

Schallpegelmessungen mit Drohnen – Ein Widerspruch?

Felix Wachter¹, Andreas Rupp², Michael Plitzner³

¹ *Forschungszentrum Allgäu, 87435 Kempten, E-Mail: felix.wachter@hs-kempten.de*

² *Forschungszentrum Allgäu, 87435 Kempten, E-Mail: andreas.rupp@hs-kempten.de*

³ *ECC-ProBell, 87435 Kempten, E-Mail: michael.plitzner@hs-kempten.de*

Abstract

Das Europäische Kompetenzzentrum für Glocken ECC-ProBell® an der Hochschule Kempten forscht seit dem Jahr 2005 an Glocken. Im Institut werden immer wieder Fragestellungen zu Geräuschemission aus Kirchtürmen behandelt. Schallschutz Läden unterschiedlicher Materialien, Strukturen und Anordnungen bieten sich zur Steuerung der Emissionen an. Als Basis für eine zuverlässige Bewertung der Ergebnisse solcher Maßnahmen können Lärmpegelmessungen im direkten Außenbereich von Kirchtürmen dienen. Im vorliegenden Beitrag wird eine Studie zu Potenzialen und Schwierigkeiten vorgestellt, bei der mit einer Drohne fliegende Schallpegelmessungen um den Kirchturm vorgenommen wurden.

Zunächst wurde ein geeignetes Messsystem konzipiert, dass Tonaufnahmen auf der Drohne erlaubt. Um die Störung der Klanguaufnahmen durch die Drohngeräusche zu mindern, fand ein Mikrofon mit vorgeschaltetem Interferenzrohr und einer starken Richtwirkung Verwendung. Ein geeignetes Messprogramm wurde entwickelt das eine zuverlässige Geräuschpegelmessung unter den besonderen Bedingungen des Glockenläutens erlaubt.

Störgeräusche der Drohne weisen eine Breitband-Rauschcharakteristik sowie Tonhaltigkeit auf. Anteile mit Klangcharakteristik können mit den Rotor-Drehzahlen in Verbindung gebracht werden. Um die Grundfrequenz der Rotor-Drehzahlen bilden sich weitere Harmonische aus. Ein Verfahren zur Korrektur des Geräuschpegels von den Drohngeräuschen wurde erarbeitet und mit Messungen im Labor verifiziert. Messungen um Kirchtürme wurden mit diesem Verfahren analysiert und die Vorgehensweise bewertet. Dabei zeigte sich, dass mit dem verwendeten System Schallpegel externer Quellen ab etwa 80 dB an der Drohne zuverlässig bewertet werden können.

Im Beitrag wird die Vorgehensweise, die Messtechnik und Korrekturverfahren beschrieben. Einflussgrößen werden behandelt, um Randbedingungen für derartige Messungen zu definieren.

Einführung

Zur gleichmäßigen Verteilung der akustischen Emissionen werden nach Stand der Technik Schallläden nach subjektivem Ermessen an die Schallöffnungen angebracht. Zur Beurteilung der Verteilung des Schalls um die Kirchtürme, wurde ein Konzept erarbeitet. Ergebnisse werden anhand von Unterschieden des Schalldruckpegels an verschiedenen Positionen um den Kirchturm erbracht. Es muss sichergestellt werden, dass die Ergebnisse durch die akustischen Emissionen der Drohne nicht verunreinigt werden.

Die Glockenkammer des Kirchturms wird im Weiteren als Punktschallquelle angenommen. Messungen zur Beurteilung der Schallabstrahlung von Punktschallquellen werden auf kugelförmig um die Schallquelle angeordneten Messpunkten getätigt.

Zunächst wurde ein geeignetes Messsystem konzipiert, dass Tonaufnahmen aus Sicht einer Drohne erlaubt. Um die Störung der Klanguaufnahmen durch die Drohngeräusche zu mindern, fand ein Mikrofon mit vorgeschaltetem Interferenzrohr und einer starken Richtwirkung Verwendung. Die maximale Gesamtlast der verwendeten Drohne limitiert den Einsatz beliebiger Messtechnik. Die Audiodaten werden mit einem kompatiblen Audiorecorder aufgenommen und im Nachgang weiterverarbeitet.

