

Messtechnik in der Akustik Grundlagen und Anwendungen



Mario Stoll

April 2026

Zusammenfassung

Messen in der Akustik bedeutet meistens die Erfassung von Schalldruck mit Mikrofonen. Physikalisch betrachtet ist dies prinzipiell eine einfache Aufgabe, die Herausforderungen liegen in den Details. Es ist ein grosser Pegel- und Frequenzbereich zu umfassen, und gemessen wird in unterschiedlichen Schallfeldern.

Häufig soll gemessen werden, was gehört wird. Die Motivation, Schall zu messen, stammt oft von der akustischen Behaglichkeit. Sei dies nun eine Industrieanlage, die leiser werden soll oder ein Raum, der angenehmer klingen soll. Die akustische Empfindung des Menschen steht häufig im Zentrum. Dieser Ausgangslage sollen sich Akustiker*innen bei Messungen bewusst sein und - so mein Ratschlag - immer mit offenen Ohren messen. Denn häufig zählt der Höreindruck bei Messungen genau so wie das numerische Messresultat.

Das vorliegende Skript ist während meines Unterrichts der akustischen Messtechnik an der FHNW entstanden. Inspiriert wurde ich von den Unterlagen von Kurt Eggenschwiler und Kurt Heutschi, vom Buch meines Kollegen Clemens Kuhn-Rahloff sowie von Markus Haselbach von der EMPA. Und durch meine Messpraxis und den Diskussionen unter Fachleuten, unter anderem bei der Gartenmann Engineering AG, wo ich heute tätig bin.

Das Skript widmet sich an Einsteiger*innen mit einem Grundwissen in Akustik. In einem ersten Teil werden die konzeptionellen Grundlagen der akustischen Messtechnik behandelt. Im zweiten Teil *Anwendungen* wird auf konkrete Messaufgaben eingegangen, damit korrekte und normgemässe Messungen durchgeführt werden können. Der Fokus liegt in den praxisnahen Anwendungen der Messtechnik. Für das weitere Studium werden Angaben und Verweise zu weiterführenden Informationsquellen angegeben.

Das Skript befindet sich in der Erarbeitung und wird in der nächsten Zeit laufend erweitert. Der aktuelle Stand ist eine erste Fassung für die Abgabe im Rahmen des CAS Akustik, Messpraktikum an der EMPA. Für das Messpraktikum im Juni wird es eine neue Version mit eingefügten Inhalten im zweiten Teil geben. Die letzte Version ist jeweils auch unter www.stolltech.ch/akumess zu finden. Vorliegende Version: 0.5, 28.04.2026

Für Anmerkungen zum Skript, Ergänzungen und fachliche Fragen bin ich sehr gerne erreichbar: mario@stolltech.ch

Die Nutzung des Skripts ist nur für den persönlichen Gebrauch, nicht zur Verbreitung oder Kommerzialisierung.

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen	3
1.1 Elementare physikalische Grössen in der Akustik	3
1.1.1 Schalldruck und Schalldruckpegel	3
1.1.2 Frequenz, Wellenlänge und Zeit	4
1.2 Das Mikrofon als Sensor im Schallfeld	5
1.2.1 Aufbau des Mikrofons	5
1.2.2 Druck-, Freifeld- oder Diffusfeldentzerrung	6
1.2.3 Dynamikbereich	7
1.2.4 Frequenzbereich	8
1.2.5 Beispiele von Mikrofonen	8
1.2.6 Richtcharakteristik	8
1.2.7 Windschutz	9
1.2.8 Aussenmikrofone	9
1.2.9 Mikrofon Speisung und Steckverbindungen	10
1.2.10 Weiterführende Informationen zur Mikrofon-Technik	11
1.3 Signalverarbeitung in der akustischen Messtechnik	12
1.3.1 Prinzipieller Signalpfad	12
1.3.2 Frequenzbewertung	12
1.3.3 Signalverarbeitung im Zeitbereich	15
1.3.4 Pegelgrössen	19
1.4 Pegelarithmetik	20
1.4.1 Pegeladdition	20
1.4.2 Pegelsubtraktion	20
1.4.3 Mittelwertbildung von Pegeln	20
1.5 Diffuses Schallfeld	22
1.5.1 Hallradius	22
1.5.2 Raummoden und Schroeder-Frequenz	23
1.6 Bauakustische Messungen	24
1.6.1 Messgrössen	24
1.6.2 Luft- und Trittschall	24
1.7 Messung der akustischen Impulsantwort	26
1.7.1 Lineares, zeitinvariantes System in der Akustik	26
1.7.2 Impulsantwort, Raumimpulsantwort	26
1.7.3 Nachhallzeit	27
1.8 Audioaufnahmen und Sonogramme	29
1.9 Eichung und Kalibration	30
1.9.1 Eichung	30

1.9.2	Kalibration	30
1.10	Normierung und Bauartzulassung	32
1.10.1	Normierung	32
1.10.2	Bauartzulassung	32
1.11	Messunsicherheit	33
1.12	Messgeräte, Messsysteme	34
1.12.1	Handschallpegelmesser	34
1.12.2	Einstellungen am Handschallpegelmesser	35
1.12.3	Messsysteme aus Audiohardware und Auswertesoftware	35
1.12.4	Stationäre Messsysteme	36
1.12.5	Impedanzrohr	37
1.12.6	Mikrofonsysteme mit Richtungsinformation	38
1.12.7	Kunst- und Echkopf, psychoakustische Messungen	38
1.12.8	Akustische Kamera	39
1.12.9	Intensitätssonde	40
1.12.10	Messung der Schallschnelle	40
1.12.11	Messstationen	41
1.12.12	SPL-Logger	42
1.12.13	Smartphone als Pegelmesser	42
1.13	Schallquellen	43
1.13.1	Dodekaeder	43
1.13.2	Trittschallhammerwerk, Trittschallball	43
1.13.3	Impulsquellen für Nachhallzeitmessungen	44
1.13.4	EMPA Pendelfallhammer	45
1.13.5	Talkbox	45
1.13.6	Systeme zur Erschütterungsmessung	45
2	Anwendungen	46
2.1	Einführung	46
2.1.1	Messnormen und Wegleitungen	46
2.1.2	Messbedingungen, Grund- und Störgeräusche	46
2.1.3	Arbeitsweise, Protokollierung und Praxis-Tipps	47
2.1.4	Höreindrücke während den Messungen	48
2.1.5	Auswertungen der Messdaten	48
2.1.6	Rundungsregeln in der Akustik	48
2.1.7	Bericht und Beurteilung	49
2.2	Lärmmessungen	50
2.2.1	Messung einer Punktschallquelle	50
2.3	Langzeit- und Überwachungsmessungen	52
2.4	Bauakustische Messungen	54
2.5	Labormessungen	55
2.6	Raumakustische Messungen	56
2.7	Elektroakustische Messungen	57
2.8	Messungen Körperschall und Erschütterungen	58
2.9	Weitere akustische Messungen	59
2.10	Hersteller und Vertriebe von Messtechnik in der Schweiz	60
2.11	Buchbare Akustiklabore in der Schweiz	61

Kapitel 1: Grundlagen

1.1 Elementare physikalische Grössen in der Akustik

1.1.1 Schalldruck und Schalldruckpegel

Schall ist die wellenartige Ausbreitung von mechanischen Schwingungen in verschiedenen Medien. Luftschall bezeichnet die Ausbreitung in der Luft. Änderungen des Luftdruckes sind dem atmosphärischen Luftdruck (ca. 1'000 hPa) überlagert und werden durch das Trommelfell vom Gehör registriert. Als Menschen hören wir somit die Luftdruckänderungen, die in der Realität meist in folgendem Bereich liegen.

- 20 μPa (Hörschwelle), Schalldruckpegel 0 dB SPL
- 20 Pa (annähernd Schmerzgrenze), Schalldruckpegel 120 dB SPL

In der Akustik bewegt man sich somit in grossen Zahlenbereichen. Um diesen Zahlenbereich mit überschaubaren Werten darstellen zu können, wurde der logarithmische Massstab als Verhältnismass eingeführt. Damit liegen die praxisnahen Werte gut handhabbar zwischen 0 dB (20 μPa) und 120 dB (20 Pa). Nachteilig ist jedoch, dass in diesem Massstab die mathematischen Operationen der physikalischen Grössen sich nicht mehr direkt ausführen lassen. So ist beispielsweise die Addition nicht eine einfache arithmetische Werteaddition: $60 \text{ dB} + 60 \text{ dB} \neq 120 \text{ dB}$.

Sobald eine Grösse in den logarithmischen Massstab überführt worden ist, spricht man von einem Pegel, beispielsweise vom Schalldruckpegel. Der logarithmische Massstab ist eine vergleichende Angabe von Zahlenwerten bezogen auf einen Referenzwert / Bezugsgrösse (Verhältnismass). Damit auf den ursprünglichen physikalische Wert zurück geschlossen werden kann, ist die korrekte Bezeichnung der Pegelangabe notwendig.

In der Akustik kommen folgende Pegelangaben regelmässig vor:

- Schalldruckpegel L_p (oder häufig auch nur L mit weiterem Zusatz-Index), englisch auch SPL (sound Pressure Level) genannt
- Schalleistungspegel L_W

Der Schalldruckpegel ist somit folgendermassen definiert, siehe auch Kapitel 1.3.3:

$$L_p = 10 \cdot \lg \left(\frac{p_{eff}^2}{p_0^2} \right) \quad [\text{dB}] \quad (1.1)$$

mit:

L_p : Schalldruckpegel in dB

p_{eff} : Effektivwert des Schalldruckes in Pa

P_0 : Referenzschalldruck 20 μ Pa

Der Schalleistungspegel kann nicht direkt gemessen werden, darum wird diese Grösse im vorliegenden Skript nicht weiter behandelt. Für weiterführende Angaben sei auf die Fachliteratur [1] verwiesen.

1.1.2 Frequenz, Wellenlänge und Zeit

Neben dem Schalldruck ist die Frequenz die zweite wichtige Grösse in der akustischen Messtechnik. Sie beschreibt die Tonhöhe und somit wie oft sich eine periodische Schwingung innerhalb einer Sekunde wiederholt. In der akustischen Messtechnik sind die Schwingungen häufig die Schalldruckschwankungen. Wiederum ist der betrachtete Bereich dem menschlichen Gehör angepasst. Der hörbare Bereich ist von einigen individuellen Faktoren abhängig, liegt aber typischerweise in der Region von 20 Hz bis 20'000 Hz. Eine Verdoppelung der Frequenz ist ein Sprung um eine Oktave. Dies hat zur Folge, dass auch die Frequenz in einem logarithmischen Massstab dargestellt wird.

Wird die Frequenz im Zeitbereich dargestellt, entspricht die Dauer einer Schwingung einer Periodendauer.

$$f = \frac{1}{T} \quad [\text{Hz}] \quad (1.2)$$

mit:

f : Frequenz in Hz

T : Periodendauer in s

In der sich in einem Medium ausbreitenden Schallwelle ist die Frequenz als Wellenlänge vorhanden.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [\text{m}] \quad (1.3)$$

mit:

λ : Wellenlänge in m

c : Schallgeschwindigkeit in m/s, in Luft und bei normalen Verhältnissen kann $c = 343$ m/s eingesetzt werden

f : Frequenz in Hz

Einige Eckwerte der Periodendauer und der Wellenlänge sind folgend aufgeführt. Es wird ersichtlich, dass die akustische Messtechnik eine hohe zeitliche Auflösung bieten muss, um hohe Frequenzen zu erfassen. Die grosse Bandbreite der Wellenlänge ist bezüglich der Messungen im Raum zu beachten (Stichwort Raummoden Kapitel 1.5.2).

- 20 Hz: Periodendauer: 50 ms, Wellenlänge: 17 m
- 1 kHz: Periodendauer: 1 ms, Wellenlänge: 343 mm
- 20 kHz: 0.05 ms, Wellenlänge: 17 mm

1.2 Das Mikrofon als Sensor im Schallfeld

1.2.1 Aufbau des Mikrofons

In der akustischen Messtechnik wird üblicherweise gemessen, was gehört wird. *Messen was wir hören – hören was wir messen*. Somit soll die zeitliche Änderung des Schalldruckes $p(t)$ erfasst werden. Die Änderungen des Schalldruckes werden mit einem mechanischen Element im Wellenfeld erfasst, dem Mikrofon. Das Mikrofon besteht aus einer sehr leichten und dünnen Membran, die die Druckänderungen des Schallfeldes möglichst gut übernimmt (Druckempfänger). Bei 1 Pa (94 dB SPL) wird eine 1/2 "Kapsel in der Mitte um etwa 5 nm (Nanometer) ausgelenkt [13].

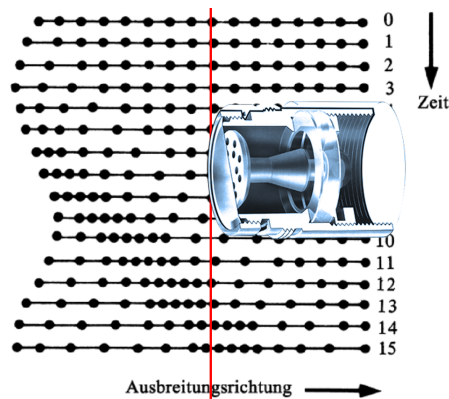


Abbildung 1.1: Darstellung der Wellenausbreitung eines Schallfeldes in Abhängigkeit der Zeit [6], Mikrofon zur Aufnahme der Druckänderungen, [13]

Die mechanischen Schwingungen der Membran werden in elektrische Schwingungen umgewandelt. Dazu gibt es verschiedene Wandlungsmöglichkeiten. In der akustischen Messtechnik werden meist elektrostatische Mikrofone eingesetzt (Kondensatormikrofon). Die Anordnung der Kapsel bildet einen Plattenkondensator (blau). Die Membranauslenkung verändert die Kapazität. Die elektrische Spannung über der Kapazität wird umgewandelt und verstärkt (grün). Mit der Polarisationsspannung wird die elektrische Ladung konstant gehalten. Sie beträgt in der Regel 200 V bei extern polarisierten Mikrofonen. Häufig (bspw. bei NTi Audio oder Norsonic) sind die Kapseln auch vorpolarisiert, in dem ein Elektret auf der Membran oder der Gegenelektrode eingesetzt wird. Diese werden somit Elektret-Mikrofone genannt.

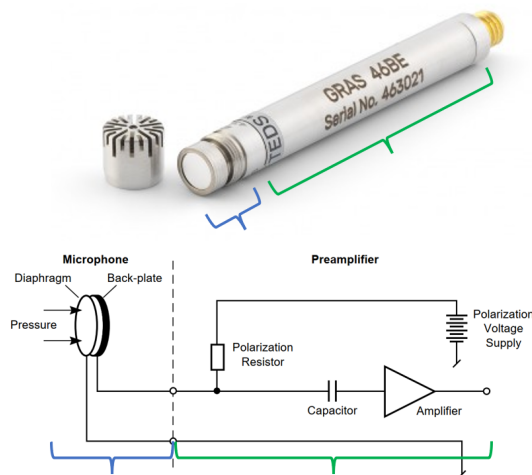


Abbildung 1.2: Aufbau eines Kondensatormikrofons: Plattenkondensator (blau) und Vorverstärker (grün). [13] [11]

1.2.2 Druck-, Freifeld- oder Diffusfeldentzerrung

Das Mikrofon als Sensor soll das Schallfeld erfassen, ohne dieses zu beeinflussen. Aufgrund der Grösse der Mikrofon-Kapsel kommt es je nach Schalleinfallrichtung jedoch zu Störungen des Schallfeldes und damit zu Messfehlern. Bei senkrechtem Einfall und hohen Frequenzen ist die Störung am grössten, es kommt zum «Druckstau» (Wellenlänge im Bereich des Kapseldurchmessers).

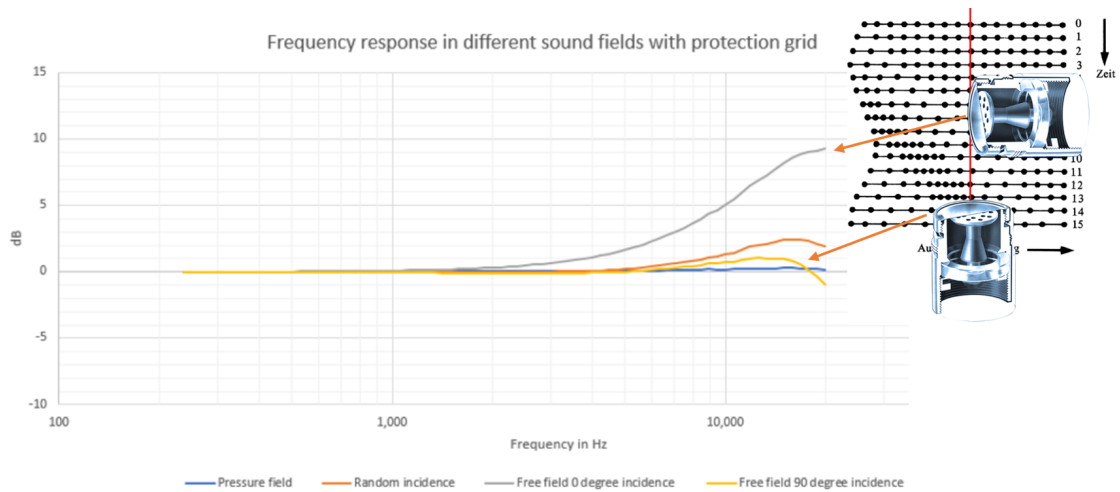


Abbildung 1.3: Typischer Frequenzgang des Druckfeldmikrofons Typ 4971-H-041 [13]

Dieser Druckstau-Effekt wird je nach Mikrofon-Typ korrigiert (Frequenzgang-Korrektur, Entzerrung):

- Druckfeldmikrofon
 - Keine Korrektur des Druckstaus
 - Einsatz in Druckfeldern (kleine Volumen, bspw. akustische Kuppler)
 - Bei Freifeldmessungen rechtwinklig zur Schalleinfallrichtung
- Freifeldmikrofon
 - Druckstau korrigiert, deshalb Mikrofon auf die Schallquelle ausrichten
 - Meist verwendet für Handschallpegelmesser
- Diffusfeldmikrofon
 - Korrigiert für diffuse Schallfelder und zufälliger Schalleinfallrichtung
 - Einsatz in Hallräumen

1.2.3 Dynamikbereich

Der Dynamikbereich definiert sich durch die untere und obere Pegelgrenze, bei der noch valide Resultate gemessen werden können. Die untere Pegelgrenze ergibt sich aus dem Eigenrauschen der Kapsel und vom Vorverstärker. Sie liegt bei den Standard-Mikrofonen (1/2 ") bei etwa 20 dB(A).

