

Forschungsbericht BWPLUS

Schallschutzpflanzen – Optimierung der Abschirmwirkung von Hecken und Gehölzen

von

Dr. Moritz Späh, Dr. Lutz Weber, Timo Oesterreicher, Dr. Andreas Liebl

Fraunhofer Institut für Bauphysik
IBP

Förderkennzeichen: BWU 27009

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit Mitteln des
Landes Baden-Württemberg gefördert

Oktober 2011

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer

IBP-Bericht B-BA 4/2010

Schallschutzpflanzen – Optimierung der Abschirmwirkung von Hecken und Gehölzen

Der Bericht umfasst

104 Seiten Text

7 Tabellen

88 Bilder

7 Anhänge

Dr. Moritz Späh, Dr. Lutz Weber, Timo Oesterreicher, Dr. Andreas Liebl

Stuttgart, 28 Oktober 2011

Institutsleitung



Univ.-Prof. Dr.-Ing.

K. Sedlbauer

Abteilungsleiter



Dr.-Ing. P. Leistner

Bearbeiter



Dr. M. Späh

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Nobelstraße 12 | 70569 Stuttgart

Telefon +49 711 970-00

Telefax +49 711 970-3395

www.ibp.fraunhofer.de

Institutsteil Holzkirchen

Fraunhoferstr. 10 | 83626 Valley

Telefon +49 8024 643-0

Telefax +49 8024 643-366

Projektgruppe Kassel

Gottschalkstr. 28a | 34127 Kassel

Telefon +49 561 804-1870

Telefax +49 561 804-3187

Inhalt

1	Einleitung und Forschungsziel	6
1.1	Forschungsziel	7
1.2	Überblick über diesen Bericht	8
2	Übersicht über bestehende Literatur	8
2.1	Erkenntnisse aus einzelnen Literaturstellen	8
2.2	Literatur zur Wahrnehmung von Geräuschen bzgl. Vegetation	9
2.3	Zusammenfassung der Erkenntnisse	9
3	Grundlagen	10
3.1	Luftschall	10
3.2	Schallausbreitung im Freien	10
3.3	Nahfeld einer Schallquelle	11
3.4	Schalltransmission, -reflexion, -dissipation und -absorption	11
3.5	Schalldämmung	12
3.6	Einfügungsdämmung	12
3.7	Beugung	13
3.8	Standardisiertes Verkehrslärmspektrum	14
4	Messaufbauten	15
4.1	Bestimmung der Schallabsorption im Kundt'schen Rohr	15
4.2	Bestimmung der Schalldämmung im Kundt'schen Rohr	17
4.3	Messung der Einfügungsdämmung im Halb-Freifeldraum	17
4.4	Messungen mit Intensitäts-Sonde	21
4.5	Messungen der mechanischen Verluste	23
4.6	Messung der Einfügungsdämmung im Freien	24
5	Eigenschaften von Hecken - Messungen im Labor	25
5.1	Voruntersuchungen	25
5.1.1	Messung der Schalldämmung von Blattflächen	25
5.1.2	Berechnung der Schalldämmung von Blattflächen	26
5.1.3	Schallabsorption von Blattflächen	27
5.1.4	Schalldämmung von dichten Blatt-Volumina	28
5.1.5	Schallabsorption von dichten Blatt-Volumina	30
5.1.6	Zusammenfassung der Voruntersuchungen im Kundt'schen Rohr	30
5.2	Untersuchungen an Efeuelementen im Labor	31
5.2.1	Beschreibung der Efeuelemente	31
5.2.2	Messung auf einem Pfad durch die Hecke	31

5.2.3	Streuung der Messwerte	34
5.2.4	Bewertung der Efeuhecke für Lärmschutz-Zwecke	35
5.2.5	Messung der mechanischen Verluste	36
5.2.6	Messung von Reflexions-, Transmissions-, Diffusions- und Absorptionsgrad	38
5.3	Messung einer Spindelstrauchhecke	42
5.3.1	Beschreibung der Spindelstrauchhecke	42
5.3.2	Messung der Einfügungsdämmung	43
5.3.3	Bewertung der Spindelstrauchhecke für Lärmschutz-Zwecke	43
5.4	Messung an einer Yucca-Palme	44
5.5	Messung an einer Kunsthecke aus Styrofill	45
5.6	Messung an einer Kunsthecke aus Folienblättern	46
5.6.1	Beschreibung der Kunsthecke	47
5.6.2	Messungen der Einfügungsdämmung	47
5.6.3	Variation der Blattparameter	48
5.6.4	Vergrößerter Blattdurchmesser	50
5.6.5	Veränderte Blattdichte	52
5.6.6	Veränderte Heckendicke	52
5.6.7	Erkenntnisse aus den Messungen an der Kunsthecke	54
5.7	Zusammenfassung der Messungen im Labor	54
6	Eigenschaften von Hecken - Messungen im Freien	55
6.1	Untersuchte Hecken	55
6.2	Durchführung der Messungen	59
6.3	Messung der Efeuhecke - Hedera helix 'Woerner'	60
6.4	Messung der Kirschlorbeerhecke - Prunus laurocerasus 'Rotundifolia'	61
6.5	Messung der Hainbuchenhecke – Carpinus betulus	62
6.6	Messung der Buchsbaumhecke – Buxus sempervirens	63
6.7	Nachweis des Einflusses der Bodenreflexion	64
6.8	Ergebnisse der Heckenmessungen im Freien	65
6.9	Bewertung der Dämmwirkung für den städtebaulichen Lärmschutz	67
6.10	Zusammenfassung der Messungen im Freien	68
7	Modellierung von Hecken	69
7.1	Modell von Aylor	69
7.2	Modell von Price, Attenborough und Heap	70
7.3	Modell von Defrance, Barriere und Premat	70
7.4	Modell von Mechel	71
7.4.1	Modellierung der Spindelstrauch-Hecke	75
7.4.2	Vergleich von Messung und Rechnung bei der Spindelstrauch-Hecke	77
7.4.3	Vergleich von Messung und Rechnung bei der Kunsthecke aus Folienblättern	78
7.4.4	Parameterstudie mittels Berechnungsmodell	82
7.4.5	Zusammenfassung der Ergebnisse des Modells	88

8	Hörversuche an Hecken	89
8.1	Methode	89
8.2	Teilnehmer	89
8.3	Material	90
8.4	Durchführung	91
8.5	Ergebnisse	92
8.5.1	Akustische Lästigkeit	92
8.5.2	Lautheit	93
8.5.3	Optische Attraktivität	94
8.6	Zusammenfassung der Hörversuche	95
9	Zusammenfassung	96
10	Hinweise für den Einsatz von Hecken und Gehölzen für Schallschutzzwecke	97
11	Ausblick	98
12	Literatur	101
13	Anhang	105

Danksagung:

Die vorliegenden Untersuchungen wurden von BWPlus gefördert. Hier sei vor allem Frau Bohrmann vom Projektträger Karlsruhe für ihre Unterstützung bei der Durchführung des Projekts gedankt. Weiterhin wurde das Projekt durch die Firma Helix Pflanzen mit der Bereitstellung von Heckenelementen und Hintergrundinformationen zu Heckenpflanzen unterstützt. Hierfür sei insbesondere Herrn Müller gedankt.

1 Einleitung und Forschungsziel

Lärm wird in unserer Gesellschaft zunehmend als eine der bedeutendsten Umweltbelastungen wahrgenommen. Lärm beeinträchtigt nicht nur die Konzentration und geistige Aufnahmefähigkeit, sondern verursacht darüber hinaus Schlafstörungen [1], die bis zur nachhaltigen Störung der Gesundheit führen können. Bei höherer Exposition ab 60 dB(A) steigt das Herzinfarktrisiko deutlich an [2,3,4]. Auch das Risiko, eine Blutdruckkrankheit zu entwickeln, steigt schon für Pegel ab 55 dB(A) an, De Kuizenaar et al [5].

Verkehrslärm ist in unseren Städten und Gemeinden allgegenwärtig. Dabei spielt mit Ausnahme von Bereichen in Flughafennähe der Straßenverkehrslärm die wichtigste Rolle. Nach Angaben der neuesten Datenerhebung des Umwelt-Bundesamts zum Verkehr in Deutschland [6] sind in den alten Bundesländern mehr als 30,9 % der Bevölkerung Lärmpegeln über 60 dB(A) ausgesetzt, dagegen sind es durch Schienenverkehr 9,3 %. Dabei handelt es sich um Daten von 1999 bzw. 1997. Inzwischen hat der Straßenverkehr, vor allem aber der Straßengüterverkehr deutlich zugenommen [6]. Allen Anstrengungen zum Trotz, die vor allem bei der Lärmemission der einzelnen Fahrzeuge unternommen wurden, ist der Lärm durch den Straßenverkehr insgesamt gestiegen.

Prognosen für das zukünftige Verkehrsaufkommen wie z.B. [7] zeigen ein deutlich steigendes Verkehrsaufkommen für die nächsten Jahre auf. Dabei wird prognostiziert, dass auch der motorisierte Individualverkehr deutlich ansteigen wird. Damit kann man davon ausgehen, dass auch in Zukunft die Lärmbelastung der Bevölkerung zunehmen wird, selbst bei einer starken Zunahme von Elektrofahrzeugen wird sich die Lärmsituation nicht wesentlich bessern. Erste Messungen im Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) deuten darauf hin, dass sich die Lärmemission von Elektrofahrzeugen schon bei einer Fahrgeschwindigkeit von 50 km/h nicht wesentlich von denen eines Verbrennungsfahrzeugs unterscheiden, da sie in diesem Geschwindigkeitsbereich schon im Wesentlichen durch die Reifengeräusche bestimmt ist. Dies bestätigen Untersuchungen von Beckenbauer [8].

Maßnahmen zur Reduktion der Lärmbelastung sind daher mehr denn je notwendig. Da dies nicht allein durch Maßnahmen an der Quelle, beim Straßenverkehr also an den Fahrzeugen, möglich ist, werden auch in Zukunft Lärmschutzwände zu diesem Zweck eingesetzt. Gerade in urbanen Bereichen, bei denen der Platz für Lärmschutzmaßnahmen begrenzt ist, kann auf diese Maßnahmen oft nicht verzichtet werden. Durch ihre starre Trennung des öffentlichen Raums sind sie in vielen Fällen aber sehr unbeliebt und können oft nicht eingesetzt werden. Daher besteht seit langem der Wunsch, eine gewisse Schallschutzwirkung durch natürliche Barrieren wie Pflanzen oder Hecken zu realisieren. Hierfür scheint eine größere Akzeptanz in der Bevölkerung vorhanden zu sein. Studien haben gezeigt, dass die Schallschutzwirkung von Hecken von betroffenen Anwohnern subjektiv oft besser bewertet wird, als die von Lärmschutzwänden, obgleich die akustischen Messdaten das Gegenteil aussagen [9,10]. Die Gründe dafür sind dagegen noch weitgehend ungeklärt. Hecken oder andere Pflanzungen haben aber auch weitere Vorteile: Sie können gestalterisch zur Begrünung der Stadtlandschaft eingesetzt werden und wirken der Staub- und Luftverunreinigung entgegen. Pflanzen wandeln CO₂ in Sauerstoff um, wirken sich positiv auf das Mikroklima aus, bieten Sicht- und Windschutz und dienen Vögeln und Insekten als Lebensraum.

Für den städtebaulichen Schallschutz werden Hecken bislang jedoch kaum genutzt, denn in den maßgeblichen Planungsrichtlinien [11,12] wird die Bewuchsdämpfung so niedrig angesetzt, dass eine merkliche Lärminderung rechnerisch nur bei großflächigen Grünanlagen erreichbar ist. In DIN ISO 9613-2 [12] wird eine Bewuchsdämpfung von $\alpha = 0.06$ dB/m bei 1000 Hz für alle Arten von Bewuchsflächen angegeben, unabhängig davon, ob es sich dabei um Hecken, Baumbestand oder Grünflächen mit Büschen handelt. Diese Annahme führt zu einer rechnerischen Pegelminderung von 3 dB bei einer 50 m breiten Bewuchsfläche. Diese Angaben in den Richtlinien stellen Mindestangaben dar, die in der Praxis häufig deutlich übertroffen werden. Deshalb besitzen Hecken bei geeigneter Gestaltung ein großes, bislang nicht genutztes Lärminderungspotential, das sich als umweltfreundliche Alternative zu Lärmschutzwänden anbietet.

1.1 Forschungsziel

Viele Gründe sprechen für den Einsatz von Hecken im städtebaulichen Schallschutz. Es bestehen aber derzeit noch fast keine Kenntnisse über eine geeignete Gestaltung von Schallschutzhecken und deren Wirksamkeit. Auch über die akustischen Eigenschaften von Heckenpflanzen ist bislang nur sehr wenig bekannt.

In diesem Vorhaben wird untersucht,

- wie hoch die Schalldämmung und der Frequenzgang von üblichen in unseren Breiten eingesetzten Hecken ist,
- wie groß die Reduktion des A-bewerteten Summenpegels von Verkehrslärm durch die Schalldämmung dieser Hecken ausfällt
- wie der Frequenzverlauf der Schalldämmung von Hecken prinzipiell beschrieben werden kann
- wie die Schalldämmung von Hecken durch ein mathematisches Modell modelliert werden kann
- welche Abmessungen eine Hecke mit akustischer Funktion besitzen sollte (Breite und Höhe)
- wie sich weitere Einflussfaktoren wie Bewuchsdichte, Blattfläche, Form und Dicke der Blätter etc. auf die akustischen Eigenschaften auswirken und
- welche Eigenschaften eine auf akustische Wirksamkeit optimierte Hecke haben sollte und welche Schalldämmung und Reduktion des A-bewerteten Summenpegels von dieser Hecke erwartet werden kann.

Die Untersuchungen erfolgen sowohl durch Messungen unter idealisierten Bedingungen im Labor als auch an realen Hecken im Freien. Zusätzlich werden rechnerische Modelle untersucht. Das Ziel ist, das akustische Verhalten zu modellieren und damit ein Werkzeug zu erhalten, mit dem die Schallschutzwirkung von Hecken prognostiziert werden kann. Das entwickelte Modell gibt Anhaltspunkte für die Auswahl und Weiterentwicklung von Hecken für Schallschutzzwecke und ermöglicht darüber hinaus, verlässliche Bemessungsgrundlagen für die Städte- und Landschaftsplanung zu erarbeiten.

1.2 Überblick über diesen Bericht

In Kapitel 2 wird die vorhandene Literatur gesichtet. In Kapitel 3 werden die Grundlagen zur Akustik bzgl. der Wirksamkeit von Hecken dargestellt. Danach werden in Kapitel 4 die verwendeten Messaufbauten beschrieben. Kapitel 5 stellt die Messungen im Labor ausführlich dar, in Kapitel 6 werden die Messungen im Freien dargelegt. Kapitel 7 beschäftigt sich mit der Modellierung der akustischen Wirksamkeit von Hecken und beschreibt Schlussfolgerungen hieraus. In Kapitel 8 werden Hörversuche dargestellt, mit denen die Wahrnehmung von Geräuschen, die durch Pflanzen bzw. Hecken abgeschirmt werden, untersucht wurde. In Kapitel 9 werden die Ergebnisse der Untersuchungen zusammengefasst, in Kapitel 10 werden Hinweise für den Einsatz von Hecken zu Schallschutzzwecken gegeben.

2 Übersicht über bestehende Literatur

2.1 Erkenntnisse aus einzelnen Literaturstellen

Die Akustik von Vegetation ist schon seit geraumer Zeit immer wieder untersucht worden. Erste Messungen von Eyring [13] beschreiben die Hörbarkeit und die Ortung von Signalen im Dschungel im Bereich des Panamakanals. Weitere Untersuchungen wurden von Aylor unter anderem an Mais und Schilf durchgeführt [14, 15]. Die Messungen wurden über größere Entfernungen von ca. 30 m und mehr durchgeführt. Aylor kommt in [14] zu dem Schluss, dass die prinzipiellen Faktoren für die Schalldämpfung von Vegetation der Bodeneffekt sowie die Schallstreuung innerhalb des Bewuchses sind. In [16 - 23] werden Untersuchungen der Schallausbreitung in Wald beschrieben. Price et. al. [18] beschreiben ein semiempirisches Modell, das den Bodeneffekt bei tiefen und mittleren Frequenzen und den Anstieg der Dämpfung bei hohen Frequenzen durch einen Mehrfach-Streuungsansatz ermittelt. Das verwendete Berechnungsmodell basiert auf denselben Ansätzen, wie das in Kapitel 7.4 beschriebene Berechnungsmodell auch. Alle Ergebnisse beziehen sich auf Messungen über größere Distanzen zwischen 24 m und 72 m.

Spezielle Untersuchungen bezüglich der Reduktion von Verkehrsgeräuschen durch Vegetation sind in [22-28] beschrieben. In Kragh [23] werden natürliche Vegetationsstreifen von 3 bis 25 m Breite untersucht. Dabei wurden auch Testpersonen befragt. Die Reduktion der Störwirkung von Straßenverkehrslärm durch einen Baum- oder Buschgürtel wird darin (psychologischen) Faktoren wie Sichtschutz etc. zugeschrieben. In [24] wird von Harris die Wirkung von relativ schmalen Vegetationsstreifen mit Dicken von ca. 10 m untersucht. Bei seiner Untersuchung findet er eine Reduktion des Straßenverkehrslärms von 2 – 3 dB(A).

In Huddard [26] werden die psychologischen Effekte von Schallschutz durch Vegetation aus vorhergegangenen Studien beschrieben. Dabei wird darauf hingewiesen, dass die Effizienz von Schallschutzwänden durch die Reduktion der wahrgenommenen Schallpegel und der Störung beurteilt werden sollte, und nicht durch die reine Reduktion der Geräuschpegel. Zusammenfassend wird festgestellt, dass ein großer psychologischen Einfluss auf die Bewertung von Vegetation als Schallschutzmaßnahme besteht, so dass auch eine geringe Wirkung von Vegetation auf den Schallpegel einen großen Einfluss auf die wahrgenommene Lautstärke und auf die Belästigung hat.

Weitere Untersuchungen zur Lärmbekämpfung mittels Pflanzen liegen von Beck [30-32] vor. Die Messungen wurden an natürlichem Bewuchs zu verschiedenen Jahreszeiten durchgeführt, der zum Teil in seiner Dichte und Dicke mit Hecken vergleichbar ist. Diese Messungen zeigen prinzipiell ähnliche Verläufe der frequenzabhängigen Minderungswerte wie in der hier beschriebenen Arbeit.

Die Grundlagen von städtebaulicher Akustik und Vegetation sind von Bucur in [33] beschrieben, wobei auf die Wirkung von Bäumen abgehoben wird.

2.2 Literatur zur Wahrnehmung von Geräuschen bzgl. Vegetation

Ein wichtiges Thema, ist die Wahrnehmung von Verkehrsgeräuschen bei Einsatz von Vegetation, z.B. Hecken und dichtes Gehölz. Hierbei spielt die tatsächliche Dämmwirkung der Vegetation eine Rolle, aber auch Effekte wie die Sichtbarkeit (visuelle Abschirmung) der Schallquelle, eine a priori hohe Akzeptanz von natürlichen Schutzeinrichtungen wie Hecken etc. Interessant erscheinen hier Untersuchungen von Watts et. al. [10], Aylor und Marks [34], sowie Mulligan et. al. [35]. In allen drei Literaturstellen werden unterschiedliche Versuchsanordnungen getroffen, und alle drei Arbeiten fokussieren auf etwas unterschiedliche Ziele.

2.3 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Bei der Schallminderung durch Vegetation sind zwei Vorgänge zu unterscheiden: Im Bodenbereich der Hecke kommt es zu einer Bodenreflexion. Diese erzeugt im tiefen bis mittleren Frequenzbereich eine Einfügungsdämmung hinter der Vegetation, verglichen mit einer Übertragungssituation mit derselben Geometrie, aber unterschiedlicher Bodenbeschaffenheit (Wiese, Straße etc.). Dabei hat die Vegetation Einfluss auf die Bodenbeschaffenheit (Lockerung des Bodens, Abwurf von Pflanzenreste etc.) und damit auf die Impedanz des Bodens.

Bei höheren Frequenzen kommt es zu Wechselwirkung des Schalls vor allem mit der Begrünung. Dabei entstehenden Mehrfach-Reflexion sowie Mehrfach-Streuung des Schalls. Bei diesem frequenzabhängigen Vorgang wird Schallenergie reflektiert, der effektive Schallweg verlängert und zugleich wird Schallenergie an Ästen und Blättern durch Dissipation dem Luftschall entzogen. Dieser Wirkungsbereich beginnt mit Frequenzen ab 1000 Hz aufwärts, wobei mit steigenden Frequenzen der Schallminderungseffekt zunimmt. Beck [30,32] beobachtete zudem eine Verschiebung der Wirkung in Richtung der tiefen Frequenzen mit der Zunahme der artenspezifischen Blattgröße.

Günstige Eigenschaften für die Wirksamkeit jeder Art von Vegetation bei höheren Frequenzen sind die Blattgröße und die Blattdicke, eine annähernd senkrecht, d.h. rechtwinklig zum Schalleinfall gerichtete Blattstellung, ein gegen die Schallquelle geschlossener Laubschirm sowie eine hohe Belaubungsdichte der Vegetation. Die Dämmungseffekte basieren hauptsächlich auf der Belaubung. Deshalb sind bei der Artenwahl immergrün belaubte Hecken von Vorteil. Auch sollte ein von unten her dicht aufgebauter Laubschirm vorhanden sein.

Zur Wahrnehmung von Geräuschen im Zusammenhang mit Vegetation lassen sich nach der vorliegenden Literatur keine eindeutigen Schlüsse ziehen. Allerdings ist unstrittig, dass Vegetation grundsätzlich positiver bewertet wird als künstlicher Lärmschutz. Die Gründe hierfür scheinen relativ komplex und sind noch nicht klar.

3 Grundlagen

3.1 Luftschall

Allgemein werden mechanische Schwingungen, die sich in der Luft im Hörbereich des Menschen fortpflanzen, als Luftschall bezeichnet.

Gekennzeichnet wird die Stärke der Luftdruckschwankungen mit dem Schalldruck p (Einheit: $[N/m^2] = [Pa]$). Aus praktischen Erwägungen wird der Schalldruckpegel L_p angegeben.

$$L_p = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \lg \frac{p}{p_0} \quad [dB] \quad (1)$$

Mit p dem Effektivwert des Schalldrucks und p_0 dem Bezugsschalldruck ($p_0 = 2 \cdot 10^{-5} Pa$)

3.2 Schallausbreitung im Freien

Von einer gleichmäßig abstrahlenden, punktförmigen Schallquelle breitet sich der Schall in alle Richtungen aus. Damit ist die Schallleistung, die durch Kugelschalen um die Quelle hindurch tritt, konstant. Die Schallintensität als Maß der Schallleistung pro Fläche ist definiert durch:

$$I = \frac{W}{S} \quad [W/m^2] \quad (2)$$

Mit W der Schallleistung der Quelle in Watt und S der Kugeloberfläche um die Quelle in m^2 . Die Kugeloberfläche um die Quelle herum ist $S = 4\pi r^2$, mit r dem Abstand zwischen Quelle und Kugeloberfläche. Daraus folgt für die Intensität bei kugelförmiger Ausbreitung

$$I(r) = \frac{W}{4 \pi r^2} \quad (3)$$

Der Schalldruckpegelunterschied ΔL zwischen zwei Messpunkten r_1 und r_2 unter Freifeldbedingungen berechnet sich mit:

$$\Delta L = 10 \lg \left[\frac{I(r_1)}{I(r_2)} \right] = 10 \lg \left[\frac{r_2^2}{r_1^2} \right] = 20 \lg \left[\frac{r_2}{r_1} \right] \quad [dB] \quad (4)$$

Die Kugelausbreitung ist zweidimensional in Bild 1 dargestellt.

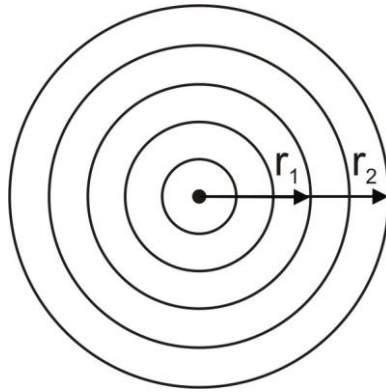


Bild 1: Zweidimensionale Darstellung der Wellenausbreitung im Freifeld.

3.3 Nahfeld einer Schallquelle

Das Nahfeld einer Schallquelle erstreckt sich etwa über eine halbe Wellenlänge. Hier befinden sich Schalldruck und Schallschnelle nicht in Phase. Daher verhalten sich im Nahfeld Schallleistung und Schalldruckquadrat nicht proportional zueinander.

Um durch Messung des Schalldruckpegels Aussagen über die Schallleistung machen zu können, sollte die Messung nicht im Nahfeld der Quelle stattfinden. Daher muss ein Abstand von einer halben Wellenlänge von der Schallquelle eingehalten werden. In diesem Vorhaben wurde bei Messungen ein Abstand von mindestens einem Meter eingehalten, so dass ab Frequenzen von ca. 160 Hz aufwärts die Messung nicht mehr im Nahfeld stattfand.

3.4 Schalltransmission, -reflexion, -dissipation und -absorption

Trifft eine Schallwelle auf ein Hindernis wie eine Wand oder eine Hecke, so tritt ein Teil der Schallleistung durch die Struktur hindurch. Dieser Anteil wird durch den Transmissionsgrad quantifiziert.

$$\tau = \frac{\text{durchgelassene Schallleistung}}{\text{auftreffende Schallleistung}} \quad (5)$$

Ein weiterer Anteil der Schallenergie wird durch Reibung in Wärme umgewandelt. Dieser Anteil wird mit dem Dissipationsgrad beschrieben.

$$\delta = \frac{\text{dissipierte Schallleistung}}{\text{auftreffende Schallleistung}} \quad (6)$$

Da sich das Medium bzw. die Mediumsbedingungen an der Oberfläche des Objekts ändert, wird ein Teil der Schallenergie an dieser Mediumsgrenze reflektiert, was durch den Reflexionsgrad beschrieben wird.

$$\rho = \frac{\text{reflektierte Schallleistung}}{\text{auftreffende Schallleistung}} \quad (7)$$

Alle Schallenergie, die nicht reflektiert wird, geht für das Medium vor dem Hindernis verloren, und wird mit dem Absorptionsgrad beschrieben. Damit sind im Absorptionsgrad der Dissipations- und der Transmissionsgrad zusammengefasst.

$$\alpha = \frac{\text{absorbierte Schalleistung}}{\text{auftreffende Schalleistung}} \quad (8)$$

Es gilt:

$$\tau + \delta + \rho = 1 \quad (9)$$

Mit τ dem Transmissionsgrad, δ dem Dissipationsgrad und ρ dem Reflexionsgrad. Damit ist der Absorptionsgrad α :

$$\alpha = \tau + \delta. \quad (10)$$

Die Definition der Größen bzw. ihre Verwendung hängt mit der Art ihrer Messung zusammen. So gibt es z.B. für verschiedene Schalleinfallrichtungen verschiedene Absorptionsgrade etc.

3.5 Schalldämmung

Die Schalldämmung eines Objekts beschreibt deren Dämmwirkung. Sie ist definiert durch:

$$R = 10 \lg \frac{P_a}{P_d} = 10 \lg \frac{1}{\tau} \quad [\text{dB}] \quad (11)$$

Mit der auf das Objekt auftreffenden Schalleistung P_a und der durchgelassenen Schalleistung P_d . Die Schalldämmung kann damit auch aus dem Transmissionsgrad τ bestimmt werden. Bei Lärmschutzwänden beschreibt die Schalldämmung nur den Anteil der Schallübertragung durch das Objekt selbst, aber nicht den Anteil durch die Beugung um das Objekt herum.

3.6 Einfügungsdämmung

Dagegen beschreibt die Einfügungsdämmung die Verminderung des Schallpegels durch die Schallschutzeinrichtung unter Einsatzbedingungen. Wichtig ist dabei die Schalldämmung des Objekts, aber auch die Beugung um das Objekt herum oder über das Objekt hinweg.

Bei gleichen Umgebungsbedingungen wird am selben Ort mit und ohne Schallschutzeinrichtung, hier einer Lärmschutzwand, der Schalldruckpegel derselben Quelle gemessen. Die Differenz ergibt die Einfügungsdämmung. Sie ist definiert durch:

$$D_e = L_1 - L_2 \quad [\text{dB}] \quad (12)$$

Mit L_1 dem empfangsseitigen Schallpegel ohne Schalldämmungs-Maßnahme und L_2 dem empfangsseitigen Schallpegel mit Lärmschutzwand.

Im Falle der Messung an ortsfesten Hecken wurde die Messung ohne Objekt durch eine Referenzmessung ersetzt, d.h. es wurde eine Messung in einem Bereich ohne Hecke durchgeführt, wobei darauf geachtet wurde, dass die Umgebungsbedingungen, die Geometrie und die Quelle unverändert waren.

Die Einfügungsdämmung beschreibt damit die gesamte Schalldämmwirkung z. B. einer Schallschutzwand und beinhaltet auch die Beugung. Bei Hecken und Gehölzen ist die Dämmwirkung geringer als bei herkömmlichen Schallschutzwänden, da sie keine geschlossene Struktur aufweisen. Daher ergibt sich bei der Einfügungsdämmung von solchen Objekten immer eine Kombination der Übertragung durch die Hecke sowie der Beugung. Der Unterschied herkömmlicher Lärmschutzwände und Lärmschutz durch Vegetation ist in Bild 2 schematisch dargestellt.

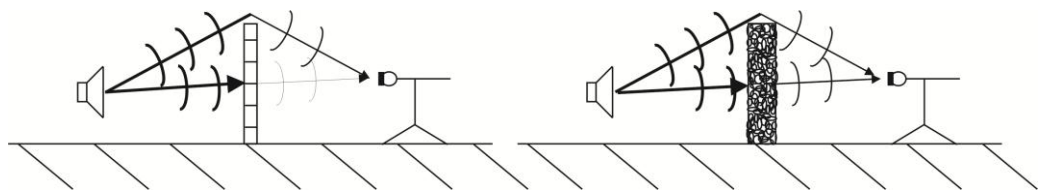


Bild 2: Schallübertragung bei einer herkömmlichen Lärmschutzwand mit hoher Schalldämmung (linkes Bild) und bei einer Hecke als Lärmschutzelement (rechtes Bild) mit geringerer Schalldämmung.

3.7 Beugung

Die Beugung ist ein Phänomen der Wellenausbreitung und erfolgt nach dem Huygen'schen Prinzip. Bei der Beugung wird Schallenergie um ein Hindernis herumgeleitet. Sie ist vor allem tieffrequenz wirksam. Zur Abschätzung der Beugung wird das in ISO 9613-2 [12] angegebene Berechnungsverfahren zur Abschirmung von Schall durch Schallschirme verwendet. Die frequenzabhängige Abschirmung D_Z ist gegeben durch:

$$D_Z = 10 \times \log \left[3 + \frac{C_2}{\lambda} \times C_3 \times z \right] \quad [\text{dB}] \quad (13)$$

mit C_2 dem Koeffizient 2 mit dem Wert 20 bei Berücksichtigung der Bodenreflexion, dem Koeffizient C_3 mit dem Wert 1 für Einfachbeugung, und:

$$C_3 = \frac{1 + \left(\frac{5\lambda}{e} \right)^2}{\frac{1}{3} + \left(\frac{5\lambda}{e} \right)^2} \quad (14)$$

Mit e dem Abstand zwischen beiden Beugungskanten im Falle der Doppelbeugung, λ der Wellenlänge und z der Differenz zwischen den Weglängen des gebeugten und des direkten Schalls. Dabei wird die Größe z bei Einfachbeugung durch:

$$z = \left[(d_{ss} + d_{sr})^2 + a^2 \right]^{0.5} - d \quad (15)$$

mit d_{ss} dem Abstand von der Quelle zur (ersten) Beugungskante, d_{sr} dem Abstand von der (zweiten) Beugungskante zum Empfänger R und d dem tatsächlichen Abstand von Quelle zum Empfänger berechnet. Die Größen sind in Bild 3 dargestellt.

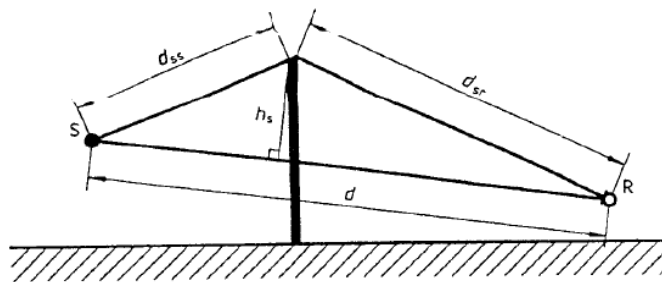


Bild 3: Geometrische Größen zur Bestimmung des Schirmwertes bei Einfachbeugung (aus DIN ISO 9613-2 [12]).

3.8 Standardisiertes Verkehrslärmspektrum

Als repräsentative Geräuschquelle wurde das standardisierte Verkehrslärmspektrum aus DIN EN 1793-3 [36] herangezogen. Das standardisierte Spektrum wird als A-bewertetes auf ca. 0 dB normiertes Terzspektrum im Frequenzbereich von 100 Hz bis 5 kHz angegeben. Zur Anwendung im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde das gesamte Spektrum um 60 dB angehoben und zusätzlich die A-Bewertung aus dem standardisierten Verkehrslärmspektrum herausgerechnet. Damit ergab sich ein A-bewerteter Gesamtschallpegel von 60,2 dB(A) und ein Linearpegel von 65,3 dB. Das verwendete Spektrum liegt an der Obergrenze von Lärmpegelbereich II nach DIN 4109 [37]. Dieses Verkehrslärmspektrum ist in Bild 4 angegeben.

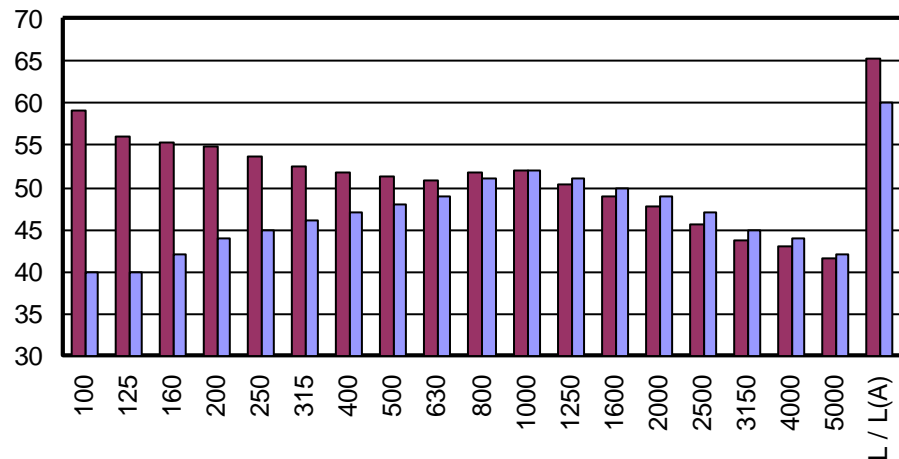


Bild 4: Verkehrslärmspektrum abgeleitet aus DIN EN 1793-3 [36].

Das in Bild 4 gezeigte Spektrum kann als ein typisches Spektrum für Straßenverkehr angesehen werden (abhängig von Fahrzeugart, Geschwindigkeit, Straßenbelag, Witterung etc.). Das Spektrum ist tieffrequent geprägt, mit einer geringfügigen Überhöhung bei 1000 Hz. Zu höheren Frequenzen hin fällt es kontinuierlich ab.

4 Messaufbauten

Eine der einfachsten Aufbauten zur Messung der akustischen Eigenschaften stellt das Kundt'sche Rohr oder Impedanzrohr dar. Der Vorteil ist, dass bei dieser Prüfmethode kleine Probengrößen benötigt werden. Allerdings können damit nur die Eigenschaften bei senkrechtem Schalleinfall in einem begrenzten Frequenzbereich ermittelt werden. Daher bietet sich das Kundt'sche Rohr für Reihenmessungen und Vergleiche verschiedener Materialien an. In diesem Vorhaben wurde das Kundt'sche Rohr für erste Voruntersuchungen eingesetzt.

4.1 Bestimmung der Schallabsorption im Kundt'schen Rohr

Für die Bestimmung des Schallabsorptionsgrads im Kundt'schen Rohr gibt es eine Reihe von Normen [38 - 41]. Das Prüfobjekt wird hierbei vor einem schallharten Abschluss des Rohres im Rohr eingebracht. Aus dem Verhältnis der Schalldrücke kann der Reflexionsfaktor nach [40]:

$$|r| = \frac{\frac{p_{\max}}{p_{\min}} - 1}{\frac{p_{\max}}{p_{\min}} + 1} \quad (16)$$

berechnet werden. Dabei sind p_{\max} der maximaler Schalldruck der stehenden Welle und p_{\min} der minimaler Schalldruck der stehenden Welle.

Aus dem komplexen Reflexionsfaktor ergibt sich der Absorptionsgrad α bei senkrechtem Schalleinfall mit:

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (17)$$

Bei den Messungen in dieser Arbeit wurde der Schallabsorptionsgrad bei senkrechtem Schalleinfall mittels der 1-Mikrofon-FFT-Methode nach [41] bestimmt. Eine Skizze des Aufbaus ist in Anhang B, Bild B 1 dargestellt. Die Anregung erfolgt durch ein breitbandiges Rauschen. Der Reflexionsfaktor r wird aus der Übertragungsfunktion zwischen zwei Messpunkten 1 und 2 bestimmt. Die Übertragungsfunktion H_{12} ist das Verhältnis zweier fouriertransformierter, zeitabhängiger Signale zueinander. Sie wird aus der Transferfunktion zwischen den jeweiligen Mikrofonpositionen und einem Referenzmikrofon bestimmt. Der Reflexionsfaktor errechnet sich mit:

$$r = \frac{H_{12} - e^{jk_0s}}{e^{-jk_0s} - H_{12}} e^{2jk_0L} \quad (18)$$

Mit H_{12} der Übertragungsfunktion zwischen Mikrofonposition 1 und 2, k_0 der Wellenzahl, L der weiteste Entfernung zwischen Mikrofon und Prüfbjetoberfläche und s dem Abstand der Mikrofonpositionen 1 und 2 in m.

Für s gilt hierbei:

$$s < 0,45 \lambda \quad (19)$$

Die Rohrbreite bedingt den Frequenzbereich und legt die obere Frequenzgrenze fest, denn es muss ausgeschlossen sein, dass es zu Quermoden im Rohr kommt. Daher wird die obere Arbeitsfrequenz f_u durch:

$$f_u < \frac{0,58 c_0}{d} \quad (20)$$

mit d dem Innendurchmesser des Rohres in m. Die Arbeitsfrequenz f ist:

$$f_1 < f < f_u \quad (21)$$

Mit f_1 der untere Arbeitsfrequenz in Hz. Diese ist von der Messgenauigkeit des Analysesystems bzw. der Auflösung der FFT abhängig. In diesem Projekt wurde für die Messungen das Rohr mit einem Rechteck-Querschnitt von 0,25 m x 0,25 m und einer Länge von 7,5 m eingesetzt. Ein Foto des Rohres ist in Anhang B in Bild B 3 gezeigt. Als Messsystem wurde das am IBP entwickelte System ImpAKT (Impedance and Absorption Measurement in Kundt's Tube) verwendet. Dabei wurde als Anregesignal ein breitbandiges MLS-Signal eingesetzt, die Abtastrate war 4096, die Anzahl der Mittelungen betrug 20. Als Mikrofonabstände wurden 0,225 m, 0,125 m und 0,1 m verwendet. Damit ergab sich der Arbeitsfrequenzbereich von 40 bis 1000 Hz.

4.2 Bestimmung der Schalldämmung im Kundt'schen Rohr

Das verwendete Kundt'sche Rohr mit Rechteck-Querschnitt von 0,25 m x 0,25 m und einer Länge von 7,5 m ermöglicht auch die Messung der Einfügungsdämmung bzw. der Schalldämmung. Möglich wird die Messung der Schalldämmung, indem die Probe zwischen Lautsprecher und Mikrofon platziert und am Ende des Rohres gegenüber des Lautsprechers ein reflexionsarmer Abschluss eingebaut wird. Der Absorptionsgrad des Abschlusses ist im Anhang A in Bild A 1 dargestellt. Die Schalldämmung ergibt sich aus:

$$R = D_e = L_1 - L_2 \quad [\text{dB}] \quad (22)$$

Mit L_1 dem Schallpegel ohne Element im Rohr und L_2 dem Schallpegel mit Element im Rohr. Wichtig ist, dass diese Schalldämmung nur für den senkrechten Schalleinfall gültig ist.

