktion hergestellt um alle gewünschten Mikrofonpositionen zu erreichen. Da es ein enormer Material- und Zeitaufwand ist, mehrere Ersatzstative aus Holz zu bauen, werden die Messungen nicht mehr mit einem Mehrkanalsystem durchgeführt. Stattdessen wird ein Norsonic Nor140, wie er im Nor850 verbaut ist, eingesetzt.

Die Messungen finden am 11. September 2012 statt. An diesem Tag ist es sonnig bei 21,6°C Lufttemperatur. Die vorherrschenden Wetterdaten sind dem Anhang 40 zu entnehmen.

Bei diesen Messungen wird der Lautsprecher auf einem Tisch positioniert. Die Summe aus Tischhöhe (ca. 0,75 Meter) und halber Lautsprecherhöhe ergibt in etwa 1,1 Meter. Bei den Messungen zur Richtcharakteristik vertikal nach oben steht der Tisch auf einer Asphaltstraße (siehe Abbildung 4.9 und Anhang 3), im anderen Fall auf einem Container, der sich am Institutsgelände befindet (siehe Abbildung 4.10 und Anhang 4).

Zur Ermittlung der Richtcharakteristik nach oben werden sieben Messpositionen in einem Abstand von 5 Meter zur Schallquelle und einem Vielfachen von 15° über der Horizontalen definiert. Die sich ergebende Schnittskizze ist in Abbildung 4.9 dargestellt. An jeder Stelle wird zweimal für je 20 Sekunden gemessen und die einzelnen Oktavbänder logarithmisch gemittelt. Anhang 7 zeigt die gemessenen und logarithmisch gemittelten Schalldruckpegel.

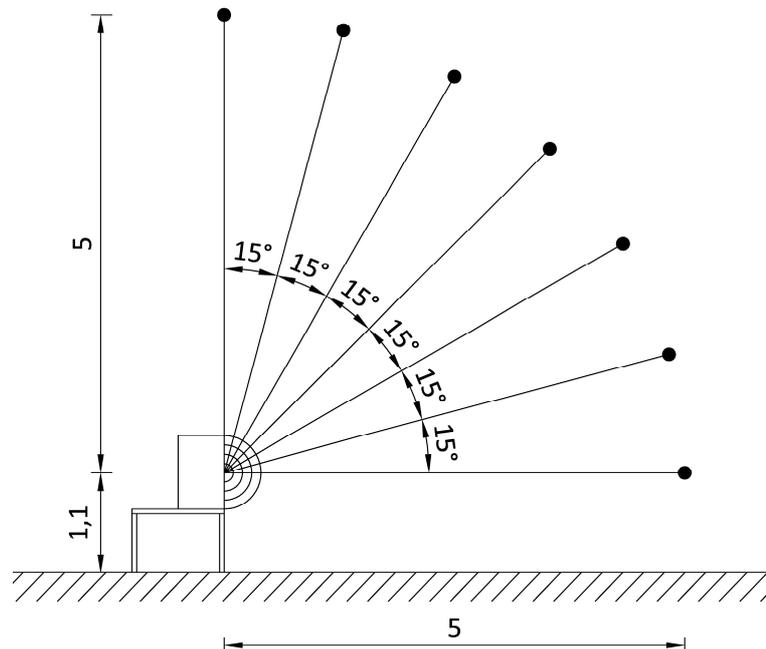


Abbildung 4.9: Messaufbau zur Bestimmung der vertikalen Richtcharakteristik oben

Die Messungen zur Ermittlung der Richtcharakteristik vertikal nach unten sind ähnlich der nach oben. In diesem Fall befindet sich der Tisch samt Lautsprecher auf dem Dach eines Containers. Der Brechungswinkel zwischen den Messstrahlen beträgt ebenfalls 15°. Der Abstand zwischen Quelle und Mikrofon wird aus Gründen der Realisierbarkeit auf 3 Meter reduziert. Zur Reduktion der Reflexionen am Boden wird

eine 10 cm dicke Dämmmatte auf einer Breite von 120 cm ausgelegt. Abbildung 4.10 zeigt den Messaufbau. Die gemessenen und logarithmisch gemittelten Schalldruckpegel sind im Anhang 8 angeführt.

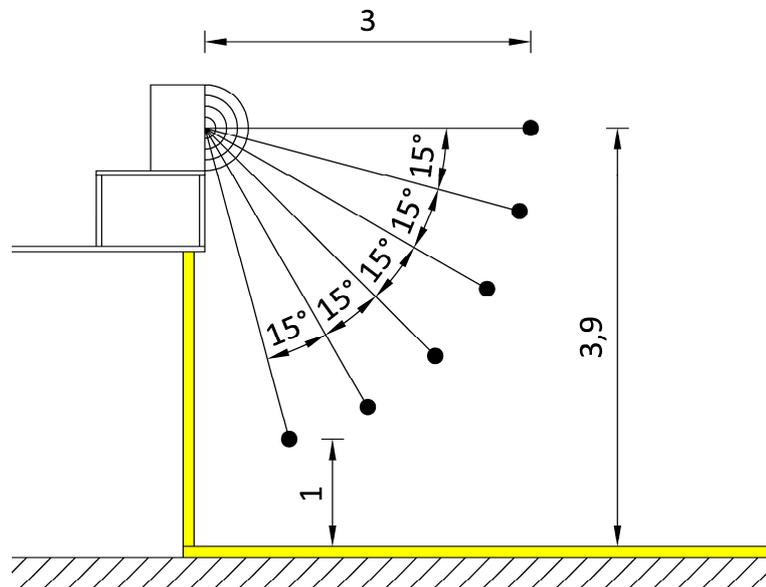


Abbildung 4.10: Messaufbau zur Bestimmung der vertikalen Richtcharakteristik unten

An jeder vorgesehenen Mikrofonposition werden wieder zwei Messungen zu je 20 Sekunden durchgeführt. Anschließend werden die Messergebnisse logarithmisch gemittelt und die Differenz zur Messung bei 0° (= Horizontale) auf dem entsprechenden Messstrahl aufgetragen (siehe Abbildung 4.11). Analog zur Auswertung der Richtcharakteristik horizontal.

Aus diesen Messungen lässt sich beim Summenpegel (Sum) ableiten, dass bereits bei 15° über der Horizontalen eine Minderung des Schalleistungspegels von knapp 3 Dezibel auftritt. Diese Reduktion steigt auf etwa 9 Dezibel bei 75° . Nach unten ist der Unterschied zur Horizontalen weit geringer. Bei -75° wird beim Summenpegel lediglich eine Reduktion von ca. 5 dB erreicht. Analog zu den Ergebnissen der Richtcharakteristik horizontal ist auch in diesem Fall die Minderung größer je höher die Frequenz ist. Der Verlauf der Reduktion der Schalleistungspegel je Oktavband ist in Abbildung 4.11 graphisch dargestellt.

Die Abweichungen sind um die Horizontale nicht symmetrisch. Dies ist durch die Anordnung des Tief- und des Hochtöners im Lautsprecher zu erklären. Die schematische Ansicht des Lautsprechers ist in Abbildung 4.12 abgebildet.

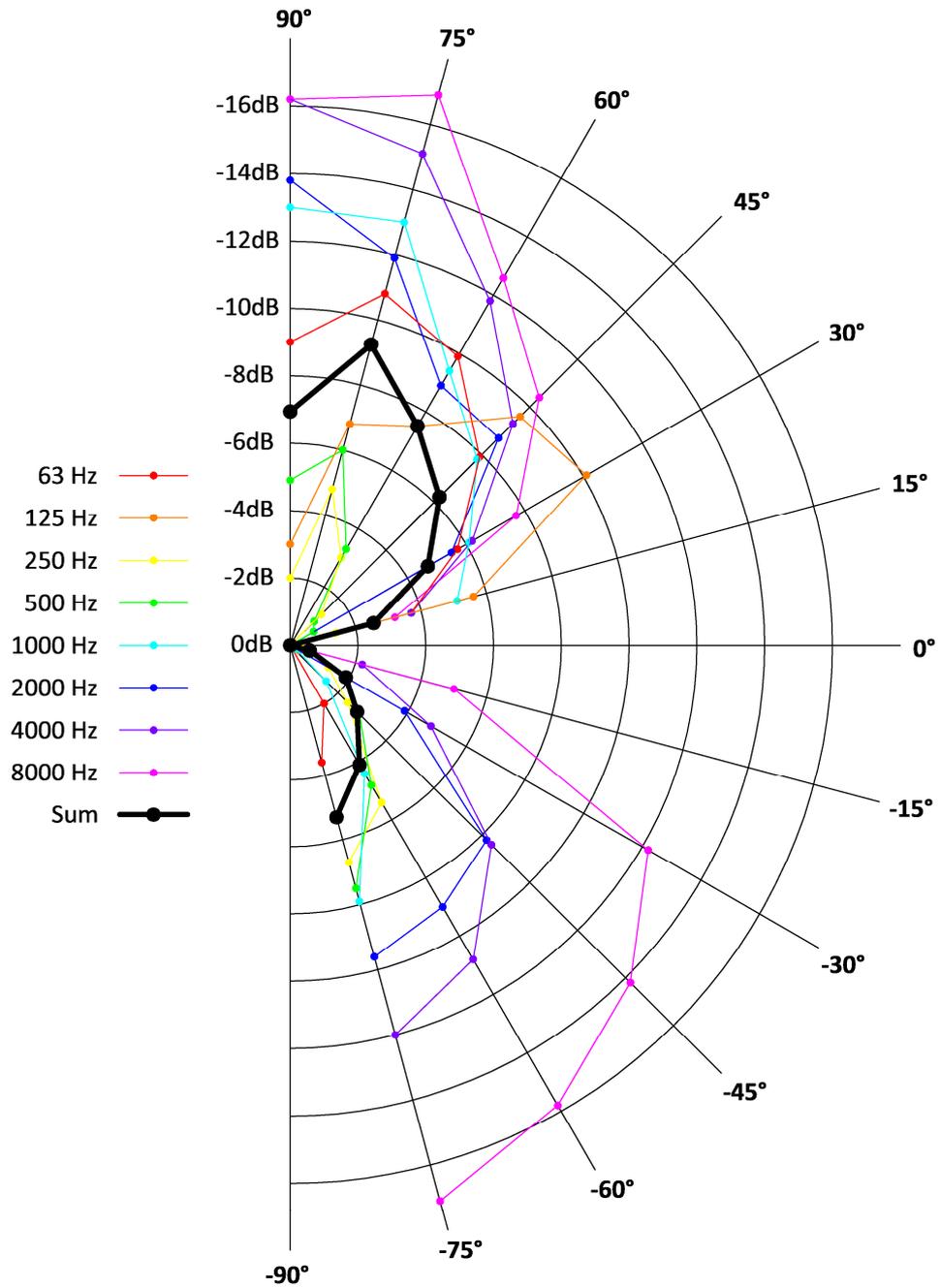


Abbildung 4.11: Richtcharakteristik vertikal

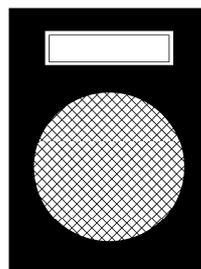


Abbildung 4.12: Ansicht des Lautsprechers

4.2.3. Schallausbreitung bei Abstandsverdoppelung

Bei dieser Messserie wird der Abstand zwischen Schallquelle und Mikrofon verdoppelt. Die Messungen werden am 11. September 2012 bei 21,6°C Lufttemperatur durchgeführt. Die vorherrschenden Wetterdaten sind dem Anhang 40 zu entnehmen. Ein Foto der Messungen befindet sich in Anhang 5.

Die ersten beiden Messungen zu je 20 Sekunden werden in einer Entfernung von einem Meter zu der Quelle vorgenommen. Anschließend wird der Abstand auf zwei, vier, acht und 16 Meter vergrößert. Die Höhe der Schallquelle und die Höhe der Mikrofone bleiben unverändert und betragen 1,1 Meter. Bei der reinen Abstandsverdoppelung sollte sich der Schalldruckpegel um 6 Dezibel verringern, wie unter Punkt 3.3 in Gleichung (16) erläutert.

Bei den durchgeführten Messungen kann dieser Effekt jedoch nicht festgestellt werden. Bei jeder Abstandsverdoppelung nimmt der gemessene Schalldruckpegel um etwa 5 Dezibel ab, was in einer Entfernung von 16 Meter zu einer Differenz zwischen dem erwarteten und gemessenen Wert von ca. 4 Dezibel führt (vgl. Tabelle 6). Abbildung 4.13 zeigt den Verlauf der berechneten Pegelabnahme (rote Linie) und den der gemessenen Werte (blaue Linie). Dargestellt und angegeben sind jeweils die Summenpegel. Die gemessenen und logarithmisch gemittelten Schalldruckpegel je Oktavband-Mittenfrequenz sind im Anhang 9 angeführt. Anhang 10 zeigt ein Diagramm der gemessenen Schalldruckpegel bei Abstandsverdoppelung je Oktavband-Mittenfrequenz.

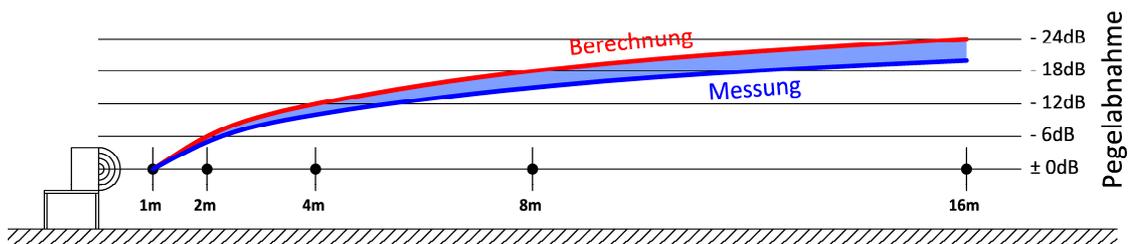


Abbildung 4.13: Schalldruckpegelabnahme bei Abstandsverdoppelung

Tabelle 6: gemessene und berechnete Schalldruckpegel bei Abstandsverdoppelung

Abstand zur Quelle	Messung		Berechnung
	$L_{\text{Sum,eq}}$	$\Delta L_{\text{Sum,eq,1m}}$	$\Delta L_{\text{Sum,eq,1m}}$
1m	110,1	0,0	0,0
2m	105,0	-5,1	-6,0
4m	100,0	-10,2	-12,0
8m	95,0	-15,1	-18,0
16m	89,8	-20,3	-24,0

Die Abweichung zwischen den beiden Pegelabnahmen entspricht nicht den akzeptablen Ungenauigkeiten bei Freifeldmessungen. Um die Herkunft dieser Abweichung zu finden, werden verschiedenste mögliche Fehlerquellen untersucht. Dazu zählen zum Beispiel nicht berücksichtigte Reflexionen oder Fremdschallquellen. Diese Fehlerquellen werden untersucht und können auf Grund der großen Entfernungen zu den Immissionsorten ausgeschlossen werden. Somit kann die herkömmliche Berechnung nicht angewendet werden und es muss ein abweichendes Berechnungsverfahren entwickelt werden.

Es wird ein weiterer Lösungsansatz untersucht, der schließlich eine deutliche Annäherung der Sollkurve an die Messkurve bringt. Dabei werden die Schallwege des direkten und des am Boden gespiegelten Schalls getrennt voneinander betrachtet. Durch die stark verminderte Schalleistung der Quelle bei Abweichungen von der Horizontalen und des größeren Ausbreitungsweges (siehe Abbildung 4.14) entfällt bzw. minimiert sich der Anteil des am Boden gespiegelten Schalls bei den nahen Positionen. Daher muss der gemessene Schalldruckpegel aus dem Anteil des direkten Schalls stammen. Somit wird der berechnete Schalleistungspegel größer, je näher man zur Quelle kommt.

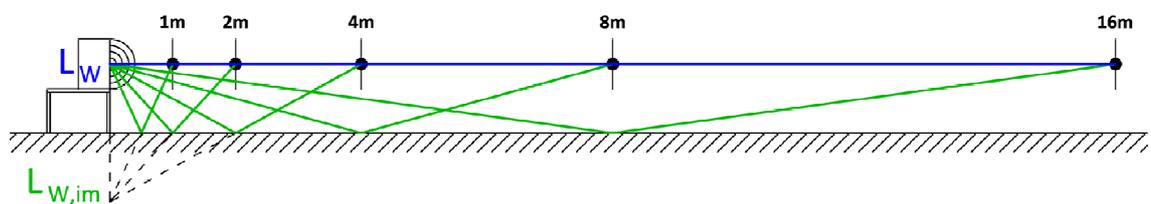


Abbildung 4.14: Ausbreitungswege des direkten und des gespiegelte Schalls bei Abstandsverdoppelung

Abbildung 4.14 zeigt die theoretische Lage der Spiegelschallquelle $L_{W,im}$. Die blaue Linie markiert den direkten Schallausbreitungsweg, die am Boden gespiegelten Schallwege sind grün dargestellt. Die Differenz zwischen dem direkten und dem gespiegelten Schall, bei einem Meter Entfernung zur Quelle, beträgt 241%. Bei einer Entfernung von 16 Meter reduziert sich diese Differenz auf 101%. Das bedeutet, dass bei 16 Meter Entfernung der direkte und der gespiegelte Schall eine annähernd gleich große Distanz zurücklegen.