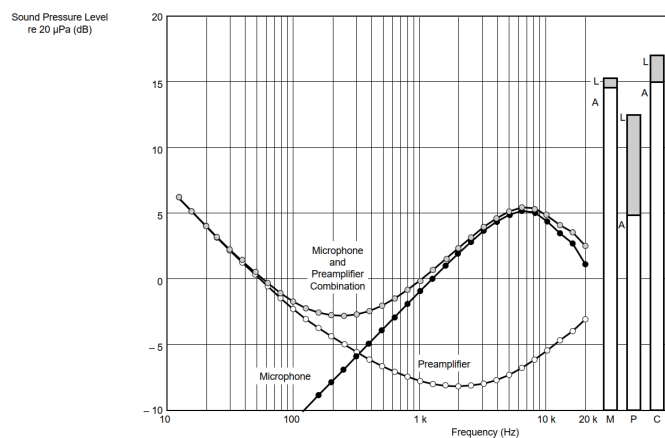


Abbildung 1.4: Spektrum des Grundrausches eines 1/2 "Mikrofons (M), Vorverstärker (P) und in Kombination (C). Zu beachten sind die unterschiedlichen Teil-Spektren. [13]

Die obere Pegelgrenze wird bei Überschreitung von typischerweise 3 % Verzerrungen angegeben. Diese so definierte Höchstgrenze liegt häufig über 120 ... 140 dB(A).

1.2.4 Frequenzbereich

Die tiefsten und die höchsten fehlerfrei messbaren Frequenzen definieren den Frequenzbereich des Mikrofons. Unterschiedliche Bauarten der Kapsel und des Vorverstärkers bedeuten unterschiedliche Frequenzbereiche. Die untere Grenzfrequenz ist typischerweise durch die Dimension des Druckausgleichskanal für atmosphärischer Luftdruck gegeben und liegt im Bereich von etwa 2 bis 10 Hz. Die obere Grenzfrequenz ergibt sich durch die Resonanzfrequenz Kapsel und einer allfälligen Frequenzgang-Korrektur. Auch die Richtcharakteristik beeinflusst die obere Grenzfrequenz, da bei höheren Frequenzen die Bündelung grösser ist, siehe Kapitel 1.2.6.

Die elektronische Schaltung des Vorverstärkers ist auf einen bestimmten Frequenzbereich ausgelegt, somit bestimmt auch die Wahl des Vorverstärkers den Frequenzbereich der Messkette.

1.2.5 Beispiele von Mikrofonen

Die folgende Tabelle zeigt einen Vergleich der Mikrofon-Eigenschaften, Quelle [13].

Mikrofon	Dynamikbereich	Grundrauschen	Frequenzbereich
1 ", Typ 4144	11 dB ... 146 dB	9.5 dB(A)	2.6 Hz ... 8 kHz
1/2 ", Typ 4190	14.6 dB ... 146 dB	14.6 dB(A)	6.3 Hz ... 20 kHz
1/4 ", Typ 4939	28 dB ... 164 dB	28 dB(A)	4 Hz ... 100 kHz
1/8 ", Typ 4138	43 dB ... 168 dB	43 dB(A)	6.5 Hz ... 140 kHz

Tabelle 1.1: Einige Mikrofon-Eigenschaften, Quelle Hersteller

Aus der Zusammenstellung wird klar, dass je nach Messaufgabe ein unterschiedliches Mikrofon gewählt werden soll. Für Messungen im tieffrequenten Bereich und / oder bei kleinen zu messenden Pegeln eignen sich Mikrofone mit grossen Membranen (1 "), für Messungen im Ultrasound-Bereich und / oder bei hohen Pegeln (bspw. Explosionen) solche mit kleinen Membranen (1/8 ").

Für die meisten Messungen im Alltag von Akustik-Fachleuten haben sich die 1/2 " Mikrofone bewährt. Diese lassen sich von 20 bis 120 dB(A) sowie zwischen 10 Hz und 20 kHz einsetzen (inklusive genügend Sicherheitsmargen) und sind an den üblichen Handschallpegelmessern zu finden. Ergänzend kommen sogenannte LowNoise-Mikrofone für Messungen von tiefem Grundgeräuschen, bspw. bei Messung von leisen, störenden Geräuschen, zum Einsatz. Ein Beispiel eines solchen Mikrofons ist das GRAS 40HL 1/2 " .

1.2.6 Richtcharakteristik

Die in der akustischen Messtechnik verwendeten Mikrofone haben fast ausschliesslich eine kugelförmige, omnidirektionale Richtcharakteristik. Das heisst, sie nehmen den Schall von allen Richtungen gleich auf. Dies ist für tiefe und mittlere Frequenzen auch der Fall. Bei hohen Frequenzen kommt es abhängig vom Membran-Durchmesser zu einer Bündelung der Empfindlichkeit, das Mikrofon ist nicht mehr omnidirektional, sondern weist eine Richtungsabhängigkeit auf.

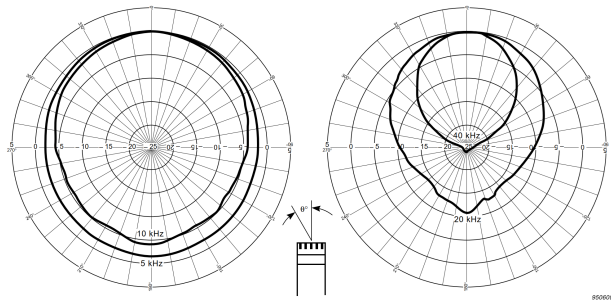


Abbildung 1.5: Typische Richtcharakteristik eines 1/2 " Mikrofons für 5, 10, 20 und 40 kHz. [13]

Das 1/2 " Mikrofon misst bei 10 kHz etwa 5 dB weniger Pegel von hinten (180 °) als von vorne (0 °). Zu tieferen Frequenzen ist der Unterschied deutlich kleiner, bei 5 kHz noch weniger als 2 dB. In der akustischen Messpraxis ist die in diesem Frequenzbereich vorhandene Richtcharakteristik für die meisten Messaufgaben somit nicht relevant.

Wird das Messmikrofon direkt am Handschallpegel eingesteckt, d.h. ohne Kabel-Verlängerung, kann es unter ungünstigen Umständen zu Schallreflexionen vom Gerät kommen. Diese Reflexionen können das Messresultat verfälschen. Darum haben die meisten Handschallpegelmesser angewinkelte Flächen oder bieten einen zusätzlichen Reflexionsschutz an (vergl. NTi XL2 [2]).

1.2.7 Windschutz

Der Windschutz, die aufgesteckte schwarze Kugel, besteht aus offenporigem Schaum und schützt die Mikrofon-Kapsel vor störenden Windgeräuschen. Diese Geräusche sind tieffrequent und würden eine Messung verunmöglichen. Bei Aussenmessungen ist der Einsatz eines Windschutzes darum Pflicht. Es empfiehlt sich allerdings, den Windschutz generell aufgesteckt zu lassen, bietet dieser doch auch einen gewissen Schutz vor Beschädigungen des Mikrofons, beispielsweise durch unbeabsichtigtes Anstossen oder Herunterfallen.



Abbildung 1.6: Nor140 Handschallpegelmesser mit aufgestecktem 60 mm Windschutz [19]

Der Windschutz hat einen geringen, aber einen zu berücksichtigenden Einfluss auf die Empfindlichkeit des Mikrofons. Der Einfluss ist mit einer entsprechenden, spektralen Korrektur zu kompensieren. In den Einstellungen des Messgerätes kann dies angepasst auf den verwendeten Windschutz vorgenommen werden.

1.2.8 Aussenmikrofone

Die bisher betrachteten Mikrofone sind für den Innenbereich oder kontrolliertem, bzw. begleitetem Aussenereinsatz vorgesehen. Für unbegleitete Langzeitmessungen werden Messstationen im

Aussenbereich fest installiert, beispielsweise zur Erfassung von Bahn- oder Fluglärm. Dazu muss das Mikrofon vor Witterungseinflüssen wie Wind, Regen, Schnee, Hagel, Kälte aber auch vor Staub und Vögel geschützt werden. Die Mikrofone werden in eine spezielle Hülle verpackt, die den notwendigen Schutz bei gleichzeitigem Schalldurchlass bietet. Folgende Eigenschaften und Funktionen sind oft vorhanden:

- Kontrollierte vertikale und horizontale Richtcharakteristik
- Klasse 1 nach IEC 61672
- Stabiler Windschutz
- Regen- und Staubschutz der Kapsel durch eine Membran, siehe Abbildung 1.7
- Vogelschutz durch Dorn oder Spikes an der Oberseite (Vögel können nicht auf dem Mikrofon landen)
- Heizung zur Vermeidung von Kondenswasser
- System-Tests zur elektrischen Verifizierung für einen zuverlässigen Dauerbetrieb

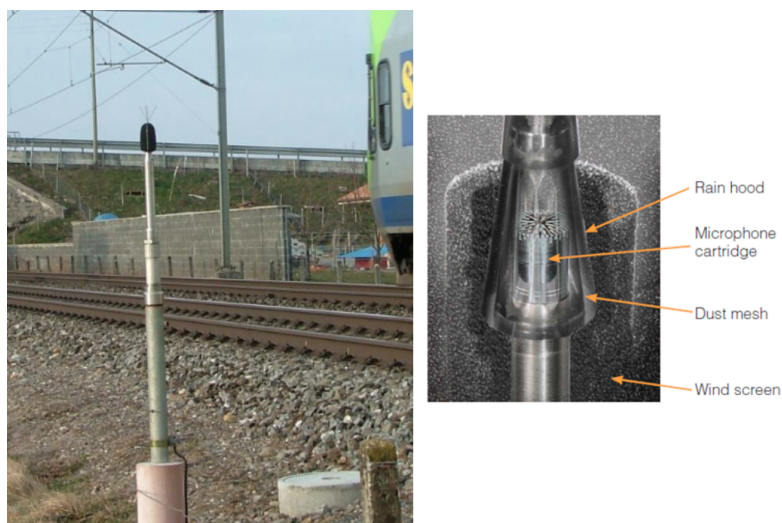


Abbildung 1.7: Messtation für Bahnlärm (Quelle [27]), Aufbau Aussenmikrofon Norsonic [19]

1.2.9 Mikrofon Speisung und Steckverbindungen

Der Vorverstärker benötigt für den Betrieb eine elektrische Speisung (siehe Kapitel 1.2.1), die vom angeschlossenen Messgerät zur Verfügung gestellt werden muss. Zur Verbindung der Mikrofone an die Messgeräte sind je nach Anwendungszweck folgende Typen zum Standard geworden:

- XLR: Dies ist die Standard-Verbindung in der Audiotechnik. Die Speisung der Mikrofone erfolgt über die so genannte Phantomspeisung von 48 V. Die Signalübertragung erfolgt symmetrisch, was die Verbindung bezüglich Störeinspeisungen unanfällig macht. Diese Verbindung wird beispielsweise von den Geräten von NTi Audio verwendet.

- Lemo: Diese Verbindung ist die gebräuchlichste Verbindung in der akustischen Messtechnik. Der Stecker ist etwas kleiner als der XLR-Stecker. Mit Lemo-Verbindungen kann eine Speisespannung der Kapsel von 200 V übertragen werden, womit auch extern polarisierte Mikrofone verwendet werden können. Dieser Stecker ist auch mit einem Gewinde erhältlich, wodurch die Messmikrofone direkt auf die Handschallpegelmesser geschraubt werden können. Diese Verbindung wird beispielsweise von Norsonic oder B&K verwendet.
- BNC: Dies ist ein koaxialer Stecker, der in den Laboren oder bei speziellen Sensoren verwendet wird. Die Speisung der Mikrofone, in diesem Fall eine Konstantstromquelle, wird über die zweipolige Verbindung übertragen, wobei das Mikrofonsignal aufmoduliert wird. Es können nur vorpolarisierte Mikrofone damit betrieben werden. Bei Messungen im Feld kommt diese Verbindung weniger zum Einsatz, da weniger robust als die ersten zwei Verbindungen. Die Bezeichnung für diese Mikrofone lautet CIC (Constant Current Power) oder IPC (Integrated Circuit Piezoelectric).

Daneben gibt es noch eine Vielzahl von spezifischen Verbindungen und Spezialsteckern.



Abbildung 1.8: Gebräuchliche Stecker: XLR, Lemo, BNC

1.2.10 Weiterführende Informationen zur Mikrofon-Technik

Zum weiterführendem Studium der Mikrofon-Technik sei auf die Publikation *Microphone Handbook* von B&K [13], das Online-Training von GRAS [11], NTi Audio [2] sowie Dr Jordan Design [5] verwiesen.

1.3 Signalverarbeitung in der akustischen Messtechnik

1.3.1 Prinzipieller Signalpfad

Die elektrischen Signale des Mikrofon-Vorverstärkers werden an das Messgerät weitergegeben. In heutigen Messgeräten werden diese Signale in der Eingangsstufe analog-digital gewandelt. Auf die digitalen Zahlenwerte wird in einem ersten Schritt eine Filterung angewandt, um Einzahlwerte zu erhalten (Frequenzbewertung wie A- oder C-Filter) oder die Filterung in Terzband- oder Oktavbandwerte. Im zweiten Schritt wird eine Zeitbewertung (fast / slow / Integralbildung) durchgeführt, bevor die Messwerte schlussendlich angezeigt werden. Dies ist die Standard-Signalverarbeitung in einem Handschallpegelmesser, welche oft zu den benötigten Messwerten führt.

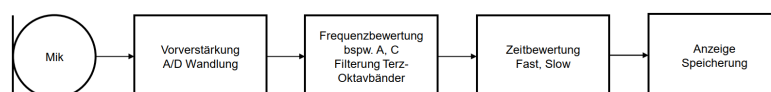


Abbildung 1.9: Typischer Signalpfad in einem Handschallpegelmesser

Die Eingangsstufe der heutigen Messgeräte erlauben eine Abtastung in hoher Qualität (bspw. 16 bit Auflösung / 48 kHz Samplingfrequenz oder höher). Damit kann aus dem Signal des Mikrofons eine Audio-Aufnahme erstellt werden, welche zum nachträglichen Abhören der Messung verwendet werden kann. Mit diesen Daten sind darüber hinaus weitergehenden Möglichkeiten zur Auswertung mit Hilfe der digitalen Signalverarbeitung vorhanden. Sei dies eine feinere zeitliche oder spektrale Auflösung (Stichwort FFT-Analysen) oder die Speicherung von Impulsantworten zur Weiterverarbeitung der Messdaten.

Früher war der gesamte Signalpfad in analoger Elektronik mit den entsprechenden Limitierungen ausgebildet. Aus Nostalgiegründen, aber auch zum Verständnis der prinzipiellen Signalverarbeitung, lohnt sich ein Blick in die Archive der Hersteller [12].

1.3.2 Frequenzbewertung

Bildung von Einzahlwerten

Die gemessenen Signale werden nach der Analog-Digital-Wandlung zur Bildung eines Einzahlwertes gefiltert. Die spektralen Filterkurven orientieren sich dabei an den Kurven gleicher Lautheit nach ISO 226. Die Kurven zeigen das Lautheitsempfinden des menschlichen Gehörs bei unterschiedlichen Frequenzen. Sinustöne, die auf diesen Kurven liegen, werden als gleich laut empfunden.

Zur Anwendung kommt meist das A-Filter, mit der Pegelangabe dB(A). Das A-Filter bezieht sich auf die Kurve bei etwa 40 Phon. Das C-Filter wird beispielsweise zur Angabe der Basshaltigkeit gebraucht (dB(C) - dB(A)). Ohne Filterung wird der Wert mit dB(Z) bezeichnet, weitere Filter der Frequenzbewertung sind nicht gebräuchlich. Die Frequenzbewertung ist in der IEC 61672-1 genormt.

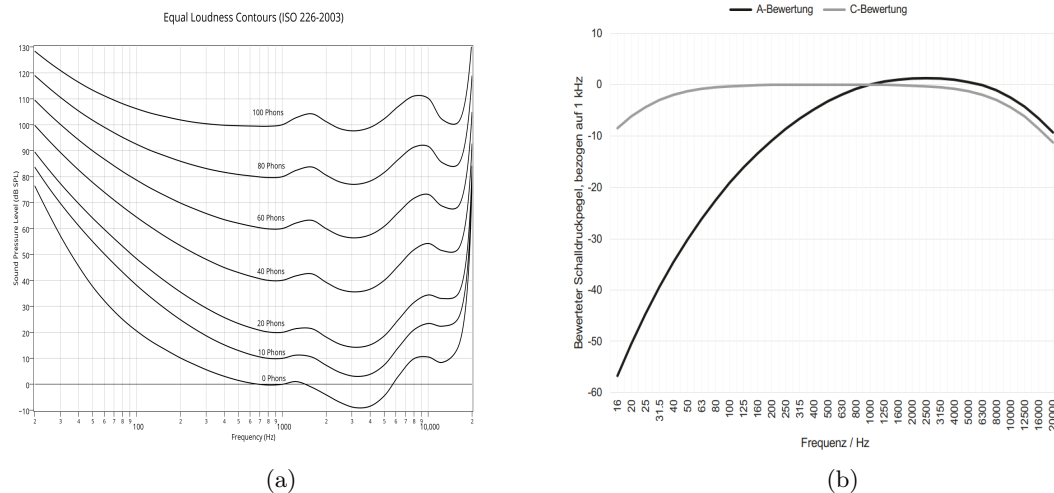


Abbildung 1.10: Kurven gleicher Lautheit nach ISO 226 (a), A- und C-Bewertungskurven nach IEC 61672-1, Bildquelle: [14] (b)

Filterung in Oktav- und Terzbänder

Neben den Einzahlwerten werden je nach Bedarf zusätzlich die spektralen Daten aufgenommen. Bei bau- und raumakustischen Messaufgaben ist dies für eine normgerechte Auswertung zwingend notwendig. Die spektralen Daten werden in Oktav- oder in Terzbänder gefiltert. Diese Filter sind im Frequenzbereich logarithmisch aufgeteilt und weisen eine konstante relative Bandbreite aus. Selten ist eine lineare Aufteilung gefordert. Die Anforderungen an das Filterdesign ist in der DIN EN 61260-1 festgehalten. Der Schnittpunkt der Bandpassfilter liegen normalerweise bei -3 dB (energetische Addition, für Lärm, Bauakustik).