4.3 Messung der Einfügungsdämmung im Halb-Freifeldraum

Die Messungen im Labor wurden in einem Halb-Freifeldraum durchgeführt. Reflexionen am Boden wurden durch Verwendung von Schallabsorbern reduziert. Der Messaufbau bestand aus einer 19 mm dicken Spanplatte, die eine Blende mit den Abmessungen von 2,0 m Höhe und 3,5 m Breite darstellte. Diese besaß eine Blendenöffnung mit einer Höhe von 0,75 m und einer Breite von 0,75 m. Die effektive Höhe wurde aufgrund des mit Caruso Iso Bond-Absorbern ($d = 100$ mm) belegten Bodens auf 0,65 m reduziert. Der Aufbau ist in Bild 5 dargestellt. Der Absorptionsgrad der Absorber ist in Anlage A in Bild A 2 gezeigt.



Bild 5: Foto des Messaufbaus im Halb-Freifeldraums des IBP.

Der Aufbau ermöglichte die Messung der Einfügungsdämmung von kleineren Heckenelementen, die auf Höhe der Blendenöffnung direkt hinter der Blende eingesetzt wurden. Dabei wurde sichergestellt, dass vor allem der durch die Blendenöffnung und durch das Heckenelement hindurch tretende Direktschall beurteilt wurde. Durch die Messung der Einfügungsdämmung wurden Einflüsse wie z.B. Reflexion oder Beugung an den Blendenkanten auf die Messergebnisse reduziert.

Die Freifeldbedingung im Bereich des Messaufbaus wurde in Anlehnung an ISO 3745 Anhang A [42] messtechnisch überprüft.

Hierbei wurde vom Lautsprecher durch die Blendenöffnung bis zur späteren Messposition hinter der Hecke ein Pfad parallel zum Boden definiert. Mit einem Abstand von 0,50 m von der Quelle ausgehend, wurde mit jeweils 0,10 m Abständen der Schalldruckpegel auf dem Pfad in Terzen von 50 Hz bis 10 kHz gemessen. Die Quelle stand mittig zur Kanalöffnung mit einem Abstand von 0,5 m zur Blende auf Höhe des Messpfads. Der Aufbau ist in Bild 6 schematisch dargestellt.

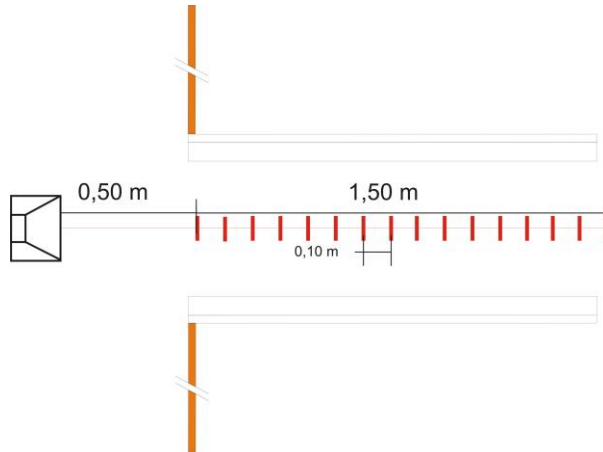


Bild 6: Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Ermittlung der Freifeldbedingungen hinter der Blende.

Mit der Gleichung (4) für Freifeldbedingung errechnet sich der zu erwartende Pegel am Messpunkt x auf dem Pfad mit

$$L_p(x) = L_p(0) - \Delta L. \quad (23)$$

Mit $L_p(x)$ dem Schalldruckpegel am Messpunkt x in dB und $L_p(0)$ dem Schalldruckpegel am Messpunkt o im Abstand von 0,5 m von der Quelle in dB. Für die maximal zulässige Abweichung der Messwerte vom berechneten Wert $L_p(x)$ wurde der Toleranzbereich der ISO 3745 verwendet. Dieser ist in Tabelle 1 niedergelegt.

Prüfraum	Terz-Mittenfrequenz in Hz	Zulässige Abweichung in dB
Reflexionsarmer Raum	≤ 630	$\pm 1,5$
	800 bis 5000	$\pm 1,0$
	≥ 6300	$\pm 1,5$

Tabelle 1: Zulässige Abweichungen der Schalldruckpegel für Freifeldbedingungen auf dem Messpfad nach ISO 3745 [42].

Für die Auswertung wurde ein vom IBP entwickeltes Rechenprogramm verwendet, das eine Regressionsgerade durch alle Messpunkte zur Beurteilung der Abweichungen verwendet. Das Messsignal war rosa Rauschen, die Messzeit betrug 12 s. Bild 7 sind die Abweichungen von den zu erwartenden Werten bei Freifeldausbreitung dargestellt.

Frequenz [Hz]	Entfernung Schallquelle - Mikrofon in [m]																
	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	
50	0,7	0,0	-0,4	0,0	0,2	0,3	0,1	0,2	-0,2	-0,3	0,0	-0,4	-0,3	0,1	-0,7	-0,5	
63	-0,7	-0,4	-0,4	-0,1	0,2	0,0	0,3	0,6	0,4	0,2	0,3	0,7	0,5	0,2	0,4	0,0	
80	0,8	1,0	0,9	0,9	0,4	-0,3	-0,5	-1,0	-0,7	-0,6	-0,6	-0,2	-0,4	0,1	0,1	-0,1	
100	1,1	1,1	1,4	1,3	0,8	0,6	0,4	0,1	-0,1	-0,4	-0,1	-1,0	-1,8	-1,4	-1,9	-2,1	
125	-0,8	-0,5	-0,4	-0,2	-0,7	-0,4	-0,4	-0,1	-0,2	0,3	0,7	0,8	0,2	0,4	0,0	0,4	
160	-0,6	-0,7	-0,8	-0,3	-0,2	-0,4	-0,4	-0,6	-0,7	-0,5	-0,4	-0,7	-0,2	0,1	0,5	0,8	
200	1,0	1,2	1,2	1,3	1,1	0,7	0,5	0,1	0,1	-0,1	-0,4	-0,9	-1,2	-0,9	-1,3	-1,3	
250	0,3	0,7	1,2	1,3	0,7	0,9	0,9	0,6	0,0	0,1	-0,4	-0,5	-1,2	-1,3	-2,1	-1,9	
315	0,8	0,7	1,2	1,5	1,0	0,9	0,6	0,5	-0,1	-0,3	-0,2	-0,4	-1,0	-1,5	-2,0	-1,8	
400	1,4	1,0	0,9	1,0	0,8	0,3	0,0	-0,3	-0,9	-1,0	-1,4	-2,2	-2,5	-2,9	-3,9	-3,8	
500	1,4	-0,1	-0,2	0,0	0,1	-0,2	-0,2	-0,5	-0,8	-1,2	-1,4	-1,8	-2,3	-2,6	-2,7	-3,2	
630	1,5	0,2	-0,1	0,3	0,3	0,1	0,3	0,2	0,2	-0,2	-0,5	-0,8	-1,0	-1,3	-1,8	-1,5	
800	0,8	0,4	-0,3	-0,1	0,0	0,0	0,4	0,4	0,6	0,3	0,1	0,1	-0,1	-0,5	-0,6	-0,8	
1000	0,0	0,1	-0,1	-0,4	-0,3	-0,3	0,1	0,2	0,4	0,3	0,2	0,4	0,3	0,0	-0,1	-0,1	
1250	-0,9	-0,5	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,6	0,6	0,7	0,9	0,7	0,5	0,5	
1600	-0,5	-1,0	-0,2	0,7	0,9	0,9	0,7	0,5	0,6	0,8	0,8	0,9	0,8	0,9	0,9	1,0	
2000	-0,2	-0,8	-0,8	-1,0	-0,7	0,0	0,8	1,0	1,2	1,5	1,7	1,7	1,3	1,5	1,5	1,4	
2500	0,8	0,2	0,1	0,2	-0,6	-0,9	-0,3	0,3	0,9	1,7	2,2	2,5	2,3	2,8	3,0	3,0	
3150	0,5	0,2	0,2	0,4	0,5	0,3	0,2	-0,1	-0,5	-0,8	-0,9	-0,8	-0,8	-0,1	0,4	0,9	
4000	0,8	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,7	0,5	0,0	-0,3	-0,6	-0,8	-0,6	-0,3	0,1	
5000	-0,1	-0,1	-0,1	0,1	0,1	0,3	0,5	0,6	0,8	1,0	0,8	0,3	-0,2	-1,0	-1,4	-1,4	
6300	0,1	-0,2	-0,3	0,0	-0,2	-0,4	-0,2	-0,3	-0,2	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,1	0,1	
8000	0,6	0,2	0,1	0,2	0,2	0,0	0,2	0,1	0,1	-0,2	-0,5	-0,6	-0,7	-0,1	0,5	0,7	
10000	0,3	0,1	0,0	0,1	0,0	-0,1	0,0	0,0	0,2	0,1	-0,3	-0,2	-0,2	0,2	0,1	0,2	

Bild 7: Abweichung der Schallpegel im Blendenaufbau von den Freifeldbedingungen in Anlehnung an EN ISO 3745 Anhang A [42]. Der Abstand der Quelle betrug 0,5 m.

Für den Lautsprecherabstand von 0,5 m zeigte sich ein Freifeldverhalten im kompletten Frequenzbereich bis zu einem Abstand von 1,3 m. Freifeldbedingungen bis 2,0 m in den meisten Frequenzbändern gegeben. Ausnahmen bilden die Terzmittenfrequenzen 100 Hz, 400 Hz, 500 Hz, 2000 Hz, 2500 Hz und 5000 Hz. Diese Abweichung von diesen Freifeldbedingungen kann jedoch akzeptiert werden, da die Messungen der Einfügungsdämmung den Einfluss dieser Abweichungen auf die Messergebnisse deutlich reduziert. Allerdings sollte die Beugung um den Messaufbau herum keinen Einfluss haben.

Aus diesem Grund wurde die Beugung um die Blende herum messtechnisch und rechnerisch untersucht. Hierzu wurde die in Kapitel 3.7 beschriebene Abschätzformel verwendet. Bei der Messung wurde die Blendenöffnung mit einer Sperrholzplatte geschlossen und die Einfügungsdämmung der geschlossenen Blende (nur Beugung) bestimmt. Der Messaufbau ist in Bild 8 gezeigt.

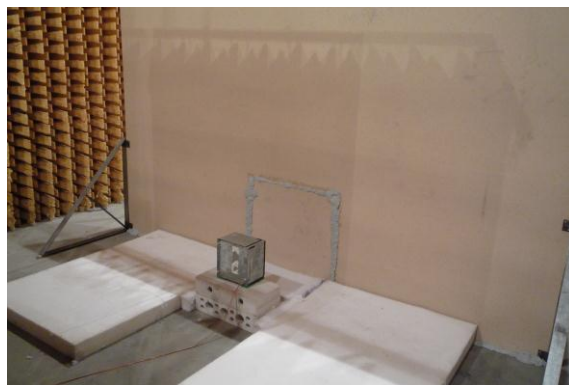


Bild 8: Messaufbau zur Bestimmung der Beugung um die Blende herum durch Verschließen der Blendenöffnung mittels Sperrholzplatte.

Die Messung der Einfügungsdämmung mit der vollständig geschlossenen Blende wurde in einem Messabstand von 0,7 m hinter der Blende in einer Höhe von 0,35 m durchgeführt. Der Lautsprecher war in einem Abstand von 0,5 m vor der Blende in einer Höhe von 0,35 m aufgestellt. Auf der Sende- und der Empfangsseite wurden wiederum Caruso Iso Bond-Absorbern ($d = 100$ mm) zur Reduktion von Bodenreflexionen eingesetzt. Das Messergebnis ist in Bild 9 der Berechnung gegenüber gestellt. Zusätzlich sind Ergebnisse eines Bewuchses aus der Literatur für einen Strauch „Wolliger Schnellball“ (*Viburnum lantana*) in Bild 9 gezeigt.

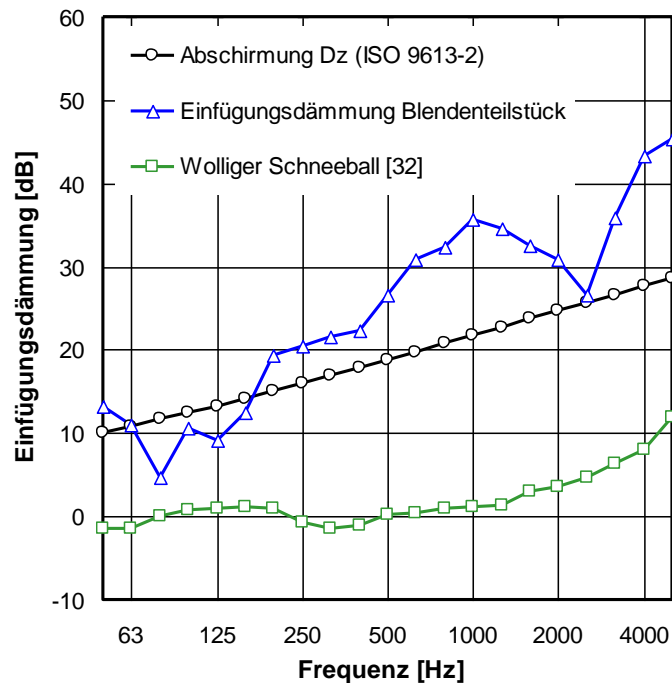


Bild 9: Einfügungsdämmung der geschlossenen Blende, der nach ISO 9613-2 berechneten Einfügungsdämmung (Abschirmung) sowie der Einfügungsdämmung einer Pflanze „Wolliger Schneeball“ [32].

Der Vergleich der Messwerte und der berechneten Abschirmung sind relativ ähnlich. Bis auf die tiefen Frequenzen zwischen 80 und 160 Hz liegen die Messwerte über den berechneten Werten. Die Einfügungsdämmung, die durch die Beugung begrenzt ist, beträgt bei tiefen Frequenzen Werte von ca. 10 dB, die mit steigender Frequenz ansteigen. Sie erreichen bei 1000 Hz Werte von ca. 20 dB, bei 5000 Hz fast 30 dB und liegt damit deutlich höher als die Dämmwirkung der Vegetation. Damit ist der Prüfstand geeignet, die Direktdämmung von Hecken und Gehölzen zu untersuchen.

Bei später durchgeführten Messungen wurde die Lautsprecherposition auf 1 m Abstand zur Blende vergrößert. Der Grund dafür war, dass sich dann die Hecke im Fernfeld des Lautspechers, siehe Abschnitt 3.3, befand. Damit ändert sich die Geometrie der Übertragungssituation bei Beugung um die Blende, was zu einer etwas reduzierten Einfügungsdämmung durch Beugung führt (ca. 1 dB). Diese ist in Bild 10 dargestellt.

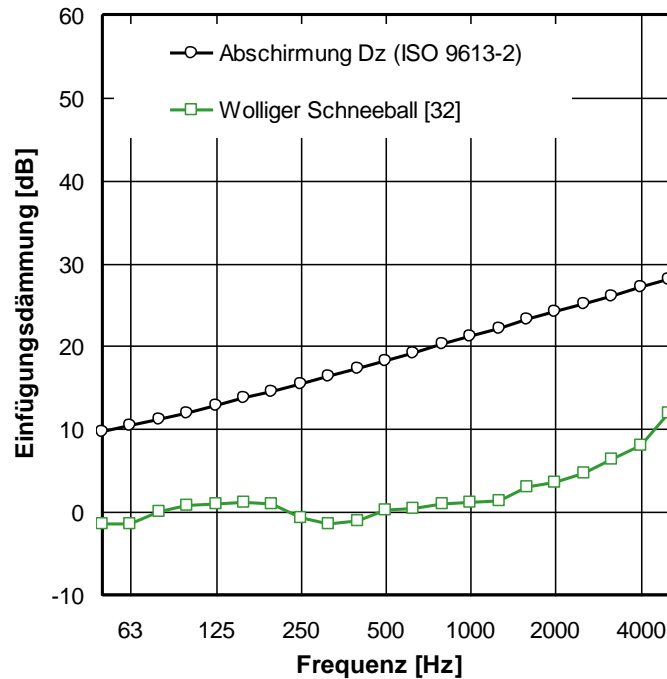


Bild 10: Einfügungsdämmung nach ISO 9613-2 für einen Lautsprecherabstand von 1,0 m bei gleichem Abstand des Mikrofon, sowie der Einfügungsdämmung eines Wolligen Schneeball-Strauchs [32].

4.4 Messungen mit Intensitäts-Sonde

Zusätzlich zu einem einfachen Messmikrofon lässt sich auch eine sogenannte Intensitäts-Sonde zur Ermittlung der Schallintensität einsetzen. Hierbei wird Schalldruck und Schallschnelle ermittelt. Die eingesetzte Sonde des Herstellers Microflown basiert auf einem Mikrofon und einem Hitzdraht, der direkt die Schallschnelle detektiert. Diese wird als P-U-Sonden bezeichnet. Der Vorteil der Verwendung von Intensitätssonden besteht darin, dass sie in diesem Fall die Bestimmung des Reflexions- Transmissions-, Dissipations- und Absorptionsgrads der Hecke ermöglichen.

Bei dieser Messung wird die Schallintensität vor und hinter dem Element gemessen. Dies geschieht im Aufbau mit und ohne Heckenelement. Die Messung ohne Heckenelement ist in Bild 11 gezeigt.

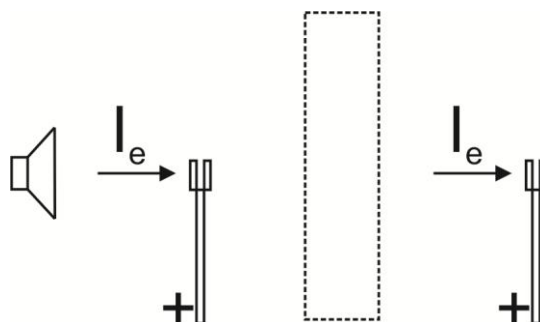


Bild 11: Messung der Intensität der einfallenden Schallwelle vor der späteren Position der Hecke und dahinter (Position der Hecke gestrichelt dargestellt).

Bei der Messung ohne Heckenelement wird die Intensität der auf das Objekt einfallenden Schallintensität I_e sowie die Intensität der ungehindert sich ausbreitenden Schallwelle hinter der Position der Hecke gemessen. Die zweite Messung mit Heckenelement ist in Bild 12 dargestellt.

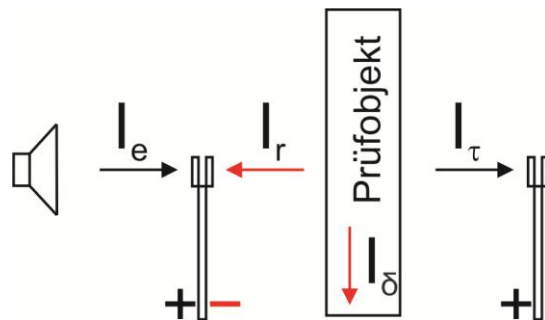


Bild 12: Messung der Intensität der einfallenden Schallwelle und der reflektierten Schallwelle vor der Position der Hecke und Messung der Intensität der durchgelassenen Welle hinter der Hecke.

Bei dieser Messung wird die auf die Hecke einfallende und die reflektierte Welle vor dem Objekt gemessen ($I_e + I_r$). Hinter dem Objekt wird die durch das Objekt durchgelassene Schallintensität I_τ ermittelt. Um eine quasi-ebene einfallenden Welle zu erhalten, wurde der Abstand des Lautsprechers vor der Blende auf 1,0 m erhöht.

Der Reflexionsgrad wird durch:

$$r = \frac{I_r}{I_e}; \quad (24)$$

bestimmt. Dabei ist I_e die auftreffende Schallintensität in W/m^2 und I_r die reflektierte Schallintensität in W/m^2 .

Der Transmissionsgrad ist

$$\tau = \frac{I_\tau}{I_e}; \quad (25)$$

dabei ist I_τ die transmittierte Schallintensität in W/m^2 . Der Absorptionsgrad ist

$$\alpha = \frac{I_\alpha}{I_e} \quad (26)$$

mit I_α der absorbierten Schallintensität in W/m^2 . Dabei ist

$$\alpha + \rho = 1 \quad \text{bzw.} \quad \alpha = 1 - \rho. \quad (27)$$

Die Absorption beinhaltet damit die gesamte Energie, die nicht transmittiert wird, also sowohl den reflektierten Anteil als auch den dissipierten Anteil. Der Dissipationsgrad ist:

$$\delta = \frac{I_{\delta}}{I_e} \quad (28)$$

Dabei ist I_{δ} die dissipierte Schallintensität. Der Dissipationsgrad kann berechnet werden aus Gleichung (10) mit:

$$\delta = \alpha - \tau \quad (29)$$

Durch die oben beschriebene Messung von I_e , $I_e + I_r$ und I_r lassen sich alle in Gleichung (25) bis Gleichung (28) beschriebenen Größen bestimmen.

4.5 Messungen der mechanischen Verluste

Die Dissipation innerhalb der Hecke kann z.B. durch die Grenzschicht am Rande der Blätter entstehen, bei der eine erhöhte Reibung der Luft vorliegt. Ebenso können die Blätter zu mechanischen Schwingungen angeregt werden, die durch Reibung Energie in Wärme umwandeln. Dieser Anteil der Dissipation kann durch die im Folgenden beschriebenen Untersuchung quantifiziert werden.

Der Verlustfaktor η ist ein Maß, um die inneren Verluste von Materialien zu beschreiben. Er besteht aus der Summe aller Verluste, die in einer Struktur auftreten. Dazu zählen die inneren Verluste durch Reibung, aber auch Verluste durch Abstrahlung. Messtechnisch lässt sich der Verlustfaktor einer Struktur am einfachsten über die Messung der Körperschallnachhallzeit T bestimmen. Der Verlustfaktor ist dann

$$\eta = \frac{2,2}{f * T}, \quad (30)$$

mit f der Frequenz in Hz und T der Körperschallnachhallzeit in s. Um den mechanischen Verlustfaktor der Blätter zu bestimmen kann deren Schwingung mit Hilfe eines Laser-Vibrometers berührungslos gemessen werden. Ebenso ist es möglich, die Nachhallzeit von Blättern mittels Laser-Vibrometer zu bestimmen.

Bei stationärer Anregung ist die in eine Struktur eingeleitete Leistung gleich der Leistung, die innerhalb der Struktur durch Verluste dissipiert wird. Nach Cremer und Heckl [43] ist die eingeleitete Schalleistung:

$$P_A = \eta \cdot \omega \cdot m \cdot \tilde{v}^2 \quad (31)$$

Mit ω der Kreisfrequenz in rad/s, m die Masse in kg und \tilde{v}^2 das gemittelte Schnellquadrat in (m/s)². Ist die Masse der Blätter bekannt, so kann die durch mechanische Verluste dissipierte Leistung bestimmt werden.

Zusätzlich wurde bei gleicher Anregung die einfallende Schallintensität mittels PU-Sonde gemessen. Ist die Blattfläche bekannt, so kann die auf das Blatt einfallende akustische Leistung wie folgt bestimmt werden:

$$P_E = I \cdot A, \quad (32)$$

mit I der gemessenen Intensität und A der Blattfläche. Aus (31) und (32) kann der Anteil an mechanischen Verlusten durch das Blatt bestimmt werden.

$$V_{mech} = \frac{P_A}{P_E} \quad (33)$$

4.6 Messung der Einfügungsdämmung im Freien

Neben Messungen im Labor wurden auch Messungen im Freien durchgeführt. Bei der Auswahl der Hecken wurde darauf geachtet, dass eine dicht belaubte äußere und innere Struktur vorhanden war. Zusätzlich spielten aber auch die Verfügbarkeit der Hecke (Erlaubnis zur Messung), geringe Reflexionen von umgebender Bebauung etc. bei der Auswahl eine Rolle.

Bei den Messungen an Hecken im Freien wurde die Einfügungsdämmung (Kapitel 3.6) bestimmt. Die Lautsprecherposition lag wie bei den meisten Laboruntersuchungen bei 0,5 m vor der ersten "dichten Blattrihe". Damit konnten Beugungseffekte um das Prüfobjekt weitgehend ausgeschlossen werden. Die Höhe von Lautsprecher und Mikrofon betrug 0,6 m.

Die Mikrofone wurden in axialer Ausrichtung zum Quellzentrum aufgestellt. Die Übertragungsstrecke vom Lautsprecher zum Mikrofon war rechtwinklig zur Hecke angeordnet. Bei den meisten Hecken wurde an zwei verschiedenen Messpositionen jeweils im Abstand von 0,5 m und 0,8 m zur Hecke (Mikrofon) die Einfügungsdämmung bestimmt. Damit konnten vier Messungen an jeder Hecke durchgeführt werden. Der schematische Messaufbau ist in Bild 13 dargestellt.

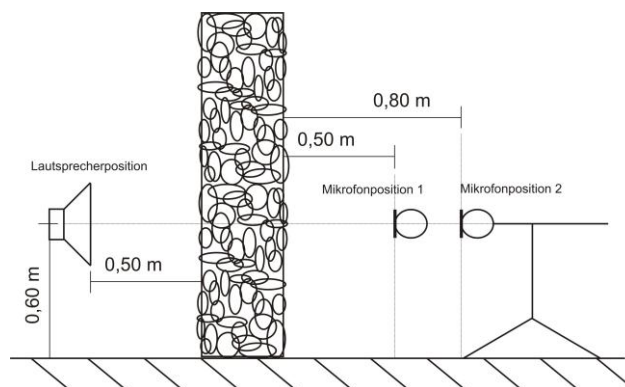


Bild 13: Schematischer Messaufbau bei Messungen der Einfügungsdämmung im Freien.

Für die Referenzmessung (ohne Hecke) wurden drei Messungen an drei verschiedenen Stellen auf nahe liegenden freien Grasflächen durchgeführt und gemittelt. Dies erfolgte unter gleichen meteorologischen (Temperatur, Windrichtung, Windgeschwindigkeit etc.) und geometrischen Bedingungen. Bei der Anregung wurde darauf geachtet, dass die gemessenen Schalldruckpegel weit genug über dem Grundgeräusch lagen. Angeregt wurde mit rosa Rauschen. Die Messdauer betrug 12 s. Um Schallreflexionen an den umliegenden Gebäuden zu vermeiden, wurden kritische Gebäudeflächen bis zu einer Höhe von 1,5 m mit Caruso Iso Bond-Absorbern (Maße: Länge 1,50 m, Breite 0,50 m und Dicke 0,10 m) abgedeckt. Details der Messungen werden in den entsprechenden Abschnitten genannt.

5 Eigenschaften von Hecken - Messungen im Labor

5.1 Voruntersuchungen

5.1.1 Messung der Schalldämmung von Blattflächen

In ersten Voruntersuchungen wurden die akustischen Eigenschaften von Blattflächen und von heckenartigen Anordnungen untersucht. Das Kundt'sche Rohr ermöglicht hierfür eine einfache Handhabung der Prüfobjekte und relativ kleine Prüfkörper, jedoch einen eingeschränkten Frequenzbereich aufgrund des Querschnitts des Rohres von 40 bis 1000 Hz. Negative Werte der Einfügungsdämmung sind auf die Messgenauigkeit und die Güte des reflexionsarmen Abschlusses zurückzuführen. Der Aufbau und das Rohr sind im Anhang in Bild B 2 und B 3 gezeigt.

Untersucht wurden die Blätter des Blutroten Hartriegels (*Cornus sanguinea*) mit einer Blattdicke von ca. 0,15 mm, zum anderen die der Roten Heckenkirsche (*Lonicera xylosteum*) mit einer Blattdicke von ca. 0,20 mm. Beide Blattarten wiesen in etwa die gleiche Größe auf. Gemessen wurde die Einfügungsdämmung bzw. der Absorptionsgrad der Blätter. Hierbei wurden mehrere der zu untersuchenden Blätter zugeschnitten und zu einer Fläche von 25 x 25 cm verklebt. Diese wurden in einem doppelten, dünnen Holzrahmen fixiert (siehe Anhang Bild B 4). Es wurde besonders darauf geachtet, dass die Überlappungen zwischen den Blättern und auch die Klebstoffmenge so gering wie möglich gehalten wurden.

Zunächst wurde der frequenzabhängige Schalldruckpegel im Kundt'schen Rohr mit eingebautem, leerem Holzrahmen gemessen. Daraufhin wurde der Rahmen mit der Probe bestückt und die daraus resultierende Einfügungsdämmung ermittelt. Um einen reproduzierbaren Vergleichswert zu erhalten, wurde in gleicher Weise die Schalldämmung eines Blattes Papier gemessen. Die frequenzabhängige Einfügungsdämmung ist in Bild 14 dargestellt.

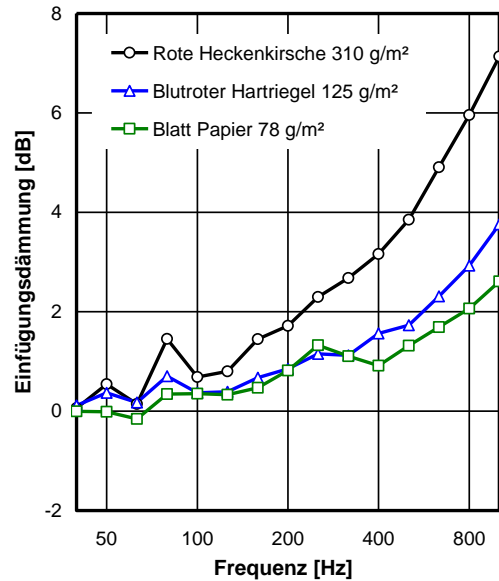


Bild 14: Einfügungsdämmung der Blattflächen des Blutroten Hartriegels, der Roten Heckenkirsche und eines Blattes Papier von 40 bis 1000 Hz.

Vom Blutroten Hartriegel wurden drei, von der Roten Heckenkirsche wurden zwei Proben erstellt und auf ihre dämmenden Eigenschaften untersucht. Die Unterschiede der Einfügungsdämmung bei Blättern der gleichen Pflanzenart waren gering und wurden gemittelt in Bild 14 dargestellt.

Der frequenzabhängige Anstieg der Einfügungsdämmung erscheint bei allen Proben relativ ähnlich. Das Verhalten ist typisch für leichte, biegeeweiche Materialien. Die Messergebnisse des herkömmlichen Blatt Papiers mit etwas geringerer Masse waren ähnlich zu den Ergebnissen des Blutroten Hartriegels. Ab 400 Hz aufwärts war die Dämmwirkung der etwas schwereren Blattfläche etwas höher. Die Blattfläche der Roten Heckenkirsche dagegen besitzt aufgrund des höheren Flächengewichts eine deutlich höhere Einfügungsdämmung.

Die bei 80 Hz vorkommenden Maxima sind auf die Güte des reflexionsarmen Abschlusses oder die Einspannbedingungen der Blattflächen zurückzuführen.

5.1.2 Berechnung der Schalldämmung von Blattflächen

Die Schalldämmung für dünne Platten oder Membranen bei nicht-resonanter bzw. erzwungener Übertragung mit $f \ll f_g$ kann nach Cremer und Heckl [43] berechnet werden mit:

$$R = 10 \lg \left(1 + \left[\frac{2\pi f m' \cos \theta}{2\rho_L c} \right]^2 \right) \text{ dB.} \quad (34)$$

Dabei ist f die Frequenz in Hz, m' die flächenbezogene Masse in kg/m^2 , θ der Schalleinfallswinkel, hier $\theta=0$ und $\rho_L c$ die Schallkennimpedanz für Luft ($\rho_L c = 414 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$).

Da die Blätter biegeweich sind, gilt die Berechnung der Schalldämmung nach Gleichung (34) für den gesamten gemessenen Frequenzbereich. Der Verlauf der Messwerte und den nach Gleichung (34) berechneten Werten für die Blattfläche der Roten Heckenkirsche und der Blattfläche des Blutroten Hartriegels ist in Bild 15 gezeigt. Die messtechnisch ermittelten Werte zeigen bis ca. 400 Hz eine deutlich höhere Einfügungsdämmung als die Rechnung. Oberhalb 630 Hz kommt es bei der Roten Heckenkirsche zu höheren berechneten Werten. Bei dem Blutroten Hartriegel liegen die Messwerte im gesamten Frequenzbereich etwas höher als die Rechnung. Derer Frequenzverlauf von Messung und Rechnung zeigt tendenziell eine gute Übereinstimmung. Insgesamt verhalten sich die Blätter im Wesentlichen wie biegeweichere Massen.

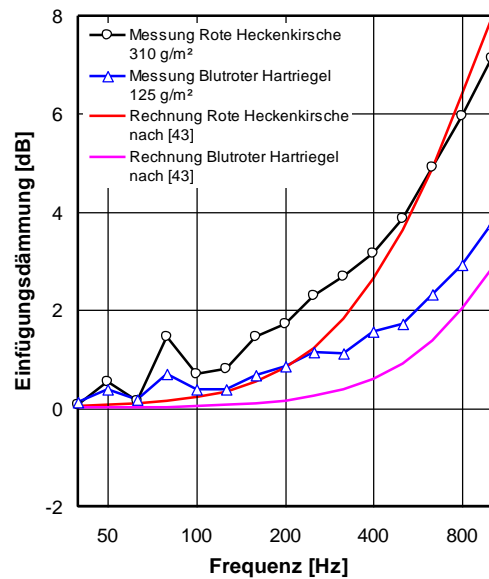


Bild 15: Einfügungsdämmung der Blattfläche der Roten Heckenkirsche bzw. der Blattfläche des Blutroten Hartriegels. Vergleich der Messwert mit Rechenwerten nach [43].

5.1.3 Schallabsorption von Blattflächen

Weiterhin wurde die Schallabsorption der Blattflächen bestimmt. Die Messungen erfolgten wie in Kapitel 4.1 beschrieben. Die Ergebnisse sind in Bild 16 dargestellt.

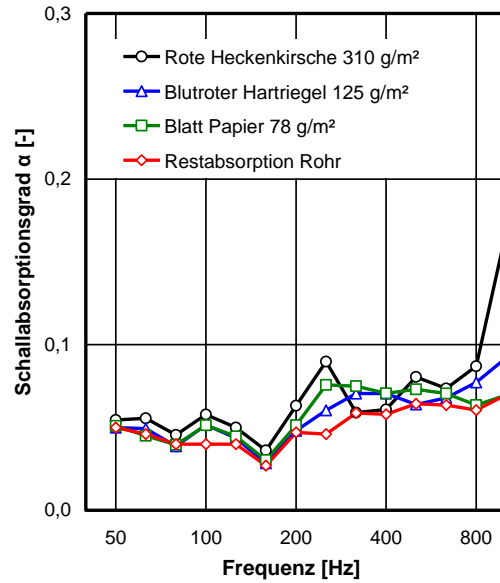


Bild 16: Schallabsorptionsgrad der Blattfläche aus Blutrotem Hartriegel, der Blattfläche aus Roter Heckenkirsche und einem Blatt Papier von 50 bis 1000 Hz.

Bei dem Messaufbau wurde die Blattfläche mittels Holzrahmen am Ende des Kundt'schen Rohrs vor dem reflektierenden Abschluss fixiert. Bei allen vier untersuchten Proben schwankt der Absorptionsgrad über den gesamten messbaren Frequenzbereich zwischen 0,05 und 0,10. Die Streuung zwischen Blättern der gleichen Pflanzenart war auch hier gering. Zusätzlich zu den Messwerten der Blattflächen ist die Restabsorption des Rohres aufgetragen. Die Messwerte der Proben liegen nur geringfügig über der Restabsorption des Rohres. Damit zeigt sich, dass die Blätter selbst keine oder nur eine sehr geringe Absorption aufweisen.

5.1.4 Schalldämmung von dichten Blatt-Volumina

Die wesentlichen Eigenschaften von Hecken und Gehölzen beruhen nicht auf den Eigenschaften der Blätter und den Ästen selbst, sondern auf der Anordnung der Blätter. Daher wurden in weiteren Voruntersuchungen die Anordnung heckenähnliche Pflanzenkonstruktionen im Kundt'schen Rohr untersucht. Bei den Untersuchungen wurde insbesondere das akustische Verhalten der Anordnung in Bezug auf Gewicht, Blattdichte sowie Dicke der Konstruktion untersucht. Hierzu wurde eine Gitterbox aus Drahtgeflecht mit den Maßen 250 mm x 250 mm x 170 mm erstellt, mit deren Hilfe es möglich war, diverse Heckenanordnungen mit Blättern und Geäst im Kundt'schen Rohr zu untersuchen.

Als Referenzwert wurde zunächst die leere Gitterbox im Rohr vermessen. Das Ergebnis zeigte, dass die Gitterbox nur sehr geringe Auswirkung auf das Schallfeld hat. Für die eigentliche Messung wurden zunächst ca. 25 cm lange Stiele (mit Blättern) des Strauches Blutroter Hartriegel (*Cornus sanguinea*) in der Gitterbox ungeordnet, aber gleichmäßig verteilt eingebracht. Ebenso wurde auch bei der Messung der Roten Heckenkirsche (botanischer Name: *Lonicera xylosteum*) verfahren. Die Gitterbox mit Heckenmaterial ist in Bild 17 dargestellt.



Bild 17: Gitterbox gefüllt mit Rotem Hartriegel im Kundt'schen Rohr (Füllgewicht 300 g) bei der Messung der Einfügungsdämmung.

Blattwerk und Äste des Blutroten Hartriegels wurde mit einer Füllmasse von 92 g (Fülldichte $8,7 \text{ kg/m}^3$) sowie von 185 g (Fülldichte $17,4 \text{ kg/m}^3$) untersucht. Für die Rote Heckenkirsche wurde eine Füllmasse von 185 g (Fülldichte $17,4 \text{ kg/m}^3$) und von 300 g ($28,2 \text{ kg/m}^3$) verwendet. Dabei war die Füllmasse von 300 g deutlich über der Masse angesiedelt, die bei natürlichem Bewuchs auftritt. Bei allen Messungen wurden frisches Pflanzenmaterial verwendet. Bei jeder Messreihe wurden wenigstens 4 Einzelmessungen durchgeführt und der Mittelwert dieser Messungen berechnet. Die gemessene Einfügungsdämmung ist in Bild 18 dargestellt.

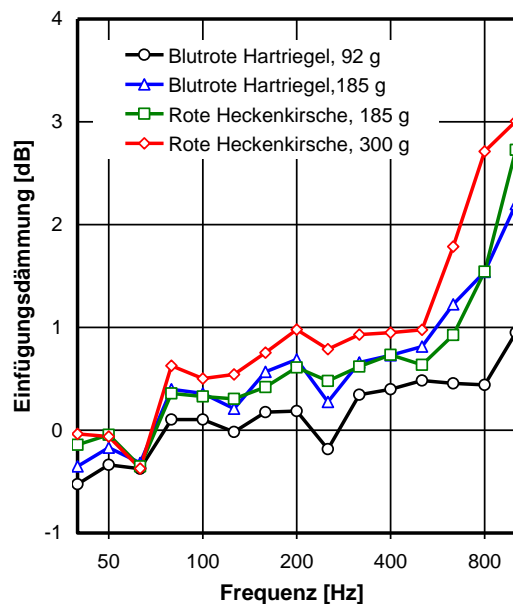


Bild 18: Einfügungsdämmung von Pflanzenmaterial (Blätter und Äste) von Roter Heckenkirsche und Blutrotem Hartriegel in einer Gitterbox.

Die Einfügungsdämmung des Pflanzenmaterials steigt mit zunehmender Frequenz und Füllmasse stetig an. Für beide Pflanzenarten ist der Verlauf der Dämmung bei gleicher Füllmasse sehr ähnlich. Da die beiden Pflanzen Blutroter Hartriegel und Rote Heckenkirsche unterschiedliche Blattdicken ausbilden, scheint die Blattdicke der untersuchten Pflanzenarten nur eine untergeordnete Rolle zu spielen, dagegen erscheint die Dichte des Pflanzenmaterials im Volumen entscheidend für die Einfügungsdämmung zu sein. Bei den Messergebnissen fällt auf, dass bei allen Proben bei hohen Frequen-

zen ein deutlicher Anstieg der Dämmung einsetzt. Dieser tritt bei niedrigeren Frequenzen auf, je größer die Füllmasse war.

5.1.5 Schallabsorption von dichten Blatt-Volumina

Neben der Schalldämmung wurde für die Proben aus Blutrotem Hartriegel und Roter Heckenkirsche die Schallabsorption nach Kapitel 4.1 bestimmt. Die Ergebnisse sind in Bild 19 zu sehen.