Werden die Schalleistungspegel und die zugehörigen Dämpfungseinflüsse der beiden Schallausbreitungswege (direkt und gespiegelt) mit den Rechenregeln der Pegelrechnung addiert, dann ergibt sich Formel (29).

$$L_{eq} = 10 \lg(10^{(L_W - A)/10} + 10^{(L_W + D_{lr} + 10 \lg(\rho) - A_{im})/10}) \quad (29)$$

L_{eq}	gemessener energieäquivalenter Schalldruckpegel [dB]
L_W	gesuchter Schalleistungspegel [dB]
A	Oktavband-Dämpfungen für den direkten Schall [dB]
A_{im}	Oktavband-Dämpfungen für den gespiegelten Schall [dB]
D_{lr}	Richtwirkungsmaß der Quelle [dB]
P	Schallreflexionsgrad des Bodens [-]

Zur Berechnung von L_{eq} wird L_W solange iteriert, bis der berechnete Schalldruckpegel dem gemessenen entspricht.

Das Richtwirkungsmaß D_{lr} entspricht in diesem Fall der Richtcharakteristik vertikal nach unten. Das heißt, die nach unten gemessene vertikale Richtcharakteristik wird an dieser Stelle je Oktavband-Mittenfrequenz in die Berechnung eingebracht.

In weiterer Folge wird von allen Immissionsorten (1, 2, 4, 8 und 16 Meter) der Schalleistungspegel ermittelt. Bei der Berechnung nach der ÖNORM ISO 9613-2 ergibt sich eine Differenz von 3,8 dB zwischen dem berechneten Schalleistungspegel bei einem Meter und dem bei 16 Meter Abstand zur Quelle. Durch die Berücksichtigung der Richtcharakteristik vertikal und der geänderten Berechnung kann die Differenz zwischen den berechneten Schalleistungspegeln reduziert werden. Der Unterschied zwischen einem und 16 Meter beträgt dann nur noch 1,3 dB. Die berechneten Schalleistungspegel und die Differenzen zu dem Pegel bei 16 Meter sind in Tabelle 7 angegeben. Abbildung 4.15 zeigt die Pegelabnahmen bei der Berechnung nach ÖNORM (rote Linie) und die nach dem Lösungsansatz (grüne Linie).

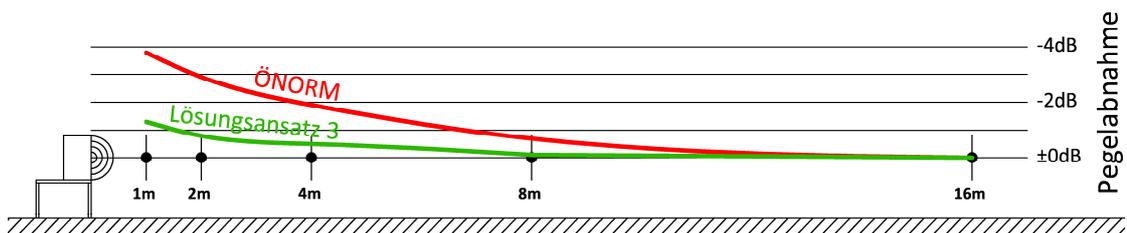


Abbildung 4.15: Verlauf der Schalldruckpegelabnahme - berechnet nach ÖNORM und nach eigenem Lösungsansatz

Tabelle 7: Schalleistungspegel bei Abstandsverdoppelung berechnet nach ÖNORM ISO 9613-2 und nach eigenem Lösungsansatz

Abstand zur Quelle	berechnet nach ÖNORM		Lösungsansatz	
	$L_{W,Sum}$	$\Delta L_{W,Sum}$	$L_{W,Sum}$	$\Delta L_{W,Sum}$
1m	118,1	-3,8	120,9	-1,3
2m	119,0	-2,9	121,4	-0,8
4m	120,0	-1,9	121,7	-0,5
8m	121,1	-0,8	122,1	-0,1
16m	121,9	0,0	122,2	0,0

Die nun ermittelte Differenz zwischen den berechneten Schalleistungspegeln bei einem und bei 16 Meter ist in einem Rahmen, der für Freifeldmessungen akzeptabel ist. In weiterer Folge werden bei allen Schalleistungsberechnungen der direkte und der am Boden gespiegelte Schall getrennt voneinander berücksichtigt. Die Berechnung erfolgt nach Formel (29).

4.3. Die Hecke

4.3.1. Definition Hecke

Nach Wikipedia ist eine Hecke ein linienförmiger Aufwuchs (ein- oder mehrreihig) dicht stehender, stark verzweigter Sträucher.

[Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Hecke>, Zugriff: 12.5.2013]

Bevor mit der Suche nach einer geeigneten Hecke für die Schallmessungen begonnen werden kann, muss für diese Arbeit der Begriff Hecke noch eindeutiger beschrieben werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Hecke folgendermaßen definiert:

- Aus Sträuchern oder Bäumen bestehend
- In Form geschnitten
- Regelmäßig gepflegt
- Ebene Oberflächen bildend
- Dicke zwischen 0,3 und einem Meter
- Höhe zwischen 1,5 und drei Meter
- Längsausdehnung mindestens fünf Meter

4.3.2. Zusatzkriterien für die Eignung als Schallschirm

Nachdem nun festgelegt ist, ab wann eine Strauchreihe als Hecke gilt, müssen weitere Kriterien erfüllt werden, um die Schirmwirkung der Hecke messen zu können:

- Die Dicke der Hecke soll zwischen 0,5 und einem Meter betragen. Die Schirmwirkung von dünneren Hecken ist eventuell zu gering, um gesicherte Aussagen darüber machen zu können.
- Die Hecke soll höher als 2 Metern sein, um zu gewährleisten, dass der Schall durch die Hecke geht und nicht darüber.
- Die Längsausdehnung soll größer als 10 Meter sein, um den Einfluss der oberen und seitlichen Beugung zu begrenzen.
- Die Hecke darf keine Lücken aufweisen und soll gleichmäßig und ausreichend dicht sein, um ausreichend große Schallpegeldifferenzen zu erhalten (Blickdichtheit; siehe 3.6.1).
- In der Nähe der Hecke sollen sich keine Hindernisse (Gebäude, Sträucher, Bäume,...) befinden, um Reflexionen zu vermeiden.
- Die Zugänglichkeit und die Stromversorgung sowie die Zustimmung der Grundeigentümer muss gegeben sein.

Geeignete Hecken, die diese Kriterien erfüllen, werden hauptsächlich in den öffentlichen Gärten und Parks in Wien gesucht. Des Weiteren werden Siedlungen in Wiener Neustadt und Wiener Neustadt Bezirk zur Suche herangezogen.

4.3.3. Gemessene Hecke

Die Hecke, die die Anforderungen bestmöglich erfüllt, befindet sich in Wien. Sie befindet sich auf dem Grundstück 565/3 in der Katastralgemeinde 01657 Leopoldstadt. Der grundbücherliche Eigentümer ist die Republik Österreich (Bundesgebäudeverwaltung).

Diese Hecke begrenzt den Parkplatz der Porzellanmanufaktur im Augarten. Abbildung 4.16 zeigt eine Luftaufnahme des Parkplatzes im Augarten. Die gemessene Hecke ist durch eine rote Linie hervorgehoben.



Abbildung 4.16: Luftbild der gemessenen Hecke im Augarten (Quelle: google.maps, 2013)

Die Hecke hat eine Längsausdehnung von ca. 62 Meter und eine Höhe von 2,20 Meter. Die vorgegebene maximale Dicke von 1 Meter wird eingehalten. Im Winter beträgt die Dicke, auf Grund eines Rückschnitts der Hecke, nur noch 0,8 Meter und die Höhe 2,0 Meter. An der Südost-Seite befindet sich in einem Abstand von 15 Meter eine parallel verlaufende ca. 4 Meter hohe Mauer. Dazwischen liegen zwei Parkflächen (2 mal 5 Meter Breite) aus Pflastersteinen und ein mittiger asphaltierter Fahrstreifen (5 Meter Breite). Im Nordwesten der Hecke sind in 23 Meter Entfernung ca. 1,8 Meter hohe, pyramidenförmig geschnittene Sträucher. An den beiden Enden der Hecke

stehen in 12 bzw. 17 Meter Entfernung zwei Gebäude. Ein entsprechender Lageplan und Querschnitt ist Abbildung 4.17 zu entnehmen.

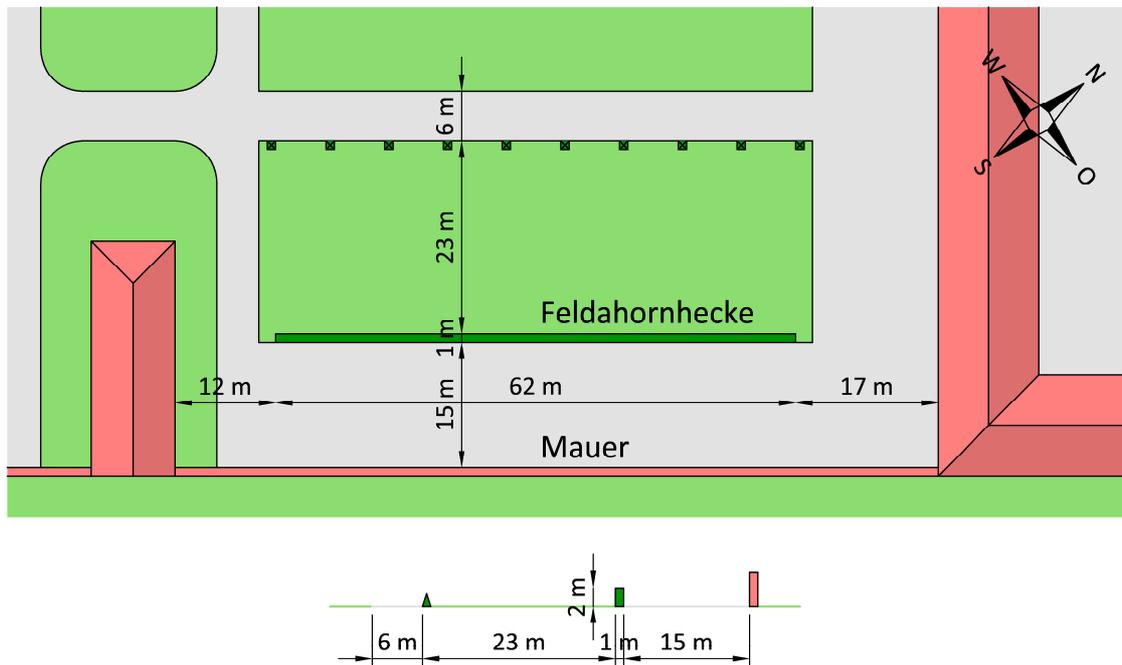


Abbildung 4.17: Lageplan und Querschnitt der gemessenen Feldahornhecke

Fotos der gemessenen Hecke mit Belaubung sind im Anhang 11 und Anhang 12 abgebildet.

4.3.4. Baumart

Bei der gemessenen Hecke handelt es sich um eine Feldahornhecke. Der Feldahorn (lat. *Acer campestre*) ist ein kleiner Laubbaum, oft strauchartig. Die Blätter sind klein und 5-lappig. Der Feldahorn blüht zwischen April und Mai. Häufig ist diese Halbschattenbaumart in Laub-Mischwäldern und Hecken, auf frischen, nährstoff- und basenreichen Böden zu finden.

Der Feldahorn erreicht Höhen bis zu 15 Meter und Stammdurchmesser bis zu 40 Zentimeter. Er wird ca. 150 Jahre alt [HOF83] [MAY84].

4.3.5. Zustand der gemessenen Hecke aus akustischer Sicht

Aus akustischer Sicht ist die gewählte Hecke tauglich um als Schallschirm zu dienen. Die geforderten Abmessungen aus Punkt 4.3.2 (Dicke, Höhe und Längsausdehnung) werden erfüllt. Die Hecke ist gleichmäßig gewachsen und ausreichend dicht. Ein gutes Indiz zur Beurteilung der genügend großen Dichtheit ist,

wie in 3.6.1 beschrieben, die Blickdichtheit, die im Sommer mit Belaubung gegeben ist (siehe Abbildung 4.18). Im Winter, ohne Belaubung, ist die Blickdichtheit der Feldahornhecke nicht mehr gegeben (siehe Abbildung 4.19).



Abbildung 4.18: Blickdichtheit der Feldahornhecke mit Belaubung



Abbildung 4.19: unzureichende Blickdichtheit der Feldahornhecke ohne Belaubung

4.4. Messungen an der Hecke

4.4.1. Messtage

Um Aussagen über die Schallschirmwirkung von der gewählten Feldahornhecke mit und ohne Belaubung treffen zu können, ist es unumgänglich zwei Messungen durchzuführen. Die erste Messung, mit Belaubung, erfolgt am 18. September 2012. Der gleiche Vorgang wird am 18. Dezember 2012 ohne Belaubung wiederholt.

4.4.1.1. Messung am 18. September 2012

Bei der ersten Messung im September 2012 ist die Feldahornhecke noch vollständig belaubt. Die Messung findet am oben genannten Tag in der Zeit von 14:00 Uhr bis 18:30 Uhr statt. Die Lufttemperatur an diesem sonnigen Tag beträgt 24,6°C. Die Wetterdaten sind im Anhang 40 gelistet. Die Daten werden am Institutsgelände (Adolf-Blamauergasse 1-3, 1030 Wien) aufgezeichnet. Die für diesen Zeitraum gemessene mittlere Windgeschwindigkeit von 2,8 m/s weicht von der lokalen Windgeschwindigkeit zum selben Zeitpunkt ab. Vor Ort ist sie kleiner 0,5 m/s. Dies wird mittels eines Handmessgeräts gemessen.

4.4.1.2. Messung am 18. Dezember 2012

Die zweite Messung wird im Winter 2012 durchgeführt. Am oben genannten Messtag ist kein Laub auf der Hecke. Die Messungen dauern von 9:30 Uhr bis 13:30 Uhr. Es ist bewölkt bei 2,9°C Lufttemperatur. Der Boden ist nicht gefroren. Die am Institutsgelände aufgezeichneten Wetterdaten sind im Anhang 40 angeführt. Im Augarten ist es zum Zeitraum der Messung windstill.

4.4.2. Messaufbau

Bei den Freifeldmessungen soll eine realistische Situation im urbanen Raum nachgestellt werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Hecke an der Grundstücksgrenze in einem Siedlungsgebiet steht. Diese Hecke soll den Lärm von der Straße mindern. Aus diesem Grund wird ein Abstand zwischen Hecke und Schallquelle von 5 m (3 m Fahrstreifen und 2 m Gehweg) als realistisch angenommen. Die Linienschallquelle (Straßenverkehrslärm) wird in diesem Fall durch eine Punktschallquelle (Aktivlautsprecher) ersetzt. Hinter der Hecke kann nicht von einem fixen Immissionsort ausgegangen werden, da sich an mehreren Positionen Personen aufhalten können. Die Schirmwirkung der Hecke muss auch nicht bei unterschiedlichen

Entfernungen zur Hecke gleich groß sein. Somit ist es notwendig, die Schalldruckpegel an mehreren Immissionsorten mit unterschiedlichen Abständen zur Hecke zu messen, um einen Verlauf der Einfügedämpfung über die Entfernung zur Hecke zu erhalten.

Es werden zwei unterschiedliche Anordnungen der Mikrofone gewählt. Zum Einen werden die Mikrofone strahlenförmig aufgestellt (Strahlenmessung), um die Schallausbreitung hinter der Hecke möglichst flächendeckend erfassen zu können. Zum Anderen in einer Linie (Linienmessung) angeordnet, um die Schallausbreitung entlang einer Linie möglichst detailliert darstellen zu können. An beiden Messtagen werden die Strahlen- und die Linienmessung ausgeführt. Die Anzahl der einzelnen Messvorgänge sowie die Messdauer werden ebenfalls gleich gelassen.

Bei beiden Messvorgängen wird die Schallquelle in 5 Meter Entfernung zur Hecke aufgestellt. 3 Meter vor dem Aktivlautsprecher befindet sich immer das erste Mikrofon, das zur Ermittlung des Schalleistungspegels dient (Referenzmikrofon). Da das verwendete Messsystem ein Mehrkanalsystem mit zehn Kanälen ist, bleiben noch neun Mikrofone übrig, die hinter der Hecke platziert werden.

Alle Mikrofone sind in einer Höhe von 1,1 Meter aufgestellt. Auch der Mittelpunkt des Aktivlautsprechers befindet sich 1,1 Meter über dem Boden.

Zusätzlich zur Strahlen- und Linienmessung wird noch eine Messung mit einer akustischen Kamera durchgeführt.

Mehrere Fotos von den Messungen am 18. September 2012 und 18. Dezember 2012 befinden sich im Anhang unter Punkt 10.4 (Anhang 13 bis Anhang 18).

4.4.2.1. Strahlenmessung

Bei der sogenannten Strahlenmessung soll kontrolliert werden, ob die Schallausbreitung symmetrisch erfolgt. Dabei spielt die Richtcharakteristik horizontal des Lautsprechers eine entscheidende Rolle. In Punkt 4.2.1 wird gezeigt, dass diese für den vorderen Bereich von -30° bis $+30^\circ$ als gleichmäßig angenommen werden kann. Somit hat der Lautsprecher keinen Einfluss auf mögliche Pegeldifferenzen zwischen den einzelnen Strahlen bei gleicher Entfernung zur Quelle. Des Weiteren sollen eventuell auftretende Reflexionen oder Einflüsse durch Fremdschallquellen von der Seite oder von hinten erfasst werden.

Beim Messvorgang werden neun Mikrofone strahlenförmig hinter der Hecke aufgestellt. Im Schnittpunkt der drei Strahlen befindet sich die Schallquelle. Zwischen den drei Strahlen ist ein Winkel von jeweils 15° . Zwischen den ersten drei Mikrofonen und der Schallquelle ist ein Abstand von acht Meter. Jeweils fünf bzw. zehn Meter

hinter der ersten Reihe sind die restlichen sechs Mikrofone positioniert. Durch diese Anordnung wird eine Fläche von ca. 75 m² abgedeckt. Die beiden äußeren, am weitesten entfernten Mikrofone stehen in einer Entfernung von 9,3 Meter zueinander. Der Messaufbau der Strahlenmessung ist in Abbildung 4.20 mittels eines Auf- und Grundrisses graphisch dargestellt. Die Mikrofonpositionen sind durch schwarze Punkte gekennzeichnet. Der Ausbreitungsweg des direkten Schalls ist durch eine blaue Linie visualisiert.