125	250	500	1000	2000	4000
100 125 160	200 250 315	400 500 630	800 1000 1250	1600 2000 2500	3150 4000 5000

Tabelle 1.2: Die gebräuchliche Aufteilung der Filtermittenfrequenzen [Hz], Oktavbänder (oben), Terzbänder (unten), bspw. nach SN EN ISO 16283-1

Hinweis: Diese Filterung mit Hilfe der digitalen Signalverarbeitung hat prinzipiell ein Filter-Abklingen zur Folge. Die Abklingzeit ist bei tieferen Frequenzen höher als bei hohen Frequenzen und kann bspw. 0.15 s bei 100 Hz und 0.05 s bei 1 kHz betragen (FIR Filterbank vom Autor). Diese Abklingzeiten spielen normalerweise keine relevante Rolle, müssen aber bei Messungen von kurzen Nachhallzeiten bedacht werden, beispielsweise in Abhörstudios.

Schmalbandspektren

Die Analyse in Oktav- oder Terzbändern wird als Breitbandanalyse bezeichnet. Eine spektral feinere Auflösung ist in den so genannten Schmalbandspektren möglich. Diese können mit steilflankigen Filtern erzeugt werden, oder über eine FFT-Analyse, siehe folgendes Kapitel.

Darstellung der FFT

Die FFT (Fast Fourier Transformation) ist eine Berechnung der DFT (diskrete Fourier Transformation), d.h. eine mathematische Operation, durch welche die Daten des Zeitbereiches im Frequenzbereich dargestellt werden. Je nach Fachgebiet sind unterschiedliche Darstellungen Frequenzbereich geläufig. In der (Elektro-) Akustik ist der Amplituden- und Phasengang, sowie die Gruppenlaufzeit vertraut. Weitere Grundlagen und Informationen zu den FFT-Analysen sind in der einschlägigen Literatur zu finden, bspw. [2].

Aus messtechnischer Sicht ist wichtig zu wissen, dass die spektrale Auflösung der Daten abhängig von der Blockgrösse im Zeitbereich ist (grössere Blockgrösse im Zeitbereich heisst höhere Auflösung im Frequenzbereich) und dass die Frequenzpunkte linear verteilt sind. Wenn nun für tiefe Frequenzen eine hohe spektrale Auflösung gewünscht ist, muss die Blocklänge im Zeitbereich genügend lang sein.

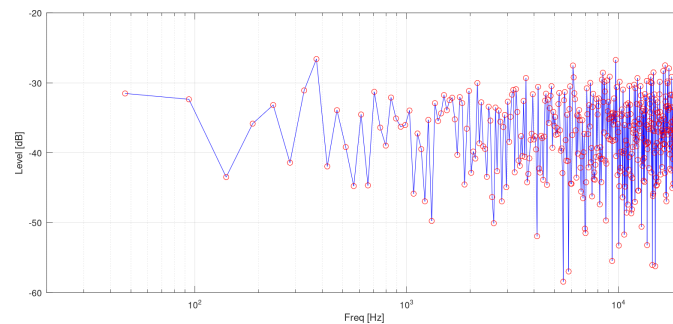


Abbildung 1.11: Exemplarische Darstellung der linear verteilten Frequenzpunkte (rot) nach einer FFT mit einer Blocklänge von 1024 Samples

In den Handschallpegelmessern sind diese sog. FFT-Analysen oft eingebaut und erlauben direkt vor Ort eine genauere spektrale Betrachtung der Messergebnisse. Dies kann beispielsweise bei Quellenidentifikation besonders hilfreich sein. Für weitergehende Analysen empfiehlt sich die Verwendung eines Messsystems auf einem Computer, bspw. REW [20].

Weitere Informationen zur FFT-Analyse gibt es in einem guten Grundlagen-Artikel bei NTi Audio [2] oder im Kurs *Communication Acoustics* (MOOC) der RTW Aachen, TU München, TU Berlin [21].

1.3.3 Signalverarbeitung im Zeitbereich

Quadrierter Schalldruck

Das digitalisierte Mikrofonsignal $p(t)$ einer kurzen Messung ist als Zeitschrieb in Abbildung 1.12 oben dargestellt. Die Amplitude des Schalldruckes schwingt um die 0-Linie. Diese Linie entspricht dem atmosphärischen Luftdruck. Der Schalldruck ist überlagert und -in elektrotechnischer Sprache ausgedrückt - DC-frei.

Die digitalen Zahlenwerte vom Mikrophon-Signal können durch die Kalibration (siehe Kapitel 1.9.2) einem Schalldruck in Pa zugewiesen werden. Die Umrechnung ergibt sich aus der Empfindlichkeit der Mikrofone in mV/Pa und der Verstärkung der Eingangsstufe.

In der Akustik werden meist Pegel-Mittelwerte eines Mess- Zeitabschnittes als Resultate benötigt. Mathematisch ausgedrückt sind das Integrale über die Zeit. Das Integral des Mikrophon-Signals $p(t)$ über eine Messdauer ist jedoch 0 und somit für eine Aussage zum Schalldruck nicht geeignet. In Analogie zur Elektrotechnik bedient man sich der Leistungsbetrachtung des Signals und bildet das quadratische Mittel (englisch *RMS*, Root Mean Square). Dazu wird in einem ersten Schritt jeder Zahlenwert quadriert. Das Ergebnis wird den quadrierten Schalldruck $p^2(t)$ genannt und weist nur positive Zahlenwerte oder 0 vor (mittlerer Plot).

Diese Zahlenwerte könnten mit der Definition der Bezugsgrösse, dem Referenzschalldruck von 20 μPa in die logarithmische Darstellung überführt werden (unterer Plot), jedoch erlaubt dies ohne Bildung eines Mittelwertes nur eine beschränkte Aussage. Es sind beispielsweise die Peak-Werte auswertbar.

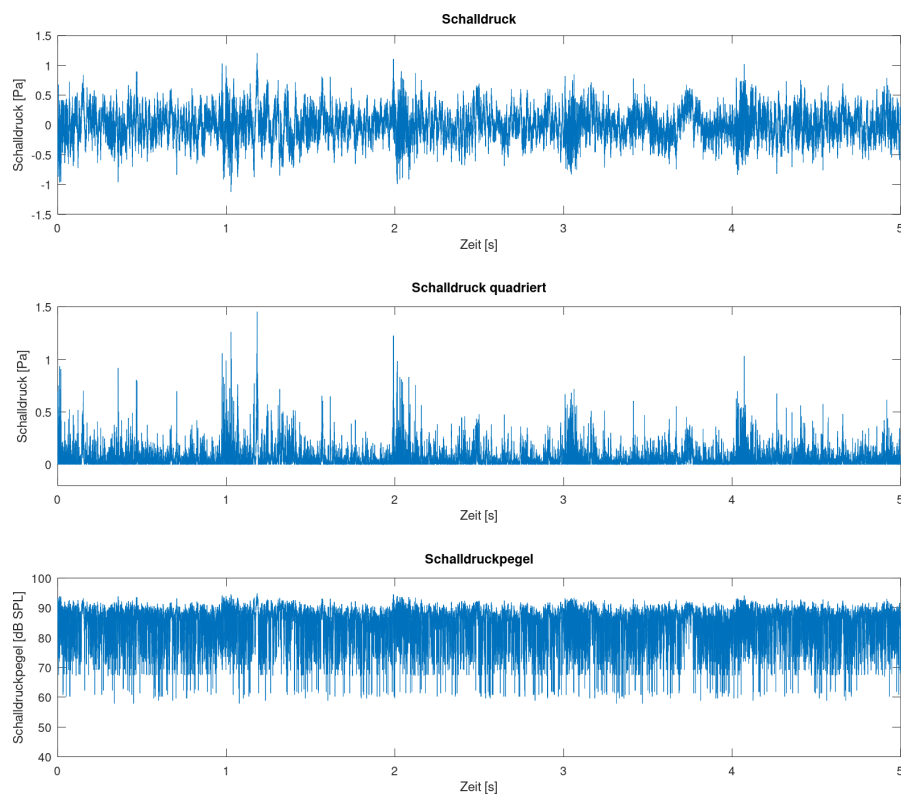


Abbildung 1.12: Schalldruck, quadrierter Schalldruck und Schalldruckpegel der Zahlenwerte als Zeitschrieb einer kurzen Messung

Gleitender Mittelwert

Der gleitende Mittelwert vom quadrierten Schalldruck wird während der Messung gebildet und direkt auf dem Messgerät angezeigt. Es haben sich die Zeitkonstanten *fast* (RC = 125 ms) und *slow* (RC = 1 s) etabliert, welche in der Norm IEC 61672 aufgenommen wurden. Heutzutage werden die Mittelwerte meist digital erzeugt, es sind jedoch auch analoge Schaltungen möglich.

$$L(t) = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{RC} \int_{-\infty}^t \frac{p^2(\tau)}{p_0^2} e^{\frac{\tau-t}{RC}} d\tau \right) \quad [\text{dB}] \quad (1.4)$$

mit:

RC : Zeitkonstante (*fast* (RC = 125 ms) und *slow* (RC = 1 s))

$p(\tau)$: Schalldruck

P_0 : Referenzschalldruck 20 μPa

Der gleitende Mittelwert existiert zu jedem Messpunkt und folgt dem Messsignal mit geringerer oder grösserer Trägheit, je nach gewählter Zeitkonstante. Die Abbildung 1.13 zeigt das zeitliche Verhalten der unterschiedlichen Trägheit bei einem sprunghaften Ein- und Ausschalten einer Rauschquelle. Die gelbe Kurve mit der Zeitkonstante *fast* folgt dem quadrierten Schalldruckpegel in hoher zeitlicher Auflösung, entsprechend schnell ändert sich die Anzeige auf dem Messgerät. Wird auf die Zeitkonstante *slow* umgeschaltet, ändert sich die Anzeige weniger stark, sprunghafte Pegeländerungen werden aber zeitlich verschmiert dargestellt. Beim Ausschalten der Rauschquelle zeigen sich die Unterschiede in der Trägheit weiter. Mit *slow* nimmt der Pegel weniger schnell ab.

Mittelwertbildung über feste Zeitfenster, L_{eq}

Wird der Mittelwert nicht gleitend, sondern über ein festes Zeitfenster gebildet, spricht man vom äquivalenten Schalldruckpegel, dem L_{eq} . Diese Integralbildung über die betrachtete Zeit liefert den Effektivwert als einen Einzahlwert und beschreibt deren Energiegehalt. Der L_{eq} wird folgendermassen gebildet:

$$L_{eq} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(\tau)}{p_0^2} d\tau \right) \quad [\text{dB}] \quad (1.5)$$

mit:

T : Zeitfenster

$p(\tau)$: Schalldruck

P_0 : Referenzschalldruck 20 μPa

In der Praxis ist das Zeitfenster meist die Messzeit zwischen Start und Ende der Messung. Bei Messungen vom Umweltlärm wird das Zeitfenster oft auch in der Nachbearbeitung gewählt, um etwaige Störungen für die Messungen nicht zu berücksichtigen.

In der Abbildung 1.13 sind die folgenden 3 Zeitfenster dargestellt:

- Leq über die ganze Zeit: Hier wurde das Zeitfenster von 0 bis 5 s gewählt, also auch die Bereiche ohne Rauschen zu Beginn und am Ende der Messung. Der Pegel ist als schwarze, ausgezogene Linie dargestellt und beträgt 89.8 dB.
- Leq über Rauschen: Gemessen wurde nur bei eingeschaltetem Rauschen. Ohne die Bereiche zu Beginn und Ende, es liegt somit ein höherer Pegel vor. Gemessen wurde 90.9 dB.
- Kurzzeit Leq: Die roten Markierungen zeigen die Werte einer Leq Bildung mit einem kurzen Zeitfenster von einigen ms.

Für Messungen von Umweltlärm hat sich ein sehr kurzes Zeitfenster von 25 ms bewährt. Bei der Auswertung vom Messungen erlaubt dies eine genaue Markierung von Schallereignissen.

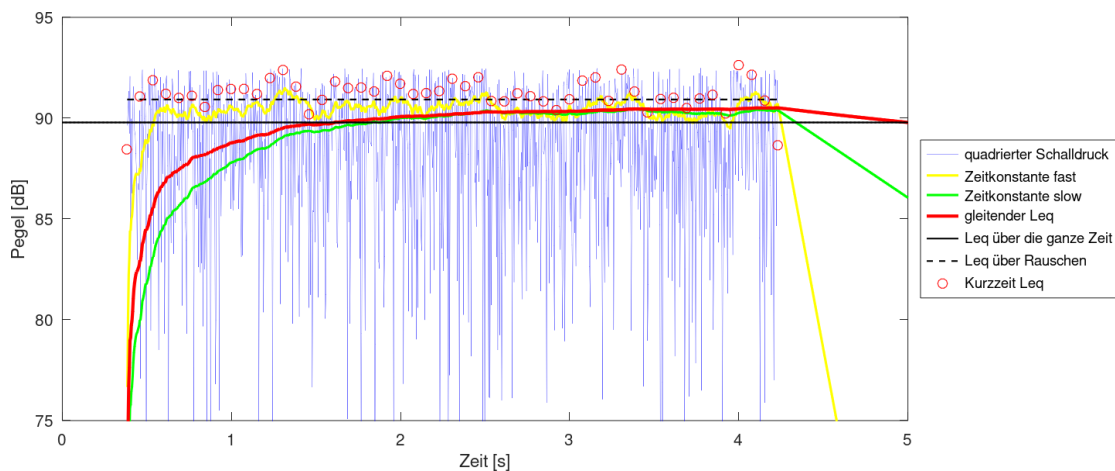


Abbildung 1.13: Verhalten der verschiedenen Mittelwert-Pegel im Zeitbereich mit sprunghaftem Ein- und Ausschalten einer Rauschquelle (exemplarische Darstellung)

Gleitende Mittelwertbildung vom L_{eq}

Für eine längere Pegelmessung kann auch während der laufenden Messung ein L_{eq} gebildet werden, dies wird als gleitende Mittelwertbildung bezeichnet. In der obigen Abbildung ist dies die rote Linie. Sie startet wie die beiden Kurven der gleitenden Mittelwerte und steigt mit einer von der Integrationszeit abhängigen Trägheit an. Beachtenswert ist, dass nach dem Abstellen des Rauschens der L_{eq} mit der Zeit nur langsam wieder sinkt. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass es sich dabei um eine energetische Addition im logarithmischen Massstab handelt. Der L_{eq} -Pegelschrieb reagiert schneller auf Pegelerhöhungen und träger bei Pegelreduktionen.

Eine Anwendung von diesem gleitenden Mittelwert mit einem fixen Zeitfenster ist die Messung vom $L_{Aeq5min}$ bei Veranstaltungen: Angabe in der V-NISSG: «Der über fünf Minuten gemittelte äquivalente Dauerschallpegel $L_{Aeq5min}$ muss während der Veranstaltung mindestens alle fünf Minuten aufgezeichnet werden.»

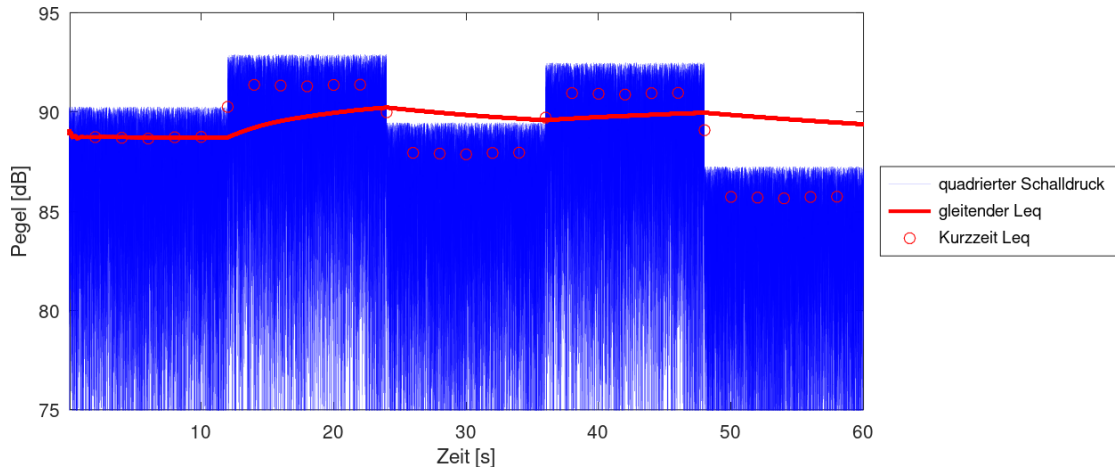


Abbildung 1.14: Gleitende Mittelwertbildung vom L_{eq} (Exemplarische Darstellung)

Für Pegelarithmetik wird auf das Kapitel 1.4 verwiesen.

Schallexpositionspegel L_{EX} , Schallereignispegel L_E

Für die Bildung des Schallexpositionspegel oder des Schallereignispegels wird über das Zeitfenster der Messung, der Messperiode, in einem ersten Schritt der L_{eq} berechnet. Im zweiten Schritt wird die Messdauer mit einer Bezugszeit normiert. Die gesamte Energie der Messung wird auf die feste Bezugszeit konzentriert. Auf diese Weise lassen sich unterschiedlich lange Schallereignisse miteinander vergleichen. Im arbeitsrechtlichen Kontext wird der L_{EX} für die kumulierte Schalldosis angewandt.

$$L_{EX} = L_{eq, T_e} + 10 \cdot \lg \left(\frac{T_e}{T_0} \right) \quad [\text{dB}] \quad (1.6)$$

mit:

T_e : Messperiode

T_0 : Bezugszeit

Für den Schallereignispegel L_E ist $T_0 = 1$ s.

Mit den heutigen Schallpegelmessern ist diese Mess-Funktion standardmässig mit dabei.

1.3.4 Pegelgrößen

Mit den oben genannten Verfahren werden nun aus dem Schalldruck $p(t)$ die für die Messaufgabe benötigten Pegel gebildet. Dies kann direkt nach der Messung erfolgen oder bei einer späteren Auswertung mit den dazugehörigen Auswerteprogrammen.