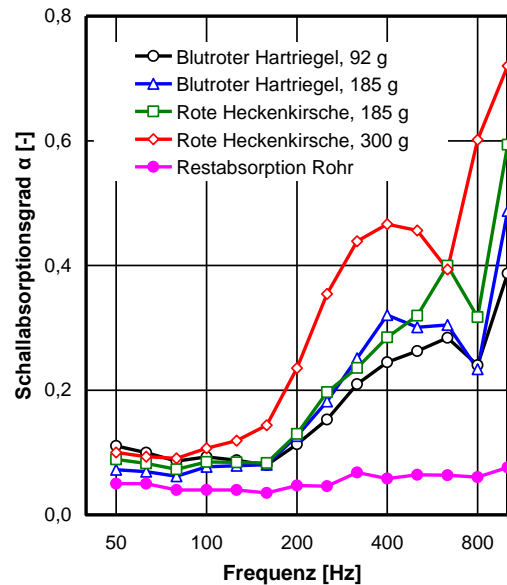


Bild 19: Schallabsorptionsgrade von Pflanzenmaterial (Blätter und Äste) von Roter Heckenkirsche und Blutrotem Hartriegel in einer Gitterbox.

Der Schallabsorptionsgrad steigt mit der Frequenz deutlich an und liegt ab ca. 200 Hz deutlich über der Restabsorption des Rohres. Lediglich bei 630 bzw. 800 Hz kommt es zu einem Einbruch des Schallabsorptionsgrades. Die Schallabsorption der Proben aus 92 g Blutrotem Hartriegel sowie aus 185 g Blutrotem Hartriegel und Roter Heckenkirsche sind relativ vergleichbar, einzig die Probe aus 300 g Roter Heckenkirsche besitzt höhere Werte über 0,5.

5.1.6 Zusammenfassung der Voruntersuchungen im Kundt'schen Rohr

Die untersuchten Blatt- und Geäst-Anordnungen sind als Modelluntersuchungen zu verstehen. Sie spiegeln in etwa die äußere Blattstruktur einer Hecke wieder, wobei die Dichte des Blattmaterials zum Teil höher war. Durch die Untersuchungen wird klar, dass selbst eine hohe Blattdichte wenig Einfluss auf das Einfügungsdämm-Maß bei tiefen Frequenzen hat. Allerdings steigt die Dämmung bei höheren Frequenzen an, und das Einsetzen des Anstiegs ist von der Dichte des Pflanzenmaterials abhängig. Für die Beurteilung der schalldämmenden Wirkung von Pflanzen sind die Messungen bis 1000 Hz nicht ausreichend.

5.2 Untersuchungen an Efeuelementen im Labor

5.2.1 Beschreibung der Efeuelemente

Die Voruntersuchungen zeigen, dass Messungen im Labor im gesamten relevanten Frequenzbereich notwendig sind, um das akustische Verhalten von Hecken und Gehölzen zu untersuchen. Hierzu wurde der in Kapitel 4.3 beschriebene Messaufbau verwendet. Für die Messung im Labor wurden reale Hecken gesucht, die mobil und für Messungen im Labor geeignet waren. Nach eingehender Recherche wurde hierfür ein Anbieter gefunden, der Hecken in mobilen Elementen anbietet. Dabei handelt es sich um Rankgerüste mit integrierter Substrat-Halterung, so dass die Pflanzen in diesen Gerüsten heranwachsen können und bei Bedarf schnell zu Hecken zusammengesetzt werden können. Zwei solcher Efeuheckenelemente der Firma Helix Pflanzen wurden auf ihr akustisches Verhalten untersucht. Die Elemente sind in Bild 20 gezeigt.



Bild 20: Mobile Efeuelemente mit den Pflanzen Hedera helix "Woernerii" der Helix Pflanzen GmbH.

Die in Bild 20 dargestellten Elemente zeigen am unteren Bildrand das Pflanzsubstrat. Beide Elemente waren relativ dicht bewachsen, besaßen jeweils eine Breite von 1,2 m, eine Höhe von 1,8 m und eine Bewuchsdicke von ca. 0,125 m. Da die Dicke nicht einer realen Hecke entsprach, wurden zwei Elemente zu einem gesamten Element zusammengefügt und entsprach in etwa einer ausgewachsenen Helix-Hecke (Aussage des Herstellers). Ein Bild des Efeu-Blattes mittlerer Größe mit seinen Abmessungen ist im Anhang in Bild C 1 gezeigt.

5.2.2 Messung auf einem Pfad durch die Hecke

Der Messaufbau ist in Bild 21 dargestellt.

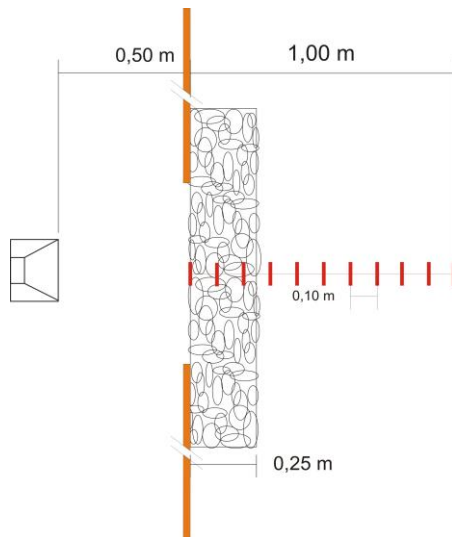


Bild 21: Horizontalschnitt der Messung der Einfügungsdämmung im Labor. Die roten Linien kennzeichnen die Messpunkte in und hinter des Heckenelements.

Angeregt wurde mit Rosa Rauschen. Die Messzeit betrug 12 s. Gemessen wurde die Einfügungsdämmung des Efeuelements auf einem Messpfad in und hinter der Hecke. Die Quelle war bei dieser Messserie 0,50 m von der Blende entfernt. Die einzelnen Messpunkte waren, beginnend auf Höhe der Blende innerhalb der Hecke, in 10 cm Abständen bis einschließlich 1,5 m von der Quelle entfernt angeordnet. Damit ergaben sich 11 Messpunkte, von denen drei innerhalb der Hecke lagen. Damit sollte untersucht werden, wie sich das Schallfeld innerhalb und hinter der Hecke einstellt und ab welcher Entfernung / Heckendicke eine Einfügungsdämmung auftritt. Die Referenzmessungen wurden ohne das Prüfobjekt bei offenem Blendenausschnitt an denselben Messpositionen durchgeführt, so dass für jede Position eine Einfügungsdämmung ausgewertet werden konnte. Die Messergebnisse sind in Bild 22 und in Bild 23 dargestellt.

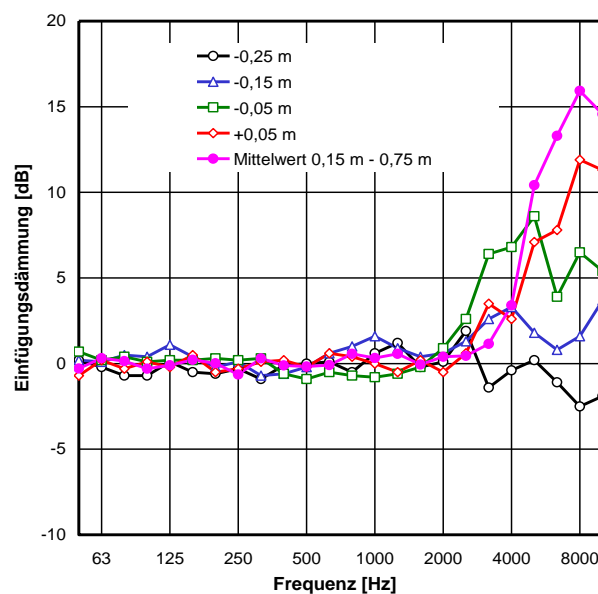


Bild 22: Einfügungsdämmung des Efeuelements im Labor. Der Abstand der Messpunkte bezieht sich auf die dem Mikrofon zugewandten Heckenoberfläche. Negative Abstände beschreiben die Messwerte innerhalb der Hecke.

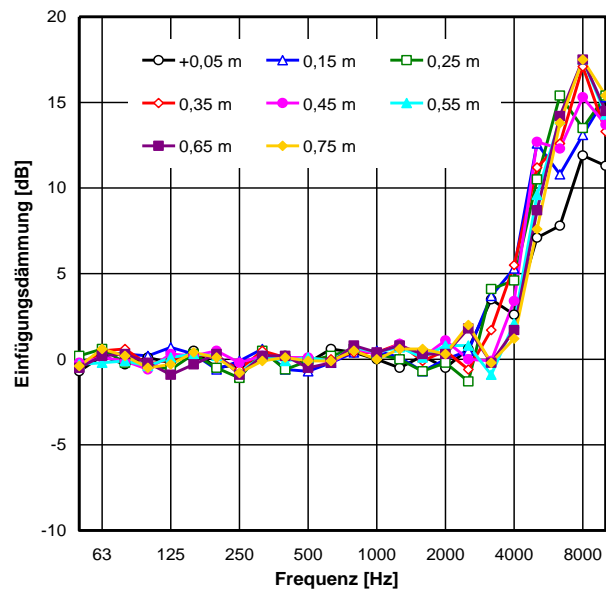


Bild 23: Einfügungsdämmung des Efeuelements im Labor. Der Abstand der Messpunkte bezieht sich auf die dem Mikrofon zugewandten Heckenoberfläche.

Die Messergebnisse zeigen bei tiefen und mittleren Frequenzen bis 2000 Hz keine Einfügungsdämmung. Dabei sind geringfügige Abweichungen von 0 dB der Messgenauigkeit geschuldet. Erst über 2000 Hz zeigt sich eine Wirksamkeit der Hecke. In der Eintrittsebene des Schalls in die Hecke (Messpunkt -0,25m) wird eine negative Einfügungsdämmung ermittelt. Hier könnte zum einen ein erhöhter Schalldruck durch Reflexion des Schalls an der Schichtgrenze Hecke auftreten, zum anderen könnte diese negative Einfügungsdämmung auch durch Streuung an umgebendem Blattwerk hervorgerufen werden. Bei Messpunkten, die weiter innerhalb der Hecke liegen, steigt die Einfügungsdämmung oberhalb 2000 Hz an. Weiterhin fällt auf, dass auch der erste Messpunkt außerhalb der Hecke (Messpunkt + 0,05 m in Bild 23) noch nicht die volle Einfügungsdämmung der gesamten Hecke misst, wie es der Mittelwert der weiter hinter der Hecke liegenden Messpunkte darstellt (Bild 25). An diesem Messpunkt scheint man noch im Nahfeld der Hecke zu liegen, bei dem Einflüsse der einzelnen gestreuten Schallanteile vorhanden sind. Alle weiter entfernten Messpositionen zeigen sehr ähnliche Werte mit einem deutlichen Anstieg ab 3150 Hz auf Werte von bis zu 15 dB bei 8000 Hz. Der Mittelwert sowie die Standardabweichung der Messpunkte hinter der Hecke sind in Bild 24 dargestellt.

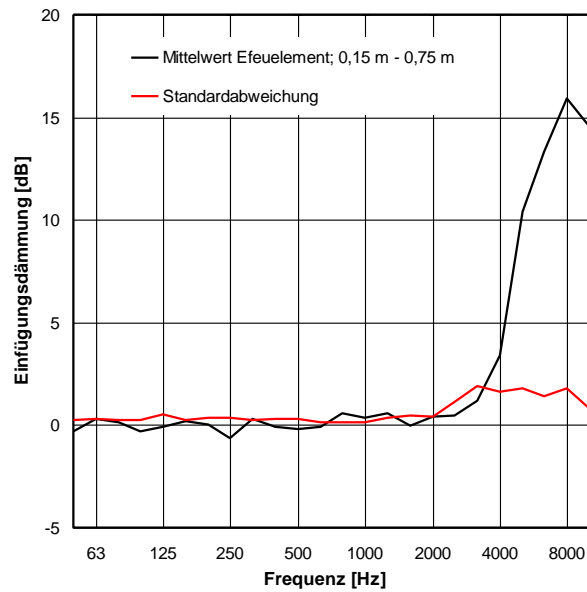


Bild 24: Mittelwert und Standardabweichung der Einfügungsdämmung an den Messpositionen 0,15-0,75 m hinter der Hecke.

Die Standardabweichung erreicht maximal 1,9 dB bei 3150 Hz. Unterhalb 2000 Hz liegt sie dagegen bei Werten von ca. 0,3 dB. Die Ergebnisse zeigen, dass die Messwerte der Einfügungsdämmung relativ geringen Schwankungen unterliegen. Weiterhin zeigen sie den typischen Verlauf der Einfügungsdämmung, der auch in der Literatur (z.B. Beck [32]) prinzipiell gefunden wurde. Allerdings war hier der Anstieg deutlich steiler, so dass die Einfügungsdämmung Werte über 15 dB bei 8000 Hz erreicht.

5.2.3 Streuung der Messwerte

Eine weitere Untersuchung war die Variation des gemessenen Heckenausschnitts. Dazu wurden die zwei Heckenelemente 8 mal gegeneinander verschoben und die Einfügungsdämmung bei einem festen Abstand von der Hecke ermittelt (Mikrofon 0,65 m von der Hecke entfernt). Die dabei ermittelten Werte sind in Bild 25 gezeigt.

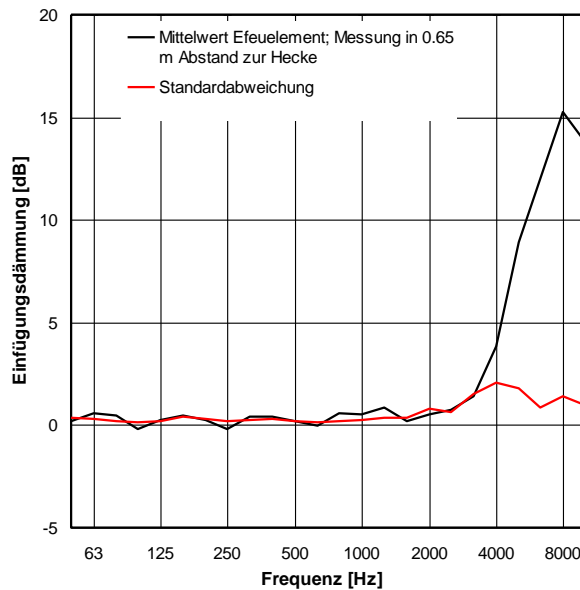


Bild 25: Mittelwert und Standardabweichung der Einfügungsdämmung an der Messposition 0,65 m hinter der Hecke. Werte von 8 Messungen an den gegeneinander verschoben Heckenelementen.

Die Ergebnisse in Bild 25 zeigen eine ähnliche Einfügungsdämmung der Hecke wie die Messungen an einer Stelle der Hecke in Bild 24. Auch die Standardabweichung zeigt ähnliche Werte. Die maximale Standardabweichung betrug hier 2,1 dB bei 4000 Hz. Da die Standardabweichung relativ gering ausfällt, wurden für weitere Messungen 4 Mittelungen durch Messung an zwei Messpositionen und mit jeweils zwei unterschiedlichen Entfernungen für die Messungen im Freien als ausreichend erachtet.

5.2.4 Bewertung der Efeuhecke für Lärmschutz-Zwecke

Um eine Bewertung der gemessenen Einfügungsdämmung bezüglich der Eignung der Hecken zum städtebaulichen Lärmschutz zu ermöglichen, wurde das standardisierte Verkehrslärmspektrum aus der DIN EN 1793-3 [36] herangezogen, Bild 4. Als einfaches Bewertungskriterium wurde der A-bewertete Summschallpegel verwendet. Dieser wurde ermittelt, in dem von dem im Bild 4 gezeigten Verkehrslärmspektrum die Einfügungsdämmung abgezogen wurde, und dann der A-bewertete Summschallpegel errechnet wurde. Das A-bewertete Verkehrslärmspektrum und das Verkehrslärmspektrum unter Berücksichtigung der Einfügungsdämmung der Efeuhecke sind in Bild 26 dargestellt.

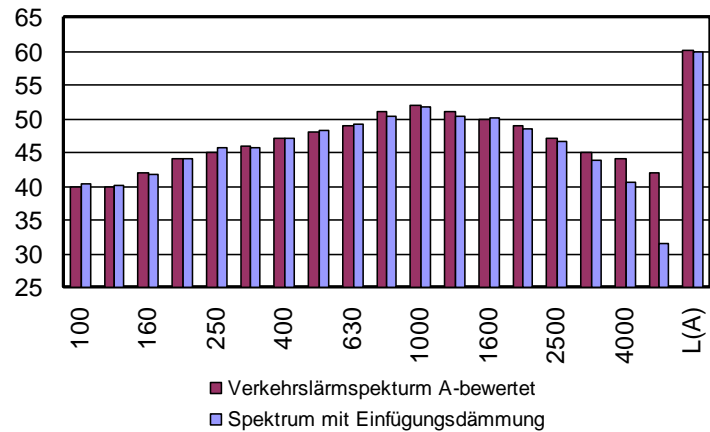


Bild 26: A-bewertetes Verkehrslärmspektrum nach DIN EN 1793-3 [36] und A-bewertetes Verkehrslärmspektrum unter Berücksichtigung der Einfügungsdämmung der Efeuhecke.

Der Vergleich beider Spektren zeigt, dass im entscheidenden mittleren Frequenzbereich die Pegelminderung sehr gering ist. Der erst oberhalb von 2000 Hz einsetzende Anstieg der Einfügungsdämmung hat für den A-bewerteten Summenpegel einen geringen Einfluss. Der A-Pegel wird durch die Hecke um ca. 0,4 dB gemindert.

5.2.5 Messung der mechanischen Verluste

An der Efeu-Hecke wurden die mechanischen Verluste bestimmt. Dabei wurde ein Scanning-Laser-Vibrometer der Firma Polytec, Typ PSV 300 eingesetzt. In der Blendenöffnung wurden 15 Blätter ausgewählt, bei denen die Schwingschnelle bei Anregung durch den Lautsprecher gemessen wurde. Dabei handelte es sich um Blätter mit repräsentativer Blattgröße, die rechtwinklig zur Schalleinfallrichtung ausgerichtet waren. Zusätzlich wurde die Nachhallzeit aller 15 Blätter mittels Laser-Vibrometer bestimmt. Hierzu wurde das Laser-Vibrometer als Sensor verwendet, die Messung wurde mittels MLS-Messtechnik eines Analysators vom Typ Norsonic 840 durchgeführt. Das verwendete Laser-Vibrometer ist in Bild 27 gezeigt.



Bild 27: Foto des Scanning-Laser-Vibrometers.



Bild 28: Foto der Hecke in der Blendenöffnung mit Nummerierung der gemessene Blätter.

In Bild 28 sind die gemessenen Blätter der Efeu-Hecke dargestellt. Zur Verbesserung der Reflexionseigenschaften der Blattoberflächen wurden diese mit kleinen Flächen aus reflektierendem Material beklebt. Alle Blätter wurden nach Durchführung der Messungen am Stiel entfernt, gewogen und die Oberfläche des Blatts ermittelt. Damit waren alle Daten vorhanden, um den mechanischen Verlustanteil, bezogen auf die einfallende Schalleistung nach Gleichung (33) zu ermitteln.

Vorab wurde ein Blatt genauer untersucht. Es handelt sich dabei um Blatt Nummer 3. Hier wurde der mechanische Verlustanteil an mehreren Positionen auf dem Blatt gemessen, um die Streuung der Werte zu ermitteln. Die Ergebnisse des Mittelwerts und des Schätzwerts der Standardabweichung bei 4 Messpositionen auf dem Blatt sind in Bild 29 dargestellt.

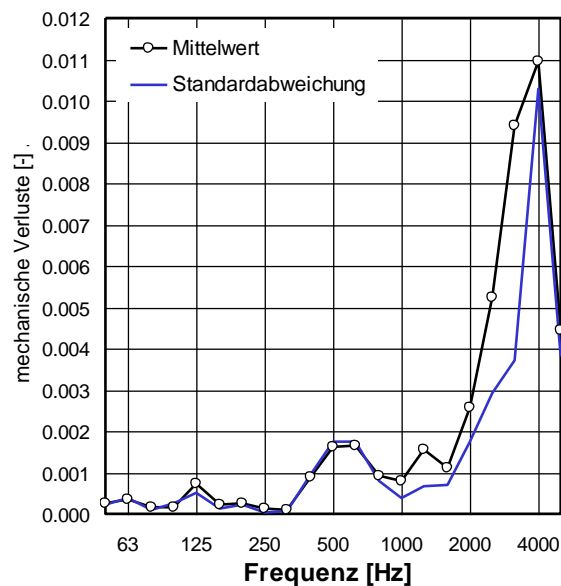


Bild 29: Mechanischer Verlustanteil, gemessen an einem Blatt an 4 Positionen. Angegeben ist der Mittelwert und der Schätzwert der Standardabweichung (aus einer Stichprobe).

Die Ergebnisse zeigen eine relativ hohe Streuung mit einer Standardabweichung, die in derselben Größenordnung wie der Mittelwert liegt. Allerdings sieht man hier auch schon an den geringen Werten, dass dieser Anteil der Verluste gering ist (maximal ca. 1%). Der mechanische Verlustanteil wurde

darauf folgend für die in Bild 28 dargestellten 15 Blätter ermittelt. Daraus wurde wiederum der Mittelwert ermittelt und die Standardabweichung geschätzt. Diese Ergebnisse sind in Bild 30 dargestellt.

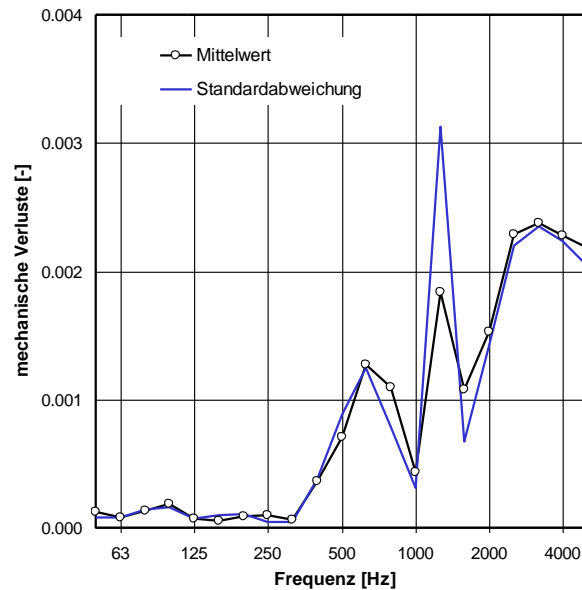


Bild 30: Mechanischer Verlustanteil, gemessen an 15 Blättern der Efeuhecke. Angegeben ist der Mittelwert und der Schätzwert der Standardabweichung (aus einer Stichprobe).

Auch bei der Mittelung der mechanischen Verlustanteile über die 15 gemessenen Blätter zeigt sich eine recht große Streuung, so dass die Standardabweichung ebenfalls in der Größenordnung vom Mittelwert liegt. Bei 1250 Hz erreicht die Standardabweichung sogar Werte, die deutlich über dem Mittelwert liegt. Es zeigt sich aber, dass die Werte mit maximal 0.0024 deutlich unter 1% liegen.

5.2.6 Messung von Reflexions-, Transmissions-, Diffusions- und Absorptionsgrad

Zu einem späteren Zeitpunkt wurden die Efeu-Elemente nochmals in Halb-Freifeldraum eingebaut und vermessen. Hierbei sollte neben der Einfügungsdämmung auch die Messung von Reflexions-, Transmissions-, Diffusions- und Absorptionsgrad mittels Intensitätssonde durchgeführt werden. Der Messaufbau ist in Bild 31 dargestellt.

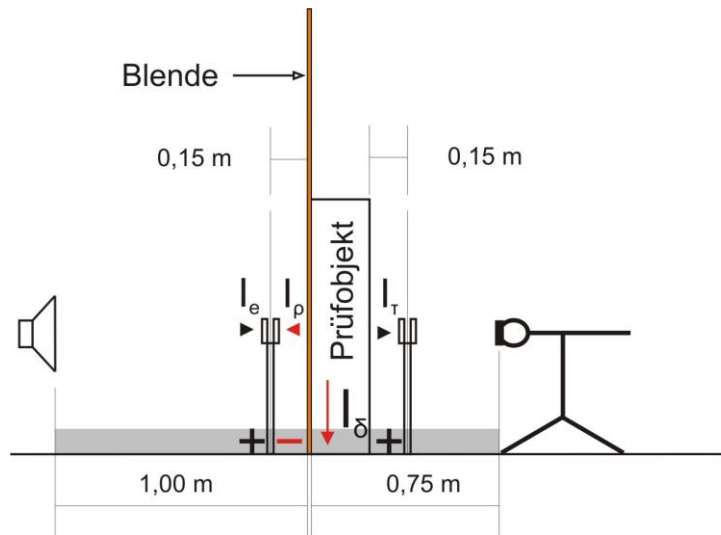


Bild 31: Skizze des Messaufbaus für die Einfügungsdämmung und die Intensitätsmessungen.

Die Messungen erfolgten in einem Abstand von 0,15 m vor der Oberfläche der Heckenelemente. Dabei wurde die Öffnungsfläche der Blende mäanderförmig in zwei Vorgängen manuell abgescannt. Die Scannvorgänge sind in Bild 32 dargestellt. Bei den Messungen lag die Messgeschwindigkeit zwischen 0,1 und 0,3 m/s. Betrug die Differenz der beiden Scans weniger als 1,0 dB für jedes Frequenzband, so wurden die Messwerte arithmetisch gemittelt. War die Abweichung größer als 1,0 dB, so wurden die Messungen verworfen und wiederholt. Beim Abtasten wurde die Sonde immer senkrecht zur Messfläche gehalten und so ausgerichtet, dass die positive in Richtung der Schallquelle gerichtet war. Die Messung erfolgte in Anlehnung an die EN ISO 15186 [44].

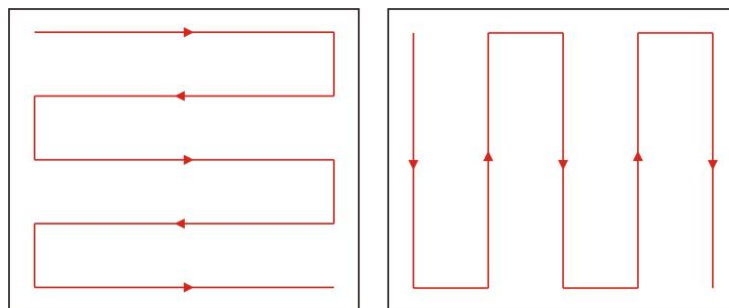


Bild 32: Scannvorgang vor der Blendenöffnung zur Ermittlung der Schallintensität.

Als Sonde kam die P-U-Sonde von Microflown zum Einsatz. Diese ist in Bild 33 dargestellt.



Bild 33: P-U-Sonde von Microflown

Aus der Messung der Schallintensität wurde der Reflexions-, Transmissions-, Diffusions- und Absorptionsgrad bestimmt (Kapitel 4.4). Aus dem Transmissionsgrad wurde die Schalldämmung mittels Gleichung (11 rechts) bestimmt. Gleichzeitig wurde auch die Einfügungsdämmung durch Mikrofonmessung nach Gleichung (11 links) gemessen. Leider waren zum Zeitpunkt der Messungen die beiden Heckenelemente nicht sehr dicht belaubt, so dass die Einfügungsdämmung deutlich geringer ausfiel. Beide Elemente zum Messzeitpunkt sind in Bild 34 gezeigt.



Bild 34: Aufnahme der Efeu-Heckenelemente bei der späteren Messung

Beide Elemente wurden wiederum hintereinander aufgestellt. Der Vergleich der Dämmungen der Elemente ist in Bild 35 dargestellt. Beide Messungen zeigen bei tiefen Frequenzen bis ca. 2000 Hz keine Einfügungsdämmung. Ab dieser Frequenz steigt die Dämmung an, allerdings zeigen beide Messmethoden abweichende Werte. Besonders im Frequenzbereich oberhalb 4000 Hz werden mittels Mikrofon deutlich höhere Dämmungen gemessen. Die verwendete P-U-Sonde besitzt oberhalb 10 kHz ein hohes Eigenrauschen, so dass Werte oberhalb 10 kHz nicht angegeben werden können. Die Werte liegen insgesamt unter denen der ersten Messung (Bild 25). Weitere Messungen an einer Spindelstrauch-Hecke in Kapitel 5.3 zeigen eine bessere Übereinstimmung von Messung mit Mikrofon und Intensitätssonde.

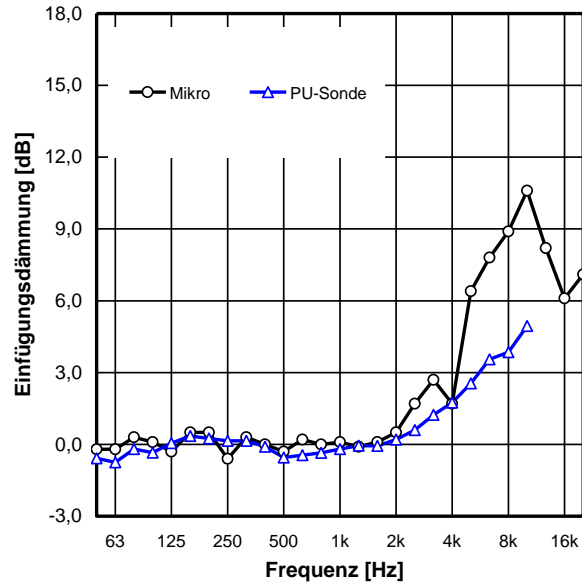


Bild 35: Einfügungsdämmung der Efeuhecke zum späteren Zeitpunkt. Messung mittels Mikrofon und P-U-Sonde

Der Transmissions-, Reflexions- und Dissipationsgrad der Efeuhecke ist in Bild 36 dargestellt. Es zeigt negative Werte des Reflexionsgrads sowie Werte des Transmissionsgrads über 1. Bei den Messungen mit Intensitätssonde in den Frequenzbereichen, in denen die akustische Wirkung der Hecken vernachlässigbar ist, haben geringe Messfehler einen größeren Einfluss auf die Messwerte. Da die Messungen durch manuelles Scannen der Oberfläche durchgeführt wurden, ist eine Beeinflussung durch etwas unterschiedliches Scannen, und damit durch unterschiedliche Detektion von Reflexionen am Rande der Blende, möglich. Dies führt vermutlich zu den Abweichungen der Messwerte von den theoretisch möglichen Werten im tiefen, mittleren und höheren Frequenzbereich bis ca. 2 kHz in Bild 36. Erst bei Einsetzen der Wirkung der Hecke oberhalb dieser Frequenzen werden die Einflüsse dieser Reflexionen am Rand der Blende geringer, so dass deren Einfluss auf die Messergebnisse abnimmt. Auf Grund der Ungenauigkeiten in den Messungen des Transmissions-, Reflexions- und Dissipationsgrads durch die Intensitätssonde und ihres geringen zusätzlichen Informationsgehalts werden diese Ergebnisse im weiteren Bericht im Anhang F dargestellt.

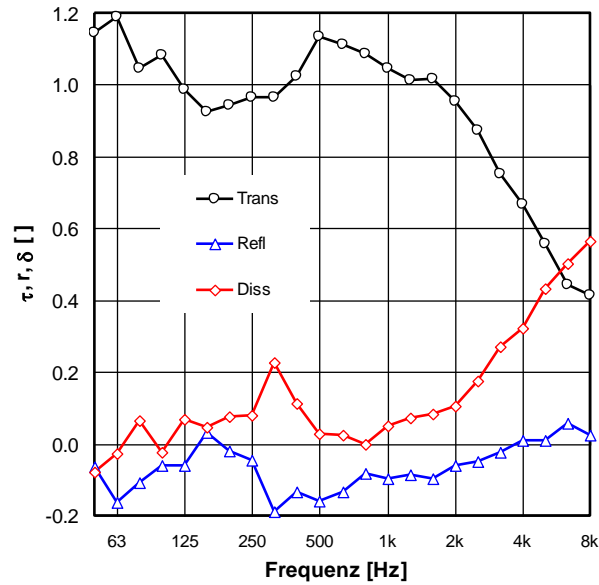


Bild 36: Transmissions-, Reflexions- und Dissipationsgrad der Efeuhecke zum späteren Zeitpunkt. Messung mittels P-U-Sonde.

5.3 Messung einer Spindelstrauchhecke

Als weitere natürliche Hecke, die als Heckenelemente im Prüfstand untersucht werden konnten, wurden zwei Spindelstrauch-Heckenelemente des Herstellers Helix Pflanzen auf ihr akustisches Verhalten untersucht.

5.3.1 Beschreibung der Spindelstrauchhecke

Auch hierbei handelte es sich um Rankgerüste mit einem Substratträger. Die Pflanzen waren *Euonymus fortunei* Coloratus, umgangssprachlich Spindelstrauch genannt. Diese besitzen kleinere und etwas länglichere Blätter als der Efeu. Ein Foto der beiden Heckenelemente ist in Bild 37 gezeigt, ein Foto eines Blattes mittlerer Größe ist mit seinen Abmessungen in Anhang B in Bild C 2 niedergelegt.



Bild 37: Foto der beiden Heckenelemente aus Spindelstrauch.

5.3.2 Messung der Einfügungsdämmung

Die beiden Elemente besaßen jeweils eine Breite von 1,2 m, eine Höhe von 1,8 m und eine Dicke von ca. 0,15 m. Beide Elemente wurden wiederum zu einer Hecke mit einer Dicke von 0,3 m zusammengefügt. Zusätzlich zur Messung mit Mikrofon wurde die Einfügungsdämmung mittels Intensitätsmesstechnik gemessen.

Die Anregung erfolgte mit Rosa Rauschen. Die Messzeit betrug 20 s. Der Lautsprecher stand bei dieser Messung 1,0 m von der Blende entfernt. Der Mikrofonabstand zur Blende betrug 0,45 m und 0,75 m. Die Referenzmessungen hierfür wurden auch hier ohne das Prüfobjekt bei offenem Blendenausschnitt durchgeführt. Die Ergebnisse der Einfügungsdämmung durch Mikrofon- und Intensitätsmessung sind in Bild 38 dargestellt.

Bei dieser Messung war die Übereinstimmung zwischen Mikrofonmessungen und Intensitätssonde sehr gut. Die Einfügungsdämmung beginnt ab ca. 2 kHz und steigt bis auf Werte von ca. 18 dB bei 12,5 kHz an.

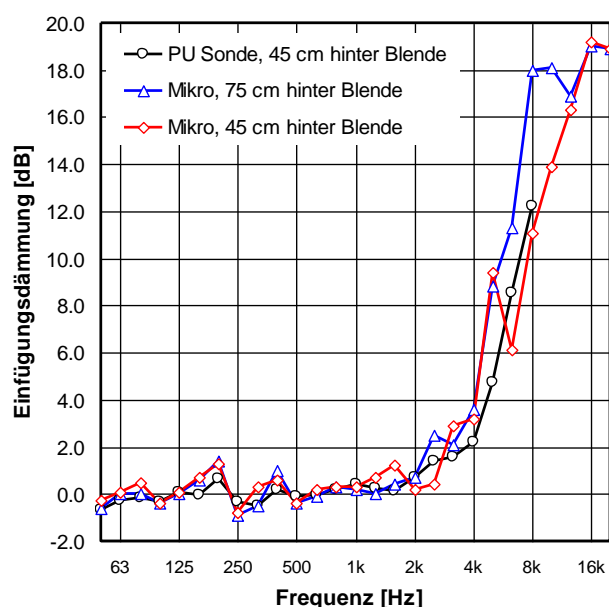


Bild 38: Einfügungsdämmung der Spindelstrauchhecke bei Mikrofonmessung im Abstand von 0,45 und 0,75 m hinter der Blende und bei Intensitätsmessung mittels P-U-Sonde.

Die Messergebnisse des Transmissions-, Reflexions- und Dissipationsgrads sind in Anhang F dargestellt.

5.3.3 Bewertung der Spindelstrauchhecke für Lärmschutz-Zwecke

Zur Bewertung der Eignung der Spindelstrauchhecke zum städtebaulichen Lärmschutz wurde wiederum das standardisierte Verkehrslärmspektrum aus der DIN EN 1793-3 [36] herangezogen. Beide A-bewertete Spektren sind in Bild 39 dargestellt.

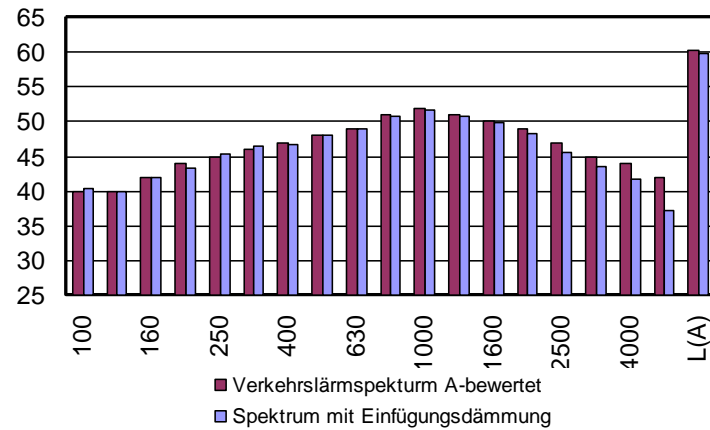


Bild 39: A-bewertetes Verkehrslärmspektrum nach DIN EN 1793-3 [36] und A-bewertetes Verkehrslärmspektrum unter Berücksichtigung der Einfügungsdämmung der Spindelstrauchhecke.

Der Vergleich beider Spektren zeigt, dass im entscheidenden mittleren Frequenzbereich die Pegelminderung wiederum sehr gering ist. Erst der oberhalb von 2000 Hz einsetzende Anstieg der Einfügungsdämmung hat für den A-bewerteten Summenpegel einen geringen Einfluss. Der A-Pegel wird durch die Hecke um ca. 0,4 dB gemindert.

5.4 Messung an einer Yucca-Palme

Die oben beschriebenen Hecken besaßen relativ ähnliche Arten von Blättern. Um nun eine Pflanze mit einer anderen Form der Blättern zu untersuchen, wurde eine Yucca-Palme im Halb-Freifeldraum mit Blende gemessen. Dabei war die Pflanze nicht heckenförmig mit einer ebenen Oberfläche, sondern es handelte sich um eine einzelne Pflanze mit einer eher runder Form. Trotzdem füllte die Pflanze die Blendenöffnung aus, so dass die Messung vergleichbar zu den vorigen Messungen durchgeführt werden konnte. Die Pflanze im Messaufbau ist in Bild 40 gezeigt.



Bild 40: Foto der Yucca-Palme hinter der Blendenöffnung im Prüfstand.

Die Blätter der Yucca-Palme waren ca. 50 cm lang, jedoch mit ca. 5 cm nicht deutlich breiter als die Blätter der bisher untersuchten Pflanzen. Die Dicke der Probe war im Blendenausschnitt mit ca. 0,4 m etwas größer als die bisher gemessenen. Die Messergebnisse sind in Bild 41 gezeigt.

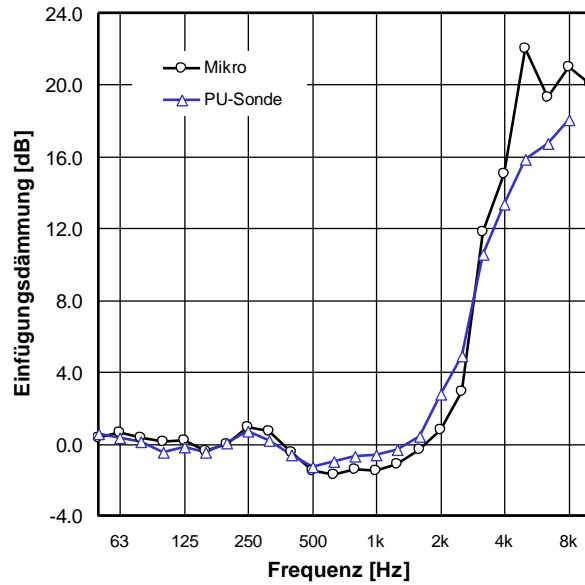


Bild 41: Einfügungsdämmung der Yucca-Palme. Gemessen mit Mikrofon und PU-Sonde wie zuvor beschrieben.

Ab 2000 Hz beginnt die akustische Wirkung mit einem starken Anstieg der Einfügungsdämmung. Sie erreichen recht hohe Werte von über 16 dB bei 5000 Hz. Bei tiefen und mittleren Frequenzen besitzt auch die Yucca-Palme keine Einfügungsdämmung. Die Abweichung von 0 dB in diesem Frequenzbereich ist vor allem auf Bodenreflexionen zurückzuführen, da bei dieser Messung die schallabsorbierende Auskleidung der Bodenfläche nicht vollflächig erfolgte (siehe hierzu Bild 40).

Im Verlauf der Einfügungsdämmung verhält sich die Yucca-Palme sehr ähnlich zu den zuvor getesteten Hecken. Dabei erhöhen die sehr langen Blätter nicht wesentlich die Dämmung.