Das Aufnahmesystem wurde auf Frequenz und Amplitudentreue, sowie bezüglich dessen Richtwirkung analysiert. Ergebnisse aus diesem Arbeitsschritt wurden zur Nachkalibrierung der aufgezeichneten Daten verwendet. Kalibrierte Datensätze liegen infolgedessen physikalisch interpretierbar als Wechseldrucksignal vor. Gängige Rechenmethoden werden daraufhin verwendet, um den äquivalenten Dauerschalldruckpegel des Schalldrucksignals zu bestimmen.

Ein geeignetes Messprogramm wurde entwickelt das eine zuverlässige Geräuschpegelmessung unter den besonderen Bedingungen des Glockenläutens erlaubt.

Methoden

Der skalare Wert des Schalldruckpegels wird über den äquivalenten Dauerschalldruckpegel (auch Mittelungspegel) bestimmt (1) [1]. Durch die Mittelung über die Gesamtzeit entfällt eine weitere zeitliche Gewichtung.

$$L_{eq} = 10 * \log \left(\frac{\int_{t_0}^t p(t)^2 dt}{T * p_0^2} \right) \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

Über die Pegelsubtraktion werden im Beurteilungspegel [2] Störgeräusche aus dem skalaren Messsignal gerechnet (2).

$$L_r = L_{eq} + K \quad [\text{dB}]$$

$$K = -10 * \log \left(1 - \frac{1}{10^{0,1 * \frac{\Delta L}{\text{dB}}}} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

$$\Delta L = L_{eq, Mess} - L_{eq, Stör} \quad [\text{dB}]$$

Bei der Berechnung der Pegelsubtraktion ist zu beachten, dass der Pegelunterschied zwischen zu messendem Signal und

Störpegel, dessen Verwendungsbereich limitiert. Der Verwendungsbereich liegt laut Definition bei Pegelunterschieden zwischen 3 und 10 dB. Ist das Messsignal lauter als 10 dB ist keine Korrektur notwendig. Unterhalb von 3 dB steigt der durch die Fehlerfortpflanzung bestimmte Messfehler durch den logarithmischen Anstieg des Korrekturfaktors drastisch an. Ist das zu messende Signal kaum noch im Messsignal wahrzunehmen, liegt der Pegel der Störgeräusche nahe dem Pegel des Mischsignals. Messfehler können dann zu negativen Pegeldifferenzen zwischen den Stichproben und weiter zu mathematischen Fehlern bei der Berechnung des Korrekturwertes führen.

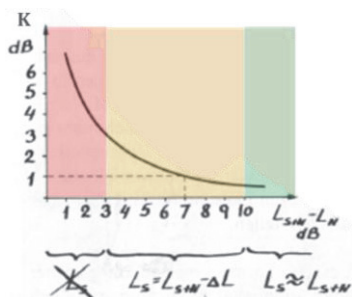


Abbildung 1, Verlauf und Verwendungsbereich der Pegelsubtraktion [3]

Der Verwendung des störgeräuschbereinigten Beurteilungspegels ist eine Inkohärenz zwischen dem Mess- und Störsignal vorausgesetzt. Inkohärente Signale sind zu keiner stabilen Interferenz imstande. Dies ist gegeben, sobald über den gesamten Beobachtungszeitraum zwischen den Signalen kein fester Frequenz- und Phasenbezug gegeben ist. Akustische Emissionen rotierender Systeme korrelieren mit deren Rotationsfrequenzen. Der Flugkontrolller von Drohnen steuert ständig die Rotoren, sodass eine Kohärenz mit einem Signal fester Frequenzen über einen längeren Zeitraum nicht möglich erscheint.

Das System und Vorgehen wurden unter verschiedenen Zuständen im reflexionsarmen Raum untersucht. Die Wirksamkeit des Interferenzrohrmikrofones wurde durch Messungen bei verschiedenen Abständen zur Drohne bestätigt.

Die Intensität von Glockengeläut variiert sowohl zwischen verschiedenen Anschlägen als auch während des Ausklings diskreter Anregung. Aufgezeichnetes Glockengeläut wurde bezüglich einer geeigneter Mess-/Mittlungsdauer ausgewertet.

Im reflexionsarmen Raum wurde das Verhalten der Störgeräusche bei verschiedenen Belastungszuständen untersucht. Unter denselben Bedingungen wurden während des Drohnenfluges Daten von Glockengeläut einer Glocke aufgezeichnet, womit die Funktion des Beurteilungspegels untersucht wurde.