Größe	Definition	Verwendung
Schalldruckpegel L_p	siehe Kapitel 1.1.1	Allgemeine Definition vom Schalldruckpegel, wird in dieser Form eher weniger verwendet
Mittelungspegel L_{eq}	siehe Kapitel 1.3.3	Pegelangabe als energetisches Mittel über die Messdauer
Mittelungspegel L_{Aeq}	L_{eq} mit Kennzeichnung der A-Bewertung	Lärmmessungen mit der Angabe eines Einzahlwertes
Mittlerer Schalldruckpegel L	Räumlicher Mittelwert nach SIA 181	Pegelmessungen in der Bauakustik mit spektraler Auswertung (Okta-ven, Terzen), bildet sich wie der L_{eq}
Maximalpegel $L_{A,F,max}$	Maximalpegel ermittelt mit der Zeitbewertung Fast und mit A-Bewertung, nach SIA 181	Maximalpegel für Fahrzeug-Vorbeifahrten, Maximalpegel bei haustechnischen Einrichtungen
Minimalpegel $L_{A,F,min}$	Minimalpegel ermittelt mit der Zeitbewertung Fast und mit A-Bewertung	Abschätzung Grundgeräusch mit Störungen
Spitzenwert L_{Peak}	Spitzenwert ohne Zeitbewertung	Prüfen von Messbereich von impulsiven Anregungen
Ereignispegel L_{AE}	siehe Kapitel	Messung von Einzelereignissen
Statistischer Pegel L_1	Pegel, der während 1 % der Messzeit überschritten wird, häufige Maxima	Früher häufig, heute eher seltene Verwendung
Statistischer Pegel L_{95}	Pegel, der während 95 % der Messzeit überschritten wird, Grundgeräusch	Früher häufig, heute eher seltene Verwendung

Tabelle 1.3: Gebäuchliche Pegelangaben in der Akustik

Eine weitere häufige Pegelangabe ist der Schalleistungspegel L_W . Dieser Pegel kann nicht direkt gemessen werden. Es wird der Schalldruck oder die Schallintensität über eine Hüllfläche gemessen, wodurch eine Angabe des Schalleistungspegels möglich ist.

1.4 Pegelarithmetik

1.4.1 Pegeladdition

Zwei oder mehrere Pegelwerte werden addiert, indem die Werte in den linearen Massstab zurückgewandelt, arithmetisch addiert werden und das Resultat wieder in den logarithmischen Massstab überführt wird.

Das Resultat wird eine energetische Addition genannt, da von inkohärenten Signalen ausgegangen wird und der Effektivwert (RMS) für die Summenbildung verwendet wird. Diese Betrachtung gelangt bei den üblichen Pegelrechnungen in der Akustik zur Anwendung (Lärmmessungen, bauakustische Messungen). In der Praxis weniger häufig treten kohärente Signale auf (bspw. tief-frequente Abstrahlung von Maschinen oder bei Lautsprecheranordnungen). Bei einer Addition ist die Phasenbeziehung der Signale zu berücksichtigen. Es kann zu einer Verdoppelung des Schalldruckes (+6 dB) bis hin zu einer Auslöschung kommen.

$$L_{ges} = L_{1+2} = 10 \cdot \lg \left(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} \right) \quad [\text{dB}] \quad (1.7)$$

mit:

L_{ges} : Pegeladdition P1 + P2 in dB

L_1 : Pegel 1 in dB

L_2 : Pegel 2 in dB

1.4.2 Pegelsubtraktion

Für die Pegelsubtraktion gelten die gleichen Voraussetzungen wie für die Pegeladdition.

$$L_{ges} = L_{1-2} = 10 \cdot \lg \left(10^{L_1/10} - 10^{L_2/10} \right) \quad [\text{dB}] \quad (1.8)$$

Bedingung: $L_1 \geq L_2$, die Logarithmusfunktion für negative Zahlen ergeben keine reellen Zahlen.

1.4.3 Mittelwertbildung von Pegeln

Häufig ist in der Messpraxis der Mittelwert von zwei oder mehreren Messungen zu bilden. Wie bei der Pegeladdition erläutert, wird hier ein energetischer Mittelwert gebildet.

$$L_m = L_{\overline{L_1, L_2}} = 10 \cdot \lg \left(\frac{10^{L_1/10} + 10^{L_2/10}}{2} \right) \quad [\text{dB}] \quad (1.9)$$

mit:

L_m : Energetischer Mittelwert von P1 und P2 in dB

L_1 : Pegel 1 in dB

L_2 : Pegel 2 in dB

Der energetische Mittelwert entspricht nicht dem arithmetischen Mittelwert, er ist etwas höher.

Sind Messungen von unterschiedlicher Länge vorhanden und soll der resultierende L_{eq} berechnet werden, kann dies mit der Gewichtung der Zeiten t_1 und t_2 erfolgen:

$$L_{eq} = 10 \cdot \lg \left(\frac{t_1 \cdot 10^{L_1/10} + t_2 \cdot 10^{L_2/10}}{t_1 + t_2} \right) \quad [\text{dB}] \quad (1.10)$$

mit:

L_m : Energetischer Mittelwert von P1 und P2 unter Berücksichtigung der Zeiten, in dB

L_1 : Pegel 1 in dB

t_1 : Zeitdauer 1 in s

L_2 : Pegel 2 in dB

t_2 : Zeitdauer 2 in s

1.5 Diffuses Schallfeld

Das Konzept des diffusen Schallfeldes wird den bauakustischen und teilweise den raumakustischen Messungen zugrunde gelegt. Es sieht vor, dass in einem Raum eine gleichmässige Verteilung der Schallenergie im relevanten Frequenzbereich vorkommt. Dies kann in akustischen Messlaboren ziemlich gut erreicht werden, beispielsweise in den Bauakustik-Prüfständen oder in den Hallräumen. In gewöhnlichen Wohn- oder Arbeitsräumen kann dies nicht vorausgesetzt werden. Es können diskrete Schallreflexionen und / oder Raummoden vorkommen, wodurch die Schallenergie nicht mehr gleichmässig im Raum verteilt ist. Die Art und die Platzierung der Schallquelle im Raum spielt eine grosse Rolle, weshalb omnidirektionale Schallquellen (Siehe Kapitel 1.13.1) und mehrere verteilte Lautsprecher-Positionen (siehe Kapitel 2.4) verwendet werden.

Die Eigenschaften und Kriterien eines diffusen Schallfeldes sind in der Literatur ausführlich beschrieben (bspw. [14] oder [9]).

1.5.1 Hallradius

Eine Schallquelle in einem Raum erzeugt einen Direktschall und einen Diffusschall. Als Direktschall wird der Anteil bezeichnet, der bei einer Ausbreitung im freien Feld vorkommen würde. Der Diffusschall ist der im Raum verteilte Schall der Quelle. Betrachtet man den Pegel in der Ausbreitungsrichtung von der Quelle in den Raum, ist im Nahbereich der Quelle der Direktschall massgebend. Ab einer gewissen Distanz wird der Direktschall vom Diffusschall überlagert. In grossem Abstand ist fast nur noch Diffusschall vorhanden. Da meist im Diffusschall gemessen werden soll, ist somit ein genügend grosser Abstand von der Quelle nötig.

Der Abstand, bei dem der Schalldruckpegel vom Direktschall gleich dem vom Diffusschall ist, wird als der Hallradius r_H bezeichnet:

$$r_H \approx \sqrt{\frac{A}{50}} \cdot Q \approx 0.057 \cdot \sqrt{\frac{V}{T_{60}}} \cdot Q \quad [\text{m}] \quad (1.11)$$

mit:

r_H : Hallradius in m

A : Äquivalente Absorptionsfläche in m^2

V : Raumvolumen in m^3

T_{60} : Nachhallzeit in s

Q : Richtungsfaktor, $Q = 1$ für omnidirektionale Quellen

Diese Formeln mit $Q = 1$ gelten für omnidirektionale Quellen. Wird eine gerichtete Quelle verwendet (direktive Lautsprecher oder Geräte an der Wand / Boden montiert), vergrössert sich der Hallradius. Dies kann durch den Richtungsfaktor Q oder das Bündelungsmass berücksichtigt werden und ist in der Fachliteratur (bspw. [9]) weiter ausgeführt.

Für die messtechnische Praxis ist wichtig, diese Gesetzmässigkeiten zu kennen. Der Umgang damit ist in den entsprechenden Messnormen aufgeführt, siehe beispielsweise in der Norm SN EN ISO 16283-1:

- Mindestabstand von 1.0 m zwischen Mikrofonposition und dem Lautsprecher

1.5.2 Raummoden und Schroeder-Frequenz

In herkömmlichen Räumen kommt es manchmal zu Raummoden, d.h. einer Überlagerung von reflektierten Schallwellen zwischen parallelen Wänden, den so genannten *stehenden Wellen* als Resonanzeffekt. An den reflektierenden Wänden entsteht dabei eine Schalldrucküberhöhung (Wellenbauch) und dazwischen Wellenknoten ohne Schalldruck. Eine Resonanz entsteht bei der Wellenlänge, die dem doppelten Wandabstand entspricht sowie den ganzzahligen Vielfachen davon.

$$f_n = \frac{c}{2} \cdot \frac{n}{d} \quad [\text{Hz}] \quad (1.12)$$

mit:

f : Frequenz in Hz

n : Ordnung der Raummode: 1, 2, 3, ...

c : Schallgeschwindigkeit in m/s, in Luft und bei normalen Verhältnissen kann $c = 343$ m/s eingesetzt werden

d : Wandabstand in m

Bei einem Wandabstand von 10 m liegt die erste Raummode somit bei 17 Hz, die zweite bei 34 Hz, die dritte bei 51 Hz, usw. Die Resonanzen zeigen sich zwischen allen Wänden und zwischen Boden / Decke und ergeben damit eine Modendichte-Verteilung. Voraussetzung ist, dass an den Raumbegrenzungsflächen eine Reflexion und keine Schallabsorption vorkommt. Wird der Schall absorbiert, kann keine Resonanz entstehen.

Die Modendichte nimmt mit der Frequenz zu, bis die Dichte genügend gross zur Annahme von einem diffusen Schallfeld gegeben ist. Diese Grenze hat sich als die Schroeder-Frequenz etabliert:

$$f_g = 2000 \cdot \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \quad [\text{Hz}] \quad (1.13)$$

mit:

f_g : Schroeder-Frequenz in Hz

T_{60} : Nachhallzeit in s

V : Raumvolumen in m^3

Bei der hochwertigen raumakustischen Gestaltung von Räumen wird darauf geachtet, dass möglichst keine störenden Raummoden auftreten. Für das weitere Studium wird auf das Buch *Schall, Raum und auditive Wahrnehmung* [14] verwiesen.

Bei akustischen Messungen können Raummoden einen signifikanten Einfluss, bzw. Fehler verursachen, da die Voraussetzung von einem diffusen Schallfeld nicht gegeben ist. In der Praxis kommen störende Moden in kleinen Räumen mit parallelen, reflektierenden Wänden vor. Dies im Frequenzbereich bis etwa 200 bis 300 Hz. Das Auftreten von Raummoden kann mittels Höreindruck an verteilten Positionen geprüft werden, braucht aber etwas Erfahrung. In den Messdaten ist der Einfluss von Raummoden in grossen Unterschieden in den Teilergebnissen bei tiefen Frequenzen erkennbar.

Aus dem Grund der Raummoden soll nicht zu nah an Wänden (Schalldrucküberhöhung) sowie nicht in der exakten Raummitte gemessen werden (Minima des Schalldruckes).

1.6 Bauakustische Messungen

1.6.1 Messgrößen

In der Bauakustik, dem Schallschutz in Bauten, werden Luft- und Trittschallmessungen, Messungen von Haustechnik- und Grundgeräuschen sowie Fassadenmessungen durchgeführt. Diese basieren auf dem Konzept von diffusen Schallfeldern in den Sende- und Empfangsräumen bei Anregung mit einer simulierten oder der originalen Schallquelle.

Sie werden - mit Ausnahme von Haustechnikgeräuschen - ausschliesslich spektral gemessen, mit einer Aufteilung in Terzen gemäss der Tabelle 1.2.

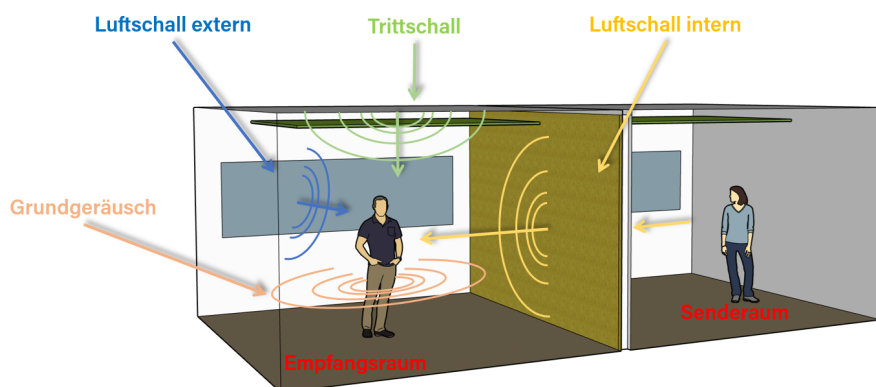


Abbildung 1.15: Bauakustische Messgrößen schematisch dargestellt

Bauakustische Messungen werden im Labor, in Prüfständen oder am Bau gemessen. Die Unterscheidung der Messbedingungen ist ein wichtiges Konzept in der Bauakustik, da in den Prüfständen ohne die am Bau vorhandenen Nebenwege gemessen werden kann. Weitere Informationen sind in der einschlägigen Fachliteratur oder bei den Herstellern (bspw. Knauf oder Glas Trösch) zu finden.

Auf die Ausführung der einzelnen Messungen wird im zweiten Teil dieses Skripts eingegangen.

1.6.2 Luft- und Trittschall

Für die Messung von Luft- und Trittschall wird in den Senderäumen ein Lautsprecher, resp. ein Trittschallhammerwerk platziert. Gemessen wird der räumliche Mittelungspegel in diesen Schallfeldern bei kontinuierlicher oder diskreter Abtastung des Raumes.

Bei kontinuierlicher Abtastung des Raumes:

$$L = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(\tau)}{p_0^2} d\tau \right) \quad [\text{dB}] \quad (1.14)$$

mit:

T : Zeitfenster

$p(\tau)$: Schalldruck

P_0 : Referenzschalldruck 20 μPa

Bei diskreter Abtastung des Raumes:

$$L = 10 \cdot \lg \left(\frac{10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} + \dots + 10^{L_N/10}}{N} \right) \quad [\text{dB}] \quad (1.15)$$

mit:

N : Diskrete Messpunkte

L_n : Schalldruckpegel L_{eq} am Messpunkt n

In den obigen Formeln ist erkennbar, dass für die kontinuierliche Abtastung des Raumes eine Messung des L_{eq} durchgeführt wird, wobei das Zeitfenster T die Messdauer umfasst. Es wird damit eine zeitliche und räumliche Mittelung erreicht. Bei der diskreten Abtastung des Raumes erfolgt eine Messung pro Position, anschliessend werden die Teilpegel energetisch gemittelt.

Die so gemessenen mittleren Schalldruckpegel werden als L_1 für den Senderraum und L_2 für den Empfangsraum bezeichnet.

1.7 Messung der akustischen Impulsantwort

1.7.1 Lineares, zeitinvariantes System in der Akustik

Ein lineares, zeitinvariantes System (LTI-System) ist eine Betrachtungsweise Systemtheorie, die den folgenden Gesetzmässigkeiten folgt:

- Linearität: Ein System ist linear, wenn ein mit a gewichtetes Eingangssignal $u(t) \cdot a$ zu einem entsprechend gewichtetem Ausgang $y(t) \cdot a$ führt
- Zeitinvariant: Wenn sich das System mit der Zeit nicht anders verhält

Nach diesem System lassen sich elektrische, mechanische und akustische Vorgänge verhältnismässig einfach beschreiben. Beispielsweise ist die bekannte Wellengleichung in der einfachsten Form ein LTI-System.

In der Akustik lassen sich die meisten Eigenschaften mit dem LTI-System beschreiben. Einige Vorgänge sind jedoch nicht-linear, diese werden unter dem Begriff der nicht-linearen Akustik behandelt. Beispiele für nichtlineare Effekte sind stark ausgelenkte Lautsprecher oder hohe Amplituden des Schalldruckes.

Weiterführende Angaben sind in der einschlägigen Literatur zu finden [15].

1.7.2 Impulsantwort, Raumimpulsantwort

Die Impulsantwort ist die Beschreibung der Veränderung, die ein Signal am Eingang erfährt und das Ausgangssignal ergibt.

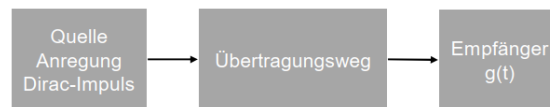


Abbildung 1.16: LTI-System mit der Impulsantwort

Die Impulsantwort wird im Zeitbereich mit dem Eingangssignal gefaltet, das entspricht im Frequenzbereich einer Multiplikation. Eine Impulsantwort kann eine Beschreibung von einem Filter, die Übertragungsfunktion eines Lautsprechers oder auch der Raumeinfluss auf ein im Raum abgespieltes Audiosignal sein.

Im letzten Fall spricht man von einer Raumimpulsantwort (RIR). Mit der Raumimpulsantwort ist der Einfluss des Raumes bei der gewählten Sender- und Empfängerposition angegeben. Aus der RIR lassen sich alle relevanten raumakustischen Parameter wie die Nachhallzeit oder die Sprachverständlichkeit berechnen. Weitere Auswertemöglichkeiten sind der Amplituden- und Phasengang, die Gruppenlaufzeit oder Wasserfalldiagramme.

Mit der Raumimpulsantwort kann eine trockene Audio-Aufnahme (d.h. eine Aufnahme ohne Hallanteil) gefaltet werden (ein sogenannter Faltungshall).

Die Raumimpulsantwort wird hauptsächlich mit computerbasierten Mess-Systemen wie REW [20] gemessen. Bei den Handschallpegelmessern ist diese Funktion nach aktuellem Kenntnisstand des Autors noch nicht möglich.

Für das weitere Studium wird der folgende Online-Kurs empfohlen: *Communication Acoustics* (MOOC) der RTW Aachen, TU München, TU Berlin [21].

1.7.3 Nachhallzeit

Die Nachhallzeit als wichtigster Parameter zum Beschreiben der raumakustischen Eigenschaften beschreibt das Abklingverhalten des gemessenen Raumes. In die Abklingkurve wird eine Gerade gelegt und die Zeit bis zur Pegelabnahme um 60 dB ausgelesen. Für die direkte Messung, ohne über die Raumimpulsantwort, muss dazu ein Geräusch oder ein Impuls im Raum abgestrahlt werden, wovon das Abklingen gemessen wird. Als Quelle eignen sich Dodekaeder (siehe Kapitel 1.13.1) die ein rosa Rauschen mit genügend hohem Pegel abstrahlen oder Impulsquellen wie Schreckschusspistolen, Klappen oder ähnliche Einrichtungen, siehe Kapitel 1.13.3.