5.5 Messung an einer Kunsthecke aus Styrofill

In dieser Arbeit wurden Messungen der Schalldämmung sowohl im Kundt'schen Rohr, als auch im Halb-Freifeldraum mit Blende durchgeführt. Dabei stellte sich die Frage ob beide Labor-Messverfahren Werte liefern, die das Verhalten einer realen Hecke beschreiben. Deshalb wurden Messungen an demselben Objekt in drei Messaufbauten (Kundt'sches Rohr, Blenden-Prüfstand und heckenähnlich Aufbau) durchgeführt. Aus praktischen Gründen wurde hierfür ein künstliches Material verwendet, das ähnliche akustische Eigenschaften wie die Hecken besitzt, und dessen Eigenschaften sich durch die unterschiedlichen Probengrößen nicht ändern. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind im Anhang D dargestellt.

Der Vergleich der Messungen zeigte eine sehr gute Übereinstimmung sowohl zwischen den verschiedenen Laboraufbauten, als auch im Verlauf der Einfügungsdämmung mit realen Hecken im Freien, Kapitel 6.

5.6 Messung an einer Kunsthecke aus Folienblättern

Um die akustischen Einflussfaktoren experimentell zu untersuchen, sowie um die Modellierung von Hecken (Kapitel 7) mit experimentellen Ergebnissen abzugleichen, wurde eine weitere Kunsthecke aufgebaut. Hierbei sollten Parameter wie die Blattfläche und die Belaubungsdichte explizit variiert werden können. Dies ist mit natürlichem Material in ausreichend guter Wiederholbarkeit nicht möglich. Daher wurde eine Kunsthecke aus Drahtgitter (Maschenweite 19x19 mm, Drahtstärke 1,45 mm) mit kreisförmigen Folienblätter aufgebaut. Die Blätter wurden hierbei aus PE-Baufolie der Firma LUX (Folienstärke 0,19 mm, Flächenbezogene Masse 150 g/m²) hergestellt. Um eine heckenähnliche Struktur zu erreichen wurden insgesamt 10 Rahmen gleicher Art erstellt, die hintereinander mit variablem Abstand hinter der Blendenöffnung des Blendenprüfstands eingebaut werden konnten. Die Rahmen hatten eine Höhe von 0,92 m und eine Breite 1,29 m.

Die Einfügungsdämmung der 10 unbestückten Rahmen wurde ermittelt. Der Abstand des Lautsprechers war 1.0 m vor der Blendenöffnung, das Mikrofon war 1.10 m hinter der Blende angeordnet. Die Einfügungsdämmung ist in Bild 42 dargestellt.

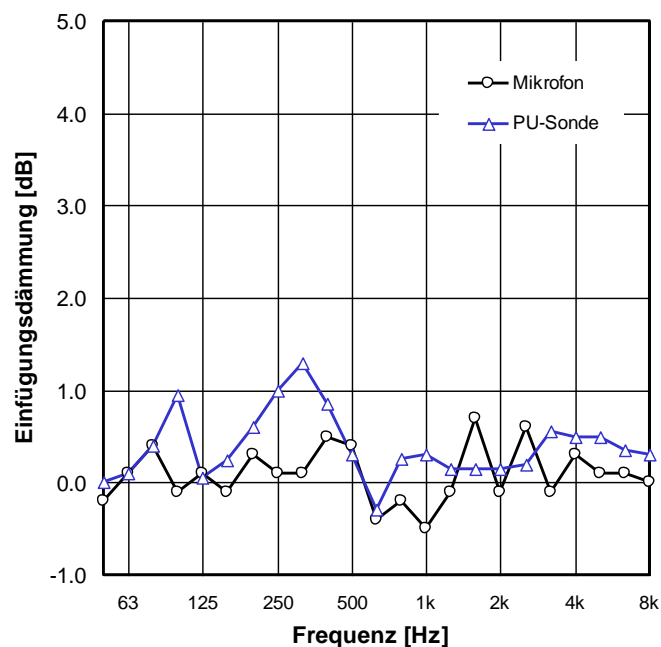


Bild 42: Einfügungsdämmung der Konstruktion aus 10 unbestückten Rahmen aus Draht, eingebaut hinter der Blendenöffnung im Halb-Freifeldraum des IBP.

Die Messergebnisse zeigen im tieferen Frequenzbereich unter 500 Hz einen gewissen Einfluss des Messaufbaus. Im interessanten Frequenzbereich oberhalb 500 Hz ist der Einfluss der Rahmen sehr gering und beträgt unter 0,5 dB. Daher ist der Aufbau für die geplanten Messungen geeignet.

5.6.1 Beschreibung der Kunsthecke

Das Material der Folienblätter besaß mit 150 g/m^2 eine ähnliche flächenbezogene Masse und Biegesteifigkeit wie Blätter. Aus praktischen Gründen wurden kreisrunde Blätter hergestellt. Der Aufbau der Kunsthecke in Bild 43 und 44 gezeigt.



Bild 43: Ansicht der Kunsthecke aus Folienblättern in der Blendenöffnung des Blenden-Prüfstands.



Bild 44: Seitenansicht der Kunsthecke aus Folienblättern hinter der Blendenöffnung.

Die Blätter wurden mittels kleiner Kügelchen aus Terostat (dauerelastisches Dichtmaterial der Firma Henkel) am Gitter beweglich befestigt. Die Ausrichtung war orthogonal zum Schalleinfall. Die Art der Anbringung ergab aber auch hier eine gewisse Streuung in der Ausrichtung der Blätter, ähnlich der Ausrichtung bei einer realen Hecke.

5.6.2 Messungen der Einfügungsdämmung

Erste Messungen der Kunsthecke wurden mit kreisrunden Blättern mit einem Durchmesser von $6,3 \text{ cm}$ (Blattfläche: $31,17 \text{ cm}^2$) durchgeführt. Die Fläche der Kunstblätter entspricht in etwa einem Efeu-Blatt. Pro Rahmen wurden 115 Blätter statistisch verteilt.

Der Abstand der Blätter zu den benachbarten Blättern betrug 4 cm . Beim Aufbau der Kunsthecke wurden 10 Rahmen verwendet, so dass eine Prüflingsdicke von $0,36 \text{ m}$ entstand. Wie aus Bild 44 er-

sichtlich, wurde diese Kunsthecke direkt hinter der Blendenöffnung angebracht. Die Messung der Einfügungsdämmung und der Reflexions-, Transmissions- und Dissipationsgrade erfolgte wie bei den realen Hecken im Prüfstand, beschrieben in Abschnitt 5.2. Die Einfügungsdämmung dieser Kunsthecke ist in Bild 45 dargestellt, die Reflexions-, Transmissions- und Dissipationsgrade in Bild F 2 gezeigt.

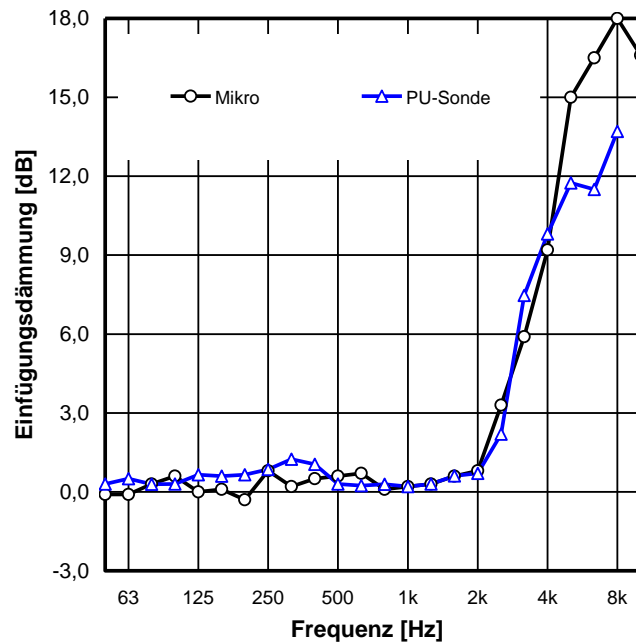


Bild 45: Einfügungsdämmung der Kunsthecke, gemessen mit Mikrofon und PU-Sonde. Blattdurchmesser 6,3 cm, Abstand der Blätter 4 cm, statistische Verteilung der Blätter.

Die Messergebnisse der Kunsthecke zeigen einen vergleichbaren Verlauf der Einfügungsdämmung wie reale Hecken. Bis ca. 2000 Hz ist die Einfügungsdämmung nahezu 0 dB, darüber steigt sie steil an und erreicht bei 8000 Hz Werte von ca. 15 dB. Dabei ist der Verlauf von Messung mit Mikrofon und PU-Sonde sehr ähnlich, bei hohen Frequenzen gibt es gewisse Abweichungen. Bei der Messung fällt auf, dass der Anstieg relativ abrupt beginnt und etwas steiler ist als bei den realen Hecken. Dies wird auf die Ausrichtung der Kunstblätter zurückgeführt, die bei den realen Hecken etwas stärker streute. Der Reflexionsgrad der Kunsthecke war bei hohen Frequenzen im Vergleich zur realen Hecke etwas höher, und es ergab sich dementsprechend ein etwas geringerer Dissipationsgrad.

5.6.3 Variation der Blattparameter

Die untersuchten Varianten der Blattparameter stehen im Zusammenhang mit der Modellierung von Hecken, die in Kapitel 7 beschrieben wird. Bei allen untersuchten Varianten wurden Blätter aus derselben Folie verwendet. Die Messungen zum mechanischen Verlust von Blättern sowie Angaben aus der Literatur legen nahe, dass der Einfluss der Schwingung der Blätter auf die akustischen Eigenschaften von Hecken gering ist. Ebenso geht die Modellierung von Hecken von schallharten Streukörpern aus, so dass die flächenbezogene Masse der Blätter, sollte sie nur ausreichend groß sein, keinen wesentlichen Einfluss auf die akustischen Eigenschaften von Hecken besitzt. Aus diesen Gründen wurde auf eine Variation des Materials der Folienblätter verzichtet.

Neben der statistischen Verteilung der Blätter wurde eine akustisch ungünstige Verteilung der Blätter untersucht. Hierzu wurden jeweils die 115 Blätter pro Rahmen an der gleichen Position angeordnet. Diese einheitliche Anordnung der Blätter ist aus Bild 46 ersichtlich. Die Messergebnisse sind in Bild 47 dargestellt.



Bild 46: Vorderansicht der Kunsthecke in der Blendenöffnung mit einheitlicher Anordnung der Folienscheiben im Modellraum. Blattdurchmesser 6,3 cm. Blattabstand 4 cm.

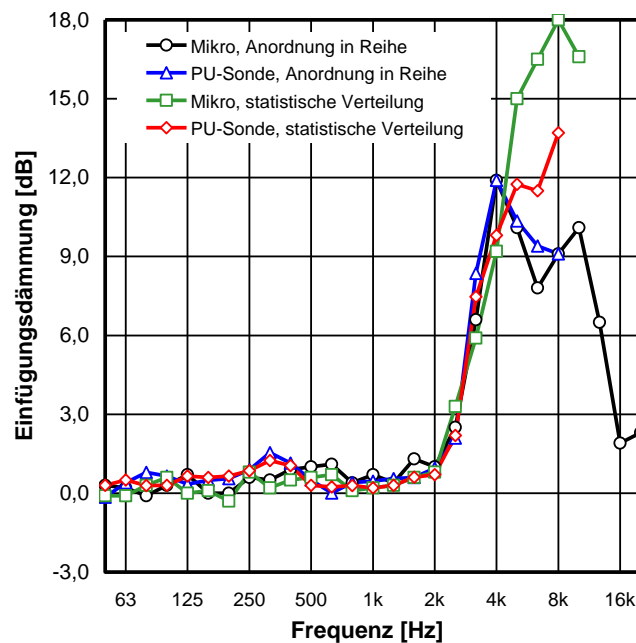


Bild 47: Einfügungsdämmung der Kunsthecke, gemessen mit Mikrofon und PU-Sonde. Blattdurchmesser 6,3 cm, Blattabstand 4 cm. Vergleich statistischer Verteilung der Blätter und einheitliche Anordnung der Blätter hintereinander.

Die Ergebnisse in Bild 47 zeigen bis 4000 Hz einen sehr ähnlichen Verlauf der Einfügungsdämmung im Vergleich zur statistischen Anordnung. In beiden Fällen ist dabei die Einfügungsdämmung bis ca. 2000 Hz sehr gering und steigt darüber deutlich an. Ab 5000 Hz kommt es durch die einheitliche Anordnung der Blätter zu geringeren Werten, die zu höheren Frequenzen hin abfallen. Hier kommt es zur „Durchschallung“ der Struktur, d.h. die hohen Frequenzen können die Struktur immer besser durchdringen. Die Wellenlänge z.B. bei 5000 Hz liegt mit ca. 6,9 cm in der Größenordnung des freien Abstands zwischen den Blättern (diagonal).

5.6.4 Vergrößerter Blattdurchmesser

Als weiterer Einflussfaktor wurde die Blattgröße verändert. Dafür wurden kreisrunde Blätter mit einem Durchmesser von 12,3 cm ($118,82 \text{ cm}^2$) aus der PE-Folie verwendet. Die Anzahl von 30 Blättern auf einem einzelnen Rahmen ergab eine gesamte Blattfläche pro Rahmen von ca. $0,36 \text{ m}^2$, Vergleichbar mit den vorherigen Messungen mit Blattdurchmesser 6,3 cm. Die Messung erfolgte mit gleicher Anzahl an Rahmen (10). Die Blätter mit Rahmen in der Blendenöffnung sind in Bild 48, die Messergebnisse in Bild 49 dargestellt.



Bild 48: Kunsthecke in der Blendenöffnung, Blattdurchmesser 12,3 cm.

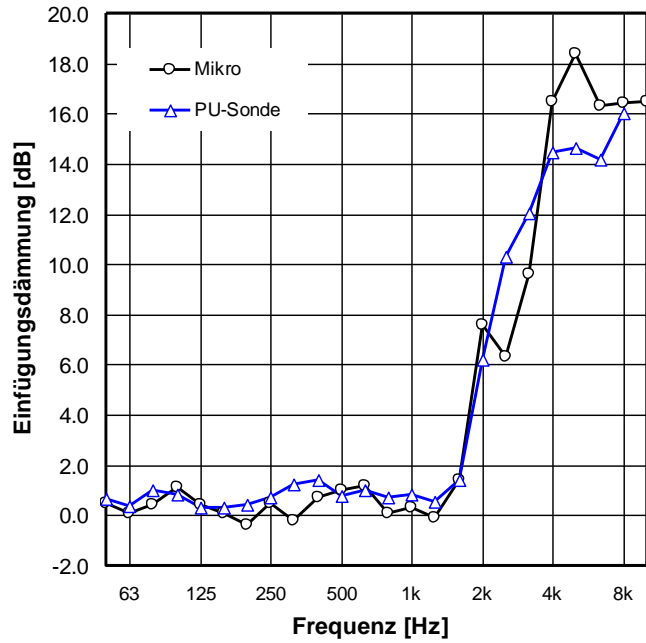


Bild 49: Einfügungsdämmung der Kunsthecke mit einem Blattdurchmesser von 12,3 cm. Messung mit Mikrofon und P-U-Sonde.

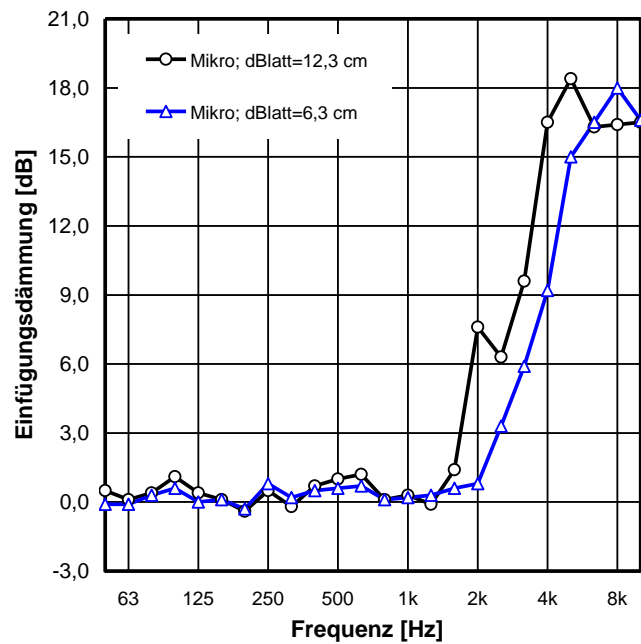


Bild 50: Einfügungsdämmung der Kunsthecke mit großer Blattfläche (Durchmesser 12,3 cm) und kleiner Blattfläche (Durchmesser 6,3 cm), bei gleicher Blattfläche pro Rahmen. Messung mit Mikrofon.

Der wesentliche Unterschied der Messergebnisse zur vorigen Messung ist, dass sich der Anstieg der Einfügungsdämmung um ca. zwei Terzen zu tiefen Frequenzen verschiebt. Dies zeigt sich im direkten Vergleich der Ergebnisse in Bild 50. Der Anstieg selbst bleibt ähnlich steil, die maximalen Werte der

Einfügungsdämmung liegt in beiden Fällen bei ca. 18 dB, da sich bei den hohen Frequenzen ein Plateau ausbildet.

5.6.5 Veränderte Blattichte

Die Kunsthecke aus Folienblättern mit Blattdurchmesser 6,3 cm wurde mit zwei verschiedenen Blattichten bei annähernd gleicher Heckentiefe untersucht. Zum einen wurde die Kunsthecke mit 5 Rahmen und 115 Blättern pro Rahmen (Blattabstand 3 cm) und zum anderen mit 6 Rahmen und 155 Blättern pro Rahmen (Blattabstand 4 cm) bestückt. Die Blätter und die Rahmen wurden jeweils so angeordnet, dass die Blätter untereinander im Rahmen und von Rahmen zu Rahmen den gleichen Abstand besaßen. Daraus ergab sich eine Hecke mit einer Tiefe von 16 cm (5 Rahmen, Blattabstand 4 cm) und eine Hecke mit einer Tiefe von 15 cm (6 Rahmen, Blattabstand 3 cm). Die Messergebnisse sind in Bild 51 dargestellt.

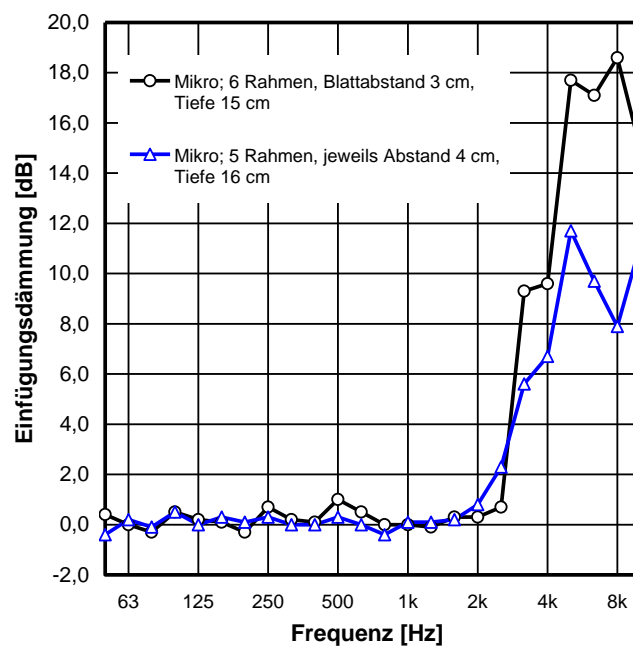


Bild 51: Einfügungsdämmung der Kunsthecken mit Blattdurchmesser von 6,3 cm, gemessen mit Mikrofon. Vergleich von Hecke mit Blattabstand 3 cm mit Hecke mit Blattabstand 4 cm.

Beide Proben besitzen bei beiden Messungen einen ähnlichen Anstieg ab 2000 Hz aufwärts. Dabei ist der Anstieg bei der dichteren Hecke steiler und setzt sich zu hohen Frequenzen weiter fort, so dass bei Frequenzen oberhalb 5 kHz eine deutlich höhere Einfügungsdämmung erreicht wird.

5.6.6 Veränderte Heckendicke

Bei diesen Untersuchungen wurde die Heckendicke verändert. Der Blattabstand der Blätter in jedem Rahmen (ca. 4 cm) und der Blattdurchmesser (6,3 cm) blieb bei allen Messungen gleich. Untersucht wurde die Variation der Heckendicke (10 Rahmen mit Rahmenabstand 4 cm, 5 Rahmen und 4 cm Rahmenabstand; 5 Rahmen mit 8 cm Rahmenabstand). Alle Ergebnisse sind in Bild 52 und 53 dargestellt.

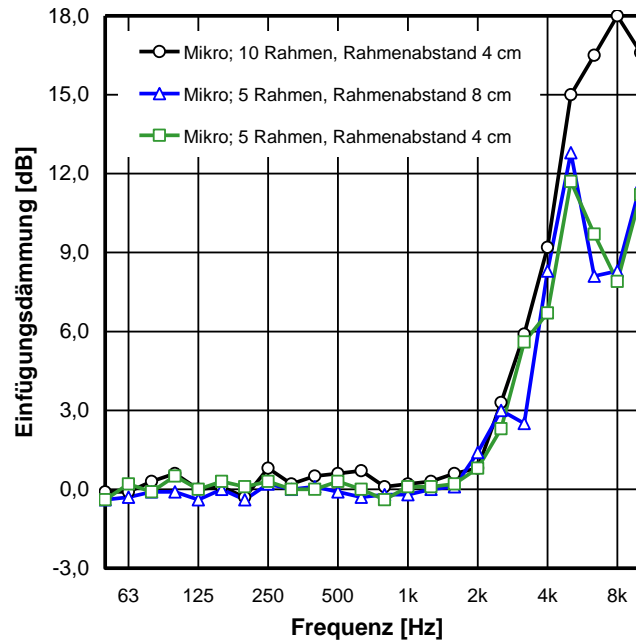


Bild 52: Einfügungsdämmung der Kunsthecken mit Blattdurchmesser von 6,3 cm, gemessen mit Mikrofon. Vergleich von Hecken mit unterschiedlicher Heckendicke.

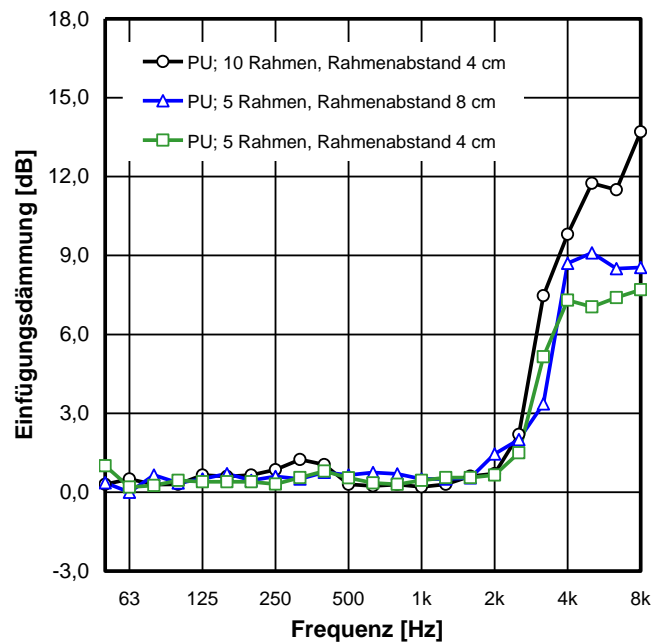


Bild 53: Einfügungsdämmung der Kunsthecken mit Blattdurchmesser von 6,3 cm, gemessen mit P-U-Sonde. Vergleich von Hecken mit unterschiedlicher Heckendicke.

Der erste Vergleich der Ergebnisse, die Variation der Heckendicke bei gleicher Blattdichte (Vergleich 10 Rahmen, Rahmenabstand 4 cm mit 5 Rahmen, Rahmenabstand 4 cm) zeigt ab ca. 2000 Hz einen Anstieg der Dämmwirkung. Dabei ist der Anstieg der dickeren Hecke etwas steiler und erreicht bei hohen Frequenzen deutlich höhere Werte von 12 bis über 15 dB. Bei der halb so dünnen Hecke erfolgt

der Anstieg bei ähnlicher Frequenz, ist aber nicht ganz so steil und erreicht Werte, die deutlich unter denen der dickeren Hecke liegen.

Der zweite Vergleich bei Variation der Blattdichte in der Tiefe der Hecke (5 Rahmen, Rahmenabstand 4 cm mit 5 Rahmen, und Rahmenabstand 8 cm mit 5 Rahmen) zeigt einen ähnlichen Verlauf der Einfügungsdämmung mit Anstieg ab 2000 Hz. Auch bei hohen Frequenzen sind die Unterschiede eher gering.

5.6.7 Erkenntnisse aus den Messungen an der Kunsthecke

Die Kunsthecke mit Folienblättern hatte ähnliche akustische Eigenschaften wie echte Hecken. Dies gilt sowohl für die Einfügungsdämmung als auch für den grundsätzlichen frequenzabhängigen Verlauf der Transmissions-, Reflexions- und Dissipationsgrade. Die Kunsthecke ermöglichte die explizite Variation von Heckenparametern wie der Blattgröße, der Blattdichte sowie der Ausrichtung der Blätter zueinander. Die Erkenntnisse von Versuchen an dieser Hecke sind im Folgenden aufgelistet.

Die grundsätzliche statistische Verteilung der Blätter ist vorteilhaft für die Dämmwirkung von Hecken. Diese Blattausrichtung verhindert die freie Durchstrahlung der Hecke bei hohen Frequenzen.

Die Blattgröße ist einer der wesentlichen Einflussfaktoren für die Wirksamkeit von Hecken. Sie bestimmt, ab welcher Frequenz eine akustische Wirksamkeit bzw. Dämmwirkung auftritt. Bei größeren Blattdurchmessern setzt der Anstieg der Einfügungsdämmung bei tieferen Frequenzen ein. Weiterhin erreicht die Dämmwirkung bei größeren Blattdurchmessern bei hohen Frequenzen höhere Werte. Messungen an der Yucca-Palme haben gezeigt, dass sehr lange Blätter dagegen keine wesentliche Verbesserung der Dämmwirkung erzielen, so dass davon ausgegangen wird, dass der Durchmesser bzw. die Breite bei länglichen Blättern für die Dämmwirkung entscheidend ist.

Bei gleichem Blattdurchmesser erhöht die Blattdichte innerhalb der Hecke die Dämmwirkung bei hohen Frequenzen. Allerdings wird die Frequenz, ab der die Dämmwirkung einsetzt, nicht oder nur geringfügig von der Blattdichte beeinflusst. Bei der Wirksamkeit von Hecken scheint der Abstand der Blätter nebeneinander wichtiger zu sein als der Abstand hintereinander. Entscheidend scheint die Anzahl an streuend wirkenden Blattebenen zu sein, die eine höhere Blattdichte bewirkt.

5.7 Zusammenfassung der Messungen im Labor

Die Einfügungsdämmung von Hecken und Gehölzen beruht auf zwei Anteilen: zum einen gibt es bei tiefen Frequenzen einen Bodeneffekt, bei dem die Bodenreflexion zu einer Einfügungsdämmung bei tiefen Frequenzen führt. Dieser wurde bei den vorliegenden Untersuchungen im Labor durch Absorption am Boden unterdrückt und war nicht Gegenstand der Untersuchungen.

Der zweite Anteil der Einfügungsdämmung ist die Dämmwirkung der Belaubung, die vor allem auf Schallstreuung beruht. Bei den Messungen im Labor wurde die Bodenreflexion durch Schallabsorber unterdrückt, so dass die Dämmwirkung von Hecken untersucht werden konnte. Die Untersuchungen zeigen, dass die Dämmwirkung bei tiefen Frequenzen sehr gering ist, aber ab einer bestimmten Frequenz beginnt, deutlich anzusteigen. Diese Frequenz lag bei der Efeuhecke bei ca. 2500 Hz. Von dieser Frequenz steigt die Dämmwirkung mit zunehmender Frequenz stark an und erreicht hohe Werte, z.B. bei der Efeuhecke 15 dB bei 8000 Hz. Die Spindelstrauch-Hecke besaß einen ähnlichen Verlauf

der Einfügungsdämmung. Der Anstieg erfolgte ebenso bei ca. 2500 Hz, der Höchstwert lag über der Efeuhecke.

Durch den Einsatz einer Kunsthecke aus Folienblättern konnte die selbe Charakteristik in der Dämmwirkung gemessen werden. Diese Hecke ermöglichte explizite Änderungen der Heckenparameter durch Vergrößerung der Blattflächen, der Blattdichte etc. Damit konnten die in der Literatur geäußerten Vermutungen des Einflusses der Blattfläche, der Blattdichte etc. nachgewiesen werden. Als wichtigste Heckenparameter konnte die Blattfläche, die Blattdichte, die lückenlose Anordnung der Blätter sowie die Heckendicke festgestellt werden. Die Modellierung der akustischen Eigenschaften in Kapitel 7 geben hierzu weitere Informationen.

6 Eigenschaften von Hecken - Messungen im Freien

Die Untersuchungen im Labor ermöglichten Detail-Untersuchungen und Messungen, bei denen z.B. der Bodeneffekt unterdrückt werden konnte. Auch konnte mit der Kunsthecke aus Folien-Blättern die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Dämmwirkung von Hecken ermittelt werden. Der nächste Schritt war nun, reale Hecken im Freien zu untersuchen. Diese Messungen dienten dazu, die im Labor gefundenen Erkenntnisse mit realen Situationen abzugleichen, sowie die mögliche Einfügungsdämmung von realen Hecken zu ermitteln. Da aus der Literatur keine Daten zur Dämmwirkung von dichten Hecken vorlagen, war es wichtig, Messungen an realen Hecken durchzuführen.

Die Auswahl der Hecken erfolgte unter Berücksichtigung der in Kapitel 2 dargestellten Erkenntnisse aus der Literatur und dem im Labor erzielten Wissenstands. Wichtig war für die Hecken eine dicht belaubte äußere und innere Struktur, eine große Blattfläche, eine zum Schalleinfall möglichst senkrecht stehende Blattstellung und eine große Heckendicke. Weiterhin waren natürlich auch noch andere Randbedingungen bei der Auswahl der Hecken, wie eine gute Zugänglichkeit, geringe Reflexionen von angrenzenden Gebäuden, die Erlaubnis zur Messung etc. zu berücksichtigen.

6.1 Untersuchte Hecken

In den folgenden Tabellen 2 bis 5 werden die untersuchten Hecken beschrieben. Fotos der Hecken sind in Bild 54 bis 57 gezeigt, Fotos der Blätter mit ihren mittleren Abmessungen sind in Anhang C in Bild C 1 bis 6 dargestellt. Skizzen des Lageplans der Hecken mit den Lautsprecherpositionen sind in Anhang E in Bild E 1 bis E 3 dargelegt.

Efeu - Hedera helix 'Woeneri'

Beschreibung:

immergrün, ausgesprochen winterhart, kann an sonnigen und an schattigen Orten wachsen, erreicht Höhen bis zu 20 m

Vorgefundener Zustand am 20. Mai 2009:

Hecke 1,80 m hoch, ca. 11 m lang und 0,80 m dick;
die Hecke ist in der Tiefe und in der Länge durchgehend dicht bewachsen,
keine undichten Stellen erkennbar, sichtdicht, rechteckiger Schnitt

Blattwerk 5 - 10 cm groß, ca. 0,40 mm dick,
dunkelgrün mit hellem Adernetz,
große Blattfläche, starke und harte Blattstruktur,
senkrechte Ausrichtung der Blätter zum Schalleinfall

Mittlerer Blattgröße an der gemessenen Hecke:
Länge 10 cm, Breite 9,5 cm, Blattfläche 55,7 cm²

Tabelle 2: Eigenschaften der Efeu-Hecke im Freien.



Bild 54: Efeuhecke - Hedera helix 'Woeneri'.

Kirschlorbeer - *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia'

Beschreibung:

immergrün und winterhart, wächst stark in die Breite, blüht wenig bis gar nicht, schnell wachsende Pflanze

Vorgefundener Zustand am 20. Mai 2009:

Hecke 2,00 m hoch, ca. 14 m lang und 1,00 m dick;
die Hecke ist in der Länge durchgehend dicht bewachsen, vereinzelnde Bewuchslücken im Bodenbereich, Blattwuchs bis zu einer Tiefe von ca. 0,3 m vorhanden (die stark ausgeprägten Ausläufer wurden nicht miteinbezogen), sichtdicht, rechteckiger Schnitt

Blattwerk 5 - 15 cm groß, ca. 0,35 mm dick,
lederartig, glänzend grün, ovalförmig,
große Blattfläche, starke und harte Blattstruktur,
eher waagrechte Ausrichtung der Blätter zum Schalleinfall

Mittlerer Blattgröße an der gemessenen Hecke:

Länge 12,7 cm, Breite 6,7 cm,

Blattfläche 55,8 cm²

Tabelle 3: Eigenschaften der Kirschlorbeer-Hecke im Freien.



Bild 55: Lorbeerhecke - *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia'.

Hainbuche - *Carpinus betulus*

Beschreibung:

sommergrünes Laubgehölz, ein Teil der Blätter trocknet ein und bleibt über die Wintermonate am Geäst, keine auffällige Blüte

Vorgefundener Zustand am 18. Mai 2009:

Hecke 2,00 m hoch, ca. 14,5 m lang und 1,10 m dick,
die Hecke ist in der Länge durchgehend dicht bewachsen, vereinzelnde
Bewuchslücken in der gesamten Hecke, Blattwuchs bis zu einer Tiefe
von ca. 0,15 m vorhanden, größtenteils sichtdicht, rechteckiger Schnitt

Blattwerk 5 - 10 cm groß, ca. 0,11 mm dick;
eiförmig, Blattrand ist gezahnt,
große Blattfläche, weiche Blattstruktur,
waagrechte Ausrichtung der Blätter zum Schalleinfall

Mittlerer Blattgröße an der gemessenen Hecke:
Länge 11 cm, Breite 6,2 cm, Blattfläche 51,6 cm²

Tabelle 4: Eigenschaften der Hainbuchen-Hecke im Freien.



Bild 56: Hainbuchen-Hecke - *Carpinus betulus*.

Buchsbaum - Buxus sempervirens

Beschreibung:

immergrün und frosthart, sehr langsam wachsend,

Vorgefundener Zustand am 20. Mai 2009:

Hecke 2,00 m hoch, ca. 3,5 m lang und 1,20 m dick,
die Hecke ist in der Länge nicht konstant bewachsen, vereinzelt Be-
wuchslücken in der gesamten Hecke, Blattwuchs bis zu einer Tiefe von
ca. 0,1 m, größtenteils sichtdicht, rechteckiger Schnitt

Blattwerk 2 cm groß, ca. 0,10 mm dick,
lederartig, Oberseite ist glänzend dunkelgrün, die Unterseite hellgrün,
elliptische Form, kleine Blattfläche, starke und harte Blattstruktur,
die Ausrichtung der Blätter zum Schalleinfall konnte nicht bewertet
werden

Mittlerer Blattgröße an der gemessenen Hecke:

Länge 3 cm, Breite 1,5 cm, Blattfläche 3,0 cm²

Tabelle 5: Eigenschaften der Buchsbaum-Hecke im Freien.



Bild 57: Buchsbaumhecke - Buxus sempervirens.

6.2 Durchführung der Messungen

Bei den Hecken im Freien wurde die Einfügungsdämmung (Kapitel 4.6) bestimmt.

6.3 Messung der Efeuhecke - Hedera helix 'Woerner'

Die Messung wurde am 20. Mai 2009 durchgeführt. Folgende Bedingungen waren zum Messzeitpunkt gegeben:

Temperatur:	24,5°C
Luftfeuchte:	36 %
Windgeschwindigkeit	≤ 0,5 m/s

Die Lautsprecherpositionen sowie die Geometrie der Hecke und das Umfeld sind in Anhang E in Bild E 1 niedergelegt. Die Messgeometrie ist in Kapitel 3.6 in Bild 13 gezeigt. Die Hecke wies eine durchgehend belaubte Dicke von 0,8 m auf. Aufgrund der Höhe von 1,8 m und der Breite von ca. 11 m waren die Beugungseffekte um die Hecke zum Mikrofon gering. Die äußere Struktur der Hecke zeigte eine zum Schalleinfall senkrecht stehende Blattstellung. Die Blattfläche war vergleichsweise groß, die Blätter besaßen eine Dicke von ca. 0,40 mm. Die Messpunkte wurden so gewählt, dass Reflexionen an den umstehenden Gebäuden möglichst vermieden wurden. Zudem wurden kritische Gebäudeflächen mit Caruso Iso Bond- Absorbern abgedeckt.

Die gemessene Efeuhecke entspricht bei der Pflanzenart der im Labor untersuchten Heckenelemente (Hedera helix 'Woerner'), jedoch war die Heckenbreite mit 0,8 m deutlich größer. Die Messergebnisse sind in Bild 58 gezeigt.

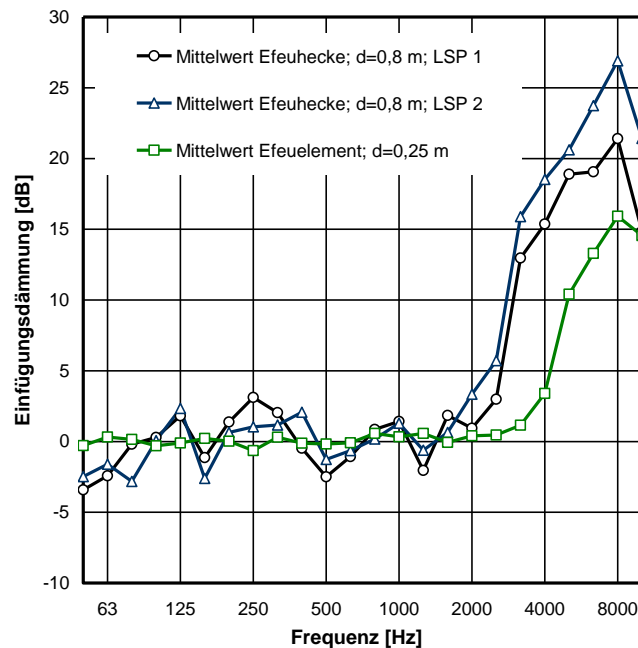


Bild 58: Einfügungsdämmung der Efeu-Hecke im Freien (Dicke 0,8 m), und im Labor (Dicke 0,25 m).

Neben den Messergebnissen im Freien sind in Bild 58 die Messergebnisse an einem Heckenelement mit der Breite von 0,25 m (Messung im Labor) gezeigt. Im Bereich von 50-2000 Hz treten bei der Messung im Freien Schwankungen um die 0 dB auf, die auf Bodeneffekte zurückzuführen sind. Diese entstehen dadurch, dass die Bodenbedingungen im Bereich der Hecke verschieden sind, als bei der

Referenzmessung über einer Rasenfläche. Dies führt zu Schwankungen der Einfügungsdämmung um 0 dB. Die Schwankungen betragen maximal $\pm 3,6$ dB (zwischen 50 und 200 Hz). Ab 2000 Hz kommt es zu einem stetigen Anstieg der Einfügungsdämmung bis ca. 27 dB bei 8000 Hz. Bei 10000 Hz weisen beide Messungen an derselben Hecke einen Einbruch auf. Die geringen Schwankungen könnten durch Unterschiede innerhalb der Hecke hervorgerufen sein.

Der Vergleich zwischen der Ergebnisse der Efeuhecke im Freien und im Labor zeigt einen ähnlichen Frequenzverlauf. Beide Hecken zeigen im Frequenzbereich unter 2000 Hz keine bzw. eine geringe Schalldämmung. Bei 2000 Hz setzt ein starker Anstieg bei den Messungen im Freien ein, der bei der Messung im Labor erst bei 4000 Hz auftritt. In beiden Fällen steigt die Dämmwirkung mit ähnlicher Steigung kontinuierlich bis 8000 Hz an. Bei 10000 Hz ergibt sich im Labor und im Freien ein Einbruch. Durch das frühere Einsetzen des Anstiegs zeigt die dickere Hecke im Freien eine deutlich größere Einfügungsdämmung bei 8 kHz mit Werten über 20 dB auf.