Es werden zehn Messungen mit einer Dauer zu je 20 Sekunden durchgeführt.

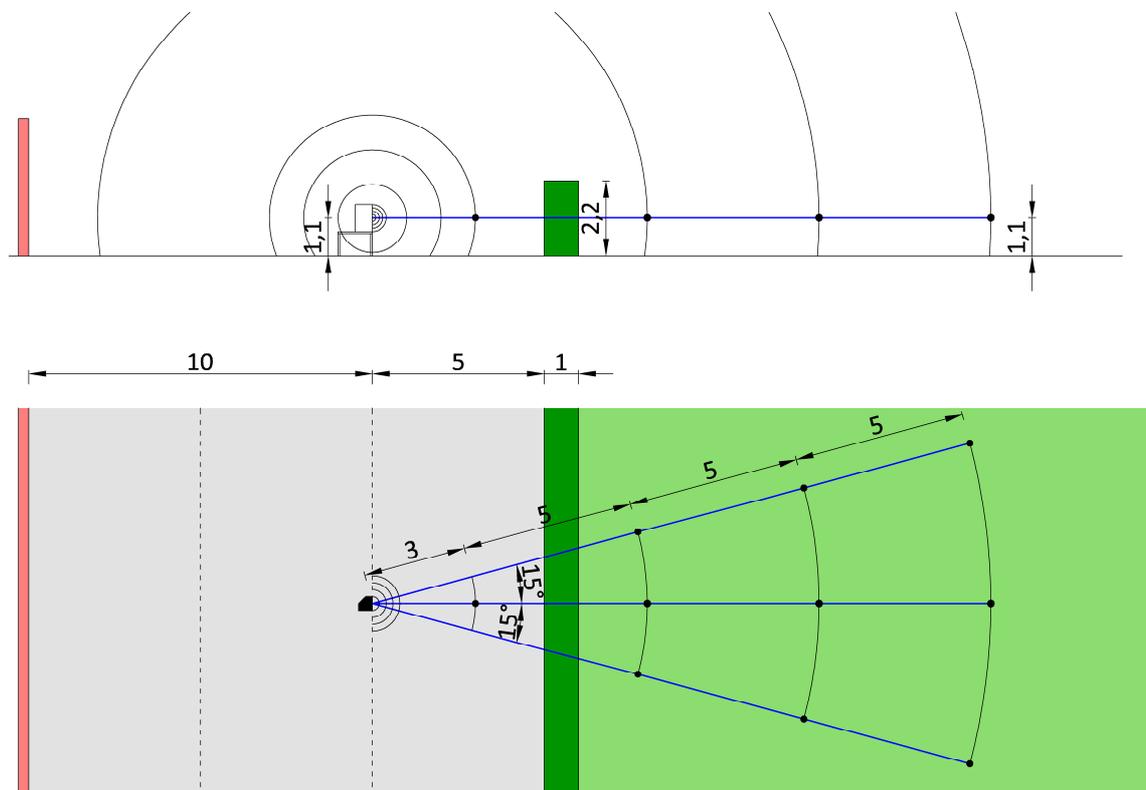


Abbildung 4.20: Messaufbau der Strahlenmessung

4.4.2.2. Linienmessung

Bei der zweiten Messung soll die Schallausbreitung hinter der Hecke möglichst detailliert aufgenommen werden. Dazu werden alle neun Mikrofone in einer Reihe hinter der Hecke aufgestellt. Das erste der neun Mikrofone steht direkt an der Oberfläche der Hecke. Zwischen den weiteren ist jeweils ein Abstand von zwei Meter. Somit ergibt sich eine Gesamtentfernung zwischen der Quelle und dem am weitesten entfernten Mikrofon von 22 Meter. Die Schirmwirkung kann von 0 bis 16 Meter hinter der Hecke bestimmt werden. Abbildung 4.21 zeigt einen Auf- und Grundriss der

Linienmessung. Die Mikrofonpositionen sind durch schwarze Punkte gekennzeichnet. Der Ausbreitungsweg des direkten Schalls ist durch eine blaue Linie visualisiert.

In diesem Fall werden fünf Messungen zu je 20 Sekunden gemacht.

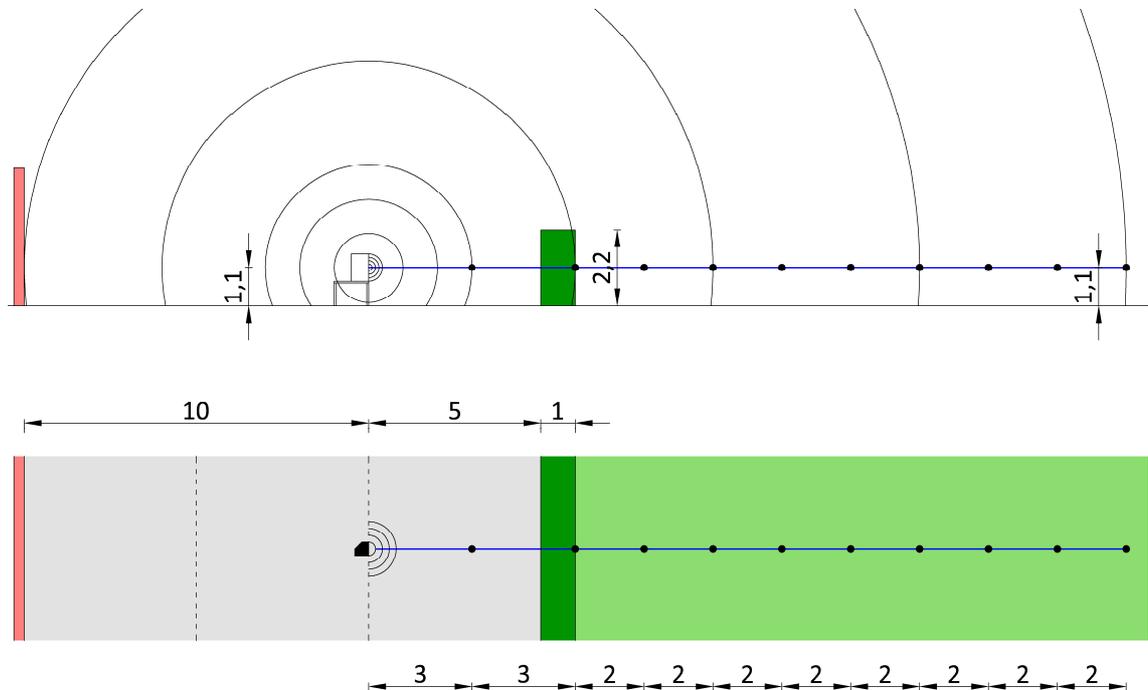


Abbildung 4.21: Messaufbau der Linienmessung

4.4.2.3. Akustische Kamera

Zusätzlich zu den Messungen mit dem Norsonic Nor850 werden Messungen mit einer akustischen Kamera durchgeführt. Die akustische Kamera wird von der Firma Fellner zur Verfügung gestellt. Die Bedienung und die Auswertung wird von Herrn Petz, einem Mitarbeiter der Firma Fellner, vorgenommen.

Dabei bleibt der Abstand zwischen Schallquelle und Hecke bei fünf Meter. Die akustische Kamera wird in acht Meter Entfernung zur Hecke bei 0° (Ausbreitungsrichtung des Schalls von der Quelle) aufgestellt. Somit ergibt sich ein Gesamtabstand zwischen Quelle und Empfänger von 14 Meter. Die Kamera ist in Richtung der Quelle ausgerichtet. Der Mittelpunkt des ringförmigen Mikrofonarrays befindet sich in ca. 1,8 Meter Höhe. In Abbildung 4.22 ist die Messanordnung der akustischen Kamera in einem Auf- und Grundriss abgebildet. Der Ausbreitungsweg des direkten Schalls ist durch eine blaue Linie visualisiert.

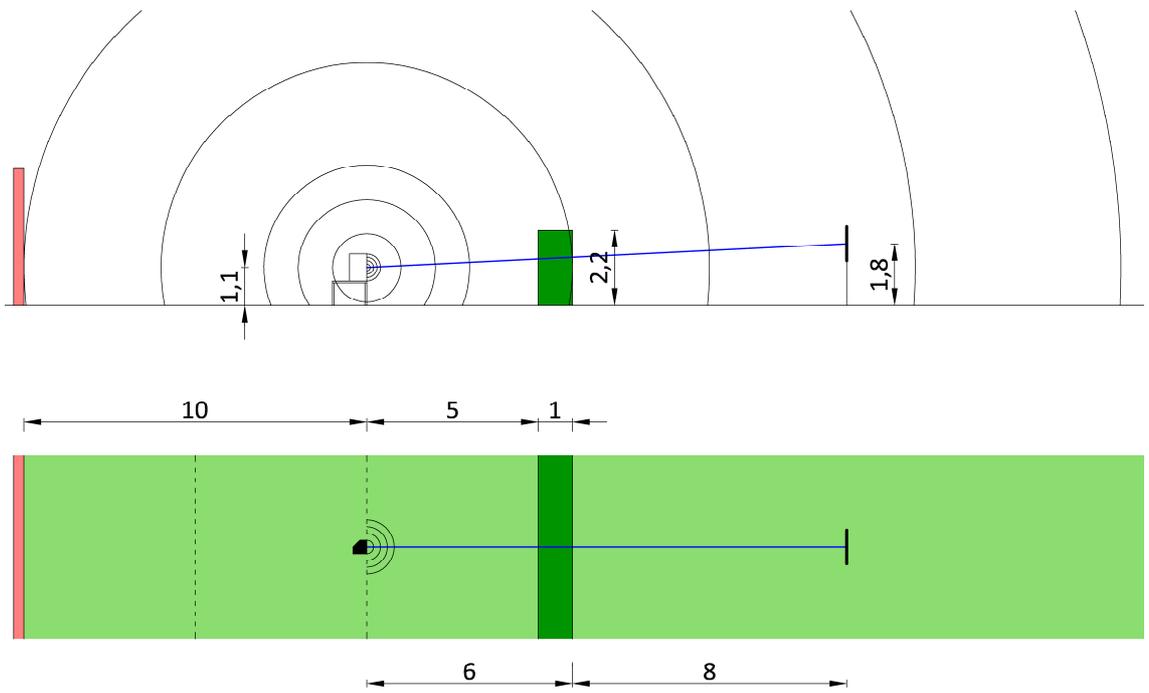


Abbildung 4.22: Messaufbau der akustischen Kamera

4.5. Auswertung der Messungen

Alle durchgeführten Messungen werden, unter Berücksichtigung der festgestellten Berechnungsänderungen (vgl. 4.2.3), nach den Formeln und Vorschriften der ÖNORM ISO 9613 Teil 2 ausgewertet. Die Schallausbreitung im Freien ist, wie in Punkt 3.5 beschrieben, mehreren Dämpfungen unterworfen. Die Summe dieser Dämpfungen wird in Formel (18) berechnet. Die darin enthaltenen Parameter werden nun für die vorliegenden Messungen im Augarten Wien behandelt.

4.5.1. Dämpfungseinflüsse aus der ÖNORM ISO 9613-2

4.5.1.1. Pegelminderung mit der Entfernung A_{div}

Die Pegelminderung mit der Entfernung spielt bei allen Freifeldmessungen eine wichtige Rolle, da der Schalldruckpegel immer ortsabhängig ist. Für die Berechnungen wird die entsprechende Entfernung eingesetzt. Dies gilt sowohl für Ausbreitungswege des direkten als auch des am Boden gespiegelten Schalls.

4.5.1.2. Atmosphärische Absorption A_{atm}

Auf Grund der geringen Entfernungen bei den durchgeführten Messungen wird die Absorption durch die Luft A_{atm} vernachlässigt und mit Null angenommen.

4.5.1.3. Bodendämpfung A_{gr}

Wie in Punkt 4.2.3 beschrieben, müssen der direkte und der am Boden gespiegelte Schall getrennt voneinander berücksichtigt werden. Aus diesem Grund fällt auch der Bodeneffekt A_{gr} weg, weil der Bodeneffekt ebenfalls Reflexionen am Boden einschließt und diese dann in Formel (18) doppelt berücksichtigt wären.

4.5.1.4. Abschirmung A_{bar}

Die Abschirmung A_{bar} muss ebenfalls nicht berücksichtigt werden, da die in [ONO08] geforderten Bedingungen nicht zur Gänze erfüllt werden (siehe 3.5.4).

4.5.1.5. Reflexionen

Die auftretenden Reflexionen an der Wand hinter der Schallquelle bzw. an den Enden der Hecke sowie die pyramidenförmig zugeschnittenen Sträucher hinter der

Hecke werden rechnerisch untersucht. Auf Grund der relativ großen Entfernungen zu diesen Objekten beeinflussen die Reflexionen an deren Oberfläche nicht das Messergebnis.

4.5.1.6. Klimatische Einflüsse

Die größte Entfernung zwischen Quelle und Mikrofon beträgt 22 Meter. Die Lufttemperaturen und relativen Luftfeuchtigkeiten sind an beiden Messtagen in einem Bereich, der keine rechnerischen Korrekturen erfordert. Auch die Windgeschwindigkeiten sind gering genug, um sie unberücksichtigt zu lassen.

4.5.2. Auswertung der Messung im Augarten

Wie bereits erwähnt, werden die Messungen im Augarten 10-fach (Strahlenmessung) bzw. 5-fach (Linienmessung) ausgeführt. Die gespeicherten energieäquivalenten Schalldruckpegel L_{eq} von gleichen Mikrofonpositionen werden logarithmisch gemittelt. Hierbei wird Formel (30) angewendet.

$$L_{eq,m} = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_{eq,i}/10} \right) \quad (30)$$

n Anzahl der zu mittelnden Schallpegel

4.5.2.1. Berechnung der Schalleistungspegel

Vom Schalldruckpegel des Referenzmikrofons in drei Meter Entfernung zur Quelle, wird auf den Schalleistungspegel L_W der Schallquelle rückgerechnet. Dabei werden die eben erläuterten Dämpfungseinflüsse bei Schallausbreitung im Freien übernommen. Berücksichtigt man noch die Tatsache, dass der direkte und der am Boden gespiegelte Schall getrennt voneinander berechnet und anschließend logarithmisch addiert werden müssen (vgl. 4.2.3), so ergibt sich folgender Ausdruck:

$$L_{eq} = 10 \log \left(10^{((L_W - A_{div})/10)} + 10^{((L_{W,im} - A_{div,im})/10)} \right) \quad (31)$$

$$L_{W,im} = L_W + D_{lr} + 10 \log(\rho) \quad (32)$$

$L_{W,im}$ Schalleistungspegel der Spiegelschallquelle
 $A_{div,im}$ Pegelminderung mit der Entfernung des am Boden gespiegelten Schalls

D_{lr}	Richtwirkungsmaß
ρ	Schallreflexionsgrad

Aus den Formeln (31) und (32) lässt sich folgender Ausdruck anschreiben:

$$L_{eq} = 10 \log(10^{((L_W - A_{div})/10)} + 10^{((L_W + D_{lr} + 10 \log(\rho) - A_{div,im})/10)}) \quad (33)$$

Durch Iteration wird der Schalleistungspegel berechnet. Dies wird für alle vier Messszenarien (Strahlen-/Linienmessung und mit/ohne Belaubung) durchgeführt. Zur Berechnung von A_{div} und $A_{div,im}$ wird Formel (19) herangezogen. Die sich daraus ergebenden Schalleistungspegel sind in Tabelle 8 angegeben. Dabei steht Sum für den Summenpegel (= die Schalleistungspegel aller Frequenzen logarithmisch addiert).

Für das Referenzmikrofon (3 Meter Abstand) gilt:

$$d = 3,00 \text{ m}; \quad A_{div} = 20,54 \text{ dB}$$

$$d_{im} = 3,72 \text{ m}; \quad A_{div,im} = 22,41 \text{ dB}$$

D_{lr} bei 36° unter der Horizontalen (siehe Anhang 19 bzw. Anhang 20)

$$\rho = 1,0$$

Tabelle 8: berechnete Schalleistungspegel; a = Strahlenmessung mit Belaubung, b = Linienm. mit B., c = Strahlenm. ohne B., d = Linienm. ohne B.

f [Hz]		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Sum
a	L_W [dB]	109,7	113,3	106,7	115,0	113,2	111,8	114,9	113,0	121,9
b	L_W [dB]	109,9	113,5	106,7	114,8	113,1	111,8	114,9	113,1	121,9
c	L_W [dB]	110,3	113,7	108,8	117,0	113,7	115,1	113,3	114,0	122,9
d	L_W [dB]	110,1	113,5	108,5	116,7	113,5	114,9	113,5	114,0	122,7

Die geometrischen Zusammenhänge bei der Schallausbreitung von der Quelle zum Referenzmikrofon sind in Abbildung 4.23 wiedergegeben. Dabei ist der direkte Schallausbreitungsweg blau dargestellt und der der Spiegelschallquelle grün.