Das prinzipielle Vorgehen zur Auswertung ist wie folgt:

1. Bildung des Schalldruckpegels (quadrierter Schalldruck)
2. Berechnung der Schroeder-Rückwärtsintegration
3. Bestimmen des Punktes bei -5 dB und -65 dB auf der Kurve der Schroeder-Rückwärtsintegration
4. Zeichnen einer Geraden durch diese zwei Punkte
5. Herauslesen des Zeitabstandes vom Nullpunkt bei -5 dB bis zum Punkt -65 dB, diese Zeit ist die Nachhallzeit

Ein Pegelbereich von 60 dB, wie dies für das prinzipielle Vorgehen vorgesehen wäre, ist in der Praxis jedoch selten messtechnisch erreichbar. Aus diesem Grund wird ein reduzierter Pegelbereich berücksichtigt, für T_{20} 20 dB, resp. für T_{30} 30 dB. Die Gerade wird in diesem reduzierten Pegelbereich bestimmt und auf einen Pegelabfall von 60 dB extrapoliert. Die Bestimmung der Nachhallzeit erfolgt wiederum auf dieser Gerade für einen Pegelabfall von 60 dB, womit die Angabe der Nachhallzeit für Messungen in allen Pegelbereichen prinzipiell vergleichbar ist. Die folgende Abbildung zeigt dies nach einer Messung der Raumimpulsantwort.

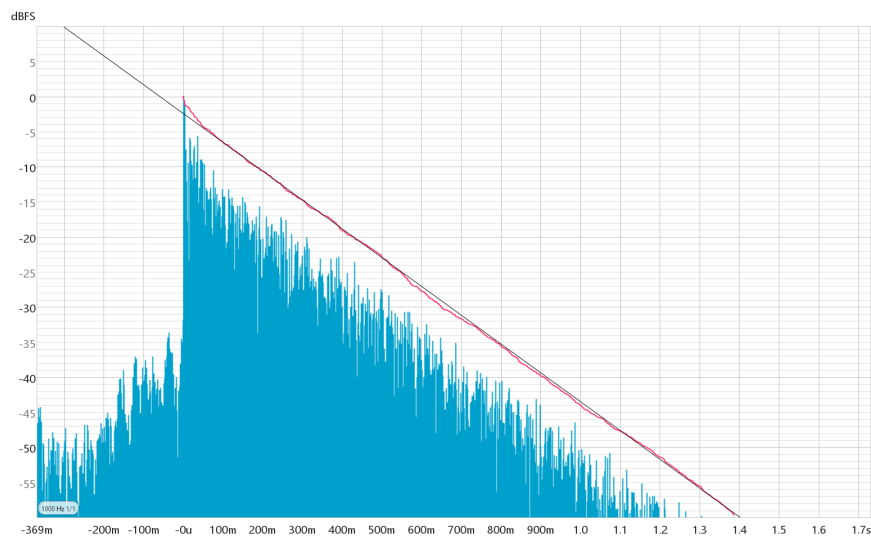


Abbildung 1.17: Darstellung der Impulsantwort, mit der Kurve der Schroeder-Rückwärtsintegration (rot), der Geraden zur Bestimmung der Nachhallzeit (schwarz)

Die Messung der Nachhallzeit ist an und für sich eine einfache Aufgabe, einwandfreies Equipment und korrekte Einstellungen vorausgesetzt. Bei den modernen Handschallpegelmessern ist die Messung der Nachhallzeit direkt implementiert und es sind keine detaillierten Einstellungen zu machen. Gemessen wird typischerweise T_{20} und T_{30} gleichzeitig.

Bei Programmen, die über die Auswertung der Raumimpulsantwort funktionieren, können allenfalls detaillierte Einstellungen vorgenommen werden. Beispielsweise die Filterung der Terzbänder oder die Auswertung nach unterschiedlichen Pegel- und Zeitbereichen wie die Early Decay Time (EDT).

Weitere Informationen und eine Einführung in die Raumakustik ist im Buch *Schall, Raum und auditive Wahrnehmung* [14] zu finden.

1.8 Audioaufnahmen und Sonogramme

Neben den bisher behandelten Messungen von technisch definierten Parametern wie Pegel, Frequenz und Nachhallzeit werden häufig (zusätzliche) Audioaufnahmen erstellt. Diese dienen dem nachträglichen Abhören von Umwelt- oder Grundgeräuschmessungen, da diese häufig auch unbegleitet durchgeführt werden.

Die Aufnahmen können auch für Hörversuche oder Hörvergleiche im Labor eingesetzt werden. Es sind psychoakustische Analysen sowie subjektive Eindrücke einer akustischen Situation möglich. Die Aufnahmen sind je nach weiterem Verwendungszweck mehr oder weniger sorgfältig zu erstellen. Für ein Abhören von Messungen genügen qualitativ mittelwertige Messungen. Bei weiterführenden Analysen ist auf eine gute Aufnahmequalität wie Wahl der Mikrofone, Grund- und Störgeräusche, Pegel- und Frequenzbereiche sowie A/D Wandlung zu achten.

Weiter werden Audioaufnahmen für detaillierte Analysen in Form von Sonogrammen verwendet. Ein Sonogram ist eine Darstellung der Aufnahme im Frequenz- und Zeitbereich, wobei farblich codiert der Pegel aufgetragen wird. In Sonogrammen sind spektrale und zeitliche Abhängigkeiten besonders gut zu analysieren.

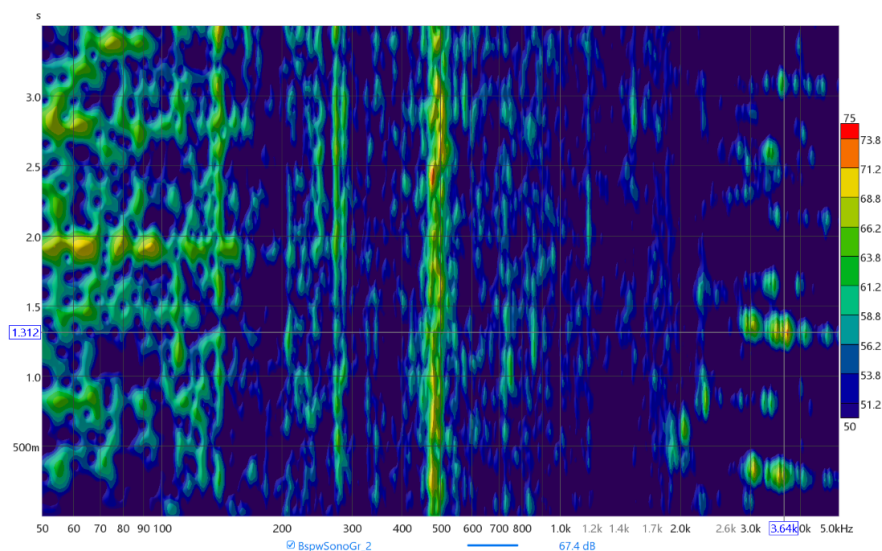


Abbildung 1.18: Sonogram einer Aussenmessung, Frequenz (x-Achse), Zeit (y-Achse), Pegel in Farbe. Erkennbar ist ein Haustechnikgerät, das einen kontinuierlichen Pegel bei ca. 500 Hz abstrahlt sowie einzelnes Vogelgezwitscher bei ca. 3.6 kHz, bei 0.3 und 1.3 s (Cursor)

1.9 Eichung und Kalibration

1.9.1 Eichung

Rechtlich verbindliche Messungen dürfen nur mit Messgeräten erstellt werden, welche das Metas zugelassen hat und welche regelmässig geeicht werden. Die rechtliche Grundlage ist mit der Lärmschutzverordnung Anh. 2, Ziffer 2 gegeben. Dort wird auf die Messmittelverordnung 941.210 verwiesen.

Diese bauartzugelassenen Messgeräte können beim Metas in Wabern bei Bern geeicht werden. Bei der Eichung wird das Messgerät auf die korrekte Funktion gemäss den gültigen Anforderungen geprüft. Prüfbare Funktionen sind:

- Ein- oder zweikanalige Schallpegelmesser mit und ohne Leq-Mittelung
- Terz- und Oktavbandfilter
- Kalibratoren

Nach bestandener Eichung wird das Gerät mit einer Eichmarke versehen. Die Eichung ist 2 Jahre gültig. Neben den Schallpegelmessern ist für eine verbindliche Messung auch der verwendete Kalibrator regelmässig zu eichen.

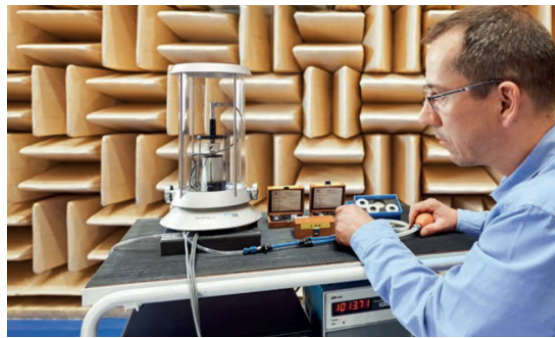


Abbildung 1.19: Mikrofonkalibrierung mit Referenz (Laborstandard-Mikrophon), Quelle Metas [17]

Weiterführende Informationen sind auf der Metas Webseite zu finden, beispielsweise der Bericht *Die Grundlage akustischer Messungen* [17].

1.9.2 Kalibration

Die Kalibration des Schallpegelmessers erfolgt unmittelbar vor und nach einer Messung. Dazu wird die Messkette vom Mikrofon bis zur Pegelanzeige auf einen festgelegten Wert kalibriert. Dies geschieht durch die Einspeisung von einem definierten Schalldruck auf das Mikrofon. Der Schalldruck wurde früher mit einem Pistofon, einem in einem Volumen schwingenden Kolben, erzeugt, siehe Abbildung.

Heute sind die Kalibratoren lautsprecherbasierte Geräte, in die das Messmikrofon eingesteckt werden kann. Anschliessend wird die Messkette auf den festgelegten Schalldruckpegel kalibriert. Die Empfindlichkeit oder Sensitivität des Mikrofons kann auf dem Gerät abgelesen und mit dem Mikrofon-Datenblatt verglichen werden. Typische Werte für ein Standard 1/2 Zoll Mikrofon sind -27.5 dBV/Pa oder 42 mV/Pa.

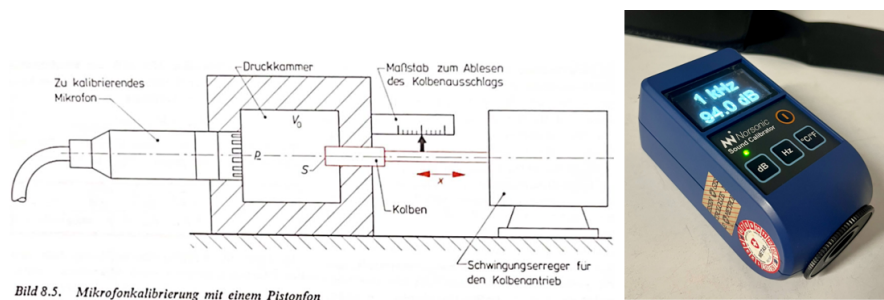


Bild 8.5. Mikrofonkalibrierung mit einem Pistofon

Abbildung 1.20: Schematische Darstellung eines Pistofons (links), Quelle, moderner Kalibrator mit Eichmarke (rechts)

Die Kalibratoren arbeiten meist bei einer Frequenz von 1 kHz und erzeugen einen Schalldruck von 1 Pa, d.h. 94 dB SPL oder 10 Pa, d.h. 114 dB SPL. Die Genauigkeit der Kalibratoren ist im Datenblatt ersichtlich und bewegt sich üblicherweise im Bereich von ± 0.3 dB. Bei 1 kHz gibt es keine Unterschiede bei den Bewertungskurven, siehe Kapitel 1.3.2, entsprechend auch keine Unterschiede ob mit dem A-Filter oder ohne kalibriert wird.

Der Kalibrator erzeugt in dem kleinen Volumen ein Schallfeld einer Druckkammer. Häufig werden jedoch Freifeldmikrofone am Schallpegelmessgerät verwendet, inklusive der implementierten Frequenzgangkorrektur, siehe Abbildung 1.3. Wird nun ein Freifeldmikrofon in ein Druckfeld gebracht, entsteht ein Fehler aufgrund dieser Korrektur. Der Fehler ist abhängig vom Durchmesser der Mikrofon-Membran. Bei den üblichen 1/2 Zoll Mikrofonen beträgt der Fehler ca. 0.08 bis 0.2 dB, die genauen Werte sind dem Datenblatt zu entnehmen, bspw. in [2] oder [19].

Einen weiteren Einfluss auf den Wert zur Kalibrierung hat eine möglicherweise vorhandene Korrektur zum Windschutz, siehe Kapitel 1.2.7. Diese Korrektur hat einen Einfluss von 0.12 dB bei einem 50 mm Windschutz [2]. Je nach Gerät ist die Korrektur vom Windschutz bei der Kalibration ein- oder ausgeschaltet.

Tipps für die Praxis:

- Das Handbuch vom Gerät ist bei der Inbetriebnahme bezüglich der genannten Korrekturen zu studieren. Ggf. ist der Kalibrierungspegel anzupassen.
- Für eine belastbare Aussage vor und nach der Messung bei den vorhandenen Umgebungsbedingungen kalibrieren
- Sicherstellen dass das Mikrofon einwandfrei im Kalibrator eingesteckt ist
- Während dem Kalibrieren die Geräte ruhig halten
- Die mit der Kalibration eingestellte Empfindlichkeit mit dem Datenblatt und/oder mit vergangenen Werten des Gerätes prüfen. Ist hier über die Zeit ein Shift erkennbar, könnte das auf ein fehlerhaftes Bauteil hinweisen und die Messkette müsste überprüft werden
- Wenn ein 114 dB Kalibrator verwendet werden soll, prüfen ob dieser Pegel für das Mikrofon geeignet ist. LowNoise Mikrofone dürfen nur bei 94 dB kalibriert werden.

Die Kalibratoren haben der Norm SN EN 60942 zu genügen und sind regelmässig zu eichen.

1.10 Normierung und Bauartzulassung

1.10.1 Normierung

Wie bereits verschiedentlich genannt, werden die Schallpegelmessgeräte in der IEC 61672 genormt. In der Norm Teil 1 wird umfassend die Leistungsmerkmale, die technischen Anforderungen und die minimalen Funktionen der Handschallpegelmessers angegeben. In der Norm werden zwei Klassen von Anforderungen definiert:

- Klasse 1: Allgemein engere Toleranzgrenzen, beispielsweise bei 1 kHz: ± 0.7 dB
- Klasse 2: Weniger enge Toleranzgrenzen, beispielsweise bei 1 kHz: ± 1.0 dB, in anderen Terzbänder ist der Unterschied grösser, siehe Abbildung 1.21.

Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch Anforderungen der beiden Klassen sowie die Performance der genannten Messmikrofone, die nach dieser Darstellung alle die Klasse 1 erfüllen würden.

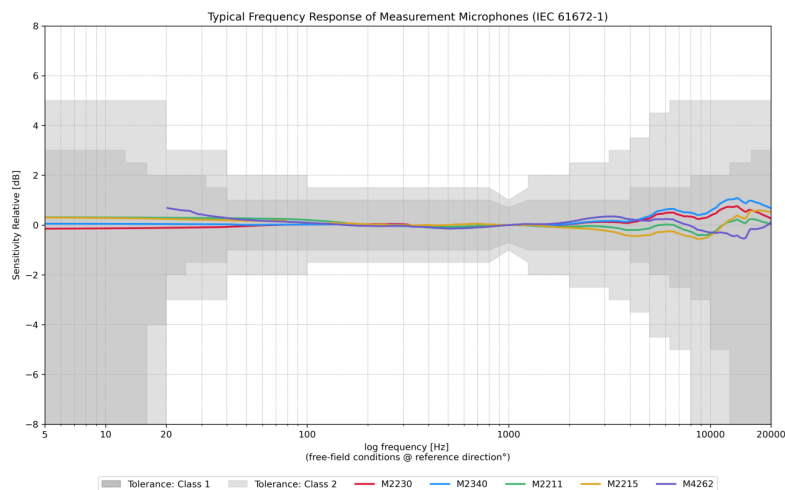


Abbildung 1.21: Spektrale Anforderung Klasse 1 und 2 (graue Bereiche), Frequenzgänge von Messmikrofonen, Quelle: [2]

1.10.2 Bauartzulassung

Wie unter dem Kapitel 1.19 genannt, dürfen rechtlich verbindliche Messungen nur mit Messgeräten erstellt werden, welche das Metas zugelassen hat. Das Metas führt eine Liste mit Geräten, die bauartzugelassen sind. Die Liste ist hier zu finden [16], inklusive Download der Zertifikate.

Zu beachten ist, Handschallpegelmessers und Kalibratoren die Möglichkeit einer Bauartzulassung haben, denn das ganze Gerät wird der Prüfung unterzogen. Ein computerbasiertes System, das aus mehreren Komponenten besteht, ist beispielsweise nicht prüfbar. Aus diesem Grund sind für verbindliche Messungen weiterhin nur Handschallpegelmessers einzusetzen.

1.11 Messunsicherheit

Die Diskussion der Messunsicherheit ist ein zentrales Thema und führt oft zu Missverständnissen. Aus Sicht des Autors sind die folgenden zwei Punkte zentral:

- Verständnis für die Messunsicherheit: Die Person, die die Messung sowie die Auswertung durchführt braucht ein Verständnis der Unsicherheit. Was sind die relevanten Einflussfaktoren und wo sind Verbesserungen möglich. Hierzu gibt es in den Messnormen wertvolle Angaben.
- Für die Beurteilung relevant ist der ausgewiesene Wert. Die Unsicherheit hat auf die Beurteilung keinen Einfluss.

Je nach Messaufgabe ist die Unsicherheit unterschiedlich. ± 2 dB sind im Feld nicht selten, hingegen sind Labormessungen besser. Es gibt viele Unsicherheiten, an der Quelle (Betrieb, Abstrahlung, etc.), am Übertragungsweg (Situation, Wetter, etc.) und am Messgerät (Kalibration, etc.). Die Messunsicherheit ist bei der Auswertung anzugeben (siehe bspw. EN ISO 12999). In den Messnormen sind weitere Angaben zum Umgang mit der Unsicherheit aufgeführt, welche vor der Durchführung einer Messung studiert werden sollen. *Eine Messung ist keine Messung* hat auch in der Akustik seine Gültigkeit. Es empfiehlt sich, mehrere Messungen durchzuführen, jede zu plausibilisieren und diese anschliessend zu mitteln.