6.4 Messung der Kirschlorbeerhecke - *Prunus laurocerasus* 'Rotundifolia'

Die Kirschlorbeerhecke wurde ebenso am 20. Mai 2010 gemessen, da beide Hecken aneinander grenzten. Die Situation ist in Anhang E in Bild E 1 dargestellt. Die Messbedingungen waren:

Temperatur:	24,5°C
Luftfeuchte:	36 %
Windgeschwindigkeit:	$\leq 0,5$ m/s

Die Messung erfolgte wie bei der Efeuhecke. Die Hecke wies eine Dicke von 1,0 m auf, sie war bis zu einer Tiefe von ca. 0,3 m belaubt. Im übrigen Innenraum befand sich unbelaubtes Geäst. Aufgrund der Höhe von 2,0 m und der Breite von ca. 14 m der Hecke waren die Beugungseffekte um die Hecke gering. Die äußere Struktur zeigte eine zum Schalleinfall etwas offenere Blattstruktur, die Hecke war blickdicht. Kleinere Ausnahmen bildeten die bodennahen Bereiche. Hier gab es vereinzelte Bewuchslücken. Die Blätter waren relativ groß und besaßen eine Dicke von ca. 0,35 mm. Die Einfügungsdämmung ist in Bild 59 dargestellt.

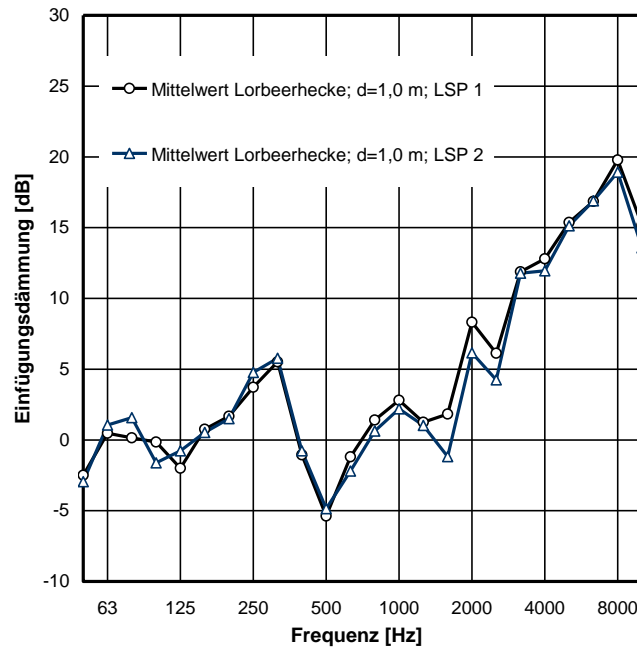


Bild 59: Einfügungsdämmung der Lorbeer-Hecke im Freien (Dicke 1.0 m).

Im tiefen Frequenzbereich bis 2 kHz schwankt die Einfügungsdämmung um ca. ± 5 dB. Diese Schwankung ist auf die Bodenreflexion zurückzuführen, die bei der Messung mit Hecke andere Reflexionseigenschaften besaß als bei der Referenzmessung. Tendenziell verhält sich die Messung über einer Grasfläche ähnlich zu der Messung über einer schallharten Oberfläche, im Bereich der Hecke ist der Boden dagegen deutlich aufgelockerter und stärker absorbierend.

Ab 2000 Hz steigt die Einfügungsdämmung, wie bei allen Hecken typisch, zu hohen Frequenzen hin an. Bei 8 kHz werden Werte von ca. 20 dB erreicht. Dabei sind beide Messungen an unterschiedlichen Stellen der Hecke in ihren Ergebnissen vergleichbar. Bei 10 kHz tritt auch bei dieser Hecke ein Einbruch auf. Im Vergleich zur Efeuhecke ist die Lorbeerhecke innerhalb der Hecke nicht belaubt. Damit ist die Dichte geringer und die maximale Einfügungsdämmung etwas geringer als bei der Efeuhecke. Die größeren und dickeren Blätter bewirken dagegen, dass der Anstieg schon bei etwas tieferen Frequenzen einsetzt.

6.5 Messung der Hainbuchenhecke – *Carpinus betulus*

Am Tag der Messung (18. Mai 2009) waren folgende meteorologische Bedingungen gegeben:

Temperatur:	9,5°C
Luftfeuchte:	60 %
Windgeschwindigkeit	$\leq 0,5$ m/s

Die Lautsprecherpositionen sowie die Geometrie sind in Anhang E in Bild E 2 dargestellt. Die Hecke wies eine Dicke von 1,1 m auf. Die Hecke war beidseitig bis zu einer Tiefe von ca. 0,15 m belaubt. Im restlichen Innenraum befand sich unbelaubtes Geäst. Aufgrund der Höhe von 2,0 m und der Breite von ca. 14,5 m der Hecke waren die Beugungseffekte um die Hecke gering. Die Blattstruktur zeigte in

regelmäßigen Abständen kleine undichte Stellen. Diese waren aber nur bei genauem Hinsehen erkennbar. Die Blattstruktur war fast waagrecht zum Schalleinfall ausgerichtet. Im bodennahen Bereich gab es vereinzelt relativ große blattfreie Flächen. Die Blattfläche der einzelnen Blätter war vergleichsweise groß, die Blattstruktur war ziemlich weich. Die Blätter wiesen eine Dicke von ca. 0,11 mm auf.

Der frequenzabhängige Verlauf der Einfügungsdämmung ist im Bild 60 dargestellt. Der Verlauf der Einfügungsdämmung ist ähnlich zur Lorbeerhecke. Auch hier kommt unter 2000 Hz es zu Schwankungen der Einfügungsdämmung um 0 dB durch den Bodeneffekt. Ab 2500 Hz steigt die Einfügungsdämmung bis 8000 Hz an. Bei 10 kHz ergibt sich ein Einbruch. Bei 10 kHz kann ein Einfluss des Hintergrundgeräusches auf die Einfügungsdämmung nicht vollständig ausgeschlossen werden. Die geringere Dämmwirkung der Lautsprecherposition 2 ist auf erkennbare undichte Stellen in der Hecke im bodennahen Bereich sowie auf lichte Stellen auf Höhe des Mikrofons zurückzuführen.

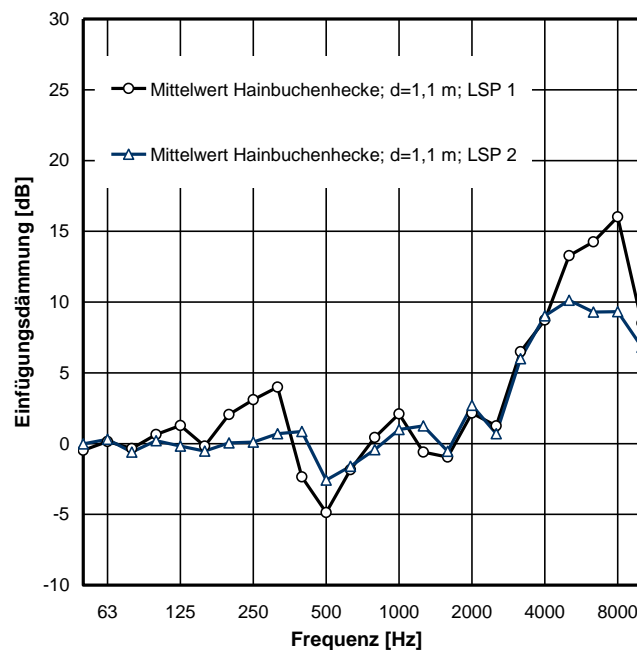


Bild 60: Einfügungsdämmung der Hainbuchenhecke im Freien (Dicke 1.1 m).

6.6 Messung der Buchsbaumhecke – *Buxus sempervirens*

Am Messtag (20. Mai 2009) waren folgende meteorologische Bedingungen gegeben:

Temperatur:	24,5°C
Luftfeuchte	36 %
Windgeschwindigkeit	≤ 0,5 m/s

Die Messung erfolgte nach der zuvor beschriebenen Vorgehensweise. Die Lautsprecherpositionen sowie die Geometrie sind in Anhang E in Bild E 3 gezeigt. Die Hecke wies eine Dicke von 1,2 m auf und war beidseitig bis zu einer Tiefe von ca. 0,10 m belaubt. Im restlichen Innenraum befand sich unbelaubtes Geäst. Aufgrund der Höhe von 2,0 m und der Breite von 3,5 m waren auch hier nur geringe

Beugungseffekte zu erwarten. Die äußere Struktur der Hecke zeigte eine zum Schalleinfall offene Blattstruktur, welche in regelmäßigen Abständen kleine, aber deutlich lichte Stellen aufwies. Eine dem Schall entgegenwirkende dichte Blattrienfläche war nicht gegeben. Die Blattfläche der einzelnen Blätter war zudem sehr klein und die Blätter besaßen eine Dicke von ca. 0,10 mm. Aufgrund der geringen Breite und der teilweise großen undichten Stellen in der Hecke wurde auf eine zweite Lautsprecherposition verzichtet.

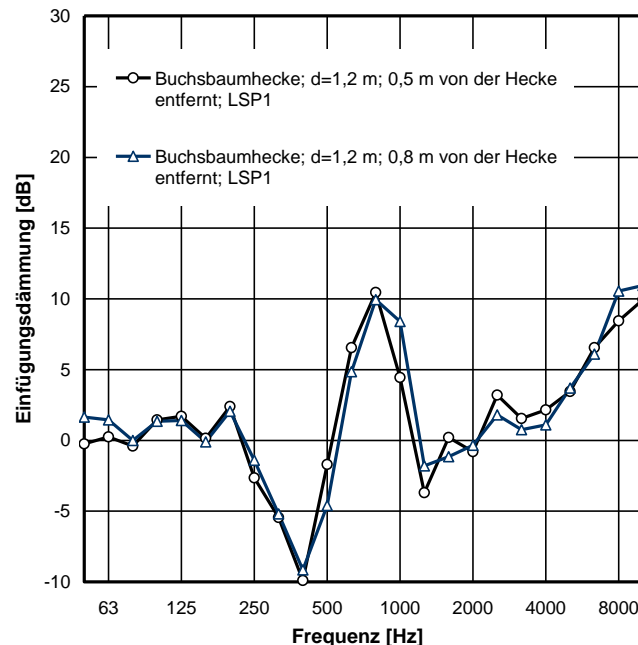


Bild 61: Einfügungsdämmung der Buchsbaumhecke im Freien (Dicke 1.2 m).

Die Einfügungsdämmung ist in Bild 61 dargestellt. Die Schwankungen der Einfügungsdämmung um 0 dB im Frequenzbereich zwischen 250 und 1000 Hz fallen hier mit ± 10 dB deutlich stärker aus als bei den zuvor untersuchten Hecken. Hier waren die Bodeneigenschaften von Messung mit Hecke und der Referenzmessung (ohne Hecke) sehr unterschiedlich. Ein Anstieg der Einfügungsdämmung der Hecke tritt ab 3150 Hz ein und fällt zudem vergleichsweise gering aus. Die Einfügungsdämmung bei 8000 Hz erreicht einen Wert von ca. 10 dB und liegt damit in der Größenordnung des Effekts der Bodenreflexion.

6.7 Nachweis des Einflusses der Bodenreflexion

Bei den Messungen im Freien wurden witterungsbedingten Einflüsse durch zeitnahes Messen und durch das Beibehalten der Messrichtung minimiert bzw. ausgeschlossen. Mögliche Reflexionen an kritische Gebäudeflächen wurden durch Abdeckung dieser Flächen mit Caruso Iso Bond-Absorbern bis zu einer Höhe von 1,5 m (Maße der Absorber: Länge 1,50 m, Breite 0,50 m und Dicke 0,10 m) reduziert. Die Messung der Einfügungsdämmung im Freien weisen dennoch Schwankungen der Einfügungsdämmung um 0 dB im Frequenzbereich zwischen 125 und 2000 Hz auf. Diese wurden auf die unterschiedliche Bodenreflexion der Messung mit und ohne Hecke zurückgeführt. Um diesen Einfluss zu belegen wurden Messungen im Labor nachgestellt

Der Schalldruckpegel am Immissionspunkt setzt sich aus direkten und reflektierten Schallanteilen zusammen. Hierzu wurde der vom Lautsprecher ausgehende direkte Schallanteil bei einer gegebenen Geometrie im Modellraum des IBP mit reflektierendem/schallhartem Boden und alternativ mit absorbierendem/schallweichem Boden (mit Caruso Iso Bond-Absorbern, $d = 100$ mm ausgelegt) durchgeführt. Der Abstand zwischen Lautsprecher und Mikrophon betrug bei allen Messungen 2 m (dies entspricht der Geometrie der Messung "Lorbeerhecke; LS 0,5 m von der Hecke entfernt"). Die Pegeldifferenz beider Messungen, wie sie auch bei der Ermittlung der Einfügungsdämmung (siehe Gleichung 12) eingesetzt wird, ist in Bild 62 dargestellt.

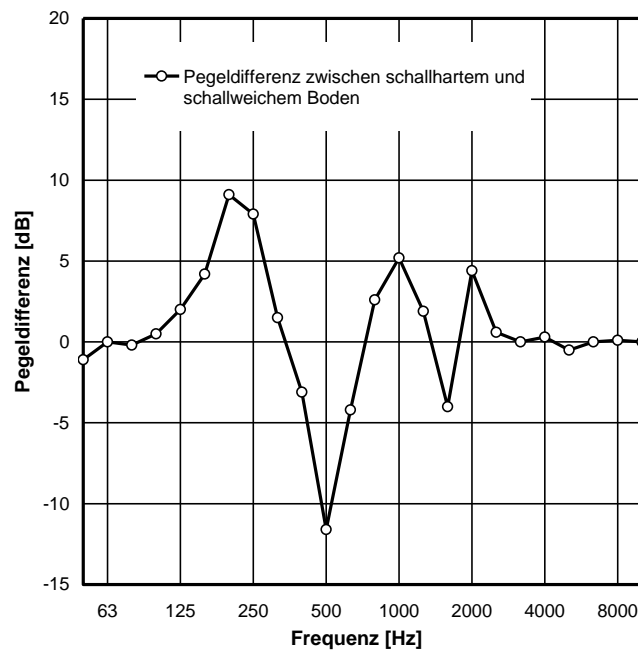


Bild 62: Pegeldifferenz von Messung mit schallhartem Boden und Messung mit schallabsorbierend ausgelegtem Boden.

Im mittleren Frequenzbereich zeigt Bild 62 einen ähnlichen Verlauf mit Abweichungen von 0 dB wie bei der Messung der Einfügungsdämmungen im Freien. Da die Geometrie der Messung der Lorbeerhecke entspricht, treten die größten Abweichungen bei ähnlichen Frequenzen zur Messung der Lorbeerhecke im Freien auf. Die Abweichungen erreichen Werte von ca. ± 10 dB, wie auch bei der Messung an der Buchsbaumhecke. In der Literatur [16 - 23] werden Bodeneffekte in derselben Größenordnung angegeben. Unter Berücksichtigung der Messungen kann man davon ausgehen, dass der Bodenbereich im Bereich der Hecke im Freien eher schallabsorbierend wirkt (aufgelockertes Erdreich durch die Hecke), der Boden einer Wiese eher schallharte Eigenschaften besitzt.

6.8 Ergebnisse der Heckenmessungen im Freien

Die Messergebnisse der Einfügungsdämmung der Efeuhecke, der Lorbeerhecke, der Hainbuchenhecke und der Buchsbaumhecke sind in Bild 63 gegenübergestellt und lassen sich in drei Frequenzbereiche aufteilen. Im tieffrequenten Bereich von 50 bis 125 Hz wird der Schalldurchgang durch die Hecke wenig bis gar nicht gestört. Im mittleren Frequenzbereich von 160 bis 1600 Hz kommt es aufgrund von unterschiedlichen Bodenimpedanzen zwischen der Messung mit Hecke und der Referenzmes-

sung zu Schwankungen der Einfügungsdämmung um 0 dB. Dieser Bodeneffekt ist geometrieabhängig, so dass es bei unterschiedlicher Geometrie zu Verschiebungen der Frequenzen der Verstärkung bzw. Abschwächung der Pegel kommt. Der Bodeneffekt wird nur indirekt von der Hecke verursacht, denn die Hecke sorgt durch ihren Wuchs des Wurzelwerks, durch ihre Verschattung des Bodenbereichs sowie durch den Blattabwurf für unterschiedliche Bodenbedingungen im Bereich der Hecke.

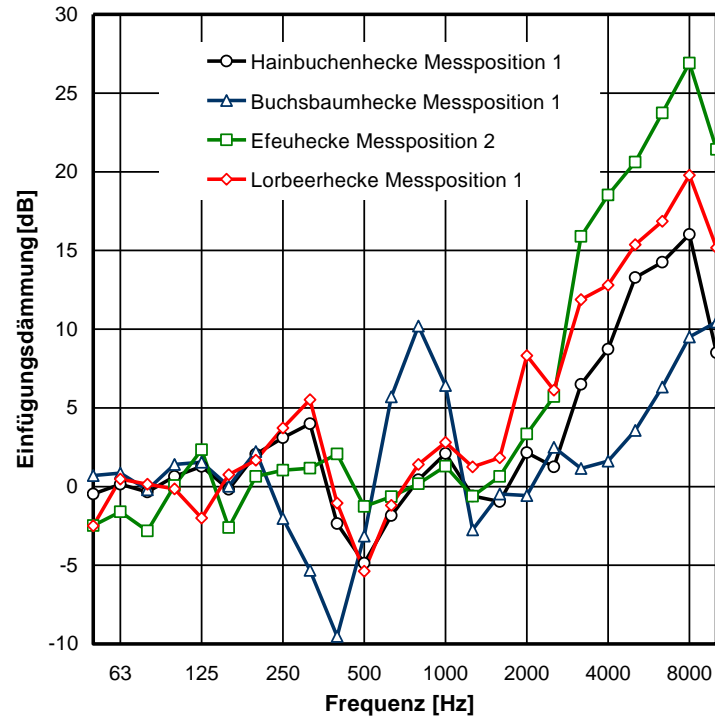


Bild 63: Vergleich der gemessenen Einfügungsdämmung der einzelnen Hecken. Aufgetragen sind die jeweils höchsten Messergebnisse .

Zwischen 1600 und 8000 Hz setzt ein stetiger Anstieg der Einfügungsdämmung mit der Frequenz ein. Bei 10000 Hz bricht die Einfügungsdämmung bei den meisten Hecken, mit Ausnahme der Buchsbaumhecke, ein. Betrachtet man den Anstieg bei hohen Frequenzen ab ca. 1600 Hz, so zeigt sich, dass dieser für die Hecke mit großen Blättern (Efeu) bei tieferen Frequenzen einsetzt als bei der Hecke mit den kleinsten Blättern (Buchsbaum)

Bei Lorbeerhecke und Hainbuchenhecke sind die Blätter nahezu gleich groß. Dabei ist die Blattausrichtung bei beiden Hecken nicht rechtwinklig zur Schalleinfallrichtung, wie dies bei der Efeuhecke annähernd der Fall war. Dabei ist die Ausrichtung der Lorbeerhecke günstiger zur Schalleinfallrichtung, bei der Hainbuchenhecke ist die Blattausrichtung eher waagrecht. Daher beginnt die Einfügungsdämmung der Lorbeerhecke bei tieferen Frequenzen und besitzt höhere Werte als die Hainbuchenhecke.

Der Anstieg aller Hecken weist einen relativ typischen Verlauf mit ähnlicher Steigung auf und ist vergleichbar mit den Messungen im Labor.

6.9 Bewertung der Dämmwirkung für den städtebaulichen Lärmschutz

Die Bewertung der gemessenen Einfügungsdämmungen bezüglich der Eignung der Hecken zum städtebaulichen Lärmschutz wurde durch das standardisierte Verkehrslärmspektrum aus der DIN EN 1793-3 [36] vorgenommen. Bewertungsmaßstab war der A-bewertete Summenpegel. Dieser ergab sich, indem vom im Bild 4 gezeigten Verkehrslärmspektrum die Einfügungsdämmung abgezogen wurde, und dann der Summenshallpegel und der A-bewertete Summenshallpegel errechnet wurden. Die Einzahlwerte des Verkehrslärmspektrums allein, sowie der Spektren mit den verschiedenen Hecken, sind in Tabelle 6 gezeigt:

	Standardisiertes Verkehrslärmspektrum	Hainbuchenhecke	Buchsbaumhecke	Efeuhecke	Lorbeerhecke
Linearpegel in dB	65,2	65,0	66,6	64,9	65,3
A-bewerteter Pegel in dB(A)	60,2	60,0	61,5	59,5	59,4
Veränderung A-Pegel in dB	-	0,2	-1,3	0,7	0,8

Tabelle 6: Einzahlwerte des Linearpegels und des A-bewerteten Summenpegels des Standardisierten Verkehrslärmspektrums sowie das Verkehrslärmspektrum minus der gemessenen Einfügungsdämmung aus Bild 63 für die Hecken im Freien.

Die Bewertung beinhaltet den gemessenen Effekt der Einfügungsdämmung der Hecken im Freien. Der Bodeneffekt, Beugungseffekte sowie Ausbreitungseffekte werden hierbei wie gemessen berücksichtigt. Da der schalldämmende Frequenzbereich erst bei ca. 2000 Hz beginnt, sind die untersuchten Hecken zur Minderung des linearen und A-bewerteten Verkehrslärmspektrums nicht geeignet. Die maximale Reduktion beträgt bei der Lorbeerhecke 0,8 dB. Bei der Buchsbaumhecke ist die Minderung durch die Hecke negativ, da hier die Überhöhung durch den Bodeneffekt im mittleren Frequenzbereich stark ausgeprägt ist und zu einem höheren A-bewerteten Summenpegel führt. Gerade in diesem mittleren Frequenzbereich wäre eine Dämmwirkung der Hecke notwendig, um das A-bewertete Spektrum zu reduzieren. Gelingt es durch geeignete Gestaltung der Hecke, den Anstieg der Dämmwirkung zu tieferen Frequenzen zu verschieben, wird auch eine deutlichere Reduktion des A-bewerteten Schalldruckpegels hinter der Hecke erzielt. Aber auch bei den bestehenden Hecken ist schon eine akustische Wirkung vorhanden. Diese reduzieren die hohen Frequenzanteile im Lärmspektrum zum Teil recht deutlich, was zu einer deutlichen Veränderung des Geräuschspektrums führt. Da bei hohen Frequenzen die Beugung über und um die Hecke gering ist, kann auch bei kleineren Hecken eine Änderung der Charakteristik des Geräusches erwartet werden. Erste psychoakustische Versuche zur Lästigkeit von Verkehrsgeräuschen sollen darüber Aufschluss geben, wie die Ab-

schirmung durch eine Hecke psychoakustisch beurteilt wird. Diese Versuche sind in Kapitel 8 beschrieben.

6.10 Zusammenfassung der Messungen im Freien

Die Messungen im Freien zeigten sowohl den Einfluss des Bodeneffekts als auch den Anstieg der Einfügungsdämmung bei hohen Frequenzen. Im hohen Frequenzbereich zeigte sich bei allen vier Hecken ein typischer starker Anstieg. Abhängig von der Heckenart war dieser Anstieg zu tieferen oder höheren Frequenzen verschoben und auch in seiner Steilheit unterschiedlich. Dabei erreichte die Hecke mit den größten Blättern und senkrechter Blattausrichtung zum Schalleinfall (Efeu) die höchste Einfügungsdämmung (> 25 dB bei 8 kHz). Dieser typische Verlauf der Einfügungsdämmung wird im nächsten Kapitel durch ein Berechnungsmodell modelliert.

Die technische Bewertung der Einfügungsdämmung von Hecken durch das standardisierte Verkehrslärmspektrum ergab eine geringfügige Reduktion des A-bewerteten Summenpegels von maximal 0,8 dB. Aus technischer Sicht kann deshalb geschlossen werden, dass Hecken für den Schallschutz von Verkehrslärm mit dem verwendeten Spektrum nur bedingt geeignet sind. Allerdings ergibt die hohe Einfügungsdämmung der Hecken bei hohen Frequenzen eine deutliche Veränderung des Spektrums. Der Einfluss dieser Änderung auf die subjektive Beurteilung der Geräusche wird in Kapitel 8 untersucht. Lärmspektren mit Geräuschen im hohen Frequenzbereich, wie z.B. von Straßenbahnen mit Kurvenquietschen, die als sehr lästig empfunden werden, können dagegen durch Hecken gut abgeschirmt werden.

7 Modellierung von Hecken

Im Idealfall lassen sich mit einem geeigneten Modell die akustischen Eigenschaften einer Hecke, ohne sie zu messen, vorhersagen. Dabei sollte das Modell einerseits möglichst einfach sein, auf der anderen Seite aber genaue Vorhersagen ermöglichen. Weiterhin ermöglicht ein gutes Modell einen Überblick der für die Akustik entscheidenden Parameter einer Hecke. Damit ist es möglich, für Hecken eindeutige Hinweise auf die Ausgestaltung zur Optimierung der Hecke zu geben. Weiterhin ermöglicht ein Modell Parameterstudien, die bei realen Hecken nicht möglich oder zu aufwändig sind. Aus diesen Gründen wurde versucht, ein Modell zu finden, mit dem Aussagen über das akustische Verhalten von Hecken möglich sind. Dazu wurde die Literatur über Hecken gesichtet.

7.1 Modell von Aylor

In [15] werden von Aylor physikalische Modelle beschrieben, die die Ausbreitungsdämpfung von Vegetation ermöglichen sollen. Diese werden mit Messungen abgeglichen, bei denen die Einflüsse der Blattfläche, der Astdurchmesser und Dichte und die Bodenverhältnisse berücksichtigt werden. Dafür wurden verschiedene Anpflanzungen mit verschiedenen Pflanzen herangezogen. Weiterhin wurden Messungen über unterschiedlichen Böden (mit verschiedener Oberflächenporosität) durchgeführt. Es wird vorausgesetzt, dass sich die Einflüsse von Blättern, Ästen und der Bodeneffekt getrennt betrachten lassen, so dass eine Interaktion der verschiedenen Einflüsse nur unwesentlichen Einfluss besitzt. Die Messergebnisse zeigen, dass dieses Vorgehen sinnvoll ist.

Als Mechanismen für die Reduktion der Schallausbreitung wird von Aylor [15] die viskose und thermische Dissipation zwischen Fluid und Pflanzenoberfläche, die Streuung und die Dissipation durch bedämpfte harmonische Oszillatoren identifiziert. Die Dissipation durch bedämpfte harmonische Oszillatoren wird durch Embleton [45] als gering eingeschätzt. Die Untersuchungen in Kapitel 5.2.5 bestätigen dies. Aylor gibt ein Modell für die viskosen und thermischen Verluste in der Grenzschicht der Pflanzenoberfläche, die Dämmung durch Streuung an einer Reihe von Blättern und die Streuung an harten Zylindern an. Weiterhin gibt er ein Modell für den Bodeneffekt an.

Den Schalldurchgang durch die Vegetation beschreibt Aylor mit Mehrfachstreuung zwischen den Blättern. Daher schlägt er als einfaches Ersatzmodell den Schalldurchgang durch eine Einfachwand mit unbekannter flächenbezogener Masse vor [15].

Für den Effekt der Äste zieht er ein Modell zur Streuung an harten Zylindern heran. Bei tiefen Frequenzen, bei denen die Wellenlänge deutlich größer als der Zylinder-Radius ist, ist die Streuung sehr gering. Bei hohen Frequenzen dagegen wird das Schallfeld stark gestreut und es kommt zu Mehrfachstreuung. Dazwischen liegt ein Übergangsbereich, bei dem die Streuung nur teilweise stattfindet. Der Vergleich der Vorhersagen des Modells mit Messwerten in Aylor [15] zeigt zum Teil recht gute Übereinstimmung im hohen Frequenzbereich, bei dem die Voraussetzung von Streuung gegeben war.

Eine wichtige Schlussfolgerung in Aylors Arbeit ist, dass die Durchsichtigkeit von Bewuchs kein gutes Maß für die Dämmwirkung darstellt, da sie auch durch kleine Objekte wie Äste und kleine Blätter ver-

ringert wird, diese aber deutlich weniger effektiv bei der Streuung von Schall sind als größere Strukturen. Weiterhin gibt Aylor ein Modell für den Bodeneffekt an. Dieses wird in hier nicht weiter betrachtet.

7.2 Modell von Price, Attenborough und Heap

In der Arbeit von Price, Attenborough und Heap [18] wird der Ansatz der Trennung der Berechnung des Bodeneffekts bei tiefen und mittleren Frequenzen und die Berechnung durch Streuung für hohe Frequenzen fortgeführt. Wiederum werden die berechneten Werte mit Messungen abgeglichen, wobei es sich auch hier um natürlichen Bewuchs über eine größere Breite von 12 bis 96 m handelte.

Für die Modellierung der Streuung wird die Theorie der Mehrfachstreuung an Zylindern verwendet, die auf der Theorie von Twersky [46] basiert. Die Oberfläche der Stämme wird als schallhart angenommen.

Ein Vergleich des Modells mit Messwerten, bei dem die Stämme als starre Zylinder und ein mittlerer Durchmesser für die Berechnung verwendet wurde, ergab zuerst eine relativ schlechte Übereinstimmung bei 1 kHz, dagegen eine relativ gute Übereinstimmung bei 10 kHz. Eine empirisch reduzierte Dichte (-60%) ergab dagegen bei 1 kHz eine gute Übereinstimmung, bei 10 kHz dann aber eine zu geringe Dämpfung. Hier zeigt sich, dass in diesem Fall die Frequenzabhängigkeit von Messungen und Rechnung nicht konform war. Daher wird der Schluss gezogen, dass auch die Äste und Blätter zur Streuung beitragen. Daher wurden empirische Versuche unternommen, auch die Äste und Blätter als (deutlich kleinere) Zylinder zu modellieren und in ihren Werten so anzupassen, dass insgesamt ein mit den Messwerten übereinstimmender Anstieg der Dämpfung zustande kommt. Empirisch war eine Anpassung möglich, so dass daraus geschlossen wird, dass die Streuung der Belaubung zur Dämpfung mit beiträgt. Dies wurde vor allem für eine dichte Struktur festgehalten.

Weiterhin wird in dieser Arbeit nun versucht, die Modelle für den Bodeneffekt und für die Streuung empirisch so zu kombinieren, dass die Berechnung den Messungen entspricht. Dies war nach Anpassung der Übergangsfrequenz beider Modelle recht gut möglich.

7.3 Modell von Defrance, Barriere und Premat

Das Modell ist in [47] beschrieben. Auch hier geht es um die Schallausbreitung im Wald über einen größeren Bereich, so dass auch meteorologische Einflüsse mit berücksichtigt werden sollen. Das Modell, das die Streuung der Bäume beschreibt, hier bezeichnet als Diffusion, basiert wiederum auf dem Ansatz der Mehrfachstreuung von Twersky [46], sowie von Felbacq [48]. Beide Modelle basieren auf der Summation der einfallenden Welle durch Bessel-Funktionen erster Art und der gestreuten Welle als eine Summe von zylindrischen Hankel-Funktionen.

Als weiterer Schritt wird ein analytisches Streuungs-Modell entwickelt, das wiederum auf der Streuung von unendlichen schallharten Zylindern beruht, aber auch meteorologische Einflüsse berücksichtigt. Hier wird Bezug genommen auf die Arbeit von Price [18], um eine Anpassung an Messwerte zu erhalten. Für die Modellierung der Dämmwirkung von Hecken, bei denen vor allem die Belaubung für die Streuung wichtig ist, ist der Ansatz der Streuung an Zylindern weniger geeignet als zur Modellierung von Ästen und Stämmen. Daher wurde für Hecken das folgende Modell herangezogen.

7.4 Modell von Mechel

Da in dieser Arbeit die Wirkung des Bodeneffekts nicht explizit untersucht wurde, wird dieser auch in der Modellierung nicht weiter behandelt. Die oben genannten Modelle gehen davon aus, dass dieser Effekt mit der Dämmwirkung einer Hecke kombinierbar ist. Für den Bodeneffekt kann also auf die gängigen Modellen zurückgegriffen werden. In Mechels Buch Schallabsorber Band II [49] wird das von Twersky [46] beschriebene Modell in Kapitel 14.1 behandelt. Dabei sind die Ansätze für unendliche Zylinder mit den zuvor beschriebenen Modellen von Defrance und Price dieselben. Hinzu kommt die Behandlung der Streuung an Kugelflächen. Das Modell wird von Mechel relativ ausführlich beschrieben und auch die darin enthaltenen Grundannahmen können [49] entnommen werden. In Kapitel 14.2 werden Formeln für die Einzel-Streuung von Dichtewellen angegeben.

Zur Modellierung von Stämmen und Ästen wird das Modell für unendliche Zylinder herangezogen. Dieses wird direkt aus [49] übernommen. Zur Veranschaulichung ist in Bild 64 das Modell skizziert.

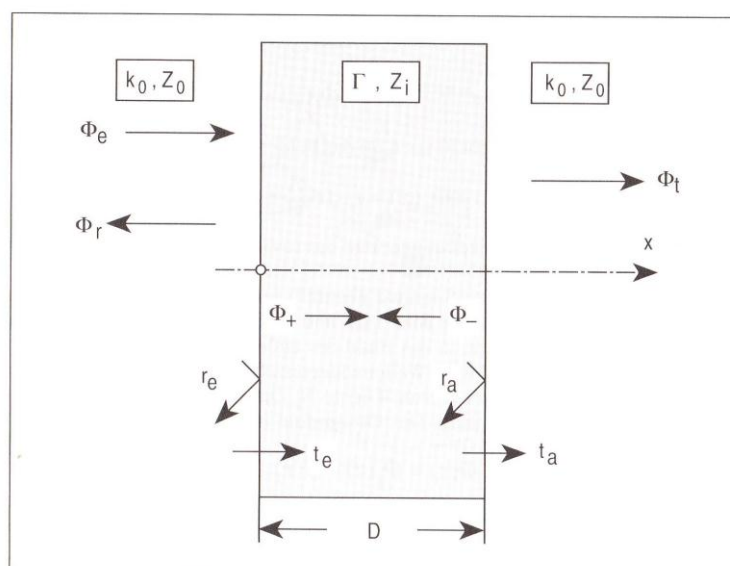


Bild 64: Grafische Darstellung des Modells nach Mechel [49], Bild 14.2. Dabei wird die Hecke als „homogene Vergleichsschicht“ mit Ausbreitungskonstante Γ und Impedanz Z_i beschrieben.

Der Pegelabfall einer Schicht der Dicke D entspricht der Einfügungsdämmung dieser Schicht. Er wird berechnet mit:

$$\Delta L = -20 \log |t| = -20 (\log |t_e| + 20 \log |t_a|) + 8.686 \operatorname{Re}(\Gamma) D \quad (35)$$

Der erste Term beschreibt dabei die Reflexionsdämpfung bei Durchtritt der Schallwelle durch die Schichtgrenzen, der letzte Term ist die Ausbreitungsdämpfung auf der Strecke durch das Medium, hier die Hecke.

Der Transmissionsfaktor beim Eintritt der Schallwelle in das Medium ist:

$$t_e = \frac{1 - r_a}{1 - r_a^2 \cdot e^{-2\Gamma D}} \quad (36)$$

und beim Austritt:

$$t_a = \frac{2}{1 + Z_i / Z_0} \quad (37)$$

Der Gesamt-Transmissionsfaktor ist

$$t = t_e \cdot t_a \cdot e^{-\Gamma D}, \quad (38)$$

der Reflexionsfaktor am Eintritt in die Hecke ist:

$$r_e = -r_a \cdot \frac{1 - e^{-2\Gamma D}}{1 - r_a^2 \cdot e^{-2\Gamma D}} \quad (39)$$

Dabei ist:

$$r_a = \frac{1 - Z_i / Z_0}{1 + Z_i / Z_0} \quad (40)$$

und

$$\left(\frac{Z_i}{Z_0} \right)^2 = \frac{\rho_{eff}}{\rho_0} / \frac{c_{eff}}{c_0} \quad (41)$$

mit:

$$\frac{\rho_{eff}}{\rho_0} = 1 + j \frac{8\mu}{\pi(k_0 a)^2} \sum_{n=1,3,5,\dots} D_n \quad (42)$$

und:

$$\frac{c_{eff}}{c_0} = 1 + j \frac{8\mu}{\pi(k_0 a)^2} \left[\frac{1}{2} D_0 + \sum_{n=2,4,6,\dots} D_n \right]. \quad (43)$$

Dabei ist μ die Massivität der Stämme oder Äste:

$$\mu = \left(\frac{2a}{2R} \right)^2 \quad (44)$$

Mit a dem Radius der Stämme oder Äste ($2a$ ist der Durchmesser) und $2R$ dem mittleren gegenseitigen Abstand der Zylinder. k_0 ist die Wellenzahl in Luft. Die Streu-Amplituden sind

$$D_n = -\frac{\frac{n}{k_0 a} J_n(k_0 a) - J_{n+1}(k_0 a)}{\frac{n}{k_0 a} H_n^{(2)}(k_0 a) - H_{n+1}^{(2)}(k_0 a)} \quad (45)$$

Mit J_n der Besselfunktion und $H_n^{(2)}$ der Hankelfunktion der zweiten Art.

Die Ausbreitungskonstante $\Gamma = jk_e$ berechnet sich mit:

$$\frac{\Gamma}{k_0} = j \sqrt{\frac{\rho_{eff}}{\rho_0} \cdot \frac{c_{eff}}{c_0}} \quad (46)$$

Für Blätter wird dagegen eine Streuung an Kugeloberflächen angenommen. Damit ändern sich die Streu-Amplituden nach [49] zu:

$$D_n = -\frac{\frac{n}{k_0 a} j_n(k_0 a) - j_{n+1}(k_0 a)}{\frac{n}{k_0 a} h_n^{(2)}(k_0 a) - h_{n+1}^{(2)}(k_0 a)} \quad (47)$$

Hier steht j_n für die sphärische Besselfunktion erster Art und $h_n^{(2)}$ für die sphärische Hankelfunktion der zweiten Art. Die normierte Dichte und Schallgeschwindigkeit innerhalb der Hecke ist für Blätter (Streuung an Kugeloberflächen) in [49] nicht explizit unterschiedlich zu der für Zylinder (Gleichung 42 und 43) angegeben. Allerdings konnten die Ergebnisse von Bild 14.5 so nicht nachgerechnet werden. Private Korrespondenz mit Mechel [50] ergab, dass hierfür folgende Gleichungen verwendet wurden:

$$\frac{\rho_{eff}}{\rho_0} = 1 + j \frac{3\mu}{(k_0 a)^3} \sum_{n=1,3,5,\dots} \delta_n D_n \quad (48)$$

$$\frac{c_{eff}}{c_0} = 1 + j \frac{3\mu}{(k_0 a)^3} \sum_{n=0,2,4,\dots} \delta_n D_n \quad (49)$$

Dabei ist:

$$\delta_n = 2n + 1 \quad (50)$$

Die Gleichungen (35) – (41), (44) und (46) für die Berechnung der Zylinder werden auch für die Blätter (Kugeln) unverändert verwendet. Für die fehlende Volumen-Verdrängung der Blätter (anstatt von Kugeln) werden die ersten Terme der Streu-Amplituden nach Mechel [49] korrigiert:

$$D_0 \rightarrow D_0 \frac{1}{1-\mu} \quad (51)$$

und

$$D_1 \rightarrow D_1 \frac{1+2/\pi \cdot \mu}{1+3/2 \cdot \mu}. \quad (52)$$

Damit lassen sich die Ergebnisse von Bild 14.5 in [49] reproduzieren. Die Summation wurde wie bei Mechel bis $n=16$ durchgeführt. Eine Variation dieser Summationsgrenze zeigte, dass mit $n=16$ die wesentlichen Terme berücksichtigt wurden und die Summation mit höheren Termen keine Änderung der Ergebnisse brachte.

Die Massivität von Blättern ist verschwindend gering, da die Blätter fast keine Dicke besitzen. Daher wird hierfür von Mechel eine Ersatz-Massivität μ' in [49] eingeführt. Diese ist:

$$\mu' = N \left(\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot a^3 \right) \quad (53)$$

mit N der Anzahldichte (Anzahl pro Volumen) und dem angenommenen Kugelvolumen der Blätter. a ist dabei der effektive Blattradius. Dieser wird nach [49] ermittelt, in dem die mittlere Blattfläche ermittelt wird. Angenommen wird, dass die Blätter nahezu kreisförmig sind. Dann kann aus der mittleren Blattfläche ein mittlerer Blattradius a_0 für Kreisflächen ermittelt werden. Eine weitere Mittelung ist notwendig, da die Orientierung der Blätter nicht ausschließlich rechtwinklig zur Schalleinfallrichtung ist. Hier gibt Mechel zur Berechnung des effektiven Blattradius:

$$a = \frac{a_0}{\frac{1}{3}} = 0,693 \cdot a_0 \quad (54)$$

an. Dieser effektive Blattradius gehört zu einer Kreisscheibe mit der Fläche senkrecht zur Schalleinfallrichtung.