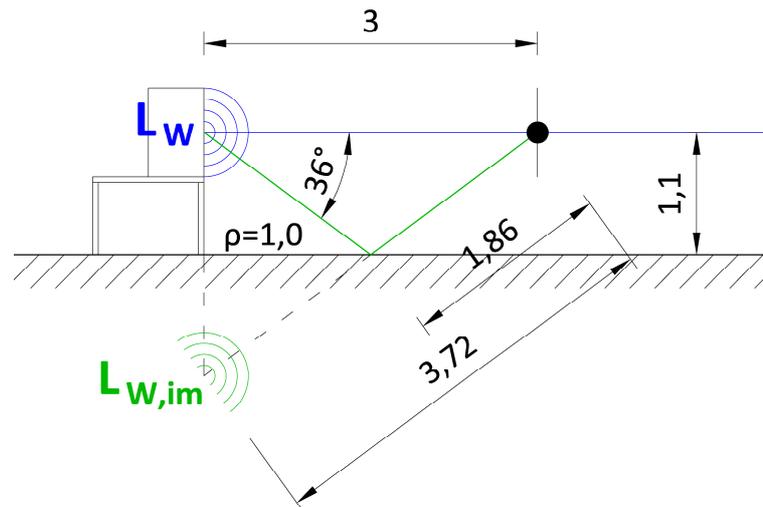


Abbildung 4.23: Schallausbreitung Quelle - Referenzmikrofon

4.5.2.2. Berechnung der Schalldruckpegel

Ausgehend von dem jeweiligen Schallleistungspegel wird ein theoretischer Schalldruckpegel ohne Schallschirm gerechnet. Dies geschieht ebenfalls mit Formel (33). Des Weiteren werden noch Schalldruckpegel für einen Schallschirm nach ÖNORM ISO 9613 Teil 2 berechnet. Dabei werden die gleichen Abstände und Randbedingungen wie bei der Messung vor Ort angesetzt.

Die Ergebnisse aus diesen Berechnungen sind im nächsten Kapitel (5. Messergebnisse) zusammengefasst.

4.5.2.3. Randbedingungen der Berechnungen

Zur Berechnung der eben erwähnten Schallleistungs- und Schalldruckpegel werden folgende Parameter bestimmt bzw. angenommen:

Das Richtwirkungsmaß D_{ir} , welches in Formel (32) bzw. (33) Eingang findet, wird aus der gemessenen vertikalen Richtcharakteristik übernommen. Dabei wird die Eingabe von Zwischenwerten (zwischen den Messwerten alle 15°) erforderlich. Diese werden mittels linearer Interpolation ermittelt. Da die Berechnungen frequenzabhängig erfolgen, wird auch die Richtcharakteristik frequenzabhängig berücksichtigt. Für jeden erforderlichen Winkel wird bei der entsprechenden Frequenz die zugehörige Richtcharakteristik abgelesen. Die bei der Auswertung verwendeten Richtcharakteristiken sind im Anhang 19 und Anhang 20 gelistet.

Der anzugebende Reflexionsgrad ρ wird für den Fall der Reflexion über den Pflastersteinen mit 1,0 angenommen. Dies betrifft die Mikrofone mit den Abständen von drei bis zehn Meter zur Quelle. Bei allen anderen Mikrofonen wird der Reflexionsgrad mit 0,5 angesetzt. Ein Reflexionsgrad von 0,5 entspricht einer mittleren Dämpfung. Es werden auch andere, von den angegebenen leicht abweichende, Reflexionsgrade eingegeben. Dabei ändert sich das Ergebnis nur geringfügig.

Vorhandene Fremdschallquellen (z.B.: Straßenverkehrslärm der Oberen Augartenstraße; Bauarbeiten,...) spielen keine Rolle für die Messauswertung, da der Schalleistungspegel weit genug über diesem Grundgeräuschpegel liegt.

Die horizontale Richtcharakteristik wird durch Messungen bestimmt. Die Auswertung dieser Messungen ist in 4.2.1 angegeben. Für die durchgeführten Messungen im Augarten ist die Richtcharakteristik horizontal Null, da die Mikrofone maximal in einem Winkel von 15° , im Bezug auf die Ausstrahlrichtung des Lautsprechers, aufgestellt sind.

5. Messergebnisse

Zur Berechnung der Schirmwirkung der Feldhornhecke wird von dem Schalldruckpegel der Referenzmessung (Mikrofon in 3 Meter Abstand zur Quelle) der Schalleistungspegel ermittelt. Mit dem errechneten Schalleistungspegel wird ein rechnerischer Schalldruckpegel bei einer Schallausbreitung ohne Schirm für alle Mikrofonpositionen berechnet. Die Abweichung zwischen dem errechneten und dem gemessenen Schalldruckpegel beschreibt den Einfluss der Hecke. Zusätzlich wird noch ein theoretischer Schalldruckpegelverlauf bei der Ausbreitung über eine Lärmschutzwand (mit gleichen Abmessungen wie die Hecke) berechnet und verglichen. Für alle Berechnungen werden die Abmessungen und Entfernungen unverändert zu jenen der Messungen vor Ort gelassen.

Dass die horizontale Richtcharakteristik im vorderen Bereich symmetrisch ist, wird in Punkt 4.2.1 erläutert. Die Auswertung der Strahlenmessungen hat ergeben, dass die Schallausbreitung symmetrisch erfolgt. Die geringfügigen Differenzen, die zwischen den Strahlen bei -15° , 0° und 15° auftreten, lassen sich durch übliche Messungenauigkeiten bei Freifeldmessungen erklären. Die gemessenen und berechneten Schalldruckpegel der Strahlenmessungen (mit und ohne Belaubung), sowie zwei Diagramme dieser Werte, sind im Anhang 21 bis Anhang 28 angegeben.

Somit sind auch mögliche Fehlerquellen, wie Reflexionen oder Fremdschallquellen, auszuschließen. Daher wird bei den im Folgenden angegebenen Messergebnissen und Bewertungen nicht näher auf die Strahlenmessung eingegangen und ausschließlich die Ergebnisse der Linienmessung behandelt, da diese zur detaillierteren Darstellung der Schirmwirkung besser geeignet sind.

An dieser Stelle wird nochmals darauf hingewiesen, dass die folgenden Messergebnisse mit einer Entfernung von 3 Meter zur Schallquelle lediglich zur Berechnung des Schalleistungspegels dienen.

5.1. Messergebnisse mit Belaubung

Trägt man alle Schalldruckpegel der Linienmessung mit Belaubung je Oktavband-Mittenfrequenz und Entfernung zur Quelle in einem Diagramm auf, ergibt sich Abbildung 5.1. Dabei sind die geringen Schalldruckpegel bei hohen Frequenzen (besonders bei 8 kHz) sehr auffällig. Die entsprechenden Messwerte sind dem Anhang 29 zu entnehmen.

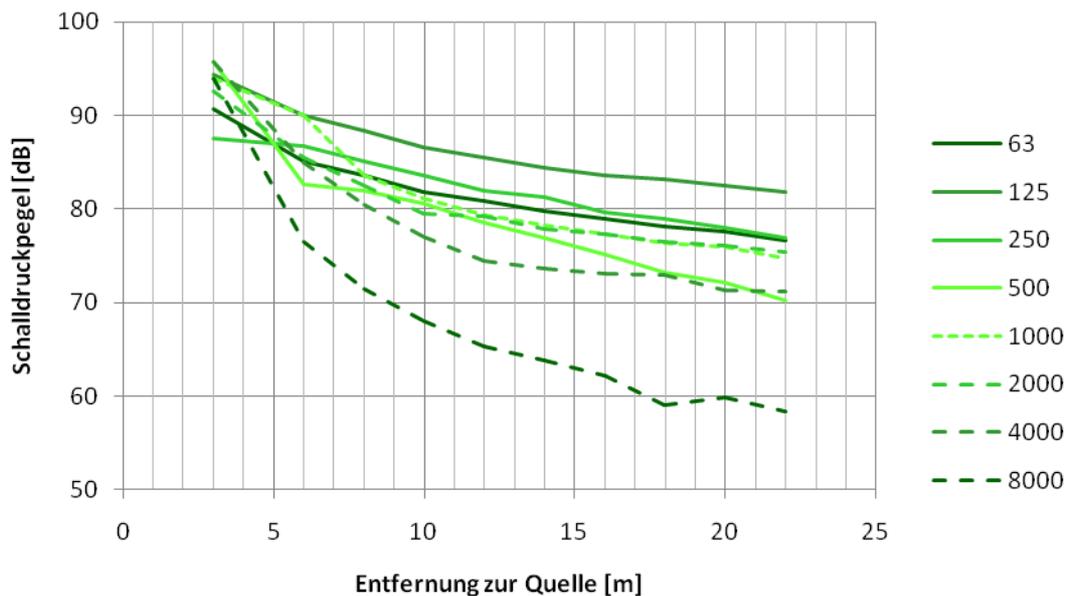


Abbildung 5.1: Oktavband-Mittenfrequenz der gemessenen Schalldruckpegel bei Hecke mit Belaubung

Wie in 4.5.2.2 erwähnt, werden noch die Schalldruckpegel für die Schallausbreitung ohne Schallschirm und mit Schallschirm (Lärmschutzwand) ermittelt. Grundlage dafür ist der in 4.5.2.1 berechnete Schalleistungspegel. Die daraus resultierenden Werte sind in Anhang 30 und Anhang 31 angeführt.

Die Differenzen zwischen den gemessenen und berechneten Schalldruckpegeln bei Schallausbreitung ohne Schirm ist in Anhang 32 angegeben. Abbildung 5.2 zeigt ein Diagramm dieser Pegelabnahme. In dieser Darstellung sind die negativen Pegelabnahmen bei tiefen Frequenzen besonders auffällig. Das bedeutet eine Erhöhung dieser Frequenzbänder hinter der Hecke im Vergleich zu vor der Hecke. Die Angabe in der Literatur, dass höhere Frequenzen stärker gedämpft werden, kann an dieser Stelle ebenfalls bestätigt werden.

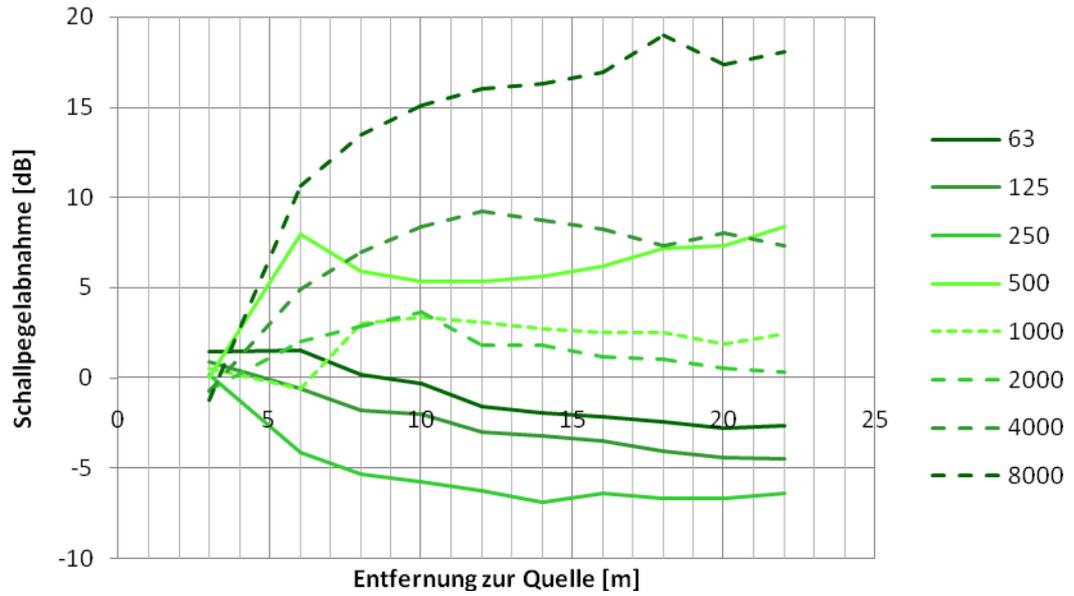


Abbildung 5.2: Schallpegelabnahme zwischen Schallausbreitung ohne Schirm und Hecke mit Belaubung

Die Summenpegel der drei Schallausbreitungsereignisse (Hecke mit Belaubung, ohne Schirm und Lärmschutzwand) sind in Abbildung 5.3 dargestellt.

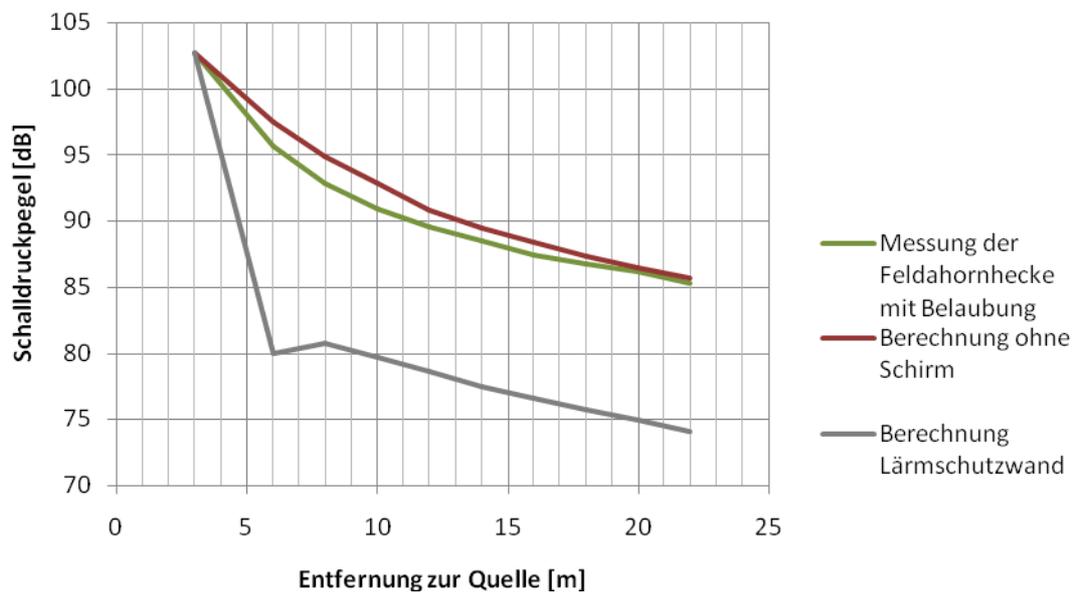


Abbildung 5.3: Gemessene und berechnete Summenpegel der Linienmessung mit Belaubung

5.2. Messergebnisse ohne Belaubung

Analog zur Darstellung der Messergebnisse mit Belaubung sind die gemessenen Schalldruckpegel ohne Belaubung je Oktavband-Mittenfrequenz in Abbildung 5.4 wiedergegeben. Auch in diesem Fall ist die 8 kHz-Linie, vor allem bei größeren Entfernungen, markant niedrig. Die Messwerte sind in Anhang 33 gelistet.

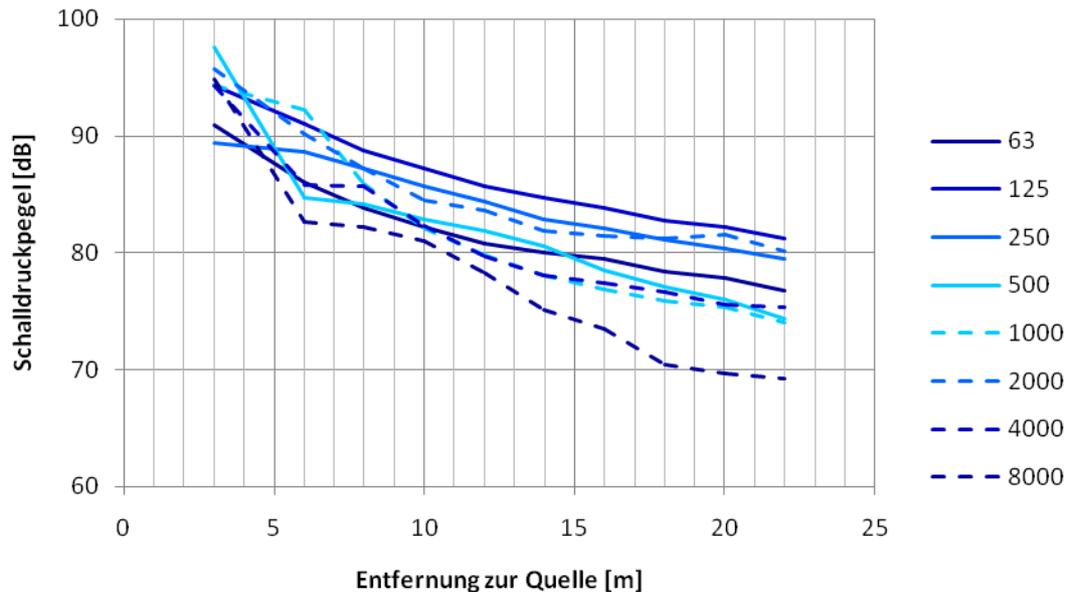


Abbildung 5.4: Oktavband-Mittenfrequenz der gemessenen Schalldruckpegel bei Hecke ohne Belaubung

Die berechneten Schalldruckpegel für Schallausbreitung ohne Schallschirm und mit Schallschirm (Lärmschutzwand) sind in Anhang 34 und Anhang 35 angegeben. Die frequenzabhängige Schallpegelabnahme ist in Abbildung 5.5 dargestellt. Die entsprechenden Werte sind dem Anhang 36 zu entnehmen. Auch bei diesen Messungen ergeben sich negative Pegelabnahmen. Die Abnahme in den höheren Frequenzen ist nicht mehr so dominant.