1.12 Messgeräte, Messsysteme

1.12.1 Handschallpegelmesser

Die bekanntesten Vertreter der akustischen Messtechnik sind die Handschallpegelmesser. Sie sind *das* Messgerät für Akustikfachleute. Der Aufbau und die Basis-Funktionen sind bei allen Produkten ungefähr ähnlich. Es sind Geräte, die in der Hand gehalten ohne externe Stromversorgung betrieben werden können. Es gibt ein oder mehrere Eingangskanäle, an die das Mess-Mikrofon angeschlossen werden. Typischerweise befindet sich der (erste) Eingang an der oberen Seite des Gerätes, damit das Mikrofon direkt aufgesteckt werden kann. Bei Bedarf lässt sich das Mikrofon auch über ein Kabel abgesetzt platzieren.

Die Funktionen beinhalten die Messung von gleitenden Mittelwerten (Kapitel 1.3.3), Min- und Max-Pegel sowie Leq (Kapitel 1.3.3), dies bei den bekannten spektralen Filterungen (Kapitel 1.3.2). Teilweise sind auch FFT-Analysen möglich.

Bei den neueren Geräten sind auch parallele Audioaufzeichnungen des Messsignals möglich. Dies empfiehlt sich besonders für Umweltlärm-Messungen, Messung von leisen Geräuschen oder unbegleiteten Langzeit-Messungen. Durch das Abhören des Pegelschriebes lässt sich im Nachhinein die eine oder andere Auffälligkeit in der Messung identifizieren.

Die Handschallpegelmesser haben der Norm IEC 61672 zu genügen und sind regelmässig zu eichen.



Abbildung 1.22: Eine Auswahl von aktuellen Handschallpegelmessern der Firmen NTi Audio, Norsonic und B&K (von links), Quellen: Hersteller

Daneben gibt auch von anderen Herstellern Produkte in unterschiedlichen Ausstattungsklassen. Für einfachere Messaufgaben sind auch preisgünstige Geräte verfügbar.

1.12.2 Einstellungen am Handschallpegelmesser

An den Handschallpegelmessern sind folgende Einstellungen vorhanden. Diese Punkte sind bei Inbetriebnahme zu prüfen und können ein Risiko für fehlerhafte Messungen bedeuten. Die Punkte eignen sich auch als Prüfpunkte bei der Fehlersuche:

- Eingang: Konfiguration korrekt (angeschlossener Vorverstärker, Mikrofon, Speisung) ?
- Eingang: Aktivierung Hochpassfilter, bspw. bei 6.3 Hz ?
- Eingang: Kompensation Windschutz eingeschaltet ?
- Eingang: Kalibration durchgeführt ?
- Frequenzbewertung: Aufzeichnung der A-, C- und Z- gefilterten Einzahlwerte, zusätzlich Terz- und/oder Oktavbandwerte ?
- Eingang: Zeitbewertung fast oder slow ?
- Audioaufzeichnung: Auf den Messpegel eingestellte Verstärkung achten, bei lauten Aufnahmen kann es sonst zu Übersteuerung der Audioaufnahme kommen. Meistens kann die Samplingrate auf 12 kHz reduziert werden, um Speicherplatz zu sparen.
- Gespeicherte Werte: Speicherort kontrollieren, damit die Messdaten wieder gefunden werden
- Zeit- und Datumseinstellungen: Die Geräte schalten teilweise nicht selbstständig zwischen Sommer- und Winterzeit um. Darum empfiehlt es sich, vor jeder Messung die Zeit- und Datumseinstellungen zu kontrollieren.

1.12.3 Messsysteme aus Audiohardware und Auswertesoftware

Neben den nun bekannten Handschallpegelmessern werden - für rechtlich nicht verbindliche Messungen - oft computerbasierte Systeme bestehend aus einer Audiohardware und einer Auswertesoftware eingesetzt. Die Systeme mit diesen flexiblen Bestandteilen können keine Bauartzulassung erhalten. Sie bestehen neben dem Computer aus einem Audiointerface und mindestens einem Messmikrofon. Ein grosser Vorteil dieser Systeme sind die flexiblen und umfangreichen Auswertemöglichkeiten, da meist mindestens die Impulsantwort gemessen wird.

Verbreitet eingesetzt werden diese Systeme in der Lautsprecherentwicklung, dem Einmessen von Beschallungs- und HighEnd-Anlagen sowie zur erweiterten raumakustischen Analyse. Beispielhafte Produkte sind Easra, Systune, Arta oder REW [20].

In der Forschung / Entwicklung wird gerne mit programmierbaren Umgebungen (Matlab, Python, etc.) gearbeitet. Für Audio- und Akustik-Messungen sind spezialisierte Bibliotheken vorhanden, bspw. die ITA-Toolbox [1] oder PyFar [24].

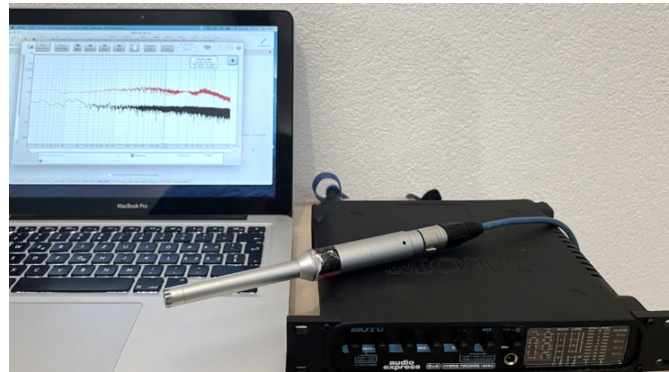


Abbildung 1.23: Computer mit Messsoftware, Audiointerface und Messmikrofon

1.12.4 Stationäre Messsysteme

Akustik-Labore sind mit stationären und fest installierten Messgeräten ausgestattet. Diese sind vernetzt, werden von einer zentralen Steuerung bedient und laufen teilweise automatisiert ab. Häufig sind diese auch mehrkanalig aufgebaut, damit eine Vielzahl von Messmikrofonen gleichzeitig verwendet werden können. In bauakustischen Messständen können so beispielsweise die Sende- und Empfangsräume gleichzeitig gemessen werden. Unten eine nicht abschliessende Liste mit technisch spannenden Gerätschaften.




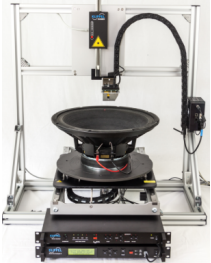

<p>B&K Lan-Xi System, modulares System mit vielen Komponenten und Schnittstellen.</p>	
<p>Norsonic Nor850 Multikanal-Messsystem.</p>	
<p>NTi Audio, Messgerät für Produktionskontrollen.</p>	
<p>Klippel, Mess- und Testsysteme, auch bekannt für nonlineare Analysen.</p>	
<p>Dewesoft, robotergestützte Schallintensitätsmessung eines Baufahrzeuges. Der Roboter fährt die Hüllfläche automatisch ab.</p>	

Tabelle 1.4: Beispiele stationäre Messsysteme

1.12.5 Impedanzrohr

Inhalt folgt

1.12.6 Mikrofonsysteme mit Richtungsinformation

Noise Locator, IRIS *Inhalt folgt*

1.12.7 Kunst- und Eckkopf, psychoakustische Messungen

Als Ausgangslage für psychoakustische Analysen (Untersuchung der Wahrnehmung eines Höreindrucks, bspw. nach ISO 12913) dienen Impulsantworten oder Audioaufnahmen. Für diese psychoakustische Messungen werden neben den normalen Messmikrofonen gerne auch so genannte Kunstkopf-Anordnungen verwendet. Der Kunstkopf ist, wie es der Name schon sagt, eine künstliche Nachbildung eines menschlichen Kopfes inklusive der Ohren und mit 2 Mikrofonen in den Gehörgängen. Damit lassen sich Messungen mit dem spektralen und zeitlichen Einfluss des Kopfes (Head Related Transfer Funktion, HRFT) durchführen. Gerne werden die Kunstköpfe auch für binaurale Audio-Aufnahmen verwendet, welche - abgehört mit Kopfhörern - eine sehr realistische räumliche Wiedergabe der aufgenommenen akustischen Umgebung ermöglichen. Im vorliegenden Skript wird die akustische Messtechnik behandelt, für Informationen zum grossen Gebiet der Audio-Aufnahmetechniken wird auf entsprechende Fachliteratur verwiesen, bspw. Sengpiel [22].

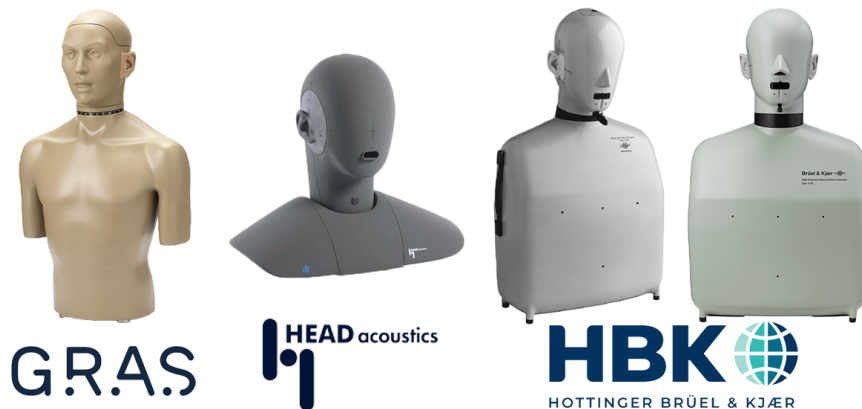


Abbildung 1.24: Verschiedene Ausführungen von Kunstköpfen, teils inklusive Torso, Quelle mit weiteren detaillierten Informationen: [4]

Auch der echte Kopf kann für binaurale Messungen verwendet werden, wenn in den Ohren Mikrofone platziert werden. Dazu sind einige spezialisierte Produkte verfügbar.



Abbildung 1.25: Mikrofone zur Platzierung an echten Köpfen, Sennheiser Smart Headset Ambeo (links), B&K 4101 (rechts)

1.12.8 Akustische Kamera

Dieser Name bedeutet, dass die Schallemissionen mittels einer Messung sichtbar gemacht werden können, einer so genannten Schallquellenlokalisierung. Dazu wird die Technologie des Beamformings verwendet. Auf einer Fläche ist eine gewisse Anzahl Mikrofone platziert, deren Signale separat ausgewertet werden. Aus den Laufzeitunterschieden zwischen den Mikrofonen lässt sich berechnen, aus welcher Richtung ein Schallereignis eintrifft. Wird dieser Prozess über die gesamte Fläche ausgeweitet, lässt sich der Pegel auf einer Prüffläche scannen. Typischerweise wird die Prüffläche auch optisch aufgenommen und mit den Pegelangaben kombiniert.

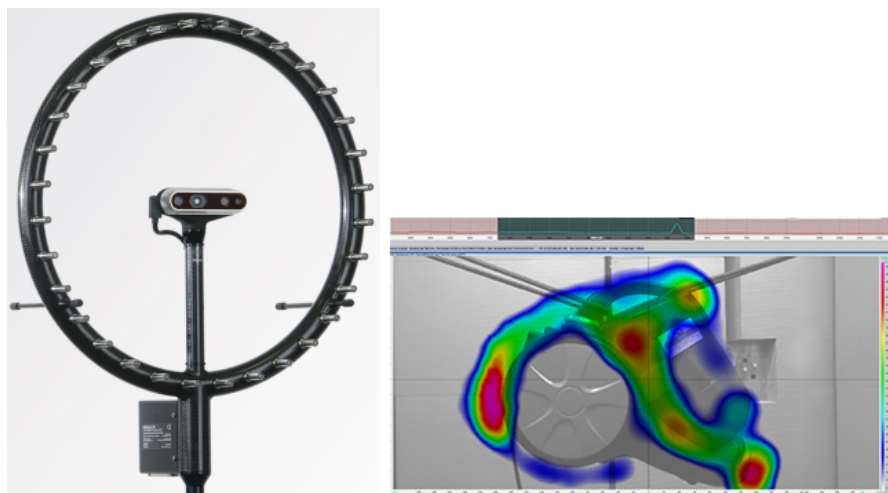


Abbildung 1.26: Ringförmige Anordnung der Mikrofone (links), beispielhaftes Ergebnis (rechts), Quelle: [10]

Mit einigen Systemen kann ein virtuelles Mikrofon generiert werden, womit auf der Prüffläche an einzelnen Punkten die Messung abgehört werden kann. Aufgrund der Dimensionen der Mikrofon-Arrays ergibt sich die untere Grenzfrequenz, was für den jeweiligen Einsatzzweck beachtet werden muss. So sind sehr grosse Arrays für tiefe Frequenzen und kleinere Geräte für mittlere bis hohe Frequenzen erhältlich.

Für das weiterführende Studium wird die Webseite der Gfai Tech GmbH empfohlen [10].

1.12.9 Intensitätssonde

Die Schallintensität ist das Produkt von Schalldruck und Schallschnelle, wobei unter gewissen Umständen die Schallschnelle aus zwei, in definiertem Abstand platzierten Mikrofonen berechnet werden kann. Im Buch *Schall, Raum und auditive Wahrnehmung* [14] ist das Prinzip der Intensitätssonde ausführlich erklärt.

Die Intensitätssonde besteht aus 2 Mikrofonkapseln, die mit einem so genannten Spacer miteinander verbunden werden. Der Spacer definiert den Abstand der Kapseln und somit der Messfrequenzbereich. Für Messaufgaben in der Praxis mit dem üblichen Frequenzbereich hat sich ein Spacer von 12 mm bewährt.



Abbildung 1.27: Messung einer Türe mit der Intensitätssonde von Norsonic

Mit der Intensitätssonde können Schalleistungen von Geräten und Anlagen, Abstrahlung von Gebäudebauteilen wie Fenster oder Türen gemessen werden.

1.12.10 Messung der Schallschnelle

Mit dem Mikrofon wird der Schalldruck gemessen. Die direkte Messung der Schallschnelle ist mit einem speziellen Sensor möglich. Dieser besteht aus zwei dünnen Drähten, die dicht nebeneinander auf einem sehr kleinen Sensor liegen, der Drahtdurchmesser sei ca. $10 \mu\text{m}$. Der Sensor funktioniert nach dem Prinzip des Hitzedrahtanemometers. Die Sensoren und die dazugehörigen Messsysteme sind von der Firma Microflown erhältlich. Ebenfalls auf der Webseite sind Publikationen für weitere Informationen verfügbar [18].

Wird der Schallschnelle-Sensor mit einem Mikrofon kombiniert, kann direkt die Schallintensität ermittelt werden. Die Intensität ist bekanntlich das Produkt von Schalldruck und Schallschnelle und eine vektorielle Grösse.

$$\vec{I} = p(t) \cdot \vec{v}(t) \quad (1.16)$$

mit:

\vec{I} : Schallintensität

$p(t)$: Schalldruck

$\vec{v}(t)$: Schallschnelle

Mit diesem kombinierten Sensor und der Möglichkeit direkt die Intensität zu messen ergeben sich nun neue Messmöglichkeiten. Diese sind beispielsweise:

- Messung der Schallabstrahlung: Der Sensor wird mit einer visuellen Kamera und einem Infrarot-Tracking kombiniert, das in der Hand gehalten wird. Damit wird nun eine Hüllfläche über einem Objekt abgefahren, dessen Schallabstrahlung gemessen werden soll. Nach dem die Hüllfläche vollständig erfasst wurde, wird - vergleichbar wie mit der akustischen Kamera - ein Bild generiert, jedoch mit der Schallintensität als darzustellende Grösse. Bei Microflowin heisst diese Technologie *Scan & Paint*.
- In-Situ Absorptionsmessungen: Mit dem Sensor und einem Anregelautsprecher kann direkt die Schallabsorption von einem Prüfling gemessen werden. Dies kann die historische Wand, die Auskleidung im Fahrzeuginnern oder auch der Asphaltbelag sein.

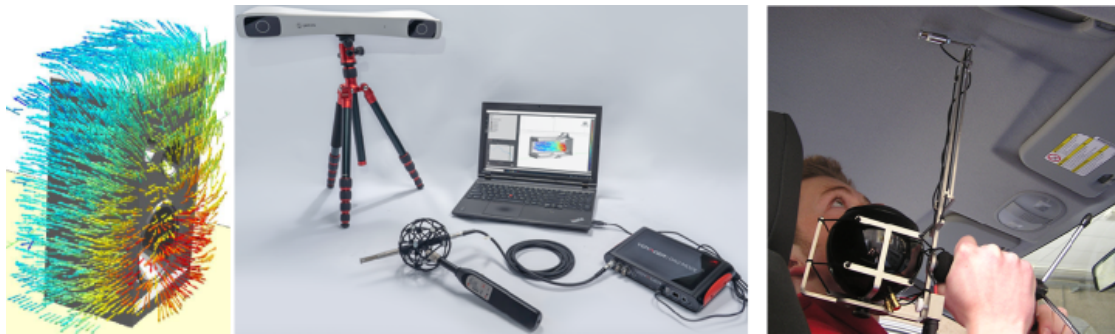


Abbildung 1.28: Schallschnelle bei einem Lautsprecher (links), Messsystem mit der Handsonde (Mitte), In-Situ Absorptionsmessungen (rechts), Quelle: [18]

1.12.11 Messstationen

Messstationen werden für Langzeitmessungen verwendet, oft in Kombination mit wetterfesten Mikrofonen (siehe Kapitel 1.7). Die Anforderungen an diese Stationen sind: Wetter- und staubgeschützt, sicherer und unterbrechungsfreier Betrieb, bestenfalls mit einem Akku ausgestattet, damit bei Stromausfall die Messungen eine gewisse Zeit weiterlaufen. Es hat sich ausserdem gezeigt, dass auf eine stabile Internet-Anbindung geachtet werden muss, wenn die Daten in die Cloud gespeichert werden sollen. Nicht zuletzt hat die Station vandalensicher und abschliessbar zu sein.

Die bekannten Messgeräte-Lieferanten haben entsprechende Stationen im Angebot.

1.12.12 SPL-Logger

Im Gegensatz zu den normalerweise verwendeten Handschallpegelmessern sind die SPL-Logger sehr einfache Geräte. Sie nehmen den Schalldruckpegel auf und speichern die Werte lokal oder in einer Cloud. Es wird der Einzahlwert mit einer A- oder C-Bewertung gespeichert, spektrale Daten oder Audioaufnahmen sind nicht möglich. Die Geräte sind kalibrierbar, weisen einen meist genügenden Pegelbereich auf und sind kostengünstig in der Anschaffung. Häufig werden diese Geräte als Ergänzung zu den normalen Messgeräten eingesetzt.