Analog zur Gleichung (53) kann ebenso eine Ersatz-Massivität μ' für Äste und Zweige (Zylinder) in der Hecke definiert werden:

$$\mu' = N \left(\pi \cdot l \cdot a^2 \right) \quad (55)$$

Dabei ist l die Länge der Zweige oder Äste und a der Radius der Äste oder Zweige.

Die Anzahldichte bei der realen Spindelstrauch-Hecke wurde durch Auszählen der Blätter in einem definierten Volumen ermittelt. Bei der Kunsthecke wurde sie durch

$$N = \frac{1}{(a_0 + b)^3} \quad (56)$$

mit b dem Blattabstand (von Blatt zu Blatt) ermittelt.

Der Zusammenhang zwischen Transmissionsfaktor t von Gleichung (38) mit den Transmissionsgrad τ in Gleichung (5) ist:

$$\tau = t^2 \quad (57)$$

Ebenso gilt für den Zusammenhang von Reflexionsgrad ρ Gleichung (7) und dem Reflexionsfaktor r_e aus Gleichung (39):

$$\rho = r_e^2 \quad (58)$$

Der Dissipationsgrad ergibt sich dann aus der umgestellten Gleichung (9):

$$\delta = 1 - \tau - \rho \quad (59)$$

Die Größen Transmissionsgrad, Reflexionsgrad und Dissipationsgrad wurden an realen Hecken auch messtechnisch ermittelt, siehe Abschnitt 5.2.6, so dass auch für diese Größen der Vergleich von Rechnung und Messung möglich war.

7.4.1 Modellierung der Spindelstrauch-Hecke

Das Modell von Mechel wurde als Matlab-Programm umgesetzt. Damit wurde die Spindelstrauch-Hecke, die in Abschnitt 5.3 beschrieben ist, modelliert. Danach wurde ein Vergleich von Messung und Rechnung vorgenommen. Als erster Schritt wurden die Eingangsdaten für das Modell ermittelt. Hierfür wurde innerhalb von drei Volumina in der Hecke die mittlere Größe und Anzahl der Blätter und Zweige bestimmt. Diese drei Volumina sind in Bild 65 dargestellt.



Bild 65: Spindelstrauchhecke mit Volumina, in denen die Blattgröße, Anzahl der Blätter sowie der Zweigradius, die Anzahl der Zweige und deren Länge ermittelt wurden.

Alle drei Volumina hatten die Abmessungen von 0,3 m x 0,25 m x 0,13 m und somit ein Volumen von 9,75 dm³. Beim Auszählen der Blätter zeigte sich, dass diese eine relativ ähnliche Größe besaßen. In Volumen 1 wurden 270, in Volumen 2 350 und in 3 300 Blätter gezählt. Weiterhin wurde in Stämme, Ästen und Zweigen unterschieden. Diese sind in Bild 66 schematisch dargestellt.

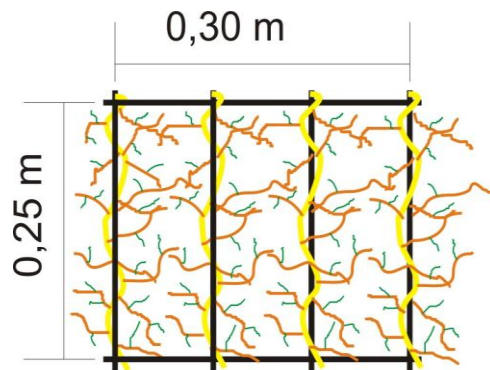


Bild 66: Schematische Darstellung der Äste und Zweige in der Spindelstrauchhecke (schwarz: Rankgerüst, gelb: Stämme, braun: Äste, grün: Zweige)

Die Stämme hatten einen mittleren Radius von $a=2,24$ mm, eine Länge von $l=0,25$ m und eine mittlere Anzahldichte von $N=1299$ /m³. Die Äste hatten die Werte $a=1,28$ mm, $l=0,08$ m und $N=2701$ /m³, Die Zweige besaßen die Werte $a=0,92$ mm, $l=0,05$ m und $N=1368$ /m³. Damit errechnete sich die Ersatz-Massivität für die Stämme zu $\mu' = 0,0051$, für die Äste $\mu' = 0,0011$ und für die Zweige $\mu' = 0,0002$. Für die Blätter ergab die Auszählung die Werte: mittlerer Blattradius $a_0 = 15,5$ mm, effektiver Blattradius $a = 10,75$ mm, Anzahldichte $N=31453$ /m³ und Ersatz-Massivität $\mu' = 0,164$. Die Dicke der Hecke war 0,3 m. Mit diesen Eingangsdaten wurde mittels Gleichung (35) die Einfügungsdämmung für die Stämme, Äste und Zweige, sowie für die Blätter berechnet. Die Ergebnisse sind in Bild 67 dargestellt.

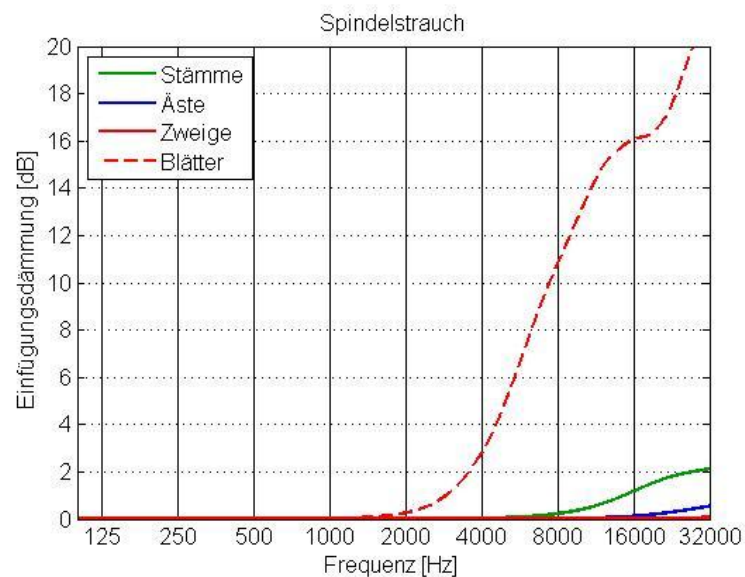


Bild 67: Mit dem Modell von Mechel berechnete Einfügungsdämmung der Spindelstrauchhecke

Die Ergebnisse zeigen, dass vor allem die Dicke der Zylinder bzw. der Kugeln (Fläche der Blätter) einen wesentlichen Einfluss hat. Erst bei Wellenlängen in den Größenbereich der Struktur kommt es zur Schallstreuung. In dem für die Anwendung von Hecken zu Schallschutzzwecken bestimmenden Frequenzbereich bis ca. 10 kHz besitzen lediglich die Blätter eine wesentliche Wirksamkeit. Die berechnete Einfügungsdämmung in Bild 67 der Blätter beginnt oberhalb 2000 Hz mit einem relativ steilen Anstieg, so dass bei 8 kHz ein Wert über 10 dB erreicht wird.

7.4.2 Vergleich von Messung und Rechnung bei der Spindelstrauch-Hecke

In Bild 68 ist der Vergleich von Messwerten zu berechneten Werten der Einfügungsdämmung der Spindelstrauchhecke dargestellt.

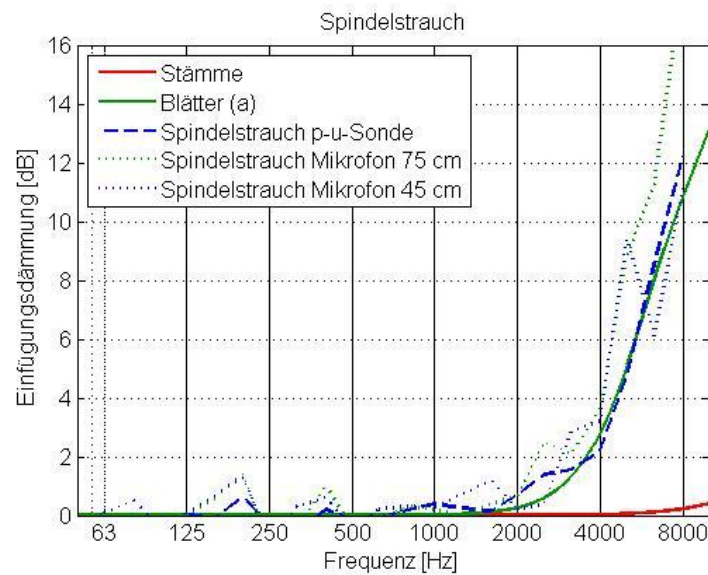


Bild 68: Berechnete und gemessene Einfügungsdämmung der Spindelstrauchhecke. Durchgezogene Linien berechnete Werte, gestrichelt gemessene Werte. $a_0 = 15,5$ mm, $a = 10,7$ mm, $\mu' = 0,16$.

Der Vergleich von Messung und Rechnung zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der Messung mit p-u-Sonde mit der Berechnung. Die Messungen mit Mikrofon weichen zum Teil etwas mehr von der Berechnung ab. Wichtig ist, dass die Berechnung sehr gut den charakteristischen Verlauf der Einfügungsdämmung wiedergibt. Das Einsetzen der Einfügungsdämmung oberhalb 2000 Hz wird ebenso gut wiedergegeben wie auch die Steilheit des Anstiegs mit der Frequenz.

Weiterhin war der Vergleich des Transmissionsgrads, Reflexionsgrads und Dissipationsgrads von Messung und Rechnung für die Spindelstrauchhecke möglich. Er ist in Bild 69 dargestellt.

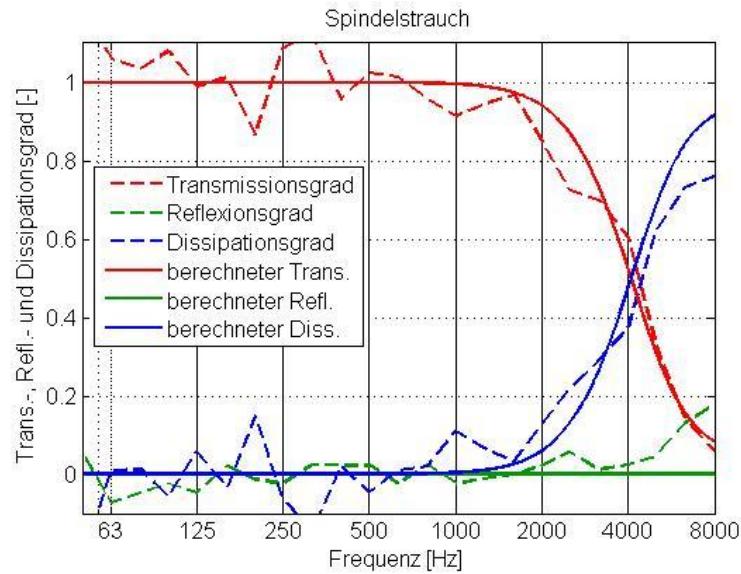


Bild 69: Berechneter und gemessener Transmissionsgrad, Reflexionsgrad und Dissipationsgrad der Spindelstrauchhecke. Durchgezogene Linien berechnete Werte, gestrichelt gemessene Werte.

Die Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Werte in Bild 69 zeigt für die Spindelstrauchhecke für alle drei Werte eine recht gute Übereinstimmung. Allerdings treten auch hier bei den Messwerten Abweichungen von den zu erwartenden Werten auf, die auf Messungenauigkeiten beim Scannen der Messfläche aufgetreten sein können. Im tiefen Frequenzbereich schwanken die Messwerte daher um die berechneten Werte. Im generellen Verlauf konnte jedoch eine gute Übereinstimmung von Messung und Berechnung gefunden werden.

Die Ergebnisse des Vergleichs der Spindelstrauchhecke zeigen eine gute Übereinstimmung von Rechnung zu Messung, so dass auf eine andere Modellierung (z.B. der Mehrfach-Streuung) verzichtet wurde.

7.4.3 Vergleich von Messung und Rechnung bei der Kunsthecke aus Folienblättern

Für die Hecke aus Kunstblättern, mit kreisförmigen Blättern mit Durchmesser von 63 mm, einem mittleren Abstand von 40 mm und einer Heckendicke von 0,36 m (Kapitel 5.6) ist der Vergleich von Rechnung mit Messung der Einfügungsdämmung in Bild 70 gezeigt.

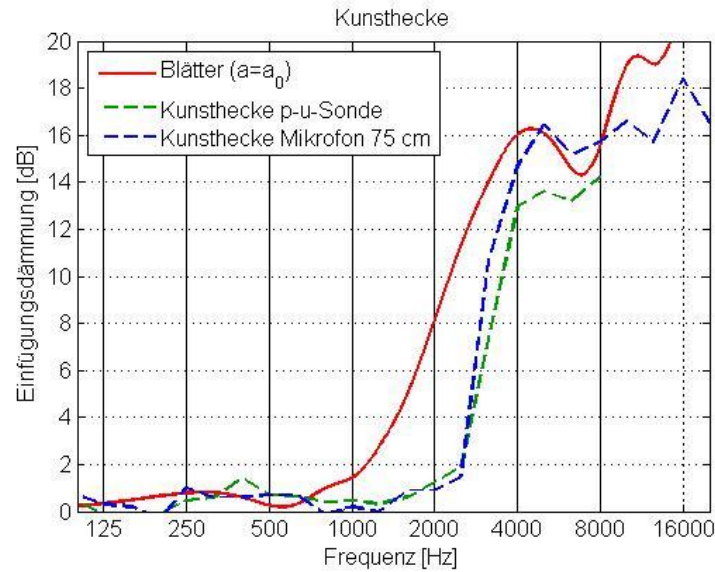


Bild 70: Berechnete und gemessene Einfügungsdämmung der Kunsthecke ($a=a_0=31,5$ mm, mittlerer Abstand $b=40$ mm, $\mu' = 0,36$, $D=0,36$ m)

Der Vergleich zeigt für der Annahme, dass die Kunstblätter senkrecht zum Schalleinfall stehen ($a = a_0$) einen etwas zu tiefen Frequenzen verschobenen berechneten Anstieg der Einfügungsdämmung. Daher scheint auch hier eine Korrektur der effektiven Blattfläche angebracht zu sein. Beim Aufbau der Kunsthecke war die Ausrichtung der Blätter annähernd senkrecht zum Schalleinfall, so dass die Korrektur deutlich geringer als in Gleichung (54) angenommen werden sollte. Unter Berücksichtigung einer Korrektur von $a = 0,95 \cdot a_0$ ergibt sich Bild 71.

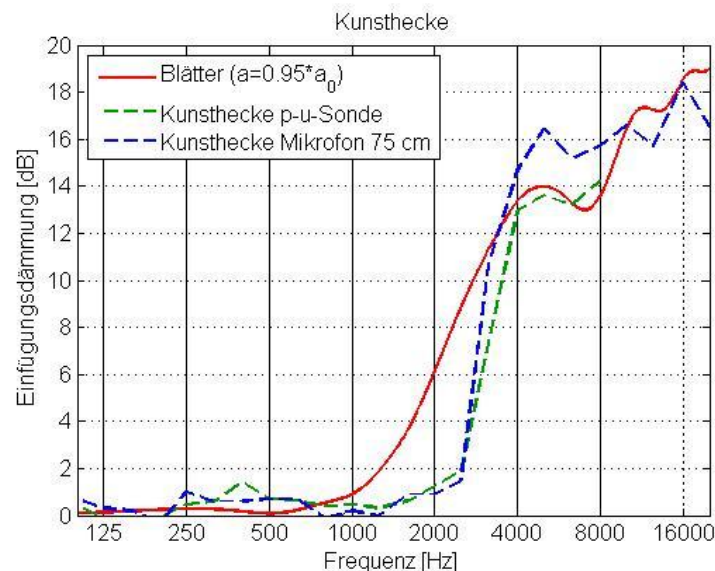


Bild 71: Berechnete und gemessene Einfügungsdämmung der Kunsthecke ($a=0,95 a_0=29,9$ mm, mittlerer Abstand $b=40$ mm, $\mu' = 0,31$, $D=0,36$ m)

Mit dieser Anpassung erreicht man bei den hohen Frequenzen eine gute Übereinstimmung von Rechnung und Messung. Auch die Welligkeit der Messwerte bei Frequenzen oberhalb ca. 5 kHz wird durch die Rechnung gut wiedergegeben. Dagegen zeigen die Messwerte bei ca. 2000 Hz einen deutlich steileren Anstieg als die Berechnung. Die Kunsthecke besitzt eine von einer realen Hecke abweichende Oberflächenstruktur, da die Kunstblätter in genau einer Ebene nahezu rechtwinklig zur Schalleinfallrichtung angeordnet sind, Bild 43. Reale Hecken haben dagegen eine weniger definierte Oberfläche. Es wird vermutet, dass der extrem steile Anstieg der gemessenen Einfügungsdämmung auf die Oberfläche zurückzuführen ist. Die Messung der Spindelstrauchhecke, Bild 68 und die Messungen an den realen Hecken in Kapitel 6 weisen dagegen einen der Rechnung ähnlicheren Anstieg der Einfügungsdämmung auf.

Der Vergleich der berechneten mit gemessenen Transmissions-, Reflexions- und Dissipationsgrade bei der oben beschriebenen Kunsthecke ist in Anhang F in Bild F 3 dargestellt. Bei diesem Vergleich treten deutlich größere Abweichungen zwischen Messung und Rechnung auf. Im Wesentlichen sind die Unterschiede auf Ungenauigkeiten bei der Messung der Reflexion zurückzuführen, die in diesem Fall deutlicher in Erscheinung treten. Insgesamt zeigt sich aber trotz dieser Abweichung ein ähnliches prinzipielles Verhalten von der Rechnung im Vergleich zur Messung.

Als weitere Variante wurde bei der Kunsthecke der Abstand der Blätter verändert. Die Messergebnisse sind in Kapitel 5.6.6 dargestellt. Ausgehend von der Hecke mit $a_0=31,5$ mm, $a=0,95$ $a_0=29,9$ mm, $b=40$ mm, $\mu' = 0,31$, $D=0,36$ m wurde jede zweite Blattebene entfernt, so dass der Abstand der Blätter hintereinander auf 80 mm anstieg. Damit veränderte sich auch μ' auf 0,197 und D auf 0,32 m. Der Vergleich von Messung mit Rechnung ist in Bild 72 dargestellt.

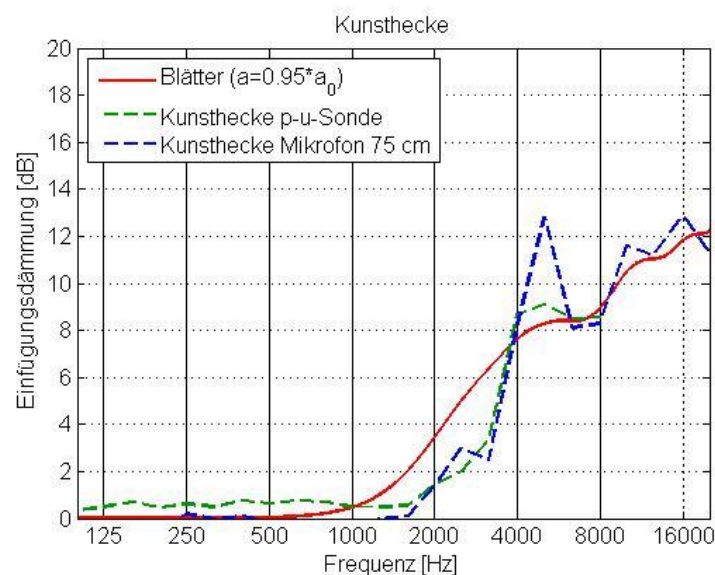


Bild 72: Berechnete und gemessene Einfügungsdämmung der Kunsthecke ($a_0=31,5$ mm, $a=0,95$ $a_0=29,9$ mm, mittlerer Abstand der Blätter in einer Ebene 40 mm, hintereinander 80 mm $\mu' = 0,197$, $D=0,32$ m, Blätter statistisch verteilt)

Die Ergebnisse in Bild 72 zeigen für diese Konfiguration eine gute Übereinstimmung von berechneten zu Messwerten. Dabei wird auch hier beobachtet, dass der Anstieg der Einfügungsdämmung bei der

Messung bei etwas höheren Frequenzen einsetzt und etwas steiler verläuft, so dass oberhalb von ca. 4000 Hz ähnliche Einfügungsdämmungen berechnet werden. Auch die Welligkeit der Dämmwirkung bei höheren Frequenzen ist gut in Übereinstimmung mit den Messwerten.

Bei einer weiteren Messung wurde der Abstand aller Kunstblätter auf $b=30$ mm verringert. Für diese Konfiguration ist die Gegenüberstellung von Messung und Rechnung in Bild 73 dargestellt.

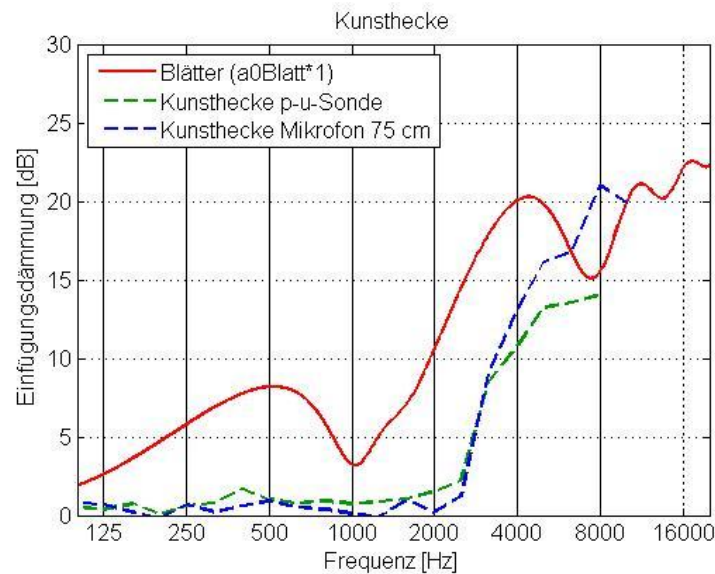


Bild 73: Berechnete und gemessene Einfügungsdämmung der Kunsthecke ($a_0=31,5$ mm, $a=0,95$ $a_0=29,9$ mm, $b=30$ mm, $\mu' = 0,483$, $D=0,27$ m, Blätter statistisch verteilt)

Der Vergleich von Rechnung mit Messung zeigt, dass nun die Rechnung auch tieffrequent bei ca. 500 Hz eine erkennbare Einfügungsdämmung prognostiziert, die die Messung nicht zeigt. Auch der starke Anstieg zwischen 1000 Hz und 4000 Hz liegt bei der Rechnung bei deutlich tieferen Frequenzen, als dies die Messung zeigt. Dagegen liegen die Werte bei hohen Frequenzen in einer ähnlichen Größenordnung wie die Messwerte. Hier wird angenommen, dass bei geringer werdendem Blattabstand und damit bei größer werdender Ersatz-Massivität μ' die Grenzen des Modells erreicht werden, und dass dann zu einem Modell mit Mehrfach-Streuung übergegangen werden müsste. Da die Blätterdichte der in dieser Arbeit untersuchten Hecken deutlich geringer war, wird auf den Einsatz eines Modells mit Mehrfach-Streuung verzichtet. Allerdings zeigt sich hier eine Anwendungsgrenze des verwendeten Modells. Diese wird durch eine Parameterstudie in Abschnitt 7.4.4 näher bestimmt.

Als weiterer Versuch wurde bei der Kunsthecke der Blattradius auf 61,25 mm nahezu verdoppelt. Um die Ersatz-Massivität realitätsnah zu betrachten, wurde der Abstand der Blätter untereinander vergrößert. Dabei wurde wiederum der Abstand der Blattreihen variiert. Bei ähnlichen Blattabstand der Blätter zueinander in jeder Ebene (90 mm) und hintereinander (80 mm) ergab sich die berechnete und gemessene Einfügungsdämmung, die in Bild 74 dargestellt ist.

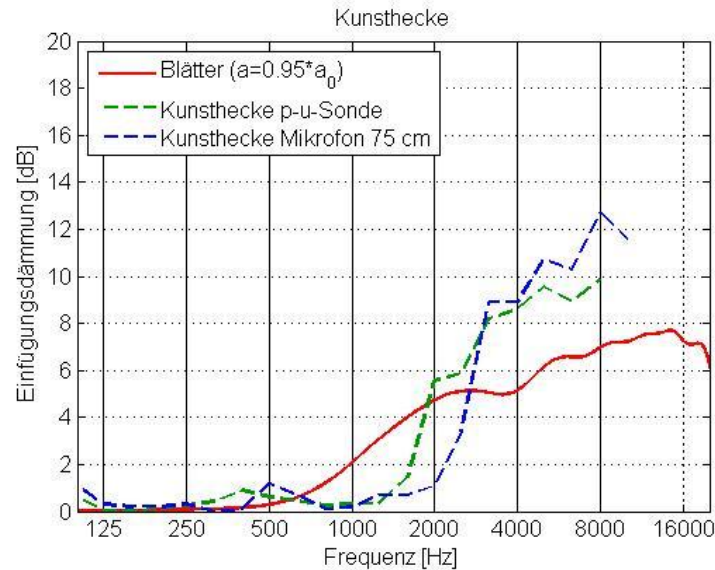


Bild 74: Berechnete und gemessene Einfügungsdämmung der Kunsthecke ($a_0=61,25$ mm, $a=0,95$ $a_0=58,4$ mm, mittlerer Abstand der Blätter g_0 mm in der Ebene, Abstand der Rahmen 80 mm, $\mu' = 0,358$, $D=0,32$ m, Blätter statistisch verteilt)

Der Vergleich von Messung und Rechnung zeigt sich eine größere Abweichung. Der berechnete Anstieg der Einfügungsdämmung setzt bei deutlich tieferen Frequenzen ein, als berechnet. Bei ca. 2000 Hz besitzen Berechnung und Messung ähnlich hohe Werte, dagegen sind bei höheren Frequenzen die gemessenen Werte deutlich größer als vom Berechnungsmodell prognostiziert. Bei diesen großen Blättern und einer relativ geringen Heckentiefe von 5 Blattebenen scheint das Modell die realen Verhältnisse nicht mehr so gut abbilden zu können. Leider war der Modellaufbau auf eine maximalen Probendicke von 40 cm begrenzt, so dass keine größere Anzahl an Blattreihen bzw. größere Dicke der Kunsthecke messtechnisch untersucht werden konnte.

Leider wurden bei den Messungen der Hecken im Freien die Eingangsparameter für das Heckenmodell nicht ermittelt (die Eingangsparameter waren zum Zeitpunkt der Messungen noch nicht bekannt), so dass diese Heckenmessungen nicht direkt mit dem Berechnungsmodell verglichen werden konnten. Die Charakteristik der Einfügungsdämmung der Hecken im Freien, Kapitel 6, deutet aber darauf hin, dass eine Modellierung auch hier zu einer guten Übereinstimmung kommen würde.

7.4.4 Parameterstudie mittels Berechnungsmodell

Das Berechnungsmodell von Mechel ermöglicht einfache Parameterstudien über den Einfluss der Eingangsparameter. Für die wesentlichen Parameter sind im folgenden Ergebnisse gezeigt. Ausgangspunkt der Parameterstudien war der Wunsch, durch geeignete Wahl der Parameter vor allem den Anstieg der Einfügungsdämmung zu deutlich tieferen Frequenzen zu verschieben. Die Idee war, im mittleren Frequenzbereich zwischen 500 und 2000 Hz schon eine wirksame Einfügungsdämmung zu erhalten. Sollte das Modell hierfür Hinweise liefern, wäre es möglich, nach Hecken zu suchen, die diese Eigenschaften erfüllen. Ausgehend von der Kunsthecke in Bild 71 wurde als erstes der Blattabstand schrittweise rechnerisch reduziert. Diese Parameterstudie ist in Bild 75 dargestellt.

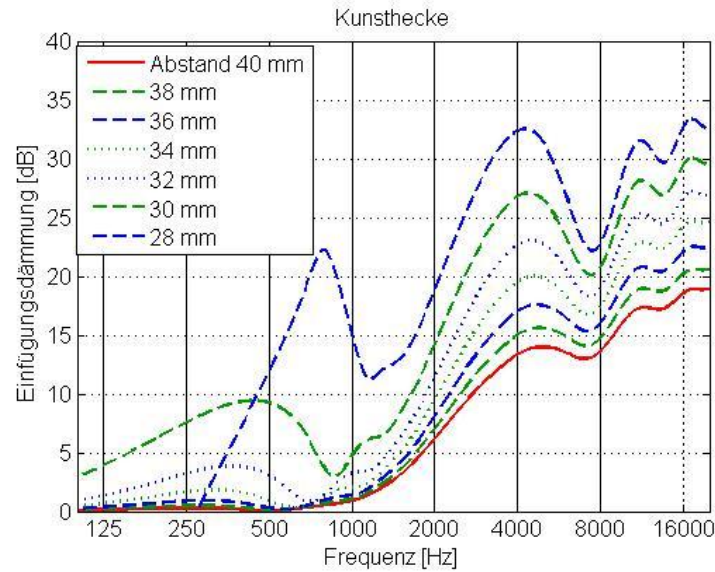


Bild 75: Berechnete Parameterstudie der Kunsthecke ($a_0=31,5$ mm, $a=0,95$, $a_0=29,9$ mm, Heckendicke $D=0,36$ m, mittlerer Abstand der Blätter variiert; Abstand b in mm / μ' : $0,40/0,31 - 38/0,33 - 36/0,37 - 34/0,40 - 32/0,44 - 30/0,48 - 28/0,53$)

Die Ergebnisse der Reduktion des Blattabstands führt zu einer relativ geringfügigen Verschiebung des Anstiegs zu tieferen Frequenzen. Dabei werden z.B. bei 1000 Hz erst bei einem Abstand von 32 mm mit einem Wert von ca. 3,5 dB eine nennenswerte Einfügungsdämmung erreicht. Bei diesem Abstand erreicht die Ersatz-Massivität μ' einen Wert von 0,44. Die Rechnung prognostiziert dann schon eine erhöhte Einfügungsdämmung bei tieferen Frequenzen zwischen 250 und 500 Hz, die bei keiner Messung auftrat (siehe z.B. Bild 73). Bei dieser Ersatz-Massivität schein das Modell seine Grenzen zu erreichen, so dass die auftretende Einfügungsdämmung bei tiefen Frequenzen nicht mit der Realität in Einklang zu bringen ist. Bei Verwendung eines noch geringeren Abstands von 28 mm ($\mu'=0,53$) entsteht aus dieser Überhöhung eine ausgeprägte Spitze zwischen 500 und 1000 Hz. Unterhalb 250 Hz wird dagegen die berechnete Einfügungsdämmung negativ, was physikalisch nicht möglich ist. Daher überschreitet man bei den hohen Werten der Ersatz-Massivität den Gültigkeitsbereich des Modells. Hier wäre es interessant, zu sehen, ob ein Modell mit Berücksichtigung von Mehrfach-Streuung bessere Ergebnisse erreicht.

Als weiteres wurde die Heckendicke variiert. Dabei wurde wiederum von der Kunsthecke in Bild 71 ausgegangen. Die Ergebnisse für die Einfügungsdämmung sind in Bild 76 gezeigt.

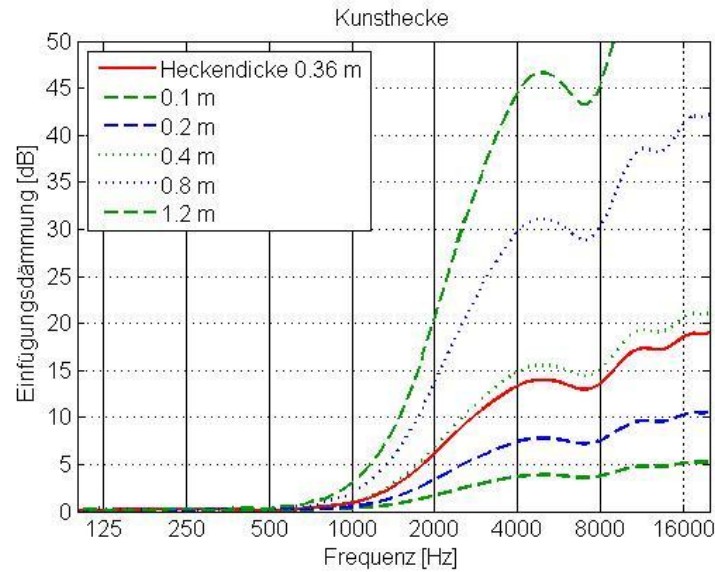


Bild 76: Berechnete Parameterstudie der Kunsthecke ($a_0=31,5$ mm, $a=0,95$, $a_0=29,9$ mm, Blattabstand 40 mm, $\mu' = 0,31$, Heckendicke variiert)

Die Ergebnisse zeigen einen zu erwartenden Trend: im tiefen Frequenzbereich besitzt die Hecke keine Wirksamkeit. Auch eine deutliche Vergrößerung der Dicke der Hecke ändert daran nichts. Im Bereich der mittleren Frequenzen, in dem eine Wirksamkeit einsetzt, wird der Anstieg der Einfügungsdämmung mit größerer Dicke immer stärker, und auch das Einsetzen des Anstiegs der Einfügungsdämmung verschiebt sich etwas zu tieferen Frequenzen. Allerdings muss auch hier eine recht deutliche Vergrößerung der Dicke auf 1,2 m erfolgen, um bei 1000 Hz einen nennenswerten Einfügungsdämmung zu erreichen.

Bei realen Hecken führt die Erhöhung der Dicke nicht in allen Fällen zu einer Vergrößerung der Einfügungsdämmung, denn dafür muss die Homogenität der Hecke auch im Inneren der Hecke gewährleistet sein. Dies ist aber oft nicht der Fall, da ab einer gewissen Dicke im Inneren der Hecke kein Laub mehr auftritt. Daher ist man auch in diesem Parameter für reale Hecken begrenzt.

Als weitere Variation der Parameter wurde der Blattradius variiert. Auch hier wurde von der Anfangskonfiguration der Kunsthecke ausgegangen. Daher wurde der Blattabstand bei 40 mm belassen. Die Ergebnisse sind in Bild 77 dargestellt.

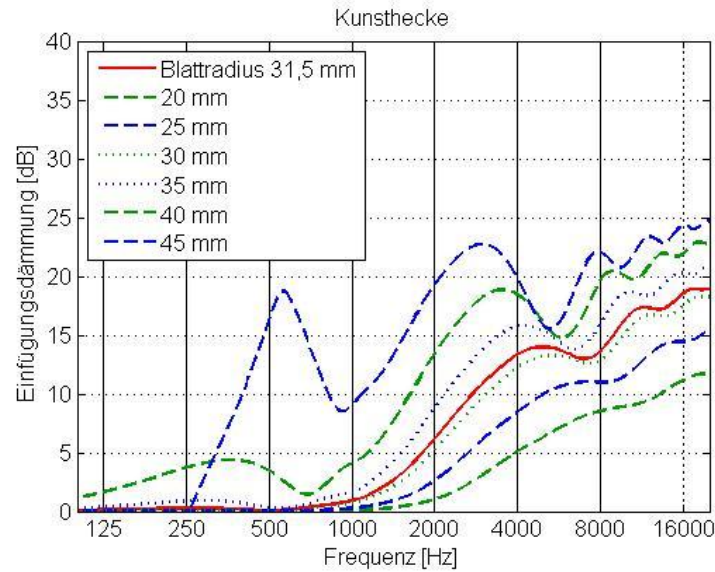


Bild 77: Berechnete Parameterstudie der Kunsthecke (Blattabstand $b=40$ mm, $\mu' = 0,31$, Heckendicke $D=0,36$ m, Blattradius variiert (a_0 in mm/ a in mm/ μ' : $31,5/29,9/0,31 - 20/19/0,13 - 25/24/0,20 - 30/28,5/0,28 - 35/33/0,37 - 40/38/0,45 - 45/43/0,53$)

Die Ergebnisse der Variation des Blattradius zeigen ein ähnliches Verhalten wie bei der Variation des Blattabstands. Bei steigendem Blattradius und konstantem Abstand steigt auch die Ersatz-Massivität deutlich an. Erreicht die Ersatz-Massivität μ' Werte über $0,4$, so errechnet das Modell eine überhöhte Einfügungsdämmung bei tiefen Frequenzen zwischen 250 und 500 Hz. Steigen die Werte für μ' noch weiter, so werden im tiefen Frequenzbereich negative Einfügungsdämmungen prognostiziert, was physikalisch nicht möglich ist. Betrachtet man die Ergebnisse bis $\mu' = 0,4$ (maximaler Blattradius 35 mm), so setzt der Anstieg der Einfügungsdämmung bei 1000 Hz ein, bei 2000 Hz wird ein Wert von ca. 10 dB erreicht. Bei höheren Frequenzen steigt die Einfügungsdämmung weiter an und erreicht Werte von ca. 15 dB bei 8 kHz.

Eine weitere Variante der oben genannten Parameterstudie ergibt sich durch Änderung des Blattradius und des Blattabstands, so dass die Ersatz-Massivität konstant gehalten wurde. Die Ergebnisse dieser Studie sind in Bild 78 gezeigt.

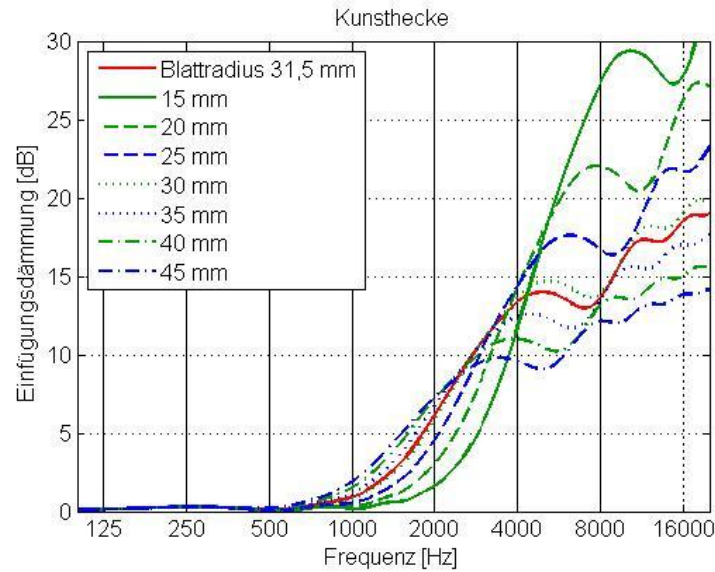


Bild 78: Berechnete Parameterstudie der Kunsthecke (Ersatz-Massivität $\mu' = 0,31$, Heckendicke $D=0,36$ m, Blattradius und -abstand variiert (a_0 in mm/ a in mm/ b in mm: 31,5/29,9/40 – 20/19/25,4 – 25/24/31,7 – 30/28,5/38,1 – 35/33/44,4 – 40/38/50,8 – 45/43/57,1))

Bei dieser Parameterstudie zeigt sich, dass größere Blätter mit einem größeren Blattabstand eine höhere Wirksamkeit bei tieferen Frequenzen besitzen. In diesem Beispiel setzt der Anstieg bei einem Blattradius von 45 mm schon unterhalb 1000 Hz ein. Bei 2000 Hz erreicht diese Hecke Werte von ca. 7 dB. Bei Frequenzen darüber knickt der Anstieg ab, so dass bei 4000 Hz ein Wert von ca. 10 dB erreicht wird. Hier sind die Werte von kleineren Blättern mit kleineren Abständen schon deutlich größer. Allerdings setzt deren Anstieg erst bei höheren Frequenzen ein, ist aber insgesamt steiler. Für die kleinsten modellierten Blätter mit Radius von 15 mm geht der Anstieg bis über 8000 Hz und erreicht hier Werte von nahezu 30 dB. Die in Bild 78 gezeigte Parameterstudie beschreibt die Unterschiede verschiedener Hecken in der Natur am ehesten, da bei Pflanzen die Ersatz-Massivität tendenziell ähnlich ist und nicht beliebig gesteigert werden kann. Dies liegt daran, dass die Pflanzen ihre Lichtausbeute optimieren und in Verschattungsbereichen keine zusätzlichen Blätter ausbilden. Für den Einsatz zu Schallschutzzwecken eignen sich vor allem Hecken, die schon bei tieferen Frequenzen eine gewisse Schallschutzwirkung besitzen. Daher bestätigt diese Modellierung die Aussagen aus der Literatur, in der beschrieben wird, dass die Pflanzen möglichst große Blätter besitzen sollten.