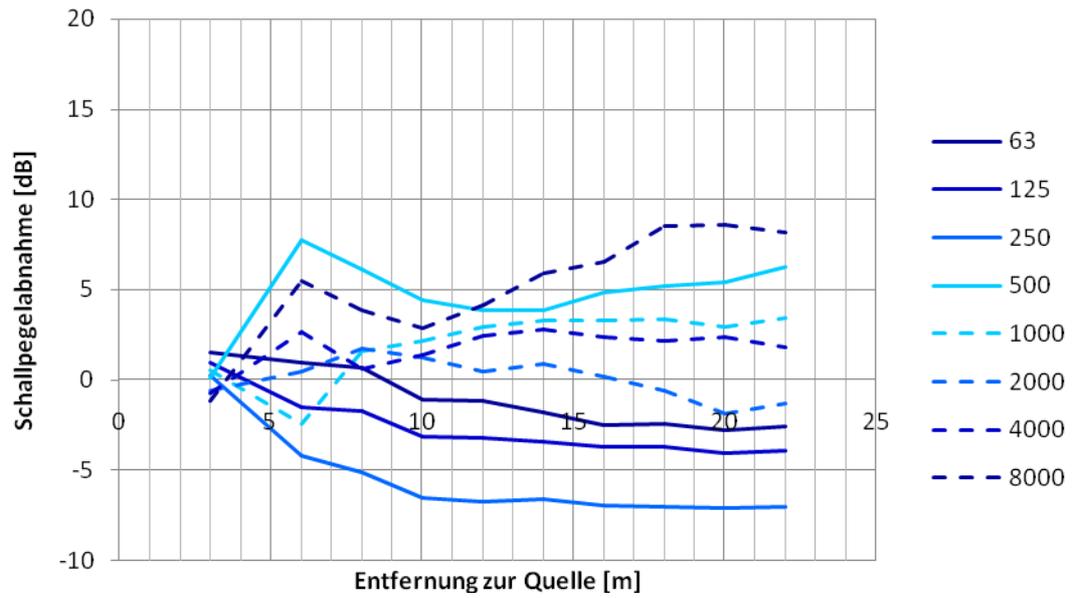


Abbildung 5.5: Schallpegelabnahme zwischen Schallausbreitung ohne Schirm und Hecke ohne Belaubung

Werden die Summenpegel der drei Schallausbreitungen in einem Diagramm aufgetragen, ergibt sich Abbildung 5.6.

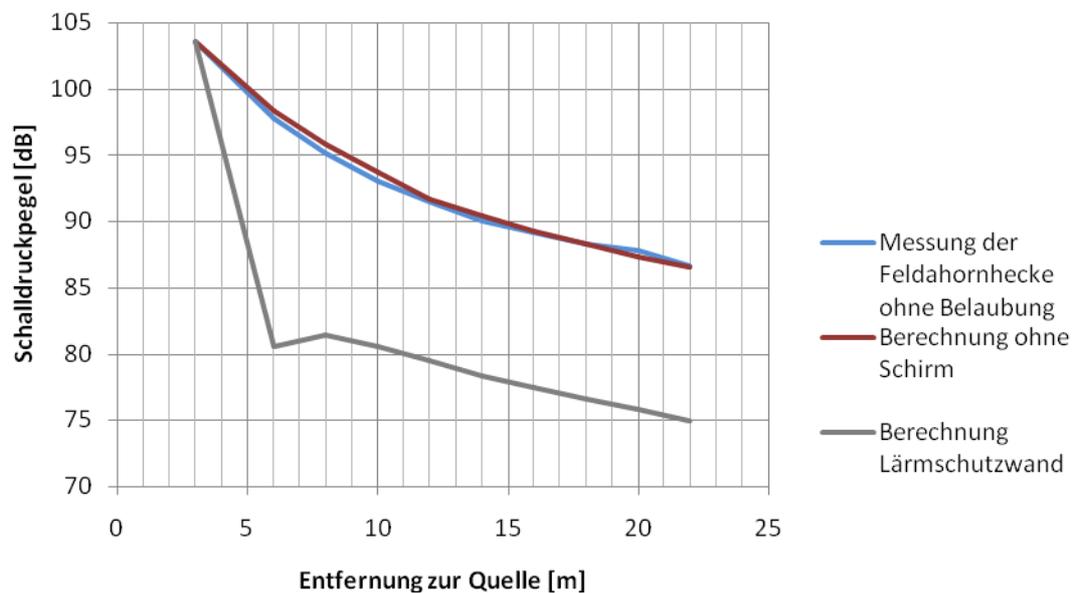


Abbildung 5.6: Gemessene und berechnete Summenpegel der Linienmessung ohne Belaubung

5.3. Akustische Kamera

Die Messergebnisse aus den Messungen mit der akustischen Kamera sind in Abbildung 5.7 (mit Belaubung) und Abbildung 5.8 (ohne Belaubung) dargestellt. Wiedergegeben sind die Summenpegel des Schalldrucks. Zur Darstellung wird ein Delta von 2 dB gewählt. Das bedeutet, dass die Differenz der Schalldruckpegel zwischen dem Mittelpunkt (magenta-farbig) und dem äußeren Rand des blauen Rings 2 dB beträgt. Dazwischen wird linear abgestuft.

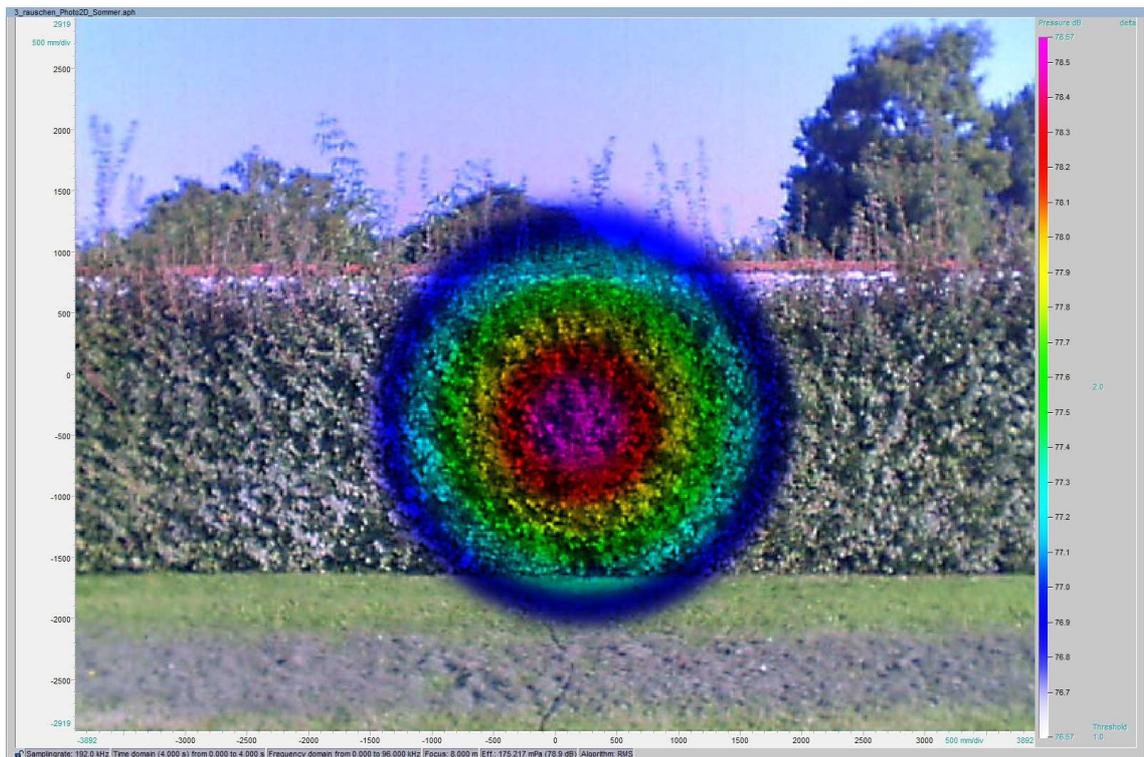


Abbildung 5.7: Aufnahme der akustischen Kamera mit Belaubung

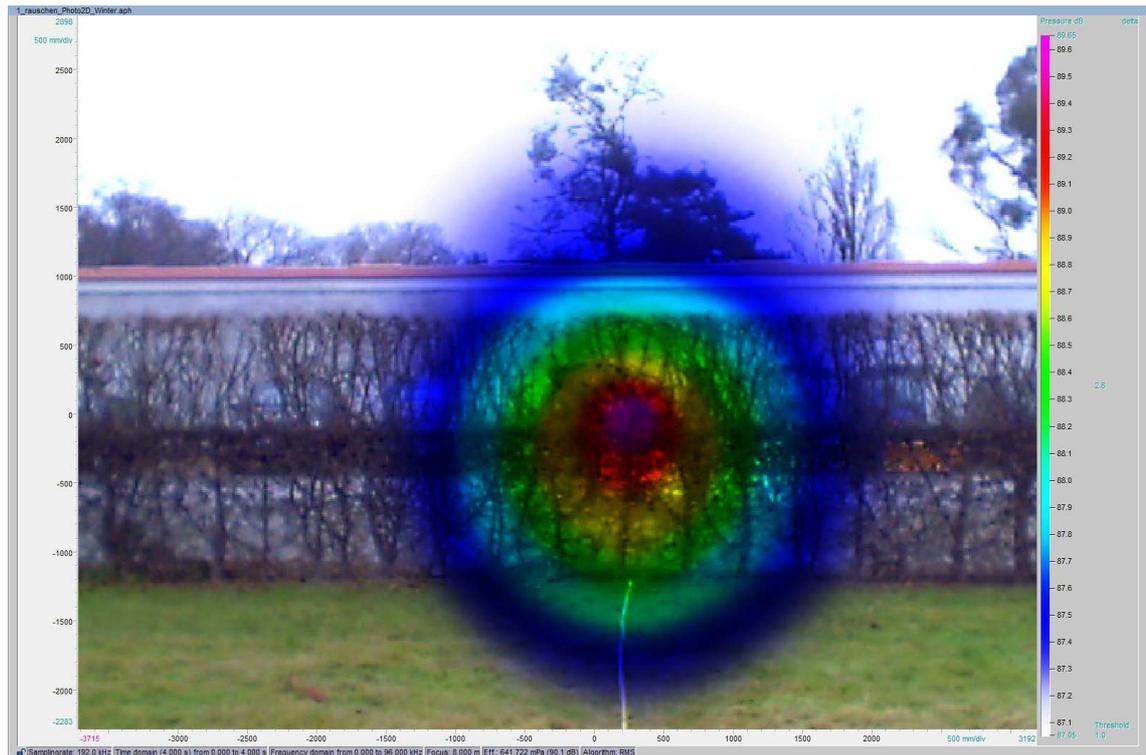


Abbildung 5.8: Aufnahme der akustischen Kamera ohne Belaubung

Anmerkung: Bei der Positionierung der Schallquelle ist man an die örtlichen Gegebenheiten gebunden. Beim Vergleich der Abbildung 5.7 und Abbildung 5.8 fällt auf, dass zwar dieselbe Hecke gemessen wird, jedoch die Lautsprecherpositionen bei beiden Messungen geringfügig voneinander abweichen. Dieser Umstand entsteht auf Grund der unterschiedlichen Parkplatzsperren durch den Eigentümer, ist aber wegen des sehr homogenen Heckenaufbaus (gleichmäßige Pflanzabstände) nicht weiter zu berücksichtigen.

5.4. Beurteilung der Messergebnisse

Auf Grund der Tatsache, dass nicht bei allen Messungen im Augarten der gleiche Schallleistungspegel abgegeben werden kann, werden in diesem Abschnitt ausschließlich die Differenzen zwischen zwei Schallpegeln untersucht und nicht der absolute Schalldruckpegel.

Der gemessene Schallpegelanstieg hinter der Hecke bei tiefen Frequenzen ist bei den Messungen mit und ohne Belaubung gleich. Dies betrifft hauptsächlich die Oktavband-Mittenfrequenzen von 63, 125 und 250 Hz. Da dieser Effekt bei den vorbereitenden Messungen nicht auftritt, muss er durch den Einfluss der Hecke entstehen.

Die vom Lautsprecher abgestrahlten Schallwellen breiten sich kugelförmig aus. Das heißt, nur ein geringer Teil der Schallwellen wird direkt in Richtung des Empfängers (Mikrofon am Immissionsort) entsendet. Wie bereits beschrieben, wird durch Reflexionen am Boden ebenfalls Schallenergie zum Empfänger geleitet. Zusätzlich werden aber auch Schallwellen von der Seite, durch Reflexionen an Stämmen und Ästen, in Richtung des Mikrofons gelenkt. Dies ist symbolisch in Abbildung 5.9 dargestellt. Auf Grund der unterschiedlichen Weglängen, die der Schall dabei zurücklegen muss, wird der Einfluss nach außen hin immer geringer. Da bei beiden Messungen (Sommer und Winter) die Stämme und Äste gleichermaßen vorhanden sind, ist auch der Effekt bei beiden Messergebnissen zu beobachten.

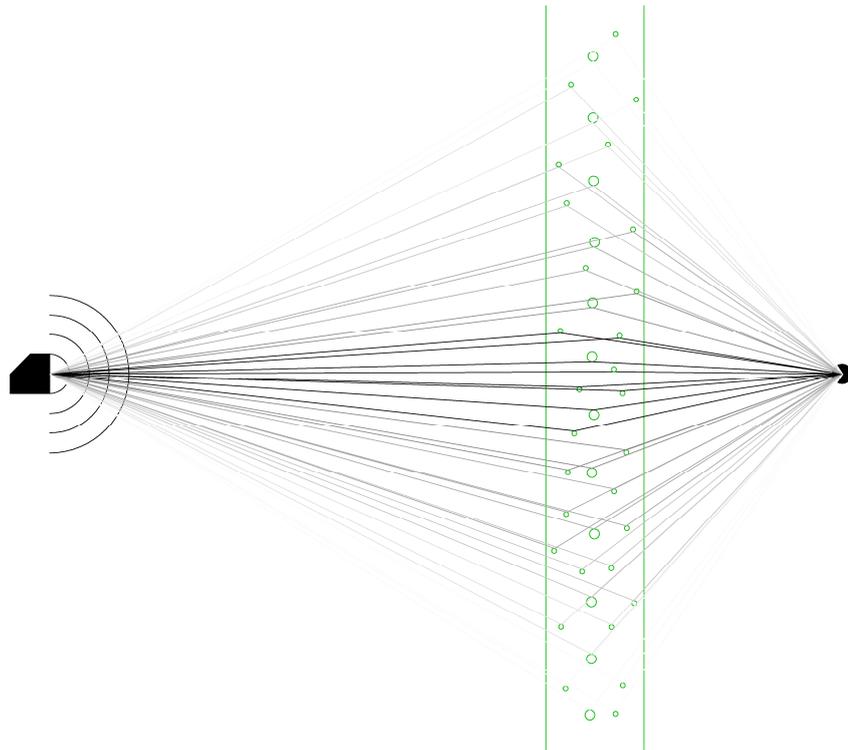


Abbildung 5.9: Seitliche Reflexionen an Stämmen und Ästen

5.4.1. Vergleich mit und ohne Belaubung

Wird die Differenz zwischen der Pegelabnahme mit und ohne Belaubung erzeugt, ergeben sich die Werte aus Anhang 37. Die entsprechende graphische Darstellung zeigt Abbildung 5.10.

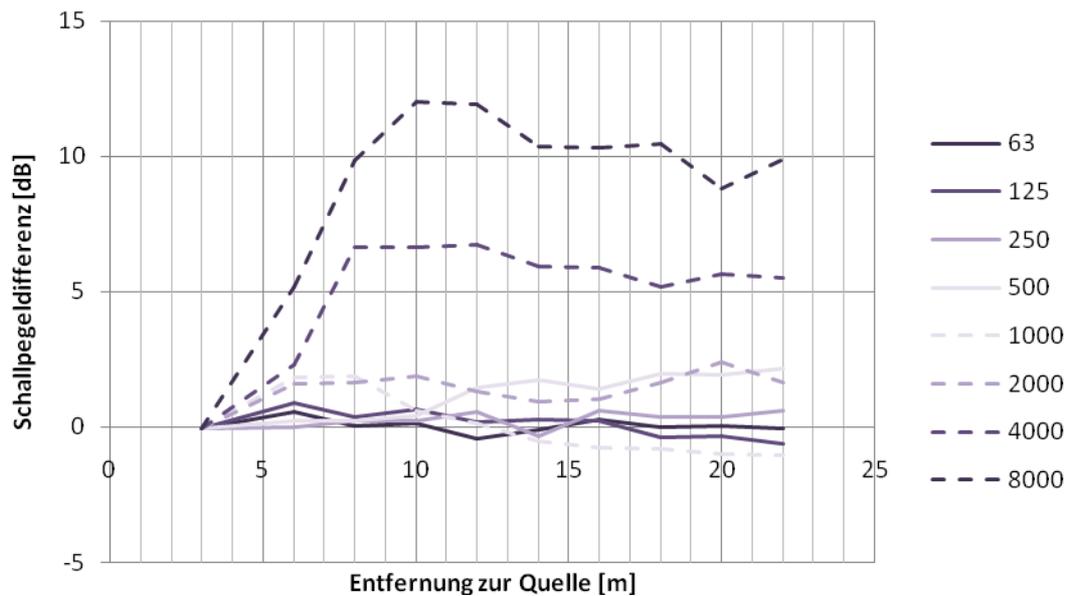


Abbildung 5.10: Differenz zwischen Schallpegelabnahme mit und ohne Belaubung

Dabei ist die Pegelminderung bei hohen Frequenzen durch den Einfluss der Belaubung gut ersichtlich.

5.4.2. Vergleich mit einer Lärmschutzwand

Bei der Berechnung der Pegelabnahme zwischen freier Schallausbreitung und der hinter einer Lärmschutzwand, ergeben sich die Werte wie in Anhang 38 gelistet und wie in Abbildung 5.11 mittels Diagramm dargestellt. Für die Lärmschutzwand gelten die gleichen Abmessungen wie bei der Hecke. Auch in diesem Fall werden die hohen Frequenzen stärker gedämpft.