Abbildung 1.29: Einsatz eines SPL-Loggers für eine Baustellenüberwachung im Innenraum (links) und zur Unterstützung einer Langzeitmessung an einer Hausfassade (rechts)

Zwei beispielhafte Produkte:

- Convergence Instruments, Vertrieb in der Schweiz über Norsonic Brechbühl AG
- Sonotrager, Sonotronex AG

Für DIY-Projekte gibt es von der Firma DF Robot das SPL-Modul *Gravity Analog Sound Level Meter*. Über die Internetsuche sind Bezugsmöglichkeiten und weitere Infos zu finden. Für ein Beispielprojekt kann gerne auch der Autor vom Skript kontaktiert werden.

1.12.13 Smartphone als Pegelmesser

Ein Smartphone hat eingebaute (MEMS-) Mikrofone, die heutzutage eine erstaunlich gute Qualität liefern. Limitierungen sind typischerweise in den tiefen Frequenzen unter 100 Hz und bei Schalldruckpegeln unter 30 dB(A). Trotzdem können Smartphones als einfache Pegelmesser, als spektrale Analysatoren oder als Einschätzung der Nachhallzeit den Akustik-Fachleuten eine unkomplizierte Hilfe sein.

Die Empa hat verschiedene Apps getestet und gibt folgende Empfehlungen ab [8]:

- iPhone: SPL Pro ist eine Schallmessapp für das iPhone. Die App beinhaltet viele flexible Einstellungsmöglichkeiten, beispielsweise kann der Messmodus manuell gewählt werden und auch ob die Bewertung über einen A oder C-Filter laufen soll. Die App kann für 8 Franken im App-Store gekauft werden.
- Android: NoiseCapture ist eine gratis Android-App, welche Schallmessungen mit dem Smartphone erlaubt. Als Zusatzfeature können die Messungen mittels GPS auf einer Karte dem Messort zugeordnet werden. Die App kann im Google Play Store oder im gratis Android Store heruntergeladen werden.

1.13 Schallquellen

Damit Schall gemessen werden kann, muss dieser vorhanden oder erzeugt werden. Für letzteres sind verschiedene Hilfsmittel vorhanden, damit eine normgemässe Messung durchgeführt werden kann.

1.13.1 Dodekaeder

Der Dodekaeder ist ein kugelförmig aufgebauter Lautsprecher mit 12 Lautsprecher-Chassis. Ab einem gewissen Abstand funktioniert der Dodekaeder als omnidirektionale Punktschallquelle, siehe Abbildung 1.30.

Die Bauart und die Leistungsmerkmale sind in den Messnormen definiert: ISO 10140, ISO 16283, ISO 3382. Es gibt passende Verstärker mit Frequenzgang-Entzerrungen je nach angeschlossenen Dodekaeder-Typ. Zu beachten ist, dass der Dodekaeder einen bestimmten Frequenzbereich abdeckt und für Messungen von tiefen Frequenzen (unter 50 Hz) mit einem Subwoofer kombiniert werden soll.

Eingesetzt wird er für die Erzeugung von einem diffusen Schallfeld für bauakustische Messungen am Bau oder im Labor oder für raumakustische Messungen (Nachhallzeit, Impulsantwort).

1.13.2 Trittschallhammerwerk, Trittschallball

Zur Messung von Trittschall wird das Normhammerwerk verwendet, das mit Stahl-Hämmern eine Trittschall-Einleitung in die zu messenden Decke erzeugt. Zu beachten ist, dass das Hammerwerk einen nicht zu unterschätzenden Lärm erzeugt, der durch Luftschall übertragen wird. Das kann beispielsweise bei horizontalen Messungen mit Trennwänden mit geringer Luftschalldämmung die Messung beeinflussen.

Die Bauart und die Leistungsmerkmale sind wiederum in den Messnormen ISO 10140 und ISO 16283 definiert. Das Hammerwerk muss periodisch beim Metas überprüft werden.



Abbildung 1.30: Dodekaeder mit Verstärker (links), Normhammerwerk mit sichtbaren Hämmern (rechts), Quelle: [2]

Zur Trittschallmessung, insbesondere von Holzdecken, ist der so genannte Trittschallball verfügbar (bsp. Nor279 von Norsonic). Im Vergleich zum Hammerwerk leitet der Ball deutlich mehr Energie bei tiefen Frequenzen in das Bauteil ein. Der Ball wird ab einer Höhe von 1 m auf die Decke fallen gelassen und der abgestrahlte Impuls im Empfangsraum gemessen.

Diese Messung kann das Messspektrum zu tiefen Frequenzen erweitern. Dies hat jedoch bis heute noch keine Berücksichtigung in den Schweizer Normen gefunden.

1.13.3 Impulsquellen für Nachhallzeitmessungen

Die Nachhallzeit kann mit Impulsanregung gemessen werden. Dazu sind unterschiedliche Geräte und Methoden möglich. Es ist wichtig, dass mit der Anregung genügend Energie in den Raum gebracht wird. Häufig sind die tiefen Frequenzen limitierend oder ein allenfalls nicht abschaltbares Grundgeräusch. Die Messung der Nachhallzeit ist somit direkt nach Beendigung zu prüfen. Moderne Handschallpegelmesser erlauben diese Kontrolle, teilweise wird sogar die Regressionsgerade angezeigt (siehe 1.7.3).

- Schreckschusspistolen, 6 mm oder 9 mm: Der Vorteil ist in der einfachen und schnellen Handhabung. Nachteilig ist der Umstand, dass mit einer Waffe hantiert werden muss. Dies bedeutet, dass bei Messungen mit der entsprechenden Vorsicht vorgegangen werden muss und alle Personen im Gebäude über die Messung und die Auswirkung informiert werden müssen. In grösseren Räumen kann die 9 mm Pistole verwendet werden.
- Dog-Trainer: Eine gute Variante ist der so genannte Dog-Trainer. Er wurde zum Training von Polizei-Hunden entwickelt, leistet aber für akustische Messungen ebenso gute Dienste. Wie mit der Scheckschusspistole können die Messungen einfach und schnell durchgeführt werden, der akustische Impuls ist gleichwertig. Das Gerät sieht jedoch nicht wie eine Waffe aus und wird auch nicht als eine Waffe identifiziert. Ein weiterer Vorteil ist die kleine Grösse.
- Holzklappen. Der Impuls kann auch durch zusammenschlagen von Holzbrettern erzeugt werden. Ein beispielhaftes Produkt ist der Delta Clapper von NTi Audio.
- Ballone: Auch mit dem Platzen von Ballonen kann ein geeigneter Impuls erzeugt werden. Ein Anwendungsfall könnten Messungen in sensiblen Räumlichkeiten sein.



Abbildung 1.31: Dog-Trainer der Firma Vogtwaffen

Bei der Anregung mit Impulsquellen sind folgende Punkte für eine erfolgreiche Messung zu beachten:

- Das wichtigste zuerst: Immer einen Gehörschutz tragen!
- Grundgeräusche und Störungen eliminieren, Grundgeräuschabstand mindestens 35 dB im zu messenden Frequenzbereich, siehe auch Kapitel Anwendungen.
- Personen im Raum und Gebäude sind über die Messungen und den Knall zu informieren. vor der Erzeugung des Impulses prüfen, dass sich keine ungeschützten Personen im Raum aufhalten.
- Bei Anregung mit Schreckschuss oder Dog-Trainer entsteht Schiessstaub, der allenfalls die Rauchmeldeanlage auslösen könnte. Deshalb nicht in Richtung Rauchmelder schießen und Gebäudepersonal vor den Messungen informieren (dass ein Rauchmelder ausgelöst wurde ist dem Autor noch nie passiert).

1.13.4 EMPA Pendelfallhammer

Zur Anregung von Körperschall aufgrund von Nutzungsgeräuschen wird der so genannte EMPA-Pendelfallhammer eingesetzt. Diese Apparatur ist eine Schweizer Eigenheit und wird zum Prüfen der Anforderungen nach SIA181 verwendet. Die genauen Anforderungen sind in der SIA181, Anhang 3.7 angegeben.

1.13.5 Talkbox

Für Messungen der Sprachverständlichkeit (STI) wird ein Lautsprecher benötigt, der die Abstrahleigenschaften des menschlichen Mundes hat. Dazu hat die IEC 60268-16 Anforderungen aufgeführt, welche mit einigen Lautsprecher-Boxen mit einem Breitbandlautsprecher erreicht werden können. Von der Firma NTi Audio gibt es ein spezialisierter Lautsprecher, die TalkBox, der diesen Anforderungen genügt und eine einfache Handhabung ermöglichen.

1.13.6 Systeme zur Erschütterungsmessung

Inhalt folgt

Kapitel 2: Anwendungen

2.1 Einführung

2.1.1 Messnormen und Wegleitungen

Die Resultate von akustischen Messungen dienen als Grundlage für die Ausarbeitung von Massnahmen, Dokumentation von akustischen Eigenschaften oder für die Beurteilung anhand von Grenz-, Richt-, oder Zielwerten. Für alle diese Messaufgaben ist eine Objektivität und Vergleichbarkeit der Resultate essentiell. Darum werden die Messungen nach den bekannten Messnormen oder Wegleitungen durchgeführt.

Im Normen und Wegleitungen wird genau beschrieben, wie eine Messung durchzuführen und auszuwerten ist. Weiter sind die Randbedingungen sowie teilweise Hilfestellungen enthalten. Die für eine bestimmte Messaufgabe zu verwendende Norm ist in den folgenden Kapiteln jeweils angegeben.

2.1.2 Messbedingungen, Grund- und Störgeräusche

Damit belastbare akustische Messungen erstellt werden können, sind auf einwandfreie Messbedingungen zu achten. Ist dies nicht möglich, beispielsweise aufgrund zu hohem Grundgeräusch oder Störungen, kann dies in der Auswertung korrigiert werden, was jedoch einen beträchtlichen Aufwand und gegebenenfalls unsichere Resultate bedeuten kann.

Grundsätzlich sind die Dimensionen Pegelbereich und Frequenzbereich für eine Messung zu prüfen. Messungen von leisen Geräuschen erfordern andere Grundgeräuschbedingungen als an lauten Maschinen. Wenn ein hochfrequenter Ton gemessen werden soll, kann ein möglicherweise vorhandener tieffrequenter Anteil von Grundgeräusch ignoriert werden, wenn ein genügender Pegelbereich vorhanden ist.

- Grundgeräusch: Im Allgemeinen muss im betrachteten Frequenzbereich eine Differenz von mindestens 10 dB vom zu messenden Pegel zum Grundgeräusch vorhanden sein. In den einschlägigen Mess-Normen sind weitere Angaben dazu verfügbar. Bei Messung der Nachhallzeit muss der Grundgeräuschabstand deutlich mehr betragen (mind. 35 dB, siehe unten).
- Wetter, Wind, Niederschlag: Mit einem Windschutz kann bei leichtem Wind und allenfalls leichtem Niederschlag trotzdem gemessen werden. Bei abgesetzten Mikrofonen kann das Abhören der Messung Sinn machen, um etwaige Windböen zu erkennen und von den Messungen auszuschliessen. Bei starkem Wind oder Niederschlag sind keine Messungen möglich, dasselbe gilt im Allgemeinen auch bei Schneebedeckung (Änderung der Schallausbreitung aufgrund veränderten Absorptionseigenschaften).

- Störgeräusche: Störungen können immer vorkommen und sind von den Messungen auszuschliessen. Auch eine kurze Störung kann einen erheblichen Einfluss auf das Messresultat wie den Leq haben. Mindestens mittels Höreindruck ist zu prüfen, dass keine Störungen gemessen werden. Hier ist darauf zu achten, dass der subjektive Eindruck möglicherweise zu einer Fehleinschätzung führt, beispielsweise ein sehr kurzes Knacken im Gebäude. Im Zweifelsfall ist die Messung mehrmals durchzuführen, bis ein wiederholbares Resultat erreicht wird. Bei Messungen in Gebäuden sind vorgängig alle Personen zu informieren und lärmige Arbeiten einzustellen, denn durch die Körperschallübertragung kann auch eine entfernt vorhandene Störung die Messung beeinflussen.

Das folgende Bild zeigt die Messung der Impulsantwort als Wasserfall-Diagramm mit einer Störung bei 100 Hz - dies war ein im Raum entfernter Kühlschrank. Die Auswertung der Nachhallzeit bei 100 Hz ist so nicht möglich. Nach dem kurzzeitigen Ausschalten des Kühlschranks war die Störung nicht mehr vorhanden und es konnten einwandfreie Messungen erstellt werden.

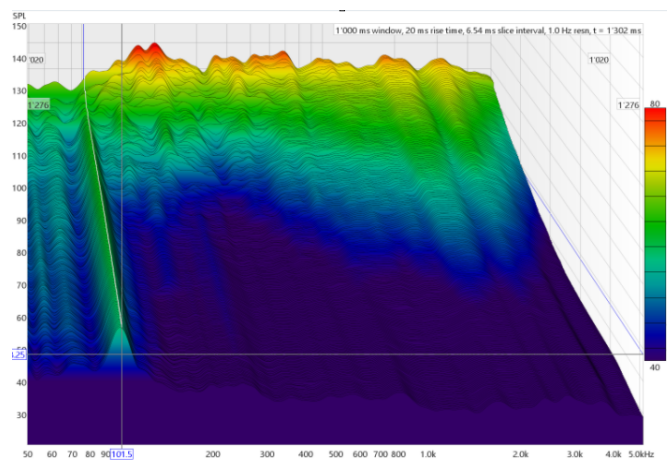


Abbildung 2.1: Messung der Impulsantwort mit einer Störung bei 100 Hz

2.1.3 Arbeitsweise, Protokollierung und Praxis-Tipps

Eine korrekte und präzise Arbeitsweise wird bei akustischen Messungen vorausgesetzt. Häufig gibt es 1 Messtermin vor Ort oder 1 Messkampagne im Labor, in Rahmen dessen belastbare Resultate akquiriert werden müssen.

Es empfiehlt sich, sich im Vorfeld Gedanken zu den erwarteten Resultaten zu machen. Vor Ort bei den Messungen soll diese Erwartung dann plausibilisiert werden, bzw. den Grund für Abweichungen herausgefunden werden. Dies dient dem Verständnis der akustischen Situation und hilft bei allenfalls nachfolgenden Massnahmeplanungen.

Die Protokollierung der Messungen, die Mess-Buchhaltung, ist ein nicht zu unterschätzender Anteil einer erfolgreichen Messung. Vielfach wird eine Vielzahl von Messungen erstellt, welche bevorzugt in ein vorbereitetes Formular protokolliert wird.

Der Autor empfiehlt, genügend - oder lieber zu viel als zu wenig - Fotos zu machen, insbesondere von akustisch relevanten Details. Es kommt in der Auswertung und der Diskussion der Resultate häufig vor, dass auf Details bezogen wird. Da ist es hilfreich, entsprechende Bilder zur Verfügung zu haben.

Last but not least: Vor und nach einer Messsession kalibrieren (siehe 1.9.2).

2.1.4 Höreindrücke während den Messungen

Wie bereits mehrfach genannt, ist es für eine akustische Messung wichtig, auch die Höreindrücke zu erfassen. Dabei geht es darum, die gesamte akustische Situation subjektiv zu erfassen.

Einige Punkte zu dieser Thematik:

- *Mit offenen Ohren hören*, versuchen, alle vorhandene Quellen zu hören und zu verstehen. Manchmal hilft auch, einen kurzen Moment die Augen zu schliessen.
- Wir sind uns normalerweise gewohnt, mit beiden Ohren zu hören. Damit leistet unser Hirn ein eindruckliches Abbild des Schallfeldes, insbesondere kann auf einzelne Quellen fokussiert werden (bspw. einem Gespräch in lauter Umgebung folgen). Wenn ein Ohr abgedeckt ist, ist dies nicht mehr so gut möglich. Für die Erfassung von Höreindrücken kann man sich dies auch zunutze machen, da die Halligkeit nur mit einem Ohr besser eingeschätzt werden kann.
- Einschätzung (und Messung) vom Grundgeräusch und dabei den Pegel- und Frequenzbereich beachten (siehe Kühlschrank in Abbildung 2.1).
- Bei der Beurteilung von Industrie- und Gewerbelärm nach LSV werden Pegelzuschläge nach dem Höreindruck vergeben. Diese sind absichtlich als subjektive Korrekturen vorgesehen und sollen die Belästigungswirkung am Immissionspunkt berücksichtigen. Hier ist allenfalls ein Austausch unter Fachpersonen hilfreich.
- Die Schwachstellenanalyse kann oft gut mittels Höreindruck vorgenommen werden. Hilfreich dazu ist auch, ein Ohr an die Wand zu halten und versuchen, die Körperschallübertragung zu hören, bzw. dessen Unterschiede.
- Schallreflexionen oder Echos sind gut hör- und meist auch ortbar. In der raumakustischen Gestaltung der Räume ist wichtig, keine störenden Reflexionen oder Echos zu generieren.
- Bei abgesetzten Messungen kann gegebenenfalls kein direkter Höreindruck gewonnen werden. Hier ist es ratsam, die Messung mit einem Kopfhörer direkt vor Ort mitzuhören.

2.1.5 Auswertungen der Messdaten

Nach den Messungen werden die Daten in spezialisierte Programme geladen, damit eine entsprechende, normgerechte Auswertung erstellt werden kann. Häufig bieten die Hersteller der Geräte auch die passenden Tools an.

Sind die rohen Messdaten in menschenlesbaren Zahlen vorhanden, kann die Auswertung auch von Hand, d.h. in Excel oder Matlab, erstellt werden. In den Messnormen sind die Prozesse zur Berechnen der Auswerteresultate dokumentiert. Dies eignet sich bei unsicheren Ergebnissen auch zur Plausibilisierung oder zum Erlernen der Thematik.

2.1.6 Rundungsregeln in der Akustik

Jede Messung ist mit einer Unsicherheit behaftet. Wie oben erläutert, liegt die Unsicherheit bei akustischen Messungen im Bereich von etwa $\pm 1 \dots 2$ dB. Resultate von Pegelmessungen werden häufig mathematisch auf ganze Zahlen gerundet, was in Anbetracht der zugrundeliegenden Messunsicherheit auch Sinn macht. Zwischenresultate von Pegeln können auf 1 Dezimalstelle gerundet werden. Resultate der Nachhallzeiten werden auf 2 Dezimalstellen gerundet.