Ausgehend von der oben gezeigten Variation der einzelnen Einflussgrößen wurde in einer weiteren Simulationsrechnung eine „akustisch optimale Hecke“ modelliert. Die dabei verwendeten Eigenschaften wurden so gewählt, dass sie in der Realität vorkommen können. Bei der Auswahl der Größen wurde berücksichtigt, das als anregendes Spektrum das in Kapitel 3.8 beschriebene standardisierte Verkehrslärmspektrum zur Bewertung der Hecke herangezogen wird. Daher wurde der Blattdurchmesser mit 10 cm möglichst groß gewählt, die Ersatzmassivität lag knapp unter 0,4. Daraus ergab sich ein mittlerer Blattabstand von 5,5 cm. Die Dicke der Hecke wurde mit 1,2 m ähnlich zu den in Kapitel 6 beschriebenen realen Hecken angenommen. Das Ergebnis der berechneten Einfügungsdämmung ist in Bild 79 gezeigt.

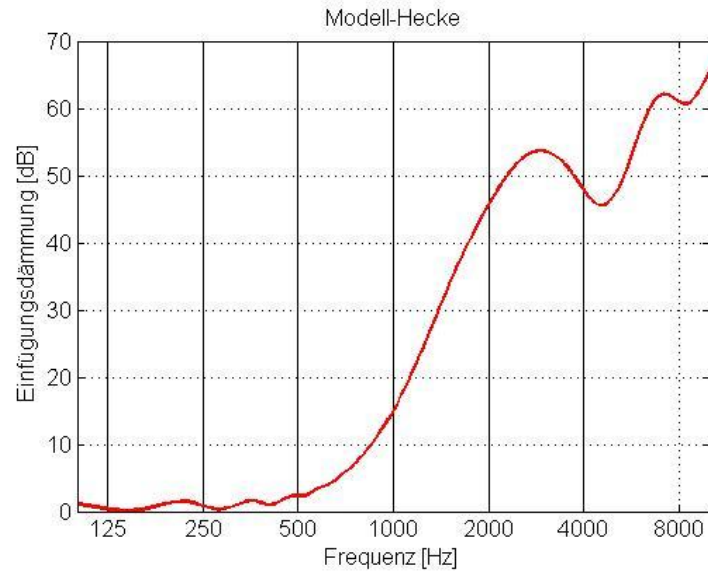


Bild 79: Berechnete „akustisch optimale Hecke“ (Blattdurchmesser 0,1 m, Blattabstand 0,055 m, Ersatz-Massivität $\mu' = 0,39$, Heckendicke $D=1,2$ m)

Wichtig ist hierbei vor allem der Anstieg der Einfügungsdämmung bei möglichst tiefen Frequenzen. Die extrem hohen Werte der Dämmung über ca. 20 dB sind dagegen nicht entscheidend, denn im Einsatz einer Hecke kommt es zu Schallbeugung über das Objekt hinweg. Bewertet man nun die Wirksamkeit einer solchen Modell-Hecke, so muss man die Dämmwirkung wegen der Beugung begrenzen. Daher wurde eine Dämmung von maximal 15 dB angenommen. Weiterhin wurden die berechneten Werte der Einfügungsdämmung unter 315 Hz auf null gesetzt, da hier in der Realität keine Wirkung zu erwarten ist. Eine Bewertung der Abschirmwirkung dieser Modell-Hecke wurde wie in Kapitel 6.9 durch das standardisierte Verkehrslärmspektrum vorgenommen. In Bild 80 sind beide Spektren dargestellt.

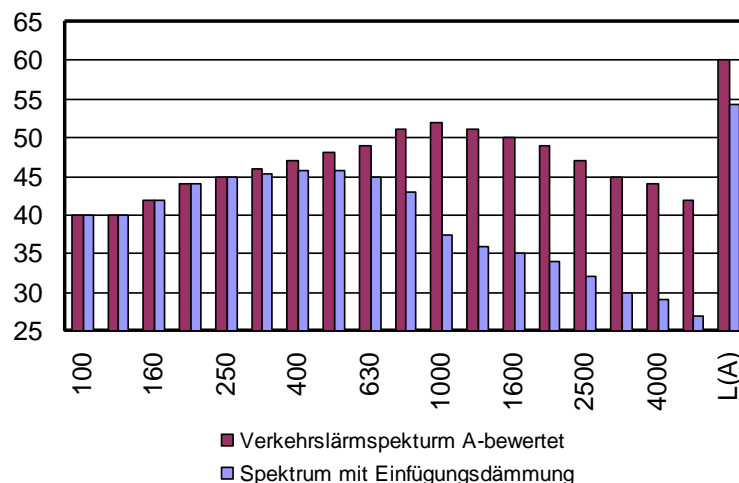


Bild 80: A-bewertetes standardisiertes Verkehrslärmspektrum und durch die Modell-Hecke reduziertes Verkehrslärmspektrum hinter der Hecke (Einfügungsdämmung auf 15 dB begrenzt)

Der A-bewertete Summenpegel des Verkehrslärmspektrums wird durch die Einfügungsdämmung der Modell-Hecke um 5,8 dB reduziert. Diese Abschirmwirkung wäre deutlich wahrnehmbar und liegt in der Größenordnung von real umgesetzten herkömmlichen Schallschutzwänden.

Wenn auch bei dieser Studie offen bleibt, ob Hecken mit den angenommenen Daten erreichbar sind, so zeigt sie doch, dass eine erhebliche Dämmwirkung für Straßenverkehrslärm denkbar ist. Daher sind nun Botaniker gefordert und in die Lage versetzt, Pflanzen und Hecken zu eruieren oder zu entwickeln, die in Blattdurchmesser, Blattdichte und Bewuchsdichte dieser Modell-Hecke nahe kommen.

7.4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse des Modells

Der Vergleich des Modells mit realen Hecken und mit Kunsthecken zeigt, dass das Modell die wesentlichen Eigenschaften der Einfügungsdämmung von Hecken und die Abhängigkeit der Dämmwirkung von Heckeneigenschaften gut beschreibt. Daher können die Ergebnisse der Parameterstudie auf Hecken übertragen werden. Für die Anwendung von Hecken zu Schallschutzzwecken ergeben sich daraus folgende Erkenntnisse:

- Die Dämmwirkung von Hecken wird vor allem von der Belaubung erzielt. Da die Dämmwirkung von Ästen und Zweigen erst bei deutlich höheren Frequenzen einsetzt, ist deren Wirkung in der Regel vernachlässigbar.
- Die Dämmwirkung steigt von der Frequenz des Einsetzens zu höheren Frequenzen hin an. Der Anstieg ist bei größeren Blättern nicht so steil, und wird umso steiler, je kleiner die Blätter sind.
- die Größe der Blätter entscheidet über das Einsetzen der Dämmwirkung. Bei Hecken mit größeren Blättern beginnt die Dämmwirkung bei tieferen Frequenzen. Das Einsetzen der Dämmwirkung ist nicht beliebig zu tiefen Frequenzen verschiebbar, bei realistischen Annahmen kann die Dämmwirkung bei ca. 1000 Hz einsetzen.
- mit steigender Belaubungsdichte, im Modell durch die Ersatz-Massivität beschrieben, steigt die Dämmwirkung im hohen Frequenzbereich. Dabei ist ab einer Ersatz-Massivität von $> ca. 0,4$ das Modell nicht mehr für die Prognose geeignet. Da die untersuchten natürlichen Hecken eine deutlich geringere Ersatz-Massivität aufwiesen, wird davon ausgegangen, dass die natürliche Bewuchsdichte eine Obergrenze aufweist, die geringer liegt. Damit ist das Modell zur Prognose natürlichen Bewuchses geeignet.
- Verringert sich der Blattabstand, so steigt wiederum die Belaubungsdichte, siehe oben.
- Lücken in der Belaubung oder die Anordnung der Blätter hintereinander führt zur Durchschallung bei hohen Frequenzen und damit zu einem Einbrechen der Dämmwirkung.
- Mit steigender Dicke der Hecke steigt die Dämmwirkung der Hecke bei Frequenzen an. Daher ergibt sich durch größere Dicke ein steilerer Anstieg der Dämmwirkung. Allerdings ist dieses Verhalten nur unter der Voraussetzung gegeben, dass die Bewuchsdichte in der gesamten Hecke konstant bleibt. Bei realen Hecken wird ab einer gewissen Dicke kein Bewuchs innerhalb der Hecke

ausgebildet, so dass hier dann ein Volumen ohne Blattbewuchs entsteht. Dieser Bereich trägt nicht zur Verbesserung der Dämmwirkung bei.

- Mit Hecken, die große Blätter, eine hohe Belaubungsdichte und eine ausreichende Dicke (im Beispiel 1,2 m) aufweisen, lässt sich der A-bewertete Summenpegel von Verkehrslärmgeräuschen um mehrere dB reduzieren. Das Beispiel der Modell-Hecke mit durchaus realistischen Annahmen zur Blattdicke, Blattabstand und Heckenbreite erreichte für das A-bewertete standardisierte Verkehrslärmspektrum eine Reduktion von 5,8 dB(A).

8 Hörversuche an Hecken

Für die Beurteilungsgrundlage der Reduktion des A-bewerteten Pegels zeigen die Untersuchungen eine sehr begrenzte Wirksamkeit der schalldämmenden Eigenschaften von Hecken. Dieser Umstand ist darauf zurückzuführen, dass die schalldämmende Wirkung von Hecken erst bei ca. 2000 Hz einsetzt (vgl. Kapitel 6.9). Die Reduktion der hohen Frequenzanteile im Lärmspektrum führt aber zu einer qualitativen Veränderung des Geräuschkennzeichens. Es stellt sich die Frage, ob sich diese Veränderung auch im subjektiven Empfinden, im Sinne einer Veränderung der empfundenen Lästigkeit oder Lautheit, wiederfindet. Schallmindernde Maßnahmen sollten nicht allein anhand von Pegelwerten, sondern auch anhand des Wahrnehmungseindrucks (z.B. Lästigkeit, Lautheit) evaluiert werden, da dieser nicht alleine vom A-bewerteten Pegel abhängt. Unklar ist zudem die optische Wirkung von Hecken im Vergleich zu üblichen Schallschutzwänden. Wechselwirkungen zwischen dem visuellen und dem akustischen Wahrnehmungseindruck werden z.B. von Watts et. al. [10], Aylor und Marks [34] sowie Mulligan et al. [35] berichtet. Dabei könnte der Grad der visuellen Abschirmung einen Einfluss auf die akustische Bewertung haben. Um die subjektive Wirkung von Schallschutzhecken über die reine Pegelminderung hinaus zu evaluieren, wurden Hörversuche durchgeführt.

8.1 Methode

Aufgabe der Probanden war, Kombinationen aus Bildern und Geräuschen hinsichtlich ihrer akustischen Lästigkeit, Lautheit sowie ihrer optischen Attraktivität zu beurteilen. Die Lästigkeitsbeurteilung erfolgte gemäß den Empfehlungen der International Commission on Biological Effects of Noise (ICBEN) anhand zweier Urteilsskalen [51]. Zur Lautheitsskalierung wurde die Methode der Kategorienskalisierung eingesetzt [52]. Die optische Attraktivität wurde anhand einer fünfstufigen Urteilsskala mit verbalen Beschreibungen der Skalenstufen (gar nicht; kaum; mittelmäßig; stark; außerordentlich) beurteilt.

8.2 Teilnehmer

Die Stichprobe besteht aus 11 Probanden (7 weiblich; 4 männlich) im Alter zwischen 21 und 53 Jahren (MD=24). Es handelte sich um Hilfskräfte und Angestellte des Fraunhofer Instituts für Bauphysik, die freiwillig dem Aufruf zur Teilnahme folgten und mit der Fragestellung der Untersuchung nicht vertraut waren.

8.3 Material

Die beurteilten Szenarien umfassen sechs alltägliche Situationen. Die Aufnahmen wurden mit einem dem DAT-Recorder (TCD-D10 von Sony) und zwei Kondensatormikrofonen des Typs 4165 von Brüel&Kjær aufgezeichnet. Das aufgezeichnete Messsignal wurde mit dem Messsystem SQA Lab III (3502 MMMIII) von Head Acoustics eingelesen und mittels Artemis von Head Acoustics geschnitten. Die Aufnahmen wurden anschließend mit konstantem Dynamikbereich in eine Wave-Datei umgewandelt, um dann bei den Hörversuchen pegeltreu zur Ausgangssituation über Kopfhörer abgespielt zu werden.

Zusätzlich wurden die Aufnahmen mit einem Filter gefiltert. Dieser Filter bildete die Einfügungsdämmung der gemessenen Efeuhecke (Kapitel 6.3) nach. Die tieffrequente Schwankung um null dB wurde dabei korrigiert, da sie auf Bodeneffekte bei der Messung zurückzuführen sind und diese Einflüsse nicht untersucht werden sollten. Die aus den gefilterten und nicht gefilterten Schallen ermittelte Differenz, die der simulierten Einfügungsdämmung entspricht, ist in Bild 81 dargestellt.

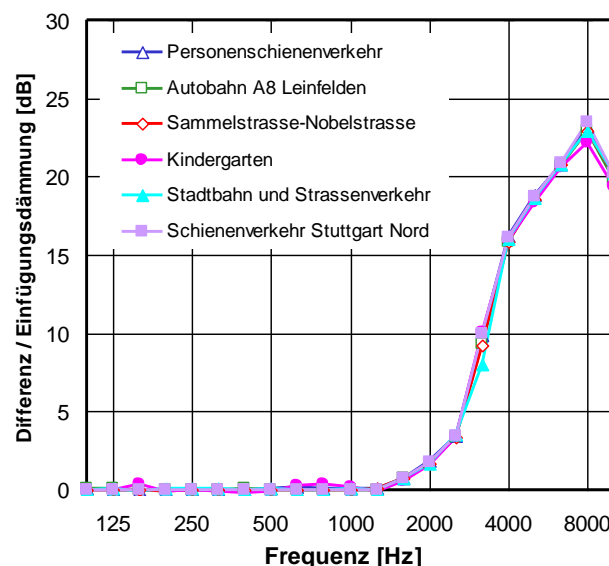


Bild 81: Differenz bzw. simulierte Einfügungsdämmung der Schalle des Hörversuchs (Pegel des Ausgangssignals minus Pegel des gefilterten Signals).

Zeitgleich wurden die einzelnen Situationen fotografiert. In die Aufnahmen wurde mittels Corel Photo-Paint 12 jeweils das Bild einer Efeu-Hecke (*Hedera helix* 'Woerner') eingefügt, wobei die Proportionen und Farbgebung berücksichtigt wurden. Durch die Kombination originaler und gefilterter Tonaufnahmen mit den zugehörigen Bildern mit und ohne Hecke ergeben sich 24 zu beurteilende Testszenarien. Die Schalle mit ihren Einzulangaben Pegel in dB, A-bewerteter Pegel in dB(A), Lautheit in Sone und die mittleren Lautheitsurteile mittels Kategorienunterteilungsverfahren sind in Tabelle 7 angegeben. Dabei erfolgte die Berechnung der Pegel aus dem Zeitsignal mittels der Software Artemis 11 der Firma Head Acoustics, ebenso die Berechnung der Lautheit, wobei hier die Methode nach DIN 45631 für das Freifeld angewendet wurde.

Schall	Pegel in dB	A-Pegel in dB(A)	Lautheit in Sone	Mittlere Lautheitsurteile (Skala 0 – 50)
Sammelstraße / Nobelstraße Original	73,3	68,3	21,7	33,2
Sammelstraße / Nobelstraße simuliert	73,2	67,7	18,4	33,5
Personenschienenverkehr Original	79,1	71,1	31,7	41,1
Personenschienenverkehr simuliert	78,8	69,3	24,4	32,7
Schieneverkehr Stuttgart Nord Original	78,9	70,9	30,3	36,0
Schieneverkehr Stuttgart Nord simuliert	78,7	69,9	23,9	32,1
Stadtbahn und Straßenverkehr Original	77,3	68,2	24,7	32,1
Stadtbahn und Straßenverkehr simuliert	77,3	67,9	21,1	31,1
Kindergarten Original	67,0	58,3	10,5	24,9
Kindergarten simuliert	67,0	57,7	8,57	22,6
Autobahn A8 Leinfelden Original	78,4	69,4	25,1	38,5
Autobahn A8 Leinfelden simuliert	78,3	68,8	21,7	33,6

Tabelle 7: Bei dem Hörversuch verwendete Schalle und ihre Einzahlwerte (Bezeichnung simuliert beschreibt die Situation mit simulierter Hecke).

Beispielhaft für die Bildpaare ohne und mit Hecke sind in Anhang G 1 und G 2 die Situation der Stadtbahn ohne und mit Hecke niedergelegt.

8.4 Durchführung

Die Probanden wurden schriftlich zur Aufgabenstellung instruiert und in einem Übungsdurchgang mit den Urteilsskalen vertraut gemacht. Im Anschluss wurden sie über die Bandbreite der Signale schriftlich informiert, zudem wurden das leiseste und das lauteste Geräusch der Untersuchung zur Orientierung dargeboten. Die Probanden hörten und betrachteten zunächst die einzelnen Testszenarien und nahmen erst nach dem Ende der Schalldarbietung die Beurteilung vor. Die Darbietung der Testszenarien erfolgte rechnergestützt (iMac) mit der Software Limesurvey in einem ruhigen Versuchsraum. Die Schalle wurden per Kopfhörer (Sennheiser HD 280) dargeboten. Die verschiedenen Schall- und Bildkombinationen wurden in zufälliger Reihenfolge präsentiert. Insgesamt nahm die Bearbeitung der Aufgabenstellung zwischen 30 und 45 Minuten in Anspruch.

8.5 Ergebnisse

Im Rahmen der statistischen Auswertung wird für jede Urteilsskala eine dreifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung durchgeführt. Die Varianzanalyse ist ein Verfahren zur Überprüfung von Mittelwertunterschieden zwischen Gruppen [53]. Als Ergebnisse werden gemäß den Richtlinien der APA [54] die Freiheitsgrade, der F-Wert, das Signifikanzniveau und die Effektstärke berichtet. Der p-Wert sagt aus, wie wahrscheinlich das Zustandekommen der Mittelwertunterschiede ist, wenn man davon ausgeht, dass kein Unterschied zwischen den Faktorstufen existiert, siehe hierzu auch die Erläuterungen in [55]. Ist diese Wahrscheinlichkeit gering ($<0,05$ bzw. $<0,01$), dann spricht man von signifikanten bzw. hochsignifikanten Unterschieden. Der Faktor *Quelle* ist sechsfach gestuft. Qualitative Unterschiede zwischen den Schallquellen sind im Rahmen dieser Untersuchung von untergeordnetem Interesse und werden daher nicht weiter diskutiert. Der Schwerpunkt der Untersuchung liegt auf der Betrachtung der akustischen und optischen Wirkung der Schallschutzhecken. Die Faktoren *Akustik* und *Optik* sind jeweils zweifach gestuft (mit Hecke vs. ohne Hecke).

8.5.1 Akustische Lästigkeit

Die akustische Lästigkeit wurde gemäß der Empfehlungen der ICBEN anhand zweier Urteilsskalen (5-stufig; 10-stufig) untersucht. Das Befundmuster ist unter Verwendung beider Skalen vergleichbar. Die Analyse belegt jeweils einen hochsignifikanten Effekt des Faktors *Quelle* [5-fach: $F(2.6,26.2) = 11.28, p < 0.01, \eta^2 = 0.53$; 10-fach: $F(2.3,23.2) = 11.31, p < 0.01, \eta^2 = 0.53$]. Demnach werden die verschiedenen Schallquellen unterschiedlich lästig empfunden. Diese Unterschiede werden an dieser Stelle nicht weiter thematisiert. Die Analyse belegt auch unter Verwendung beider Skalen einen hochsignifikanten Effekt des Faktors *Akustik* [5-fach: $F(1,10) = 11.01, p < 0.01, \eta^2 = 0.52$; 10-fach: $F(1,10) = 13.78, p < 0.01, \eta^2 = 0.58$]. Da der Faktor nur zweifach gestuft ist, lässt er sich auch bereits eindeutig interpretieren. Die gemäß der Filtercharakteristik einer Hecke veränderten Schalle werden im Vergleich zu den Aufnahmen ohne Hecke als weniger lästig beurteilt (siehe Bild 82 und 83).

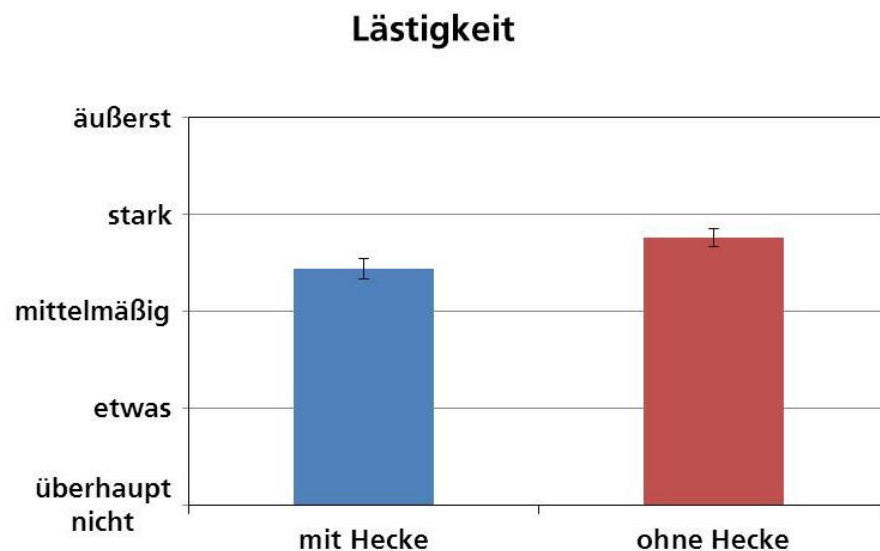


Bild 82: Mittlere Urteile (Mittelwert und Standardfehler) zur akustischen Lästigkeit (5-stufige Urteilsskala) der originalen (ohne Hecke) und gefilterten (mit Hecke) Schallaufnahmen.

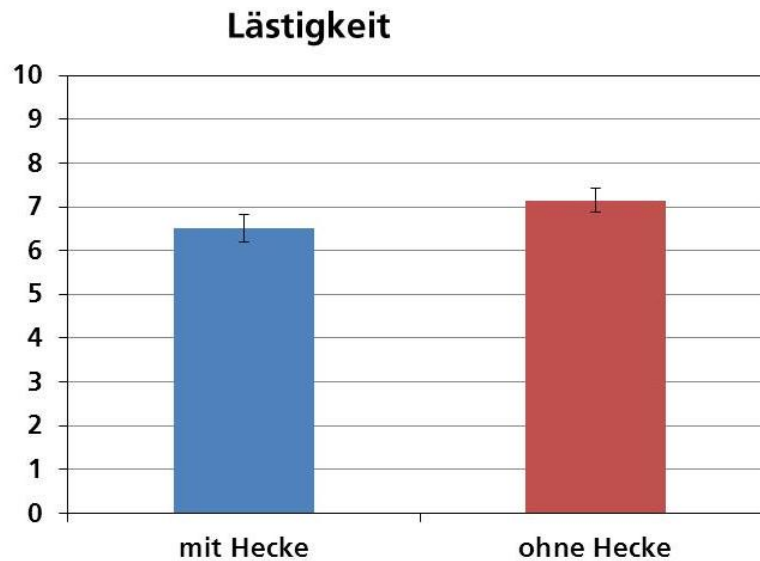


Bild 83: Mittlere Urteile (Mittelwert und Standardfehler) zur akustischen Lästigkeit (10-stufige Urteilstkala) der originalen (ohne Hecke) und gefilterten (mit Hecke) Schallaufnahmen.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Unterschiede trotz statistischer Signifikanz gering ausfallen. Das bedeutet, dass die Unterschiede zwar eindeutig wahrnehmbar, aber nicht substantiell verschieden sind. Der Faktor *Optik* hat hingegen keinen Einfluss auf die Urteile zur akustischen Lästigkeit [5-fach: $F(1,10) = 2.26, p > 0.05, \eta^2 = 0.19$; 10-fach: $F(1,10) < 1$]. Darüber hinaus gibt es keine Hinweise auf Wechselwirkungen zwischen den Faktoren. Auf eine statistische Beschreibung wird daher verzichtet.

8.5.2 Lautheit

Die Analyse der Lautheitsurteile belegt einen hochsignifikanten Effekt des Faktors *Quelle* [$F(2.8,28.3) = 14.00, p < 0.01, \eta^2 = 0.58$]. Demnach werden die verschiedenen Schallquellen unterschiedlich laut empfunden. Dieser Befund ist aber nicht Gegenstand der Untersuchung und wird daher nicht weiter verfolgt. Die weitere Auswertung belegt einen hochsignifikanten Effekt des Faktors *Akustik* [$F(1,10) = 10.93, p < 0.01, \eta^2 = 0.52$]. Wie zuvor kann dieses Ergebnis aufgrund der zweifachen Stufung eindeutig interpretiert werden. Die gemäß der Filtercharakteristik einer Hecke veränderten Schalle werden im Vergleich zu den Aufnahmen ohne Hecke als weniger laut empfunden (Bild 84).

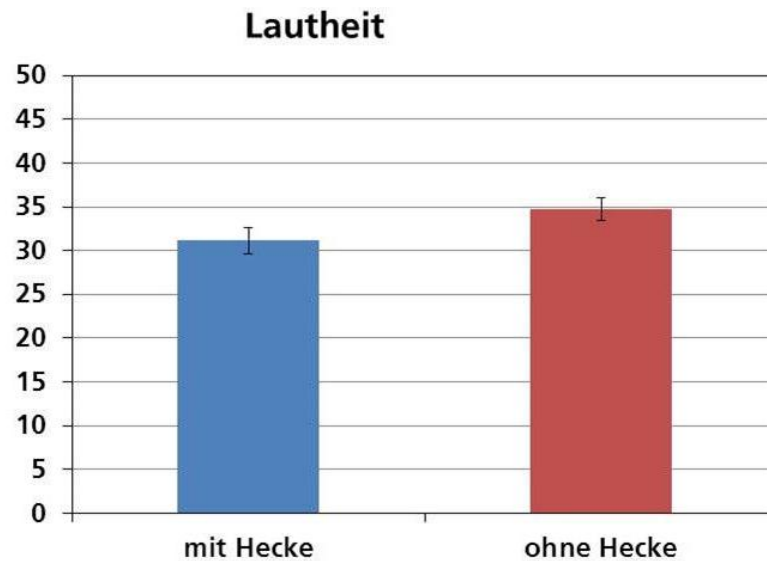


Bild 84: Mittlere Urteile (Mittelwert und Standardfehler) zur Lautheit (Kategorienunterteilungsverfahren) der originalen (ohne Hecke) und gefilterten (mit Hecke) Schallaufnahmen.

Die Lautheitsurteile korrelieren hochsignifikant ($r = 0.91$; $p < 0.01$) mit der berechneten Lautheit in Sonne (vgl. Tabelle 7).

Der Faktor *Optik* hat hingegen keinen Einfluss auf die Urteile zur akustischen Lautheit [$F(1,10) < 1$]. Darüber hinaus gibt es keine Hinweise auf Wechselwirkungen zwischen den Faktoren. Auf eine statistische Beschreibung wird daher verzichtet.

8.5.3 Optische Attraktivität

Bei der statistischen Auswertung der Urteile zur optischen Attraktivität der bildlich dargestellten Szenarien ergibt die Analyse erneut einen signifikanten Effekt des Faktors *Quelle* [$F(3,0,29.9) = 3.39$, $p < 0.05$, $\eta^2 = 0.25$]. Die optische Attraktivität der dargestellten Szenarien wird unterschiedlich beurteilt. Dieser Befund wird aber nicht weiter verfolgt. Die weitere Auswertung ergibt keinen Effekt des Faktors *Akustik* [$F(1,10) < 1$]. Im Gegensatz dazu belegt die Varianzanalyse einen hochsignifikanten Effekt des Faktors *Optik* [$F(1,10) = 14.47$, $p < 0.01$, $\eta^2 = 0.59$], siehe Bild 85.

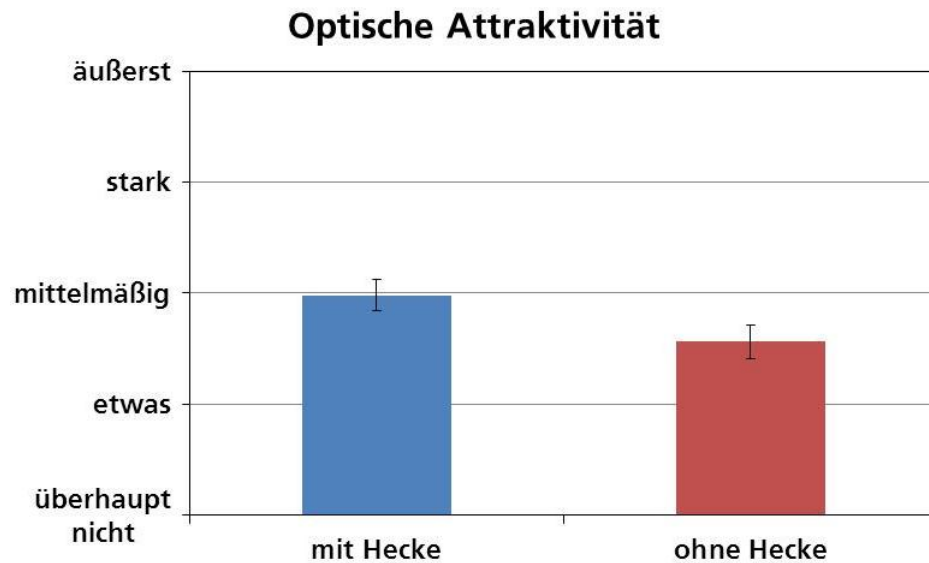


Bild 85: Mittlere Urteile (Mittelwert und Standardfehler) zur optischen Attraktivität (5-stufige Urteils-skala) der originalen (ohne Hecke) und veränderten (mit Hecke) Bildaufnahmen.

Zudem ergibt sich eine Wechselwirkung zwischen den Faktoren *Akustik* und *Optik* [$F(1,10) = 4.57$, $p < 0.01$, $\eta^2 = 0.31$]. Die Wechselwirkung ist darauf zurückzuführen, dass die optische Attraktivität der Bilder mit Hecke in Kombination mit den Schallaufnahmen ohne Hecke höher beurteilt wird als die optische Attraktivität der Bilder mit Hecke in Kombination mit den gefilterten Aufnahmen. Dieser Unterschied ist allerdings bei der Beurteilung der Bilder ohne Hecke nicht gegeben, bzw. kehrt sich sogar um. Eine plausible Erklärung für diesen Befund liegt nicht vor.

8.6 Zusammenfassung der Hörversuche

Zu den Hörversuchen ist anzumerken, dass die Stichprobengröße gering ist. In Anbetracht der Effektstärke ist sie dennoch ausreichend, um statistisch bedeutsame Haupteffekte zu belegen. Als Haupteffekte konnte festgestellt werden, dass die durch die Hecke veränderten Schalle im Vergleich zu den Aufnahmen ohne Hecke als weniger lästig beurteilt werden. Dabei sind die Unterschiede trotz hoher statistischer Signifikanz relativ gering. Weiterhin wurde mit hoher statistischer Signifikanz festgestellt, dass die veränderten Schalle im Vergleich zu den Aufnahmen ohne Hecke als weniger laut empfunden werden. Als weiteren wichtigen Haupteffekt ergab die Auswertung mit hoher statistischer Signifikanz, dass die Situationen mit Hecken mit höherer optischer Attraktivität beurteilt wurden. Wichtig ist die Feststellung, dass der Faktor *Optik* keinen Einfluss auf die Urteile zur akustischen Lästigkeit und zur Lautheit besitzt. Daher sind die Untersuchungsergebnisse nicht im Einklang mit den Befunden von Watts et. al. [10], Aylor und Marks [34] sowie Mulligan et al. [35], da keine Überbewertung der Lautheit in Abhängigkeit von der visuellen Abschirmung nachgewiesen werden konnte.

Bei der Schallminderung durch Vegetation sind drei Vorgänge zu unterscheiden: Erstens die Beugung über oder seitlich um das Objekt herum, die aber nur auftritt, wenn das Objekt selbst eine Dämmwirkung besitzt. Als zweiten Effekt kommt es im Bodenbereich der Hecke zu einer Bodenreflexion. Diese erzeugt im tiefen bis mittleren Frequenzbereich eine Einfügungsdämmung hinter der Vegetation, verglichen mit einer Übertragungssituation mit derselben Geometrie, aber unterschiedlicher Bodenbeschaffenheit (Wiese, Straße etc.). Dabei hat die Vegetation Einfluss auf die Bodenbeschaffenheit (Lockerung des Bodens, Abwurf von Pflanzenreste etc.) und damit auf die Impedanz des Bodens. Diese beiden Effekte sind bekannt und wurden in dieser Arbeit nicht explizit untersucht.

Als drittes kommt es bei höheren Frequenzen zu Wechselwirkungen des Schalls vor allem mit der Begrünung, bei sehr hohen Frequenzen auch mit dem Geäst. Dabei entstehen Mehrfach-Reflexionen sowie Mehrfach-Streuung des Schalls. Diese Wirkung beginnt mit Frequenzen ab 1000 Hz aufwärts, wobei mit steigenden Frequenzen der Schallminderungseffekt zunimmt. In dieser Arbeit wurde vor allem diese Dämmwirkung von Hecken untersucht.

Die Literaturstudie ergab, dass günstige Eigenschaften für die akustische Abschirmwirkung von Vegetation bei höheren Frequenzen die Blattgröße und die Blattdicke, eine annähernd senkrecht, d.h. rechtwinklig zum Schalleinfall gerichtete Blattstellung, ein gegen die Schallquelle geschlossener Laubschirm sowie eine hohe Belaubungsdichte der Vegetation sind. Da die Dämmungseffekte hauptsächlich auf der Belaubung beruhen, sind bei der Artenwahl immergrün belaubte Hecken von Vorteil. Für eine Wirkung bei hohen Frequenzen sollte ein von unten dicht aufgebauter Laubschirm vorhanden sein. Diese qualitativen Aussagen aus der Literatur konnten durch Messungen im Labor und im Freien an Hecken bestätigt und vor allem auch quantifiziert werden.

Durch den Einsatz einer Kunsthecke aus Folienblättern konnte die Charakteristik der Dämmwirkung bestätigt werden. Diese Hecke ermöglichte explizite Änderungen der Heckenparameter durch Vergrößerung der Blattflächen, der Blattdichte etc. Damit konnten die in der Literatur geäußerten Vermutungen des Einflusses der Blattfläche, der Blattdichte etc. nachgewiesen werden. Als wichtigste Heckenparameter konnten die Blattfläche, die Blattdichte, die lückenlose Anordnung der Blätter sowie die Heckendicke festgestellt werden.

Die Messungen im Freien zeigten den Einfluss des Bodeneffekts und einen typischen steilen Anstieg der Einfügungsdämmung bei hohen Frequenzen. Abhängig von der Heckenart war dieser Anstieg zu tieferen oder höheren Frequenzen verschoben und auch in seiner Steilheit etwas unterschiedlich. Dabei erreichte die Hecke mit den größten Blättern und senkrechter Blattausrichtung zum Schalleinfall (Efeu) die größte Einfügungsdämmung. Die technische Bewertung der Einfügungsdämmung der gemessenen Hecken durch das standardisierte Verkehrslärmspektrum ergab eine Reduktion des A-bewerteten Summenpegels von maximal 0,8 dB.

Das Modell von Mechel beschreibt die Dämmwirkung von Hecken in guter Übereinstimmung mit den Messergebnissen an realen Hecken und an der künstlichen Hecke aus Folienblättern. Die Abhängigkeit der Einfügungsdämmung von Heckenparametern der Modell- und Kunsthecke waren vergleichbar. Daher gibt die Parameterstudie des Modells einen guten Überblick über die Einflussparameter von Hecken auf deren Einfügungsdämmung. Entscheidend sind hier die Belaubung der Hecke, die Größe der Blätter, die Belaubungsdichte, die Homogenität der Hecke (ohne Lücken) sowie die Dicke

der (homogenen) Hecke. Das Modell errechnet die Einfügungsdämmung bis zu einer Ersatz-Massivität von ca. 0,4 in guter Übereinstimmung mit den Messwerten. Da die Ersatz-Massivität der realen Hecken deutlich darunter lag, wird das Modell für Hecken als geeignet angesehen.

Die mit dem Modell berechnete Modell-Hecke, die als Parameter eine Kombination von realistischen Größen aufweist, erreicht einen Anstieg der Einfügungsdämmung ab ca. 500 Hz. Damit ergibt sich für das standardisierte Verkehrslärmspektrum eine deutliche Reduktion des A-bewerteten Summenpegels von über 5 dB. Dieser Wert liegt in der Größenordnung von realen Lärmschutzwänden. Offen bleibt, ob diese Werte mit einer realen Hecke erreicht werden können. Hierfür ist eine Entwicklung von Hecken mit hoher akustischer Wirksamkeit notwendig, die mit den Ergebnissen dieses Projekts angestoßen und begleitet werden kann.

Als Haupteffekte bei den Hörversuchen konnte festgestellt werden, dass die durch die Hecke veränderten Schalle im Vergleich zu den Aufnahmen ohne Hecke als weniger lästig beurteilt werden. Dabei sind die Unterschiede trotz hoher statistischer Signifikanz relativ gering. Weiterhin wurde mit hoher statistischer Signifikanz festgestellt, dass die durch die Hecke veränderten Schalle im Vergleich zu den Aufnahmen ohne Hecke als weniger laut empfunden werden. Als weiteren wichtigen Haupteffekt ergab die Auswertung, dass die Situationen mit Hecken mit höherer optischer Attraktivität beurteilt wurden. Wichtig ist die Feststellung, dass der Faktor *Optik* keinen Einfluss auf die Urteile zur akustischen Lästigkeit und zur Lautheit besitzt.

10 Hinweise für den Einsatz von Hecken und Gehölzen für Schallschutzzwecke

Für Geräuschquellen mit hochfrequentem Frequenzspektrum eignen sich Hecken als Schallschirme. Zusätzlich können weitere Gründe für den Einsatz von Hecken vorliegen, wie z.B. ökologische Gründe (Verbesserung des Mikro-Klimas, Habitat für Lebewesen etc.), der Wunsch nach einer natürlichen Abschirmung etc.

Bei der Ausführung der Hecke muss aus akustischer Sicht berücksichtigt werden:

- Grundsätzlich gilt für Hecken wie bei herkömmlichen Schallschirmen, dass die direkte Sichtlinie von Quelle zu Empfänger durch die Hecke unterbrochen wird. Nur dann wird die direkte Schallübertragung unterbunden, so dass eine Abschirmwirkung erreicht werden kann.
- Die akustische Wirkung beruht vor allem auf dem Blattwerk der Hecke. Daher sind immergrüne Heckenpflanzen zu bevorzugen, die im Winter das Blattwerk nicht verlieren (ganzjahreszeitliche Wirksamkeit)
- Für eine Wirkung im mittleren und hohen Frequenzbereich oberhalb 500 - 1000 Hz möglichst große Blätter. Dabei sollte die Blattform möglichst kreisförmig sein. Längliche Blätter sind nicht so wirkungsvoll, da bei diesen die kleinere Dimension der Blätter (Breite) bei der akustischen Wirksamkeit zum Tragen kommt.
- Im Sonderfall einer gewünschten großen Einfügungsdämmung bei sehr hohen Frequenzen oberhalb ca. 5 kHz kann der Einsatz von Pflanzen mit kleinen Blättern vorteilhaft sein. Besonders wich-

tig ist bei einer solchen Hecke, dass die Blätter eine hohe Dichte aufweisen, so dass es nicht zu einer Durchstrahlung der Hecke kommt.

- Für alle eingesetzten Pflanzen sollte die Ausrichtung der Belaubung möglichst senkrecht zur Schalleinfallrichtung sein. In diesem Fall ist die Wirksamkeit höher, als bei anders ausgerichteten Blättern.
- Eine möglichst hohe Bewuchsdichte, d.h. eine hohe Dichte der Blätter innerhalb der Hecke führt zu einer höheren Wirksamkeit. Weiterhin sollten keine Lücken in der Hecke vorhanden sein, so dass eine Durchstrahlung der Hecke unterbunden wird.
- Dies gilt auch für den Bereich der Bepflanzung vom Boden aufwärts. Auch hier sollte es nicht zur Durchschallung kommen.
- Eine große Dicke der Hecke (so lange ein homogener Bewuchs im Inneren der Hecke vorhanden ist).

Werden die oben genannten Punkte berücksichtigt, kann abhängig von der Art des abzuschirmenden Spektrums eine deutlich wahrnehmbare Abschirmwirkung der Hecke erreicht werden. Für Verkehrslärmgeräusche konnte dies durch einen Hörversuch unter Berücksichtigung einer gemessenen Efeuhecke belegt werden. Lärmspektren mit hohen Frequenzanteilen können deutlich besser abgeschirmt werden, da die Wirkung von Hecken bei Frequenzen oberhalb 500 – 1000 Hz einsetzt und darüber stark ansteigt. Daher sind solche Geräuschquellen für die Abschirmung durch Hecken prädestiniert.