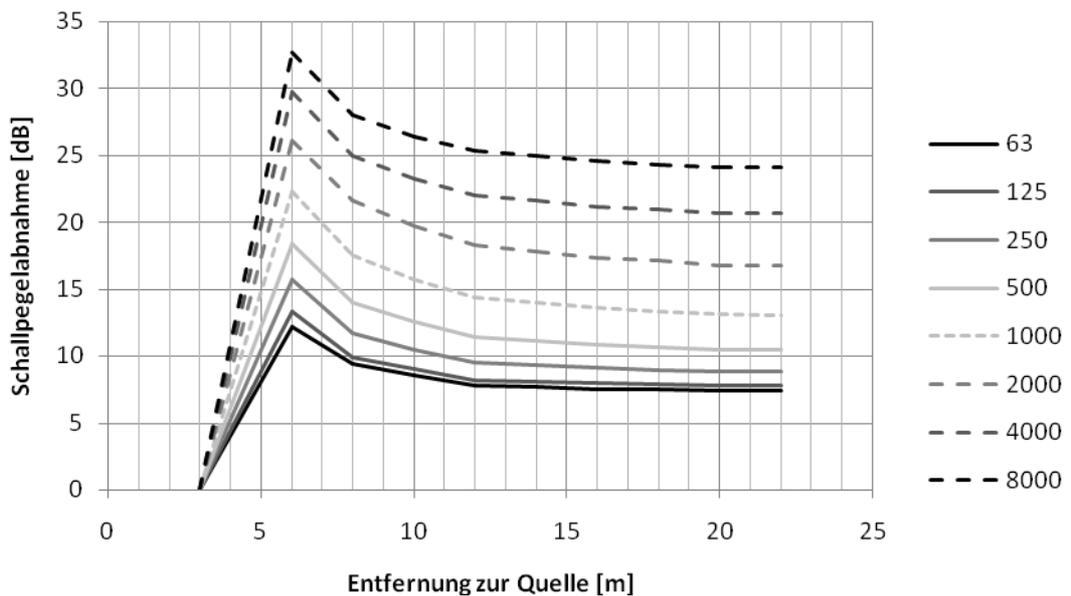


Abbildung 5.11: Schallpegelabnahme zwischen Schallausbreitung ohne Schirm und Lärmschutzwand

5.4.3. Akustische Kamera

Nachdem die Schallquelle nicht geeicht ist, können die aufgenommenen Schalldruckpegel der Messung mit und ohne Belaubung nicht miteinander verglichen werden. Dennoch kann eine essenzielle Aussage aus den beiden Bildern (Abbildung 5.7 und Abbildung 5.8) getätigt werden. Nachdem sich der Mittelpunkt der durch die Hecke dringenden Schallwellen mit der Lage der Quelle deckt und die beiden Ringe annähernd kreisförmig sind, geht der Großteil der Schallenergie durch die Hecke. Das bedeutet, dass die Beugung des Schalls über der Hecke nicht maßgebend ist.

5.4.4. Gesamtbeurteilung

Um die Aufgabenstellung bestmöglich beantworten zu können, werden die Schallpegelabnahmen der Summenpegel betrachtet. Dabei werden die Werte der Schallausbreitung sowohl durch die Hecke (mit und ohne Belaubung) wie auch über eine Lärmschutzwand in einem Diagramm dargestellt (siehe Abbildung 5.12).

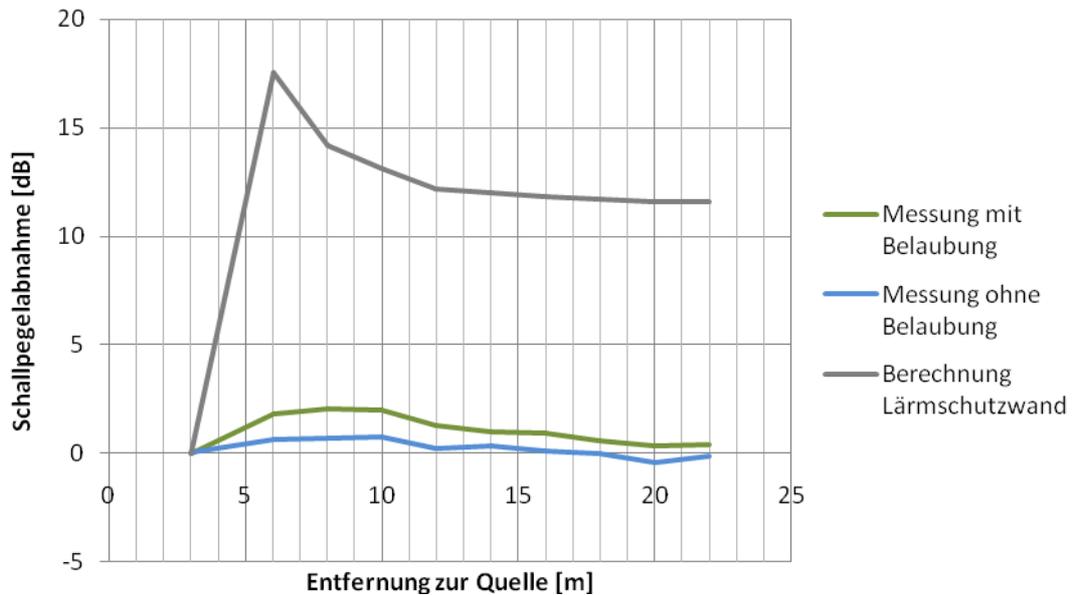


Abbildung 5.12: Schirmwirkungen

Bei einer Entfernung von 3 Meter zur Quelle sind die Abweichungen in allen drei Fällen Null, da immer die gleichen Dämpfungseinflüsse (Entfernung und Bodenreflexion) auftreten. Die Hecke bzw. die Lärmschutzwand stehen in dem Bereich zwischen 5 und 6 Meter.

Bei 6 Meter erreicht der Verlauf der Schirmwirkung der Lärmschutzwand den Höchstwert mit 17,5 dB. Dahinter fällt die Kurve regressiv ab. Die Schirmwirkung der Hecke mit Belaubung erreicht ihren Maximalwert mit 2,0 dB bei 8 und 10 Metern. Dies entspricht 11 % der Schirmwirkung der Lärmschutzwand. Der anschließende regressive Abfall - wie bei der Lärmschutzwand - ist ebenfalls zu sehen. Ähnlich verhält es sich bei der Schirmwirkung der Hecke ohne Belaubung. Der Höchstwert (0,7 dB) bei 10 Meter beträgt lediglich 35 % der Reduktion mit Belaubung und 4 % der Schirmwirkung der Lärmschutzwand.

6. Zusammenfassung

Der Lärmschutz nimmt eine immer wichtigere Rolle in unserem planerischen Alltag ein. Dies betrifft vor allem urbane Siedlungsgebiete. Gleichzeitig soll das Stadtbild naturnahe wirken. Obwohl sich diese beiden Punkte durch Lärmschutz mittels Bepflanzung realisieren lassen würden, gibt es kaum Literatur darüber. Besonders in Bezug auf Hecken ist wenig erforscht.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Schirmwirkung einer Feldahornhecke. Es wird die Schirmwirkung an einer gepflanzten und laufend in Form gebrachten Hecke vor Ort gemessen. Bei der Auswahl der Hecke werden einige Rahmenbedingungen (Reflexionen, Dichte der Hecke,...) berücksichtigt, um gesicherte Ergebnisse zu erhalten.

Laut Aufgabenstellung soll auch der Unterschied zwischen der Hecke mit und ohne Belaubung ermittelt werden. Dazu ist es notwendig, die Messungen - einmal mit und einmal ohne Belaubung - zu analysieren. Die Messungen finden im Sommer und Winter 2012 statt. Des Weiteren werden die gemessenen Schirmwirkungen mit der einer Lärmschutzwand verglichen.

Betrachtet man die Summenpegel der Schallpegelabnahmen, erreicht die Schirmwirkung der Feldahornhecke mit Belaubung einen Höchstwert von 2,0 dB. Bei den Messungen ohne Belaubung wird ein Maximalwert von 0,7 dB ermittelt. Im Vergleich dazu erreicht eine Lärmschutzwand einen Spitzenwert von 17,5 dB. In Abbildung 5.12 auf Seite 68 sind die Verläufe der Schirmwirkungen dieser drei Ausbreitungsszenarien graphisch dargestellt.

Eine Schirmwirkung von 2 dB mag auf den ersten Blick nicht hoch vorkommen, wenn man jedoch bedenkt, dass das menschliche Gehör Änderungen von bereits 1 dB wahrnehmen kann, ist das nicht wenig.

Der psychologische Nutzen einer Hecke – der sofort nach Erreichen der Blickdichtheit - eintritt, wird in dieser Diplomarbeit nicht behandelt.

Die ermittelten Messwerte gelten nur für diese Hecke und unter den gewählten Rahmenbedingungen (Entfernungen zwischen Quelle und Hecke, Hecke und Empfänger, Dichte, usw.). Sie können nur bedingt auf andere Baumarten umgelegt werden. Für Hecken aus anderen Baum- oder Straucharten (Laubholz) gelten diese Angaben nur näherungsweise, wenn die Abmessungen und die Dichte ähnlich sind.

7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1: Darstellung von Ton, Klang und Geräusch in der Zeitfunktion und als Spektrum [MAU09].....	8
Abbildung 3.2: Bevölkerungsanteile mit einer wesentlichen Belästigung durch Umweltlärm, differenziert nach Verursachern [MAU09].....	10
Abbildung 3.3: drei Bereiche zur Ermittlung der Bodendämpfung	17
Abbildung 3.4: Skizze zum Konstruieren von Spiegelschallquellen.....	20
Abbildung 3.5: Dämpfung der Schallausbreitung durch den Bewuchs	23
Abbildung 3.6: Einflussfaktoren auf die Schalldämpfung durch Vegetation [BUC06-1]	26
Abbildung 3.7: Reflexion von Schallwellen am Boden.....	27
Abbildung 3.8: Immissionspegel für Freifeld, Wiese und Kiefernwald aus Straßenlärm mit folgenden Parametern: Höhe der Linienschallquelle 0,75 Meter, Länge der Linienschallquelle 600 Meter, Mikrofonhöhe 1 Meter, Abstand von der Linienschallquelle 100 Meter [BUC06-1].	28
Abbildung 4.1: Norsonic Nor850 Rack (Quelle: www.schallmessung.com/index.php ..	29
Abbildung 4.2: Screenshot der Benutzeroberfläche der Messsoftware Nor850.....	30
Abbildung 4.3: verwendeter Kalibrator Norsonic 1251	31
Abbildung 4.4: gerichteter Aktivlautsprecher (Schallquelle) und Freifeldmikrofon mit Windscreen.....	32
Abbildung 4.5: verwendete akustische Kamera	33
Abbildung 4.6: Messaufbau zur Bestimmung der horizontalen Richtcharakteristik.....	35
Abbildung 4.7: Richtcharakteristik horizontal.....	36
Abbildung 4.8: Grundriss des Lautsprechers	36
Abbildung 4.9: Messaufbau zur Bestimmung der vertikalen Richtcharakteristik oben .	37
Abbildung 4.10: Messaufbau zur Bestimmung der vertikalen Richtcharakteristik unten	38
Abbildung 4.11: Richtcharakteristik vertikal.....	39
Abbildung 4.12: Ansicht des Lautsprechers	39
Abbildung 4.13: Schalldruckpegelabnahme bei Abstandsverdoppelung	40
Abbildung 4.14: Ausbreitungswege des direkten und des gespiegelte Schalls bei Abstandsverdoppelung	41
Abbildung 4.15: Verlauf der Schalldruckpegelabnahme - berechnet nach ÖNORM und nach eigenem Lösungsansatz.....	42
Abbildung 4.16: Luftbild der gemessenen Hecke im Augarten (Quelle: google.maps, 2013)	45
Abbildung 4.17: Lageplan und Querschnitt der gemessenen Feldahornhecke.....	46

Abbildung 4.18: Blickdichtheit der Feldahornhecke mit Belaubung	47
Abbildung 4.19: unzureichende Blickdichtheit der Feldahornhecke ohne Belaubung ..	47
Abbildung 4.20: Messaufbau der Strahlenmessung	50
Abbildung 4.21: Messaufbau der Linienmessung	51
Abbildung 4.22: Messaufbau der akustischen Kamera	52
Abbildung 4.23: Schallausbreitung Quelle - Referenzmikrofon.....	56
Abbildung 5.1: Oktavband-Mittenfrequenz der gemessenen Schalldruckpegel bei Hecke mit Belaubung	59
Abbildung 5.2: Schallpegelabnahme zwischen Schallausbreitung ohne Schirm und Hecke mit Belaubung	60
Abbildung 5.3: Gemessene und berechnete Summenpegel der Linienmessung mit Belaubung.....	60
Abbildung 5.4: Oktavband-Mittenfrequenz der gemessenen Schalldruckpegel bei Hecke ohne Belaubung.....	61
Abbildung 5.5: Schallpegelabnahme zwischen Schallausbreitung ohne Schirm und Hecke ohne Belaubung	62
Abbildung 5.6: Gemessene und berechnete Summenpegel der Linienmessung ohne Belaubung.....	62
Abbildung 5.7: Aufnahme der akustischen Kamera mit Belaubung	63
Abbildung 5.8: Aufnahme der akustischen Kamera ohne Belaubung	64
Abbildung 5.9: Seitliche Reflexionen an Stämmen und Ästen.....	66
Abbildung 5.10: Differenz zwischen Schallpegelabnahme mit und ohne Belaubung ...	66
Abbildung 5.11: Schallpegelabnahme zwischen Schallausbreitung ohne Schirm und Lärmschutzwand.....	67
Abbildung 5.12: Schirmwirkungen.....	68

8. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispiele für Schalleistungen W und Schalleistungspegel LW von Schallquellen [FAS03].....	7
Tabelle 2: Atmosphärischer Dämpfungskoeffizient α für Schall je Oktavband-Mittenfrequenz	16
Tabelle 3: Kategorien des Boden-Faktors G	17
Tabelle 4: Angaben zur Abschätzung des Schallreflexionsgrades	21
Tabelle 5: Dämpfung der Schallausbreitung je Oktavband durch dichten Bewuchs	23
Tabelle 6: gemessene und berechnete Schalldruckpegel bei Abstandsverdoppelung	40
Tabelle 7: Schalleistungspegel bei Abstandsverdoppelung berechnet nach ÖNORM ISO 9613-2 und nach eigenem Lösungsansatz.....	43
Tabelle 8: berechnete Schalleistungspegel; a = Strahlenmessung mit Belaubung, b = Linienm. mit B., c= Strahlenm. ohne B., d = Linienm. ohne B.....	55

9. Literaturverzeichnis

- [AYL72] Aylor Donald (1972):
Noise reduction by vegetation and ground.
Journal of the Acoustical Society of America 51; p. 197-205.
- [BEC66] Beck Gerhard (1966):
Pflanzen als Lärmschutzmittel. Forschungsarbeit aus dem Institut für Landschaftsbau und Gartenkunst der Technischen Universität Berlin.
Hannover, Berlin, Sarstedt: Patzer-Verlag GmbH & Co KG.
- [BUC06-1] Bucur Voichita, (2006):
Urban Forest Acoustics.
Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- [BUC06-2] Bucur Voichita, (2006):
Acoustics of Wood.
Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2. Auflage.
- [FAS03] Fasold Wolfgang, Veres Eva, (2003):
Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen.
Berlin: Huss - Medien GmbH, Verlag Bauwesen, 2. Auflage.
- [FRI84] Fricke F. (1984):
Sound-attenuation in forests.
Journal of Sound and Vibration 92; p. 149-158.
- [FUN12] Functional Gardens:
Reducing Traffic Noise with Plants.
www.functionalgardens.com/category/noise-reduction/noise-reduction-with-plants/.
Aktualisierungsdatum: 31.07.2012.
- [HEN99] Henn Hermann, Sinambari Gholam Reza, Fallen Manfred, (1999):
Ingenieurakustik. Grundlagen, Anwendungen, Verfahren.
Braunschweig/Wiesbaden: Friedrich Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 2., erweiterte und überarbeitete Auflage.
- [HOF83] Hofmeister Heinrich, (1983):
Lebensraum Wald. Ein Weg zum Kennenlernen von Pflanzengesellschaften und ihrer Ökologie.
Hamburg, Berlin: Verlag Paul Parey, 2. revidierte Auflage.

- [KRA81] Kragh J. (1981):
Road traffic noise attenuation by belts of trees.
Journal of Sound and Vibration 74; p. 235-241.
- [KUT04] Kuttruff Heinrich, (2004):
Akustik. Eine Einführung.
Stuttgart: S. Hierzel Verlag
- [MAU09] Maue Jürgen H., Hoffmann Heinz, Von Lüpke Arndt (2009):
0 Dezibel + 0 Dezibel = 3 Dezibel. Einführung in die Grundbegriffe und die quantitative Erfassung des Lärms.
Berlin: Erich Schmidt Verlag GmbH & Co., 9., neu bearbeitete und erweiterte Auflage.
- [MAY84] Mayer Hannes, (1984):
Waldbau auf soziologisch-ökologischer Grundlage.
Stuttgart, New York: Gustav Fischer Verlag, 3. neu bearbeitete Auflage.
- [ONO08] ÖNORM ISO 9613-2, (2008):
Akustik – Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien. Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren.
Wien: Österreichisches Normungsinstitut.
- [PAL00] Pal A., Kumar V., Saxena N. (2000):
Noise attenuation by green belts.
Journal of Sound and Vibration 234; p. 149-165.
- [PAT08] Pathak V., Tripathi B., Mishra V. (2008):
Dynamics of traffic noise in a tropical city Varanasi and its abatement through vegetation.
Environmental Monitoring and Assessment 146, p. 67-75.
- [SPA11] Späh Moritz, Weber Lutz, Oesterreicher Timo, Liebl Andreas (2011):
Schallschutzpflanzen – Optimierung der Abschirmwirkung von Hecken und Gehölzen. Forschungsbericht BWPLUS.
Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP).
- [VAN02] Van Renterghem Timothy, Botteldooren Dick (2002):
Effekt of a row of trees behind noise barriers in wind.
Acta Acoustica United with Acoustica 88, p. 869-878.
- [VAN12] Van Renterghem Timothy, Botteldooren Dick, Verheyen Kris, (2012):
Road traffic noise shielding by vegetation belts of limited depth.
Journal of Sound and Vibration 331.