Trotzdem wird das Runden - insbesondere in lärmrechtlicher Betrachtungsweise - kontrovers diskutiert. Folgend Angaben zu Rundungsregeln:

- Lärm: Runden und Darstellen von Lärmermittlungsresultaten, Vollzugshilfe 1.10, Cercle Bruit
- Bauakustik: Angabe in der SIA 181:2020: *Massgebend für die Beurteilung sind die am Bau messtechnisch ermittelten, ganzzahligen Werte.*
- Nachhallzeit: Auf 2 Dezimalstellen nach DIN 18041

2.1.7 Bericht und Beurteilung

Die Beurteilung erfolgt nach den gesetzten Anforderungen, welche bestenfalls vor den Messungen festgelegt werden. Die Anforderungen an die Berichterstellung ist teilweise in den Messnormen aufgeführt. Es empfiehlt sich, folgende Punkte in einen Bericht aufzunehmen:

- Ausgangslage / Auftrag
- Aufführen der berücksichtigten Messnormen
- Messdatum und Zeit, Messbedingungen, Messpersonal (Kürzel), Besonderheiten
- Angaben zu Grundgeräusch
- Messpositionen
- Darstellung der Messdaten, je nach Zielpublikum des Berichtes empfiehlt sich eine zusammenfassende Tabelle
- Bilder
- Akustische Besonderheiten und / oder Schwachstellen
- Beurteilung
- Zusammenfassung
- Angaben zur Messunsicherheit (siehe Kapitel 1.11)
- Messblätter mit den detaillierten Auswertungen in die Beilage

2.2 Lärmmessungen

2.2.1 Messung einer Punktschallquelle

Ziel

Das Messen einer Lärmquelle im Sinne einer Punktschallquelle kann als eine grundlegende Messaufgabe angesehen werden. Eine Punktschallquelle strahlt Schall von einem festen Punkt ab, dieser wird in einer definierten Distanz gemessen. Im Freifeld kann die Ausbreitung verhältnismässig einfach berechnet werden (bspw. [14]). Solche emissionsseitigen Messaufgaben stellen sich häufig, beispielsweise bei Messung von industriellen Anlagen wie Lüftungsauslässe, haustechnische Anlagen wie Wärmepumpen oder sonstige, kleine Quellen.

Der gemessene Schalldruckpegel, bspw. als L_{aeq} kann direkt vom Messgerät abgelesen werden.

Messnormen und Wegleitungen

- Lärmschutzverordnung (LSV, Stand 1. April 2026 [7]):
 - Beurteilungs-, bzw. Messort für Immissionsmessungen: *Bei Gebäuden werden die Lärmimmissionen in der Mitte der offenen Fenster lärmempfindlicher Räume ermittelt*
 - Anforderungen Messmittel in Anhang 2
- Cercle Bruit [3], Vollzugsordner mit Angaben je nach Lärmthema
- Methode zur Ermittlung der Aussenlärm-Immissionen bei geschlossenem Fenster, Vollzugshilfe zur LSV, Stand 2020, BAFU [26]. Auf der Fensterscheibe wird im Allgemeinen ein um 5 dB höherer Pegel gemessen als im offenen Fenster.
- Ermittlung und Beurteilung von Industrie- und Gewerbelärm, Anhang B, Messempfehlung zur Überprüfung der Lärmimmissionen von Wärmepumpen, Stand 2024, BAFU [25]

Durchführung

Messung in einem definierten Abstand:

- Messung vom L_{eq} nach Kapitel 1.3.3.
- Die Messdauer soll genügend lang gewählt werden, damit eine zeitliche Mittelung über das Schallereignis sichergestellt ist. Minimal 30 s.
- Der Messwert L_{eq} kann direkt in dB(A) abgelesen und protokolliert werden.

Messungen am Immissionspunkt:

- Messung nach LSV in der Mitte vom Fenster von einem lärmempfindlichen Raum.
- Alternativ: Aufkleben vom Mikrophon auf Scheibe nach [26]. Vorsicht: Störgeräusche im dahinterliegenden Raum sind auch zu berücksichtigen, bzw. zu eliminieren.
- Messung vom L_{eq} nach Kapitel 1.3.3.
- Die Messdauer soll genügend lang gewählt werden, damit eine zeitliche Mittelung über das Schallereignis sichergestellt ist. Minimal 30 s.
- Der Messwert L_{eq} kann direkt in dB(A) abgelesen und protokolliert werden.

Bei diesen Messungen ist der akustische Ausbreitungspfad von der Schallquelle zum Mikrofon zu prüfen. Nicht selten kommt es zu Reflexionen, bspw. bei einem Gerät vor einer Hausfassade. Dieser Schalleintrag wird selbstverständlich vom Mikrofon auch aufgenommen und ist in der Auswertung zu berücksichtigen.

2.3 Langzeit- und Überwachungsmessungen

Ziel

Langzeitüberwachungen haben sich als eine wertvolle Quelle von Rohdaten etabliert, auf dessen Basis eine statistische Auswertung vorgenommen werden kann. Dabei kann der Leq oder auch andere Parameter ausgewertet werden. Die Messstationen laufen entweder kontinuierlich oder sie werden beim Überschreiten einer gesetzten Pegelschwelle gestartet. Mit diesen getriggerten Messungen lässt sich einerseits Speicherplatz / Datenvolumen sparen oder es lassen sich Nachrichten versenden, beispielsweise bei Überschreitungen von Grenzwerten bei Baulärm-Überwachungen.

Durchführung

Bei der Planung von Langzeitmessungen ist auf eine geeignete Platzierung der Messmikrofone zu achten. Das zu messende Geräusch muss einwandfrei zu messen sein, bei gleichzeitiger Minimierung von Störgeräuschen. Es empfiehlt sich, eine erste Pilotphase für Testmessungen einzuplanen, um die Qualität der Messungen zu beurteilen. Störgeräusche können auf ganz unterschiedliche Weise vorkommen. Beispiele aus der Praxis sind die naheliegenden wie Wettereinflüsse, Wind, Vögel, Passanten, es sind aber auch schon Störungen von Fahnenmasten (Seil schlägt gegen Mast), Nagetieren, Knackgeräusche in Bauten, Elektro-Weidezäunen (elektrische Störung), usw. vorgekommen. Empfehlenswert ist weiter, zumindest in der Pilotphase eine Audioaufnahme zum Abhören der aufgezeichneten Ereignisse mitlaufen zu lassen.

Vorteilhaft ist, wenn das Messgerät in einer Messstation sicher verbaut wird (siehe Kapitel 1.12.11), inklusive einer Überbrückungsbatterie bei Stromausfall. Das Mikrofon soll mit einer geeigneten Ausrüstung (siehe Kapitel 1.7) geschützt sein.

Beispiele von Langzeitüberwachungen sind:

- Monitoring an Eisenbahnanlagen [27], siehe auch Abbildung 1.7. In der Schweiz wird seit dem Jahr 2003 an 6 fest installierten Messpunkten in Gleisnähe der Lärm der Züge gemessen. Dazu kommen temporäre Messstationen.
- Flughafen Zürich [28], Messung an 14 Messpunkten seit 1966.
- Messkampagnen bei Strassen zur Dokumentation von Lärmsanierungen mit einer Dauer von Wochen bis Jahren.
- Überwachungsstationen bei Bau- oder Industrielärm, sei dies in Quellennähe oder in einem lärmempfindlichen Empfangsraum. Für diese Messaufgaben werden auch gerne sogenannte SPL-Logger (siehe Kapitel 1.12.12) eingesetzt.

Wie das Resultat einer Langzeitmessung des Strassenverkehrslärms aussehen kann, zeigt folgende Abbildung:

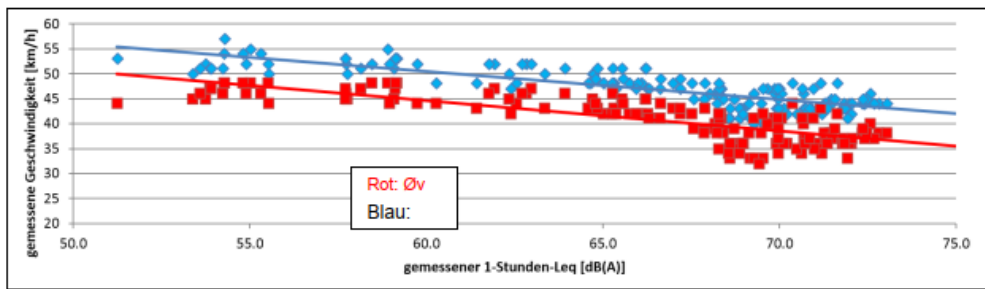


Abb. 7.76 Korrelation gemessene Geschwindigkeit – gemessener Leq (Tempo 50 km/h)

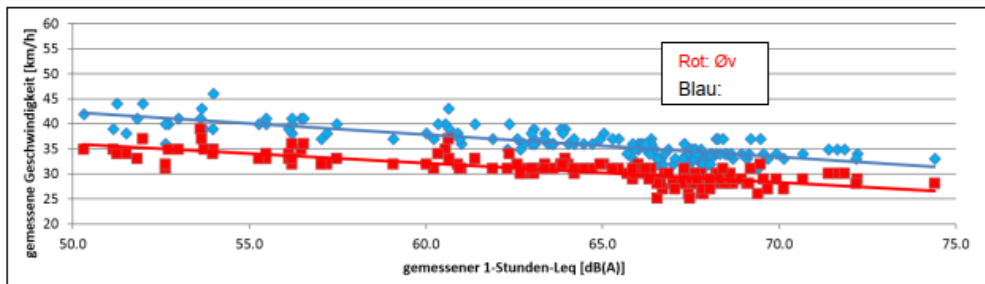


Abb. 7.77 Korrelation gemessene Geschwindigkeit – gemessener Leq (Tempo 30 km/h)

Abbildung 2.2: Auswertung einer Langzeitmessung des Strassenverkehrslärms, Korrelation der gemessenen Geschwindigkeit zum gemessenen Pegel Leq, für Tempo 50 km/h und 30 km/h, Auszug mit freundlicher Genehmigung [23]

Weitere Informationen zu Langzeitmessungen sind beispielsweise im empfehlenswerten Skript *Lärm- und Schallschutz* von Werner Stalder [23] zu finden.

2.4 Bauakustische Messungen

Inhalt folgt für den zweiten Teil vom Messpraktikum

2.5 Labormessungen

2.6 Raumakustische Messungen

Inhalt folgt für den zweiten Teil vom Messpraktikum

2.7 Elektroakustische Messungen

2.8 Messungen Körperschall und Erschütterungen

2.9 Weitere akustische Messungen

2.10 Hersteller und Vertriebe von Messtechnik in der Schweiz

Firma	Produkte und Dienstleistungen	Kontakt
Norsonic Brechbühl AG	Norsonic Microflow Menhir Erschütterungsmessgeräte Imc Messdatenerfassung GRAS Mikrofone Akustische Kameras Messtechnikzubehör und Messstationen Dodekaeder, Trittschallhammerwerk SPL-Logger siehe Kapitel 1.12.12 Cadna Vertrieb Mess- und Clouddienstleistungen	Norsonic Brechbühl AG Rüegsaustrasse 30 3415 Rüegsausachen +41 34 431 31 21 norsonic@norsonic.ch https://www.norsonic.ch
NTi Audio AG	Schallpegelmesser XL2 und XL3 Talkbox, Dodekaeder Trittschallhammerwerk Messtechnikzubehör und Messstationen Audio Analysator für QC Cloud-Dienstleistungen	NTi Audio AG Im alten Riet 102 9494 Schaan, Lichtenstein +423 239 60 60 info@nti-audio.com https://www.nti-audio.com
B&K Messtechnik GmbH	Messtechnikvertrieb für Brüel & Kjaer Produkte	B&K Messtechnik GmbH Hammerstrasse 6 8180 Bülach +41 44 880 70 35 contact@bkmt.ch https://www.bkmt.ch
Sonotronex AG	SPL Logger	Sonotronex AG Glärnischstrasse 44a 9500 Wil SG +41 71 944 45 45 info@sonotronex.ch https://www.sonotronex.ch/
ZC Ziegler Consultants AG	Erschütterungsmessgeräte	ZC Ziegler Consultants AG Asylstrasse 41 8032 Zürich +41 44 260 70 10 info@zcag.ch https://zcag.ch/

Tabelle 2.1: Hersteller und Vertriebe von Messtechnik in der Schweiz

2.11 Buchbare Akustiklabore in der Schweiz

Stelle	Dienstleistungen	Kontakt
HSLU Hochschule Luzern	Absorptionsmessungen im Hallraum Messungen der Schallpegel von Lüftungskomponenten und Geräten Prüfstand für Dämmwirkung von Vorhängen Impedanz-Messungen kleiner Proben Trittschall-Messung	Hochschule Luzern Technik & Architektur Technikumstrasse 21 6048 Horw +41 41 349 33 11 technik-architektur@hslu.ch https://www.hslu.ch/
EMPA Abteilung Akustik	Luftschall- und Trittschalldämmung im Prüfstand Schallabsorption im Hallraum Lärm von gebäudetechnischen Anlagen im Labor Eine Viel von weiterer akustischer und vibroakustischer Messtechnik	EMPA Abteilung Akustik Überlandstrasse 129 8600 Dübendorf +41 58 765 11 11 https://www.empa.ch/web/s509

Tabelle 2.2: Buchbare Akustiklabore in der Schweiz (Auswahl)

Literatur

- [1] RTW Aachen. *ITA Toolbox*. URL: <https://www.ita-toolbox.org/>. (accessed: 03.2026).
- [2] NTi Audio. *Schallpegelmesser, Messequipment*. URL: <https://www.nti-audio.com/>. (accessed: 03.2026).
- [3] Vereinigung kantonaler Lärmschutzfachleute Cercle Bruit Schweiz. *Vollzugsordner*. URL: <https://www.cerclebruit.ch/>. (accessed: 03.2026).
- [4] The Headphones Community. *Diffuse Field: Calculate, Characterize, Calibrate*. URL: <https://forum.headphones.com/t/diffuse-field-calculate-characterize-calibrate/22894>. (accessed: 03.2026).
- [5] Dr Jordan Design. *Spezialist für akustische Messtechnik*. URL: <https://www.akustik-messen.de/>. (accessed: 03.2026).
- [6] Michael Dickreiter u. a. *Handbuch der Tonstudioteknik*. De Gruyter Saur, 2023.
- [7] Schweizerische Eidgenossenschaft. *Lärmschutzverordnung LSV*. URL: https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1987/338_338_338/de. (accessed: 03.2026).
- [8] EMPA. *Das Smartphone als Schallpegelmessgerät*. URL: <https://laerm.ch/laermwissen/apps-tools/>. (accessed: 03.2026).
- [9] Wolfgang Fasold und Eva Veres. *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*. Huss-Medien GmbH, 2003.
- [10] Gfai Tech GmbH. *Lokalisierung von Schallquellen mit der Akustischen Kamera*. URL: <https://www.gfaitech.com/de/>. (accessed: 03.2026).
- [11] GRAS. *Messmikrofone, Online Training*. URL: <https://www.grasacoustics.com/>. (accessed: 03.2026).
- [12] Brüel & Kjær. *Historie der Handschallpegelmesser*. URL: <https://www.bksv.com/de/knowledge/blog/sound/sound-level-meter-history>. (accessed: 03.2026).
- [13] Brüel & Kjær. *Messmikrofone, Messinstrumente, Online Training, Microphone Handbook*. URL: <https://www.hbkworld.com/>. (accessed: 03.2026).
- [14] Dr. Clemens Kuhn-Rahloff. *Schall, Raum und auditive Wahrnehmung*. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2023.
- [15] David T. Blackstock Mark F. Hamilton. *Nonlinear Acoustics*. [https://library.oapen.org/bitstream/20.500.12657/ASA Press, Springer, Open Access, 2024](https://library.oapen.org/bitstream/20.500.12657/ASA%20Press,%20Springer,%20Open%20Access,%202024).
- [16] Metas. *Liste mit bauartgeprüften Geräte*. URL: <https://legnet.metas.ch/legnet2/Eichstellen/certsearch;internal&action=setlang&lang=ge&>. (accessed: 03.2026).
- [17] Metas. *Metas*. URL: <https://www.metas.ch/metas/de/home/fabe/akustik.html>. (accessed: 03.2026).

- [18] Microflown. *Messsysteme basierend auf Schallschnelle-Sensoren*. URL: <https://www.microflown.com/>. (accessed: 03.2026).
- [19] Norsonic. *Schallpegelmesser, Messequipment*. URL: <https://www.norsonic.ch/>. (accessed: 03.2026).
- [20] REW. *Mess-Software*. URL: <https://www.roomeqwizard.com/>. (accessed: 03.2026).
- [21] TU Berlin RTW Aachen TU München. *Communication Acoustics (MOOC)*. URL: <https://www.tu.berlin/qu/studium-und-lehre/lehrangebot/kurse/communication-acoustics-mooc>. (accessed: 03.2026).
- [22] Eberhard Sengpiel. *Forum für Mikrofonaufnahmetechnik und Tonstudioteknik*. URL: <https://sengpielaudio.com/>. (accessed: 03.2026).
- [23] Werner Stalder. *Skript Lärm- und Schallschutz*. URL: <https://stalderlaermschutz.com/>. (accessed: 03.2026).
- [24] Zusammenschluss mehrerer Hochschulen The pyfar developers. *pyfar - python packages for acoustics research*. URL: <https://pyfar-gallery.readthedocs.io/en/latest/>. (accessed: 03.2026).
- [25] Bundesamt für Umwelt BAFU. *Ermittlung und Beurteilung von Industrie- und Gewerbelärm*. URL: <https://www.bafu.admin.ch/de/ermittlung-industrielaerm>. (accessed: 03.2026).
- [26] Bundesamt für Umwelt BAFU. *Methode zur Ermittlung der Aussenlärm-Immissionen bei geschlossenem Fenster*. URL: https://www.bafu.admin.ch/dam/de/sd-web/PkGxWwc4smRi/methode_zur_ermittlungderaussenlaerm-immissionenbeigeschlossenem.pdf. (accessed: 03.2026).
- [27] Bundesamt für Verkehr BAV. „Bericht Monitoring Eisenbahnlärm, Jahresbericht 2015“. In: (2015). URL: https://www.cerclebruit.ch/enforcement/4/BAV_Monitoring%20SB%202015.pdf. (accessed: 03.2026).
- [28] Flughafen Zürich. *Lärmmonitoring – Messstellen, Lärmreduktion und FAQ*. URL: <https://www.flughafen-zuerich.ch/de/unternehmen/verantwortung/laerm-und-schallschutz/laermmonitoring>. (accessed: 03.2026).