11 Ausblick

Mit der vorliegenden Untersuchung wurden die akustischen Möglichkeiten von Hecken und Gehölzen zum Zwecke des Schallschutzes deutlich. Dabei wurde vor allem auf die Dämmwirkung fokussiert. Mit dem dargelegten Berechnungsmodell kann die Dämmwirkung von Hecken und Gehölzen prognostiziert werden. In Kombination mit vorhandenen Modellen zur Beugung und zum Bodeneffekt (beide geometrieabhängig) kann damit die Abschirmwirkung vor Ort vorherberechnet werden.

Bei dieser Untersuchung musste offen bleiben, mit welchen Heckenpflanzen die in Kapitel 7.4.4 beschriebene Modell-Hecke und die in Kapitel 10 gegebenen Hinweise am besten zu erreichen sind. Dabei spielen vor allem auch Klimaeinflüsse bezüglich des Standortes, der Verschattung, der nötigen Winterhärte etc. eine wichtige Rolle. Ebenso wichtig erscheinen auch Einflüsse des Schnittes der Hecken, der Düngung etc. Deshalb können diese Aussagen regional und situationsbedingt unterschiedlich ausfallen. Hier muss auf das Wissen von Pflanzenspezialisten zurückgegriffen werden.

Schallschutzhecken entfalten ihre Wirksamkeit erst im höheren Frequenzbereich. Folglich ist zu erwarten, dass eine Schallschutzhecke am wirksamsten ist, wenn die Lärmquelle besonders durch hohe Frequenzanteile (Quietschen, Pfeifen) gekennzeichnet ist. Die im Hörversuch eingesetzten Schallquellen unterscheiden sich stark hinsichtlich ihrer spektralen Charakteristik. Insbesondere das Szenario Personenschienenverkehr zeichnet sich im Vergleich zu den anderen Hintergrundschallen durch einen größeren Anteil hoher Frequenzen aus.

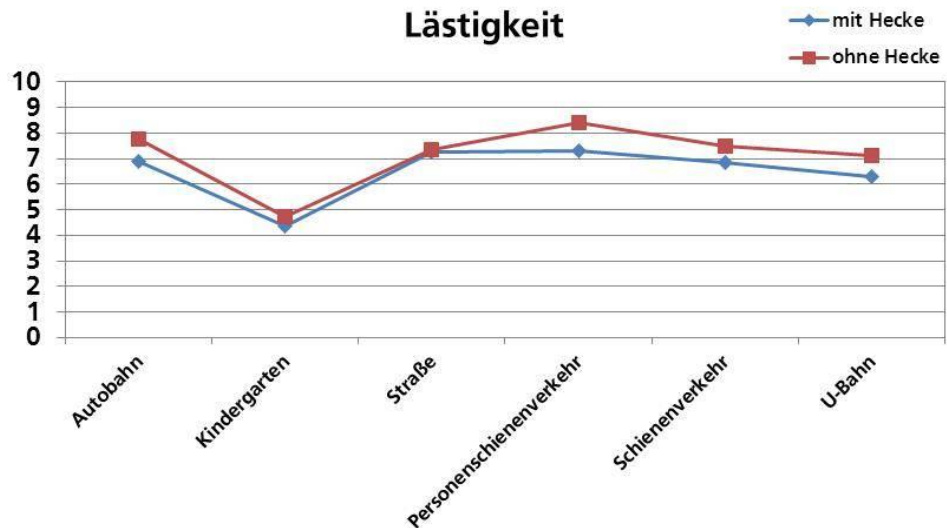


Bild 86: Mittlere Urteile zur akustischen Lästigkeit (10-stufige Urteilsskala) der originalen (ohne Hecke) und gefilterten (mit Hecke) Schallaufnahmen, dargestellt über den verschiedenen Schallen.

Die Interpretation von Bild 86 legt tatsächlich eine Deutung dahingehend nahe, dass sich der größte Unterschied zwischen den Szenarien mit und ohne Hecke hinsichtlich der subjektiv empfundenen Lästigkeit bei dem Hintergrundschall mit dem größten Anteil hoher Frequenzen, nämlich Personenschienenverkehr, einstellt. Dies ist allerdings eine rein visuelle Interpretation der Daten, eine signifikante Interaktion ergab die statistische Auswertung nicht. Für eine zuverlässige Interpretation von Interaktionen ist der Stichprobenumfang zu gering. Die Frage nach der Wechselwirkung zwischen der Wirksamkeit von Schallschutzhecken in Abhängigkeit der spektralen Charakteristik der Hintergrundschalle erscheint als vielversprechender Forschungsgegenstand für weitere Hörversuche.

Die verwendete Stichprobengröße ist weiterhin zu gering, um eine differenziertere Auswertung bezüglich der Persönlichkeitseigenschaften, wie z.B. der individuellen Lärmempfindlichkeit, vorzunehmen. Erstrebenswert wäre auch eine proportionale Schichtung der Probandenstichprobe um Alters- und Geschlechtereffekte zu untersuchen. Der Einfluss der Beugung und des Bodeneffekts auf die Wirkung einer Hecke stellt weitere Untersuchungsziele dar, da beide Effekte in situ vorhanden sind und einen Einfluss auf das Spektrum besitzen.

Zur akustischen Wirkung von Hecken auf den Menschen liegen sehr wenige Untersuchungen vor, und auch die vorgestellten Hörversuche sind nicht in der Lage, die Abhängigkeiten und die Einflussfaktoren abschließend zu evaluieren und damit abgesicherte Aussagen zur Wirksamkeit des Einsatzes von Hecken auf den Menschen abzuleiten. Daher sind auch in diesem Bereich noch Fragen offen, die in weiteren Untersuchungen zu neuen wertvollen Erkenntnissen führen können.

Neben dem Einsatz einer einzelnen Hecke sind weitere Konfigurationen von Hecken denkbar, die einen gesteigerten Schallschutz ermöglichen. So ist zum Beispiel die Staffelung von mehreren Hecken hintereinander eine praktisch umsetzbare Möglichkeit. Durch den Einsatz von zwei Hecken hintereinander (siehe Bild 87), die durch geeignete Wahl der Hecken und des Abstands günstige akustische Eigenschaften bieten (Addition der Einfügungsdämmung sowie Doppel-Beugung über die Hecken), ist eine höhere Schallschutzwirkung zu erwarten.

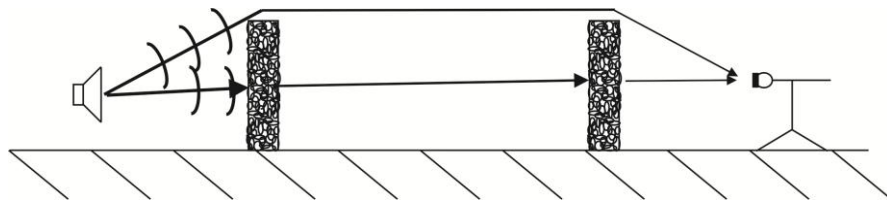


Bild 87: Schallschutzwirkung einer Doppel-Hecke.

Auch zur Verbesserung der Wirksamkeit von bestehenden Lärmschutzwällen kann eine Doppelhecke eingesetzt werden. Dies ist in Bild 88 skizziert.

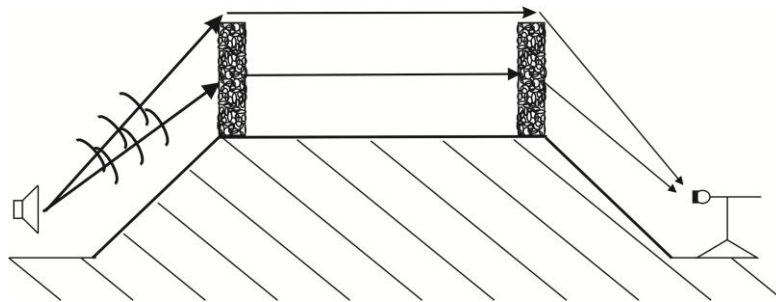


Bild 88: Schallschutzwirkung einer Doppel-Hecke auf einem Schallschutzwall.

Die Untersuchungen an den Hecken haben gezeigt, dass sie vor allem im hohen Frequenzbereich eine große Wirksamkeit aufweisen. Daher bietet sich ihr Einsatz besonders an, wenn entweder das einwirkende Spektrum hochfrequent dominiert ist oder es sich um ein Spektrum handelt, das hochfrequente tonale Schallanteile besitzt. Hier kann man z.B. an das Kurvenquietschen von Straßenbahnen denken. Oft sind Wendeschleifen in unmittelbarer Nähe von Wohnbebauung vorhanden, bei denen das regelmäßig auftretende Kurvenquietschen zu einer erheblichen Störung der Anwohner führt. In solchen Fällen scheinen auch schon herkömmliche Hecken, wie sie in diesem Vorhaben untersucht wurden, eine deutliche Reduktion der Störung bewirken zu können. Diese Wirksamkeit kann zusätzlich durch die Entwicklung von Hecken gesteigert werden, die speziell für diesen Einsatzzweck optimiert werden.

12 Literatur

- [1] Interdisziplinärer Arbeitskreis für Lärmwirkungsfragen im Umweltbundesamt: Beeinträchtigung des Schlafes durch Lärm. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 29 (1982), S 13-16.
- [2] Giering, K: Monitäre Bewertung des Straßenverkehrslärms für Deutschland. Lärmbekämpfung Bd. 4 (2009) Nr.5.
- [3] Babisch, W.: Transportation noise and cardiovascular risk – review and synthesis of epidemiological studies dose-effect corve and risk estimation. WaBoLu-Hefte 01/06, Berlin 2006.
- [4] Babisch, W.: Road traffic noise and cardiovascular risk. Noise & Health 38 (2008), S 27-33.
- [5] Kluizenaar de, Y, Gansevoort, R.T., Miedema, H. M. E., Jong de, P. E.: Hypertension and road traffic noise exposure. J. Occup. Environm. Med. 49 (2007), S. 484 – 492.
- [6] Kolodziej, A.: Daten zum Verkehr. Ausgabe 2009. Umweltbundesamt, 06813 Dessau-Roßlau, Fachgebiet I 3.1 „Umwelt und Verkehr“.
- [7] INTRAPLAN Consult GmbH: Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025. Studie im Auftrag des Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, FE-Nr. 96.0857/2005. Clearingstelle Verkehr der DLR. (<http://daten.clearingstelle-verkehr.de/220/>)
- [8] Beckenbauer, Thomas: Physik der Reifen-Fahrbahn-Geräusche, Geräuscentstehung, Wirkungsmechanismen und akustische Wirkung unter dem Einfluss von Bautechnik und Straßenbetrieb, 4. Informationstage Geräuschemindernde Fahrbahnbeläge in der Praxis - Lärmaktionsplanung 11. / 12.6.2008
- [9] Perfater, M. A.: Community Perception of Noise Barriers. Vol. 1. Virginia Highway and Transportation Research Council (Virginia, USA, 1979).
- [10] Watts, G., Chinn, L., Godfrey, N.: The Effects of Vegetation on the Perception of Traffic Noise. Appl. Acoustics 56 (1999), S. 39 – 56.
- [11] VDI 2714; 1988-01: Schallausbreitung im Freien. Zurückgezogen im Oktober 2006.
- [12] DIN ISO 9613-2; 1999-10: Akustik – Dämpfung des Schalls bei Ausbreitung im Freien – Teil 2: Allgemeine Berechnungsverfahren: Oktober 1999, Beuth Verlag, Berlin.
- [13] Eyring, C.F.: Jungle Acoustics. Journal of the Acoust. Soc. of Am. Vol. 18, Nr.2, October 1946.
- [14] Aylor, D.: Noise Reduction by Vegetation and Ground. Journal of the Acoust. Soc. of Am. Vol. 51, Nr.1, 1972 S. 197 – 205.
- [15] Aylor, D.: Sound Transmission through Vegetation in Relation to Leaf Area Density, Leaf Width and Breadth of Canopy. Journal of the Acoust. Soc. of Am. Vol. 51, Nr.1, 1972 S. 411 – 414.

- [16] Fricke, F.: Sound Attenuation in Forests. *Journal of Sound and Vibration* (1984) 92 (1) S. 149 - 158.
- [17] Bullen, R., Fricke, F.: Sound Propagation through Vegetation. *Journal of Sound and Vibration* (1982) 80 (1) S. 11 - 23.
- [18] Price, M., Attenborough, K., Heap, N.: Sound attenuation through trees: Measurements and models. *Journal of the Acoustical society of America* 84 (5), November 1988, S. 1836 – 1844.
- [19] Huisman, W., Attenborough, K.: Reverberation and attenuation on a pine forest: *Journal of the Acoustical society of America* 90 (5), November 1991, S. 2664 – 2677.
- [20] Martinez-Sala, R., Rubio, C. et. al.: Control of noise by trees arranged like sonic crystals: *Journal of Sound and Vibration* 291 (2006), S. 100 – 106.
- [21] Tarrero, A.I., Martin, M.A., Gonzales, J., Machimbarrena, M., Jacobsen, F.: Sound Propagation in forests: A comparison of experimental results and values predicted by the Nord 2000 model. *Applied Acoustics* 69 (2008) S. 662 – 671.
- [22] Kragh, J.: Pilot Study on Railway Noise Attenuation by Belts of Trees. *Journal of Sound and Vibration* (1979) 66 (3) S. 407 - 415.
- [23] Kragh, J.: Road Traffic Noise Attenuation by Belts of Trees. *Journal of Sound and Vibration* (1981) 74 (2) S. 235 - 241.
- [24] Harris, R. A., Cohn, L. F., Use of Vegetation for Abatement of Highway Traffic Noise. *Journal of Urban Planning and Development*, Vol. 111, No. 1, November 1985, S. 34 - 48.
- [25] Whitcomb, C., Stowers, J.: Sound Abatement with Hedges. *HortScience* Vol. 8 (2), April 1973.
- [26] Huddart, L.: The Use of Vegetation for Traffic Noise Screening. Research Report 238 of the Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, UK, 1990.
- [27] Fang, F.-C., Ling, D.-L.: Investigation of the noise reduction provided by tree belts. *Landscape and Urban Planning* 63 (2003), S. 187 - 195.
- [28] Van Renterghem, T., Oldoni, D., Botteldooren, D.: Sound Propagation in a Park over the Year. *Proceedings of Inter Noise 2010*, Lisbon, Portugal.
- [29] Martens, M. J. M., Michelsen, A.: Absorption of acoustic energy by plants. In: Martens M. J. M. (Ed) *Geluid en Groen* (Katholieke Universiteit Nijmegen, Netherlands Ch7, 142 – 152, 1980.
- [30] Beck, G.: Untersuchungen über Planungsgrundlagen für eine Lärmbekämpfung im Freiraum mit Experimenten zum artenspezifischen Lärminderungsvermögen verschiedener Baum- und Straucharten. Dissertation an der TU Berlin, 1965.

- [31] Mattern, H., Beck, G.: Pflanzen als Mittel der Lärmbekämpfung. Forschungsarbeit der TU Berlin, Patzer Verlag GmbH&Co. KG Hannover Berlin Sarstedt 1968.
- [32] Beck, G.: Pflanzen als Mittel der Lärmbekämpfung. Schriftenreihe Landschafts- und Sportplatzbau. Patzer Verlag GmbH&Co. KG Hannover Berlin Sarstedt, 2. Auflage 1982.
- [33] Bucur, V.: Urban Forest Acoustics. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [34] Aylor, DE, Marks, LE: Perception of noise transmitted through barriers. J.Acoust. Soc. Am, 1976 (59), 397 – 400.
- [35] Mulligan, BE, Lewis, SE, Faupel, ML, Goodman, LS, Anderson, LM: Enhancement and masking of loudness by environmental factors vegetation and noise. Environment and Behaviour. 1987, (19) 411 – 443.
- [36] DIN EN 1793-3: Lärmschutzeinrichtungen an Straßen – Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften. Teil 3: Standardisiertes Verkehrslärmspektrum. November 1997, Beuth Verlag, Berlin.
- [37] DIN 4109 Schallschutz im Hochbau – Anforderungen und Nachweise. November 1989, Beuth Verlag, Berlin.
- [38] ANSI/ASTM C 3384-7: Standard Method for impedance and absorption of acoustical materials by the impedance tube method. ASTM 1979.
- [39] ASTM E 1050: Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones, and a Digital Frequency Analysis System. ASTM 1986.
- [40] DIN EN ISO 10534-1: Akustik - Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren. Teil 1: Verfahren mit Stehwellenverhältnis. Beuth Verlag Berlin, 2001 und Berichtigung 2007
- [41] DIN EN ISO 10534-2: Akustik - Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren. Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion. Beuth Verlag Berlin, 2001 und Berichtigung 2007
- [42] EN ISO 3745: Akustik – Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Verfahren der Genauigkeitsklasse 1 für reflexionsarme Räume und Halbräume. Anhang A: Allgemeines Verfahren zur Feststellung der Eignung von reflexionsarmen Räumen und Halbräumen. 2003
- [43] Cremer, L. und Heckl, M.: Körperschall, 2. Auflage, Springer, Berlin 1996, S. 522, Gl. 6.81b.
- [44] DIN EN ISO 15186-1: Bestimmung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen aus Schallintensitätsmessungen. Teil 1: Messungen im Prüfstand. 2003. Beuth Verlag Berlin.

- [45] Embleton, T. F.W.: Sound propagation in homogeneous deciduous and Evergreen Woods. Journal of the Acoustical Society of America 35, Seite 1119 - 1125 (1963).
- [46] Twersky, V: Multiple scattering of waves by a volume distribution of parallel cylinders. Journal of the Acoustical Society of America 36, Seite 1314 - 1129 (1964).
- [47] Defrance, J., Barriere, N., Premat, E.: A diffusion model for sound propagation through forrests. Proceedings of Forum Acusticum Sevilla, 2002.
- [48] Felbacq et al: Scattering by a random set of parallel cylinders. Journal of the Optical Society of America, 1994.
- [49] Mechel, F.P.: Schallabsorber. Band II: Innere Schallfelder - Strukturen. S. Hirzel Verlag Stuttgart, Leipzig, 1995.
- [50] Mechel, F.P.: Pegel-Abnahme durch Hecken. Private Korrespondenz mit Prof. Mechel, Brief vom 19.01.2010 an Prof. Maysenhölder, IBP.
- [51] Fields, J. M.; Jong, R. G. de; Gjestland, T.; Flindell, I. H.; Job, R. F. S.; Kurra, S.; Lercher, P.; Vallet, M.; Yano, T.; Guski, R.; Felscher-Suhr, U. & S. R.: Standardized General-Purpose Noise Reaction Questions for Community Noise Surveys: Research and a Recommendation. Journal of Sound and Vibration 242 (2000) 4, S. 641 – 679.
- [52] Heller, O.: Hörfeldaudiometrie mit dem Verfahren der Kategorienunterteilung (KU). Psychologische Beiträge 27 (1985) 4, S. 478 – 493.
- [53] Bortz, J.; Schuster, C.: Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. 7. Auflage, Berlin, 2010.
- [54] American Psychological Association: Publication manual of the American Psychological Association, 6. ed. Washington DC 2010.
- [55] Ellermeier, W., Hellbrück, J., Kohlrausch, A., Zeitler, A.: Kompendium zur Durchführung von Hörversuchen in Wissenschaft und industrieller Praxis. Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA), Berlin, September 2008.

Anhang A: Messergebnisse

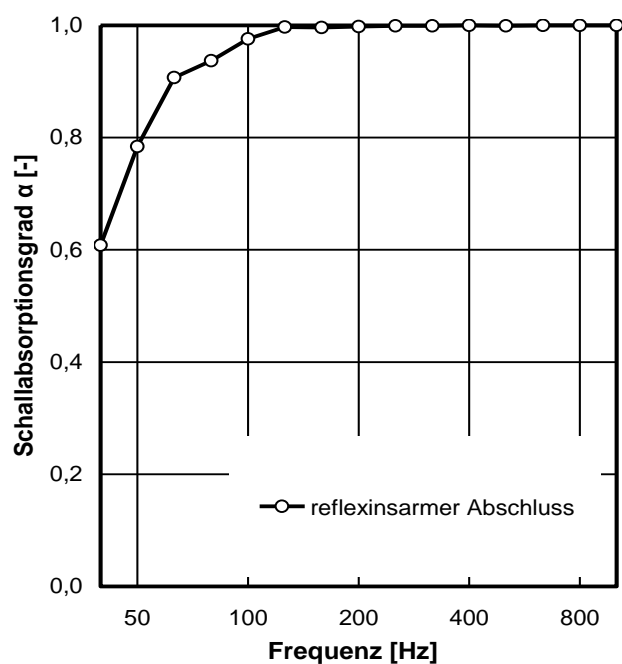


Bild A 1: Schallabsorptionsgrad des reflexionsarmen Abschlusses des Impedanzrohrs.

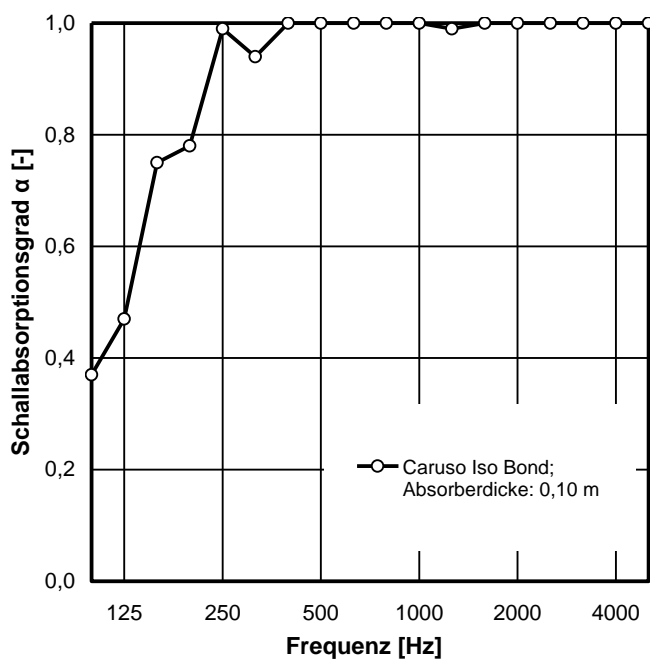


Bild A 2: Schallabsorptionsgrad von Caruso Iso Bond (WLG o35, 100 mm dick). Angaben des Herstellers, Werte über 1 auf 1 abgerundet, Messung im Hallraum.

Anhang B: Bilder und Skizzen des Kundt'schen Rohrs

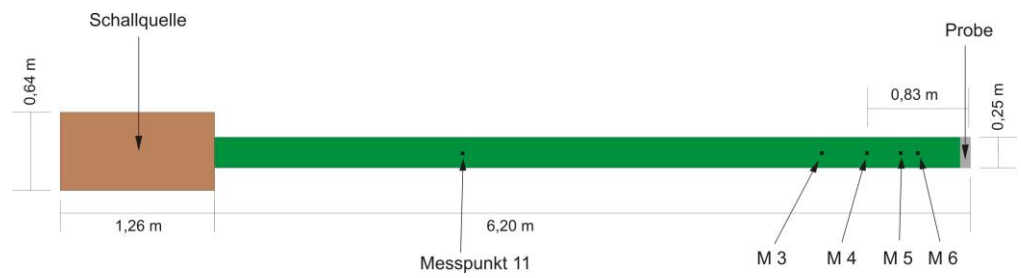


Bild B 1: Schematischer Messaufbau des Kundt'schen Rohrs bei Messung des Schallabsorptionsgrads.

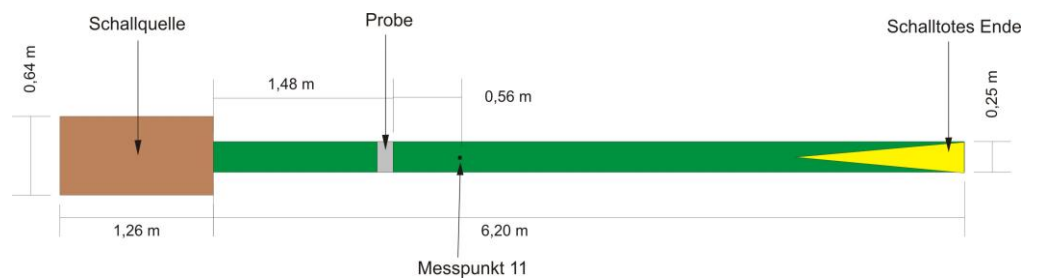


Bild B 2: Schematischer Messaufbau des Kundt'schen Rohrs bei Messung der Schalldämmung.



Bild B 3: Foto des Kundt'schen Rohrs im Labor des IBP.



Bild B 4: Foto der Blattfläche des Roten Hartriegels im Kundt'schen Rohr bei Einbau zur Messung der Schalldämmung.

Anhang C: Bilder der Blätter



Bild C 1: Foto und Abmessung eines Blattes mittlerer Größe der Efeuhecke im Labor (Blattlänge 5 cm, Blattbreite 5 cm).



Bild C 2: Foto und Abmessung eines Blattes mittlerer Größe der Spindelstrauchhecke im Labor (Blattlänge 5 cm, Blattbreite 3 cm).



Bild C 3: Foto und Abmessung eines Blattes mittlerer Größe der Efeuhecke im Freien (Blattlänge 10 cm, Blattbreite 9,5 cm).



Bild C 4: Foto und Abmessung eines Blattes mittlerer Größe der Kirschlorbeerhecke im Freien (Blattlänge 12,7 cm, Blattbreite 6,7 cm).



Bild C 5: Foto und Abmessung eines Blattes mittlerer Größe der Hainbuchenhecke im Freien (Blattlänge 11 cm, Blattbreite 6,2 cm)

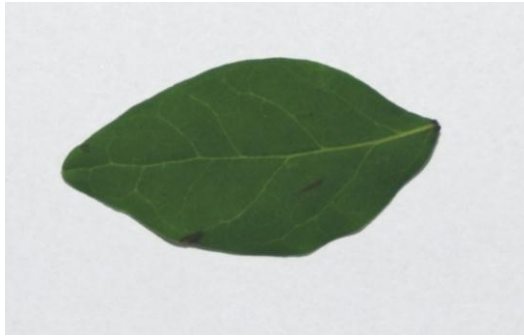


Bild C 6: Foto und Abmessung eines Blattes mittlerer Größe der Buchbaumhecke im Freien (Blattlänge 3 cm, Blattbreite 1,5 cm)

Anhang D: Messung an einer Kunsthecke aus Styrofil

Als Kunstmaterial wurde das Füllmaterial Styrofill (Firma Storopack) untersucht. Es handelt sich dabei um Verpackungschips aus EPS (expandiertes Polystyrol) mit einer Dichte von $\rho = 5,3 \text{ kg/m}^3$. Die Größe der Verpackungschips ist ähnlich zu Blättern. Daher sind Messungen im Kundt'schen Rohr als auch im Halb-Freifeldraum möglich. Bild D 1 zeigt die Gitterbox mit den Abmessungen $0,25 \text{ m} \times 0,25 \text{ m} \times 0,25 \text{ m}$ im Kundt'schen Rohr.



Bild D 1: Gitterbox mit Verpackungschips im Kundt'schen Rohr des IBP

Zur Messung im Halb-Freifeldraum wurde eine Gitterbox aufgebaut, die dieselben Abmessungen wie die Blende besaß. Damit ergab sich eine Höhe von 2 m; eine Breite von 3,5 m und eine Dicke von 0,25 m. Diese ist in Bild D 2 dargestellt.



Bild D 2: Styrofill-Kunstecke im Modellraum des IBP

Diese Wand wurde hinter der Blende stehend, aber auch ohne Blende gemessen. Bei der Messung mit Blende wurden zwei Lautsprecherpositionen untersucht. Der Lautsprecher wurde mittig zur Blendenöffnung aufgestellt. Die Abstände betragen 0,5 m und 1,4 m zur Blende. Die Mikrofonposition befand sich in einem Abstand von 0,35 m hinter dem Prüfobjekt mittig zum Quellzentrum. Die Höhe der Messachse betrug 0,35 m. Die Messwerte der Einfügungsdämmung sind in Bild D 3 dargestellt.

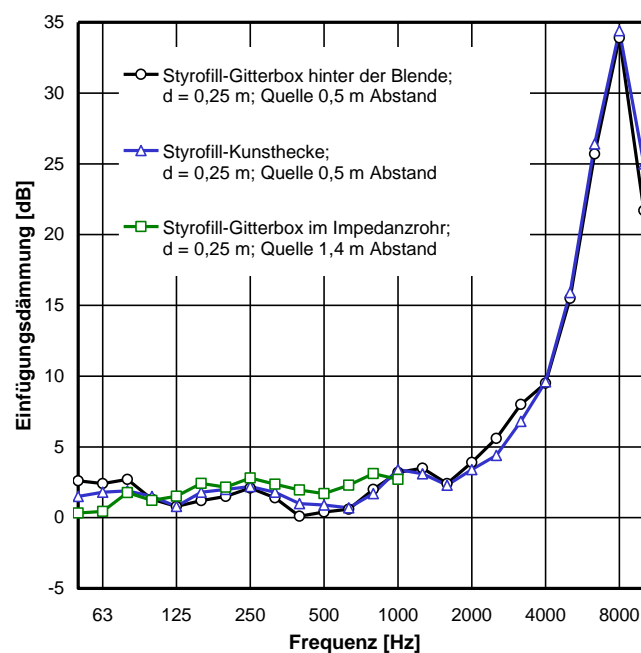


Bild D 3: Einfügungsdämmung von Styrofill-Gitterboxen, gemessen im Kundt'schen Rohr, im Blendenprüfstand und als gesamtes Element im Halb-Freifeldraum des IBP.

Die Messwerte zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen Messung im Kundt'schen Rohr, der Aufstellung hinter der Blende und als frei stehendes Element. Die geringen Unterschiede im tiefen Fre-

quenzbereich sind möglicherweise auf die Unterschiede in der Anregung zurückzuführen (Ebene Welle im Kundt'schen Rohr, Punktschallquelle im Halb-Freifeldraum). Leider ist der Frequenzbereich des Kundt'schen Rohres bis 1000 Hz begrenzt, so dass ein Vergleich bei höheren Frequenzen nicht möglich war.

Anhang E: Skizzen der Messungen im Freien

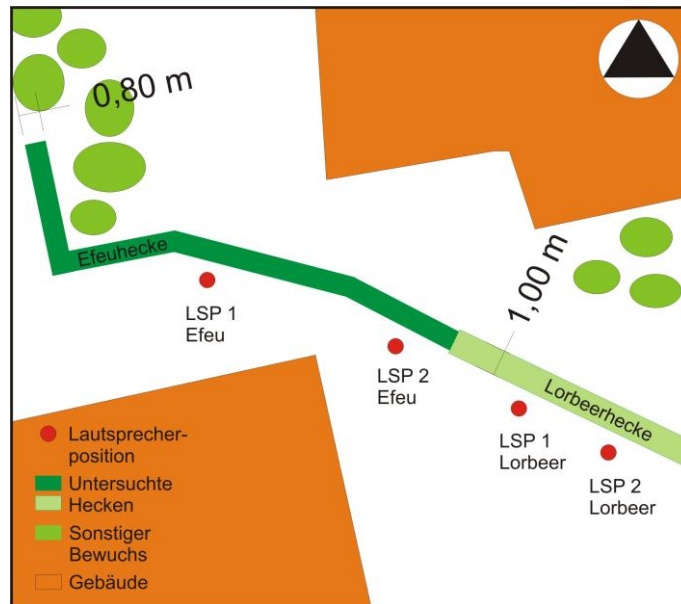


Bild E 1: Skizze der Messgeometrie zu den Messungen der Einfügungsdämmung der Efeuhecke und der Lorbeerhecke im Freien.

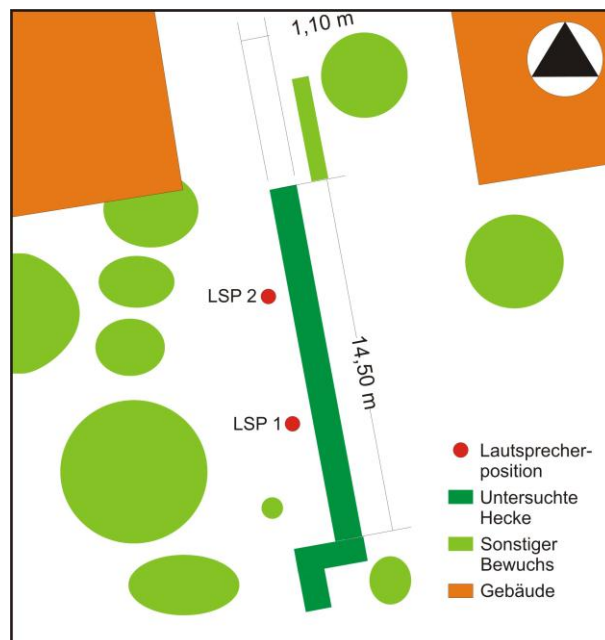


Bild E 2: Skizze der Messgeometrie zu den Messungen der Einfügungsdämmung der Hainbuchenhecke im Freien.

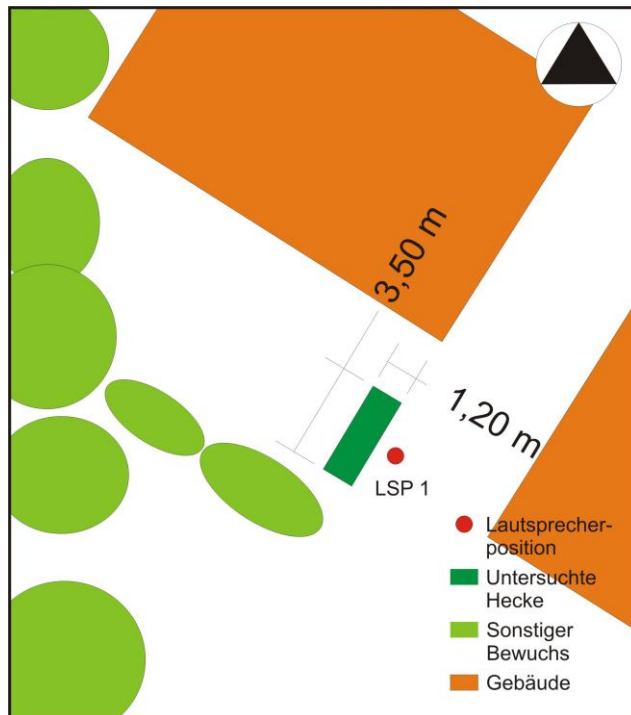


Bild E 3: Skizze der Messgeometrie zu den Messungen der Einfügungsdämmung der Buchsbaumhecke im Freien.

Anhang F: Messergebnisse des Transmissions- Reflexions- und Dissipationsgrads

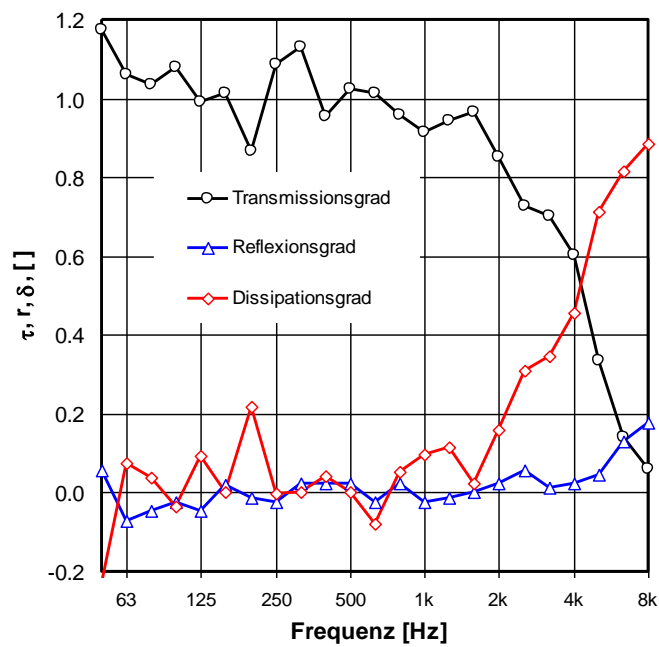


Bild F 1: Transmissions-, Reflexions- und Dissipationsgrad der Spindelstrauchhecke durch Intensitätsmessung mittels P-U-Sonde.

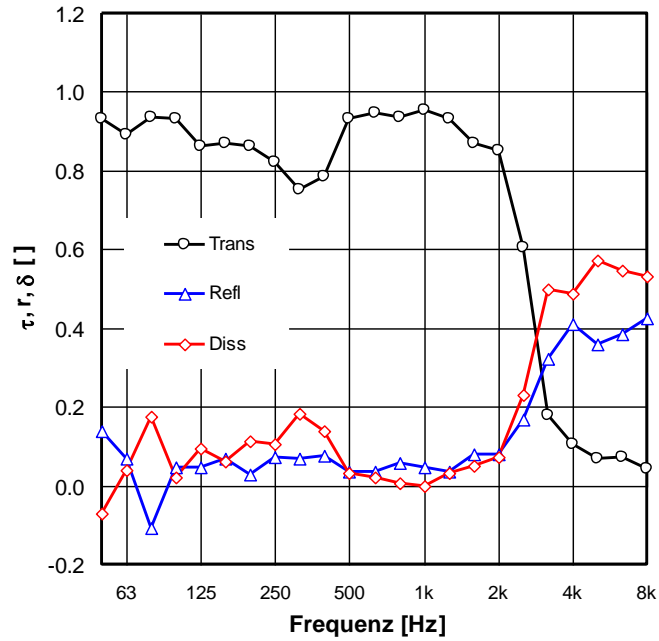


Bild F 2: Reflexions-, Transmissions- und Dissipationsgrad der Kunsthecke, ermittelt aus der Messung mit PU-Sonde. Blattdurchmesser 6,3 cm, Abstand der Blätter 4 cm, statistische Verteilung der Blätter.

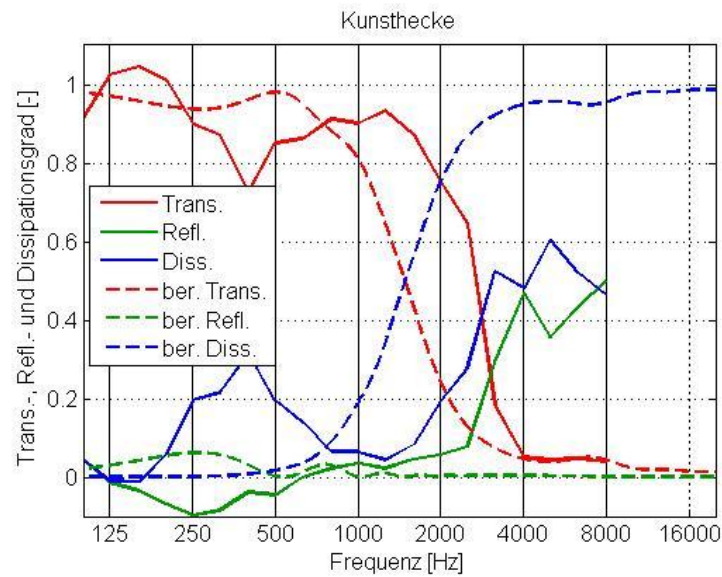


Bild F 3: Berechnete und gemessene Transmissions-, Reflexions- und Dissipationsgrade der Kunsthecke ($a=0,95$ $a_0=29,9$ mm, mittlerer Abstand $b=40$ mm, $\mu' = 0,31$, $D=0,36$ m)

Anhang G: Bilder des Hörversuchs



Bild G 1: Situation Stadtbahn ohne Hecke.



Bild G 2: Situation Stadtbahn mit Hecke.

Anhang H: Geräteliste

Echtzeitanalysator: Norsonic, Typ 830-2, Seriennummer: 12720

Echtzeit Analysator, Norsonic, Typ 840

Laser-Scanning-Vibrometer Polytec PSV-300-U5

Microflown P-U Sonde (PU-Regular Kit 193, Probe PT 0712-93)

Vorverstärker: KH, Typ SA 240, Seriennummer: 001235

½" Mikrofon: Norsonic, Typ 1220, Seriennummer: 22834

½" Mikrofon: Norsonic, Typ 1220, Seriennummer: 27982

Mikrofonvorverstärker: Brüel & Kjær, Typ 2639, Seriennummer: 1373935

Mikrofonvorverstärker: Brüel & Kjær, Typ 2639, Seriennummer: 1286305

Kalibrator: Brüel & Kjær, Typ 4231, Seriennummer: 2594556

Lautsprecher: Visaton, Typ W 200 S

DAT Recorder: Sony TCD-D10

Messsystem: SQlab III Head Acoustics

Kopfhörer: Sennheiser HD 280