10. Anhang

10.1. Fotos der vorbereitenden Messungen



Anhang 1: Messaufbau zur Bestimmung der horizontalen Richtcharakteristik



Anhang 2: Messsystem bei den Messungen der horizontalen Richtcharakteristik



Anhang 3: Messung zur Bestimmung der vertikalen Richtcharakteristik oben



Anhang 4: Messung zur Bestimmung der vertikalen Richtcharakteristik unten



Anhang 5: Messung der Schallausbreitung bei Abstandsverdoppelung

10.2. Messergebnisse vorbereitende Messungen

Anhang 6: Gemessene Schalldruckpegel bei Richtcharakteristik horizontal

L_{eq} [dB]		Frequenz [Hz]								
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	$L_{sum,eq}$
Richtung [°]	±0	78,8	84,3	89,3	92,1	91,2	90,2	89,6	89,2	98,4
	30	78,6	84,0	89,2	92,0	90,9	90,0	89,3	88,9	98,2
	60	78,1	83,5	88,6	91,3	90,1	88,9	88,2	88,0	97,4
	90	77,3	82,6	87,7	90,1	88,4	86,7	85,5	85,3	95,7
	120	76,7	81,8	86,9	89,3	87,4	85,1	82,8	81,4	94,4
	150	76,5	81,4	86,8	89,3	87,6	85,3	83,0	80,6	94,4
	180	76,7	81,5	87,0	89,7	88,0	86,0	84,1	82,1	94,9
	-150	77,0	81,7	87,1	89,8	87,9	85,8	83,5	80,8	94,8
	-120	77,6	82,2	87,4	89,9	87,9	85,4	82,6	80,2	94,8
	-90	78,2	83,4	88,7	91,0	89,7	88,3	87,2	86,7	96,9
	-60	79,0	84,2	89,2	91,8	90,6	89,7	88,8	88,4	97,9
	-30	78,9	84,2	89,2	92,0	90,9	89,9	89,3	88,9	98,2

Anhang 7: Gemessene Schalldruckpegel bei Richtcharakteristik vertikal oben

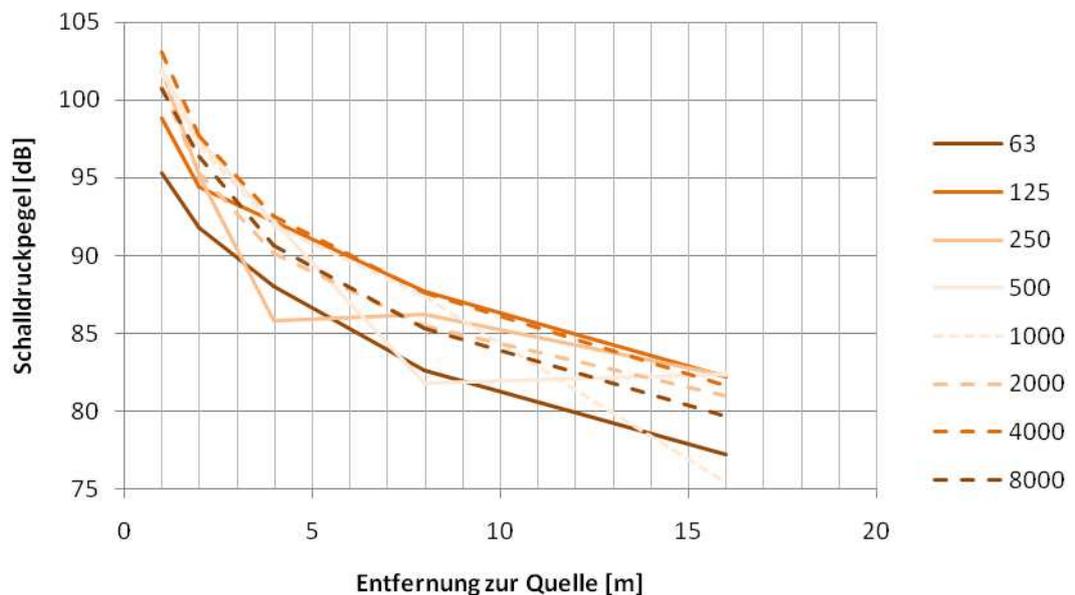
L_{eq} [dB]		Frequenz [Hz]								
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	$L_{sum,eq}$
Neigung [°]	90	76,3	86,9	84,0	81,5	78,2	73,8	73,0	68,5	90,2
	75	74,3	83,1	81,2	80,4	78,1	75,7	74,1	67,7	87,8
	60	75,1	82,1	82,7	82,8	81,5	78,4	77,1	71,7	89,3
	45	77,2	80,0	84,4	85,2	83,1	78,6	79,7	74,0	90,6
	30	79,7	79,9	86,8	85,7	85,2	82,2	83,2	77,1	92,5
	15	82,0	84,6	85,0	88,3	86,4	88,3	85,8	81,8	94,9
	±0	86,5	91,1	87,2	87,6	92,3	88,8	90,4	85,8	98,3

Anhang 8: Gemessene Schalldruckpegel bei Richtcharakteristik vertikal unten

L_{eq} [dB]		Frequenz [Hz]								$L_{Sum,eq}$
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Neigung [°]	±0	86,6	92,1	92,7	93,9	92,4	92,7	92,8	90,1	101,1
	-15	87,7	91,5	92,2	93,3	92,7	93,3	90,6	85,1	100,5
	-30	88,3	91,8	91,4	92,1	92,1	88,8	88,0	77,9	99,2
	-45	88,0	93,2	90,3	91,0	90,8	84,5	84,4	75,9	98,3
	-60	84,7	93,7	87,2	89,1	88,0	83,7	82,0	74,3	97,0
	-75	83,0	93,3	85,9	86,5	84,4	83,1	80,7	73,0	95,8

Anhang 9: Gemessene Schalldruckpegel bei Abstandsverdoppelung

L_{eq} [dB]		Frequenz [Hz]								$L_{Sum,eq}$
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Entfernung [m]	1	95,3	98,8	102,0	102,0	101,7	100,9	103,1	100,7	120,9
	2	91,8	94,4	95,2	97,5	97,0	95,3	97,7	96,4	121,4
	4	88,1	92,2	85,9	92,2	92,0	90,2	92,5	90,7	121,7
	8	82,6	87,7	86,3	81,8	87,4	85,5	87,6	85,4	122,1
	16	77,2	82,3	82,3	82,4	75,5	81,0	81,7	79,7	122,2



Anhang 10: Gemessene Schalldruckpegel bei Abstandsverdoppelung je Oktavband-Mittelfrequenz

10.3. Fotos der gemessenen Hecke



Anhang 11: Gemessene Feldahornhecke mit Belaubung wiesenseitig

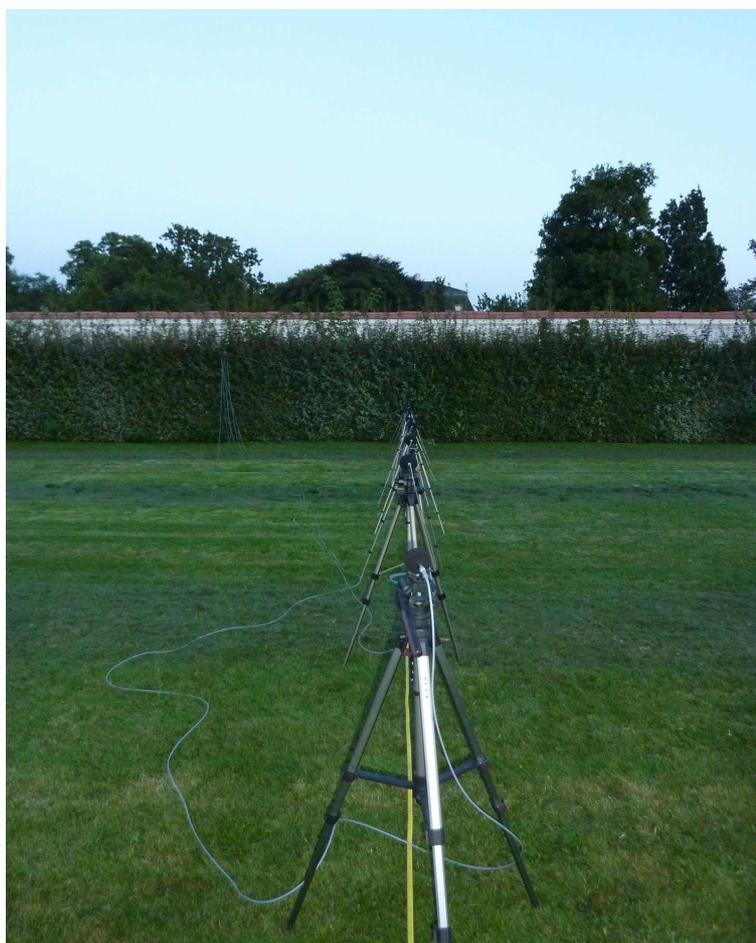


Anhang 12: Gemessene Feldahornhecke mit Belaubung parkplatzseitig

10.4. Fotos der Messungen



Anhang 13: Strahlenmessung mit Belaubung



Anhang 14: Linienmessung mit Belaubung



Anhang 15: Schallquelle und Referenzmikrofon vor der Hecke mit Belaubung



Anhang 16: Akustische Kamera hinter der Hecke mit Belaubung



Anhang 17: Schallquelle und Referenzmikrofon vor der Hecke ohne Belaubung



Anhang 18: Umbau von Strahlen- auf Linienmessung im Winter

10.5. Verwendete Richtcharakteristiken

Anhang 19: Verwendete vertikale Richtcharakteristiken bei der Strahlenmessung

D _{ir} [dB]		Frequenz [Hz]								
Entf. [m]	Neig [°]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	D _{Sum,Ir}
3	-36	1,5	0,3	-1,7	-2,2	-0,8	-5,6	-6,2	-13,0	-17,0
8	-15	1,1	-0,5	-0,4	-0,6	0,4	0,6	-2,2	-5,0	-8,5
13	-10	0,7	-0,4	-0,3	-0,4	0,2	0,4	-1,5	-3,3	-5,7
18	-7	0,6	-0,3	-0,2	-0,3	0,2	0,3	-1,1	-2,5	-4,2

Anhang 20: Verwendete vertikale Richtcharakteristiken bei der Linienmessung

D _{ir} [dB]		Frequenz [Hz]								
Entf. [m]	Neig [°]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	D _{Sum,Ir}
3	-36	1,5	0,3	-1,7	-2,2	-0,8	-5,6	-6,2	-13,0	-17,0
6	-20	1,3	-0,5	-0,7	-1,0	0,2	-0,9	-3,1	-7,4	-10,3
8	-15	1,1	-0,5	-0,4	-0,6	0,4	0,6	-2,2	-5,0	-8,5
10	-12	0,9	-0,4	-0,4	-0,5	0,3	0,4	-1,8	-4,0	-6,8
12	-10	0,7	-0,4	-0,3	-0,4	0,2	0,4	-1,5	-3,3	-5,7
14	-9	0,7	-0,3	-0,3	-0,4	0,2	0,3	-1,3	-3,0	-5,1
16	-8	0,6	-0,3	-0,2	-0,3	0,2	0,3	-1,1	-2,5	-4,2
18	-7	0,6	-0,3	-0,2	-0,3	0,2	0,3	-1,1	-2,5	-4,2
20	-6	0,4	-0,2	-0,2	-0,3	0,1	0,2	-0,9	-2,0	-3,4
22	-6	0,4	-0,2	-0,2	-0,3	0,1	0,2	-0,9	-2,0	-3,4

10.6. Messergebnisse Strahlenmessung

Anhang 21: Gemessene Schalldruckpegel der Strahlenmessung mit Belaubung [dB]

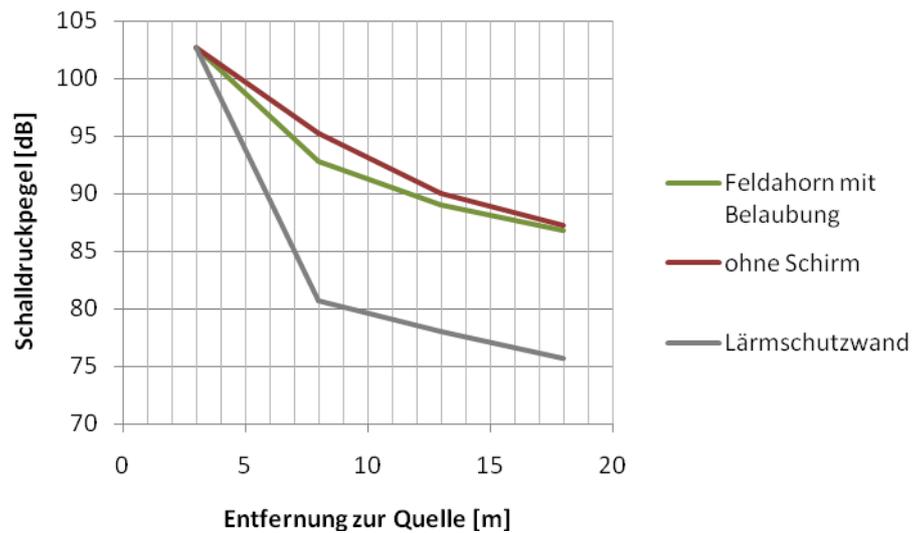
Entf. [m]	Strahl [°]	Frequenz [Hz]								
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	L _{Sum,eq}
3	±0	90,5	94,1	87,6	95,8	94,1	92,7	95,7	93,9	102,7
8	-15	82,7	87,6	84,9	81,7	83,3	81,1	78,9	71,1	92,2
	±0	83,3	88,2	85,2	82,1	83,5	82,4	80,6	71,5	92,8
	15	83,2	87,9	85,0	81,6	83,0	81,4	79,9	72,5	92,4
13	-15	79,7	84,7	81,2	77,4	77,9	78,4	74,3	64,0	88,7
	±0	80,1	84,8	82,0	77,6	78,7	78,2	74,6	64,8	89,0
	15	80,0	84,7	81,4	77,2	77,8	77,3	74,3	64,9	88,6
18	-15	78,1	83,0	78,5	73,1	75,9	75,0	72,6	60,5	86,5
	±0	78,0	82,9	79,0	73,7	76,8	76,5	72,8	59,6	86,8
	15	77,8	82,9	78,5	72,4	75,1	75,2	72,2	61,7	86,3

Anhang 22: Berechnete Schalldruckpegel ohne Schallschirm [dB] (Schallleistungspegel aus Strahlenmessung mit Belaubung)

Entf. [m]	Strahl [°]	Frequenz [Hz]								
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	L _{Sum,eq}
3	±0	92,0	95,0	87,7	95,8	94,6	92,0	95,0	92,6	102,7
8	±0	84,0	86,8	80,3	88,4	87,2	85,9	87,8	85,1	95,3
13	±0	77,4	80,6	74,9	84,3	80,7	80,7	82,6	80,8	90,0
18	±0	74,9	78,3	72,2	81,0	78,3	77,7	80,1	78,3	87,3

Anhang 23: Berechnete Schalldruckpegel mit Schallschirm [dB] (Schallleistungspegel aus Strahlenmessung mit Belaubung)

Entf. [m]	Strahl [°]	Frequenz [Hz]								
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	L _{Sum,eq}
3	±0	92,2	95,2	87,7	95,7	94,5	91,9	95,0	92,6	102,7
8	±0	74,3	76,7	68,1	73,9	69,1	63,7	62,5	56,9	80,7
13	±0	70,8	73,7	65,6	71,9	67,5	62,3	61,1	55,5	78,0
18	±0	68,2	71,2	63,2	69,7	65,5	60,4	59,3	53,7	75,7



Anhang 24: Gemessene und berechnete Summenpegel der Strahlenmessung mit Belaubung

Anhang 25: Gemessene Schalldruckpegel der Strahlenmessung mit Belaubung [dB]

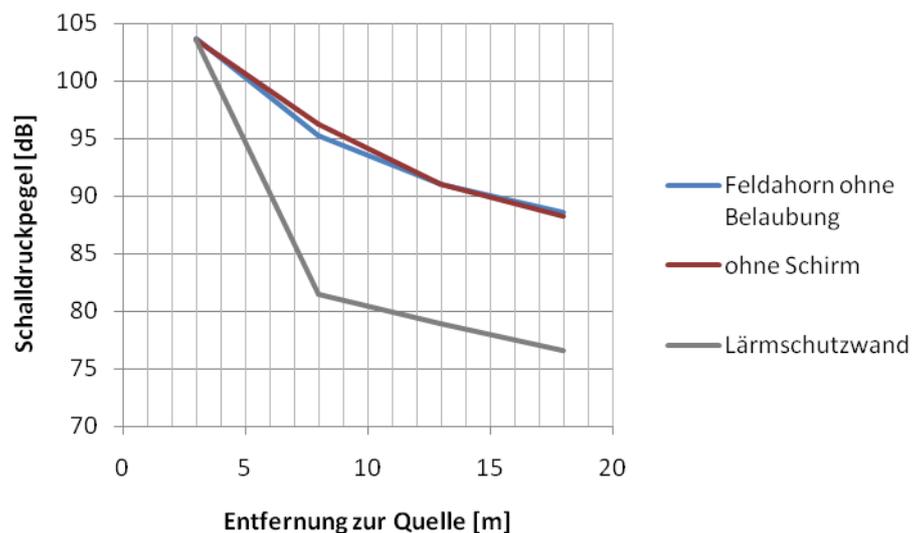
Entf. [m]	Strahl [°]	Frequenz [Hz]								L _{Sum,eq}
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
3	±0	91,1	94,5	89,6	97,8	94,5	95,9	94,1	94,8	103,7
8	-15	83,9	88,9	87,3	84,1	85,2	84,4	84,2	80,0	94,4
	±0	84,0	88,9	87,4	84,3	85,8	87,3	85,8	82,9	95,2
	15	83,9	88,7	87,1	84,5	85,8	86,2	83,9	80,6	94,7
13	-15	80,4	85,2	84,0	81,1	78,6	81,3	79,4	76,3	90,6
	±0	80,6	85,3	84,0	81,5	78,7	82,7	79,6	77,9	91,0
	15	80,6	85,3	83,6	81,1	78,2	81,6	78,3	74,8	90,5
18	-15	78,4	83,0	81,2	77,7	75,1	79,5	76,8	72,2	88,1
	±0	78,9	83,1	81,5	77,2	76,0	81,8	76,6	71,9	88,6
	15	78,2	82,8	81,0	77,0	75,5	79,5	77,3	71,5	88,0

Anhang 26: Berechnete Schalldruckpegel ohne Schallschirm [dB] (Schalleistungspegel aus Strahlenmessung ohne Belaubung)

Entf. [m]	Strahl [°]	Frequenz [Hz]								
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	L _{Sum,eq}
3	±0	92,5	95,2	89,6	97,6	94,8	95,0	93,5	93,6	103,5
8	±0	84,5	87,0	82,1	90,2	87,4	88,9	86,3	86,1	96,2
13	±0	77,8	80,9	76,8	86,1	80,9	83,7	81,1	81,8	91,0
18	±0	75,3	78,5	74,1	82,8	78,5	80,7	78,7	79,3	88,2

Anhang 27: Berechnete Schalldruckpegel mit Schallschirm [dB] (Schalleistungspegel aus Strahlenmessung ohne Belaubung)

Entf. [m]	Strahl [°]	Frequenz [Hz]								
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	L _{Sum,eq}
3	±0	92,5	95,2	89,6	97,6	94,8	95,0	93,5	93,6	103,5
8	±0	74,6	76,7	70,0	75,8	69,5	66,8	61,0	57,8	81,5
13	±0	71,1	73,7	67,5	73,8	67,8	65,4	59,7	56,5	78,9
18	±0	68,5	71,2	65,1	71,6	65,8	63,5	57,9	54,7	76,5



Anhang 28: Gemessene und berechnete Summenpegel der Strahlenmessung ohne Belaubung

10.7. Messergebnisse Linienmessung

Anhang 29: Gemessene Schalldruckpegel der Linienmessung mit Belaubung

L_{eq} [dB]		Frequenz [Hz]								$L_{Sum,eq}$
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Entfernung [m]	3	90,7	94,3	87,5	95,7	94,0	92,6	95,8	93,9	102,7
	6	85,1	90,1	86,7	82,6	90,0	85,5	85,0	76,5	95,7
	8	83,5	88,4	85,1	82,0	83,6	82,5	80,5	71,4	92,9
	10	81,8	86,6	83,5	80,5	81,1	79,5	77,1	68,0	90,9
	12	80,8	85,5	81,9	78,5	79,3	79,2	74,4	65,3	89,6
	14	79,8	84,4	81,3	76,9	78,3	77,9	73,6	63,8	88,5
	16	78,9	83,5	79,6	75,2	77,3	77,3	73,0	62,1	87,5
	18	78,1	83,1	78,9	73,2	76,3	76,5	72,9	59,0	86,8
	20	77,5	82,5	78,0	72,1	76,0	76,0	71,4	59,8	86,1
	22	76,6	81,8	76,9	70,2	74,7	75,4	71,2	58,3	85,3

Anhang 30: Berechnete Schalldruckpegel ohne Schallschirm (Schallleistungspegel aus Linienmessung mit Belaubung)

L_{eq} [dB]		Frequenz [Hz]								$L_{Sum,eq}$
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Entfernung [m]	3	92,2	95,2	87,7	95,7	94,5	91,9	95,0	92,6	102,7
	6	86,7	89,4	82,5	90,6	89,4	87,5	89,9	87,1	97,5
	8	83,7	86,6	79,8	87,9	86,6	85,3	87,5	84,9	94,9
	10	81,4	84,5	77,7	85,9	84,5	83,2	85,5	83,1	92,8
	12	79,2	82,5	75,7	83,8	82,3	81,0	83,6	81,3	90,8
	14	77,9	81,2	74,4	82,5	81,0	79,7	82,3	80,1	89,5
	16	76,7	80,0	73,2	81,4	79,8	78,5	81,2	79,0	88,4
	18	75,7	79,0	72,2	80,4	78,8	77,5	80,2	78,0	87,3
	20	74,7	78,1	71,3	79,5	77,9	76,5	79,4	77,2	86,5
	22	73,9	77,3	70,5	78,6	77,1	75,7	78,5	76,4	85,6

Anhang 31: Berechnete Schalldruckpegel mit Schallschirm (Schalleistungspegel aus Linienmessung mit Belaubung)

L_{eq} [dB]		Frequenz [Hz]								$L_{Sum,eq}$
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Entfernung [m]	3	92,2	95,2	87,7	95,7	94,5	91,9	95,0	92,6	102,7
	6	74,5	76,1	66,8	72,2	67,1	61,5	60,2	54,5	79,9
	8	74,3	76,7	68,1	73,9	69,1	63,7	62,5	56,9	80,7
	10	72,9	75,5	67,2	73,3	68,8	63,5	62,3	56,7	79,7
	12	71,5	74,3	66,2	72,4	68,0	62,7	61,6	56,0	78,6
	14	70,2	73,1	65,1	71,4	67,0	61,8	60,7	55,1	77,5
	16	69,2	72,1	64,1	70,6	66,3	61,1	60,0	54,5	76,6
	18	68,2	71,2	63,2	69,7	65,5	60,4	59,3	53,7	75,7
	20	67,3	70,3	62,5	69,0	64,8	59,8	58,7	53,1	74,9
	22	66,5	69,5	61,7	68,2	64,0	59,0	57,9	52,3	74,1

Anhang 32: Schallpegelabnahme zwischen Schallausbreitung ohne Schirm und Hecke mit Belaubung

L_{eq} [dB]		Frequenz [Hz]								$L_{Sum,eq}$
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Entfernung [m]	3	1,5	0,9	0,2	0,0	0,5	-0,7	-0,8	-1,3	0,0
	6	1,5	-0,6	-4,2	8,0	-0,6	2,0	4,9	10,6	1,8
	8	0,2	-1,8	-5,3	5,9	3,0	2,9	7,0	13,5	2,0
	10	-0,3	-2,0	-5,8	5,3	3,3	3,7	8,4	15,1	2,0
	12	-1,6	-3,0	-6,2	5,3	3,0	1,8	9,2	16,0	1,2
	14	-1,9	-3,2	-6,9	5,6	2,7	1,8	8,7	16,3	1,0
	16	-2,2	-3,5	-6,4	6,2	2,5	1,2	8,2	16,9	0,9
	18	-2,4	-4,1	-6,7	7,2	2,5	1,0	7,3	19,0	0,6
	20	-2,8	-4,4	-6,7	7,3	1,9	0,5	8,0	17,4	0,3
	22	-2,7	-4,5	-6,4	8,4	2,4	0,3	7,3	18,0	0,4

Anhang 33: Gemessene Schalldruckpegel der Linienmessung ohne Belaubung

L_{eq} [dB]		Frequenz [Hz]								$L_{Sum,eq}$
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Entfernung [m]	3	90,9	94,3	89,3	97,5	94,3	95,7	94,3	94,8	103,5
	6	86,0	91,0	88,6	84,7	92,2	90,2	85,8	82,7	97,7
	8	83,9	88,8	87,3	84,1	85,9	87,2	85,7	82,2	95,1
	10	82,2	87,2	85,6	82,9	82,1	84,5	82,3	81,0	93,0
	12	80,7	85,7	84,4	81,9	79,8	83,6	79,7	78,2	91,5
	14	80,0	84,7	82,8	80,5	78,1	81,9	78,1	75,1	90,1
	16	79,5	83,8	82,1	78,5	76,9	81,4	77,4	73,4	89,2
	18	78,4	82,8	81,1	77,1	75,8	81,2	76,6	70,4	88,2
	20	77,8	82,2	80,3	76,0	75,3	81,5	75,5	69,6	87,8
	22	76,8	81,2	79,4	74,3	74,0	80,1	75,3	69,2	86,7

Anhang 34: Berechnete Schalldruckpegel ohne Schallschirm (Schallleistungspegel aus Linienmessung ohne Belaubung)

L_{eq} [dB]		Frequenz [Hz]								$L_{Sum,eq}$
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Entfernung [m]	3	92,5	95,2	89,6	97,6	94,8	95,0	93,5	93,6	103,5
	6	87,0	89,5	84,4	92,5	89,7	90,6	88,5	88,1	98,4
	8	84,5	87,0	82,1	90,2	87,4	88,9	86,3	86,1	96,2
	10	81,1	84,1	79,1	87,3	84,3	85,7	83,7	83,8	93,2
	12	79,5	82,5	77,6	85,7	82,7	84,1	82,2	82,3	91,7
	14	78,2	81,2	76,3	84,4	81,4	82,8	80,9	81,1	90,4
	16	77,0	80,1	75,1	83,3	80,2	81,6	79,8	80,0	89,3
	18	76,0	79,0	74,1	82,3	79,2	80,6	78,8	79,0	88,2
	20	75,0	78,2	73,2	81,4	78,3	79,7	77,9	78,2	87,3
	22	74,2	77,3	72,4	80,6	77,4	78,8	77,1	77,4	86,5

Anhang 35: Berechnete Schalldruckpegel mit Schallschirm (Schalleistungspegel aus Linienmessung ohne Belaubung)

L_{eq} [dB]		Frequenz [Hz]								$L_{Sum,eq}$
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Entfernung [m]	3	92,5	95,2	89,6	97,6	94,8	95,0	93,5	93,6	103,5
	6	74,8	76,2	68,7	74,1	67,4	64,6	58,7	55,5	80,6
	8	74,6	76,7	70,0	75,8	69,5	66,8	61,0	57,8	81,5
	10	73,1	75,6	69,1	75,2	69,1	66,6	60,8	57,7	80,5
	12	71,8	74,3	68,1	74,3	68,3	65,9	60,2	57,0	79,4
	14	70,5	73,1	66,9	73,3	67,4	64,9	59,3	56,1	78,3
	16	69,5	72,1	66,0	72,5	66,6	64,3	58,6	55,4	77,4
	18	68,5	71,2	65,1	71,6	65,8	63,5	57,9	54,7	76,5
	20	67,6	70,4	64,4	70,9	65,2	62,9	57,2	54,1	75,8
	22	66,8	69,5	63,5	70,1	64,4	62,1	56,5	53,3	75,0

Anhang 36: Schallpegelabnahme zwischen Schallausbreitung ohne Schirm und Hecke ohne Belaubung

L_{eq} [dB]		Frequenz [Hz]								$L_{Sum,eq}$
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Entfernung [m]	3	1,5	0,9	0,2	0,1	0,5	-0,6	-0,7	-1,2	0,0
	6	1,0	-1,5	-4,2	7,7	-2,4	0,4	2,6	5,4	0,6
	8	0,1	-2,2	-5,6	5,7	1,1	1,2	0,3	3,7	0,7
	10	-0,5	-2,7	-6,0	4,9	2,7	1,8	1,8	3,1	0,7
	12	-1,2	-3,2	-6,8	3,9	2,9	0,5	2,4	4,1	0,2
	14	-1,8	-3,5	-6,6	3,9	3,3	0,9	2,8	5,9	0,3
	16	-2,5	-3,7	-7,0	4,8	3,3	0,2	2,3	6,6	0,1
	18	-2,5	-3,7	-7,0	5,2	3,4	-0,6	2,1	8,6	0,0
	20	-2,8	-4,1	-7,1	5,4	2,9	-1,9	2,4	8,6	-0,4
	22	-2,6	-3,9	-7,0	6,2	3,4	-1,3	1,8	8,1	-0,2

Anhang 37: Schallpegeldifferenz zwischen Schallausbreitung mit und ohne Belaubung

L_{eq} [dB]		Frequenz [Hz]								$L_{Sum,eq}$
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Entfernung [m]	3	0,0	-0,1	0,0	-0,1	-0,1	0,0	-0,1	0,0	0,0
	6	0,6	0,9	0,0	0,2	1,9	1,6	2,3	5,2	1,2
	8	-0,5	0,0	-0,2	-0,2	1,4	1,2	6,3	9,6	0,9
	10	0,7	1,1	0,7	0,9	1,1	2,4	7,0	12,3	1,7
	12	-0,4	0,2	0,6	1,5	0,1	1,3	6,7	11,9	1,0
	14	-0,1	0,3	-0,3	1,7	-0,5	0,9	5,9	10,4	0,7
	16	0,3	0,2	0,6	1,4	-0,7	1,0	5,9	10,3	0,8
	18	0,0	-0,4	0,4	1,9	-0,8	1,7	5,2	10,5	0,6
	20	0,0	-0,3	0,4	1,9	-1,0	2,4	5,6	8,8	0,7
	22	-0,1	-0,6	0,6	2,2	-1,0	1,6	5,5	9,9	0,5

Anhang 38: Schallpegelabnahme zwischen Schallausbreitung ohne Schirm und Lärmschutzwand

L_{eq} [dB]		Frequenz [Hz]								$L_{Sum,eq}$
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Entfernung [m]	3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	6	12,2	13,3	15,7	18,4	22,3	26,1	29,8	32,6	17,5
	8	9,4	9,9	11,7	14,0	17,5	21,6	25,0	28,0	14,2
	10	8,6	9,0	10,5	12,5	15,7	19,7	23,2	26,4	13,1
	12	7,8	8,2	9,5	11,4	14,4	18,3	22,0	25,3	12,2
	14	7,6	8,1	9,3	11,1	14,0	17,8	21,6	25,0	12,0
	16	7,5	7,9	9,1	10,8	13,6	17,4	21,2	24,6	11,8
	18	7,5	7,9	9,0	10,6	13,4	17,1	20,9	24,3	11,7
	20	7,4	7,8	8,9	10,5	13,1	16,8	20,7	24,1	11,6
	22	7,4	7,8	8,8	10,4	13,1	16,8	20,6	24,1	11,6

10.8. Geräteliste

Anhang 39: Liste der verwendeten Geräte

Messgerät		Hersteller	Typ	Seriennummer
Mehrkanalmesssystem	Rack I	Norsonic AS	850	8501117
	Rack II	Norsonic AS	850	8501119
	Software Nor850 Vers. 1.4	Norsonic AS	850	8501704
Freifeldmikrofon	Mikrofon ½"	Norsonic AS	1225	128813
	Vorverstärker	Norsonic AS	1209	14193
Freifeldmikrofon	Mikrofon ½"	Norsonic AS	1225	128817
	Vorverstärker	Norsonic AS	1209	13925
Freifeldmikrofon	Mikrofon ½"	Norsonic AS	1225	128831
	Vorverstärker	Norsonic AS	1209	14200
Freifeldmikrofon	Mikrofon ½"	Norsonic AS	1225	128835
	Vorverstärker	Norsonic AS	1209	14178
Freifeldmikrofon	Mikrofon ½"	Norsonic AS	1225	128846
	Vorverstärker	Norsonic AS	1209	14181
Freifeldmikrofon	Mikrofon ½"	Norsonic AS	1225	128863
	Vorverstärker	Norsonic AS	1209	14207
Freifeldmikrofon	Mikrofon ½"	Norsonic AS	1225	151294
	Vorverstärker	Norsonic AS	1209	14515
Freifeldmikrofon	Mikrofon ½"	Norsonic AS	1225	142481
	Vorverstärker	Norsonic AS	1209	14558
Freifeldmikrofon	Mikrofon ½"	Norsonic AS	1225	142474
	Vorverstärker	Norsonic AS	1209	14280
Freifeldmikrofon	Mikrofon ½"	Norsonic AS	1225	151298
	Vorverstärker	Norsonic AS	1209	14478
Freifeldmikrofon	Mikrofon ½"	Norsonic AS	1225	142478
	Vorverstärker	Norsonic AS	1209	14543
Freifeldmikrofon	Mikrofon ½"	Norsonic AS	1225	142473
	Vorverstärker	Norsonic AS	1209	14255
Kalibrator	Kalibrator	Norsonic AS	1251	20845
	½" Adapter	Norsonic AS	1443	
Lautsprecher	Aktivlautsprecher	imq	MAB-150AK	I/O2-OO1006-O2
Akustische Kamera	Datenrekorder mcdRec 721	GFal	GI-DR-008	
	ringförmiges Mikrofonarray	GFal	GI-MA-R48	
	Software Noiselmage4	GFal	GI-SW-NI4	

10.9. Wetterdaten

Anhang 40: Vorherrschende Wetterbedingungen

Datum	Uhrzeit		Temperatur	Luftfeuchte	Windgeschwind.
	von	bis	[°C]	[%rF]	[m/s]
28.08.2012	13:00	17:00	26,8	31,9	2,4
05.09.2012	13:00	16:00	26,6	39,7	1,6
11.09.2012	08:00	10:00	21,6	54,3	1,9
18.09.2012	14:00	18:30	24,6	44,0	2,8
18.12.2012	09:30	13:30	2,9	86,6	0,9

Die Wetterdaten stammen von der Messanlage der TU Wien, Institut für Hochbau und Technologien (Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz). Diese Anlage befindet sich am Institutsgelände (Adolf-Blamauergasse 1-3, 1030 Wien). Die Messwerte sind Mittelwerte über die angegebene Messzeit.