Abbildung 2, Verlauf der Validierungsrouten bei verschiedenen Abständen zum Kirchturm
Quelle: GeoBasis-DE/BKG, Geoimage Austria, Maxar Technologies (2021)

Um die Funktion des Systems und des Vorgehens abschließend validieren zu können, muss nachgewiesen werden, dass Ergebnisse die Änderungen des Schalldruckpegels richtig bewerten. Messungen werden bei verschiedenen Abständen zu einem Kirchturm getätigt. In der Theorie nimmt der Schalldruck im Verhältnis $1/r$ bei Abstandsvergrößerung ab. Bei Abstandsverdopplung entspricht dies einer Reduktion um 6 dB im Schalldruckpegel einer Punktschallquelle [4]. Die Formel (3) beschreibt das Verhalten des Schalldruckpegels in Abhängigkeit des Abstandes zur Schallquelle. Zu diesem grundsätzlichen Verhalten können dämpfende Eigenschaften der Luft die Minderung erhöhen. Nachzuweisen gilt ein doppellogarithmischer Verlauf des Schalldrucks zum Abstand zur Schallquelle. Äquivalent dazu ist ein linearer Verlauf der Schalldruckpegeländerung bei logarithmischer Ansicht der Abstände zum Kirchturm.

$$\Delta L_p = 20 * \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad [\text{dB}] \quad (3)$$

Die Machbarkeit von vergleichenden Messungen mit dem erarbeiteten Vorgehen um Kirchtürme wird an einem Beispielobjekt gezeigt. Die Kirche St. Walburga bei Füssen eignet sich durch unterschiedliche Schallöffnungen und Bebauungen gut, um die Grenzen des Systems zu ergründen.

Resultate

Die Analyse des Glockengeläuts zeigte, dass der durch die Varianz der Glockenanschläge hervorgerufene Messfehler mit der Fenstergröße sinkt. Die Messfehler von Zweiminutenfenstern sind als vernachlässig zu bewerten.

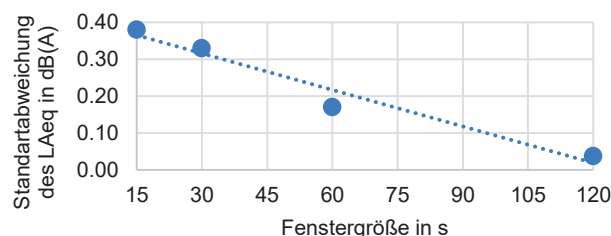


Abbildung 3, Messfehler verschiedener LAeq-Fenstergrößen bei reinem Glockengeläut

In Abbildung 3 beschreibt die Standardabweichung die Streuung der Einzelwerte verschiedener Fenstergrößen um den gemeinsamen Mittelwert des sechsminütigen Glockengeläuts.

Messungen bei verschiedenen Mikrofonpositionen zur Drohne zeigen eine deutliche Reduktion der Störgeräusche bei größerem Einfallswinkel. Abbildung 4 zeigt Störpegel bei verschiedenen Abständen des Richtmikrofons zur Drohne. Die Abstände wurden in den Winkel zwischen Mikrofon und der nächsten Rotorspitze bei einem Drehpunkt um das Mikrofonmembran überführt. Bei finaler Lage des Mikrofons bei etwa 100° ist die Wirkung des Interferenzrohres deutlich zu erkennen. Das Mikrofondatenblatt und selbst aufgezeichnete Validierungsmessungen zeigen eine anfängliche Richtwirkung bei etwa 15° Eintrittswinkel. Daraus ist abzuleiten, dass Störgeräusche von Mikrofonen

ohne Richtwirkung deutlich höher in die Signalaufzeichnung miteingehen.

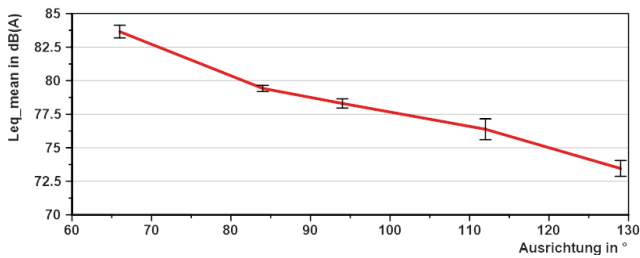


Abbildung 4, Störpegelminderung der Messdaten bei unterschiedlichen Mikrofonauslenkungen bis zur nächsten Rotorspitze

Abbildung 5 zeigt einen Ausschnitt an Emissionen der Drohne, sowie die modellhafte Nachbildung der klanghaften Anteile durch einen Zusammenhang zur Rotorfrequenz. Es bilden sich Harmonische zu diesen Grundfrequenzen aus.

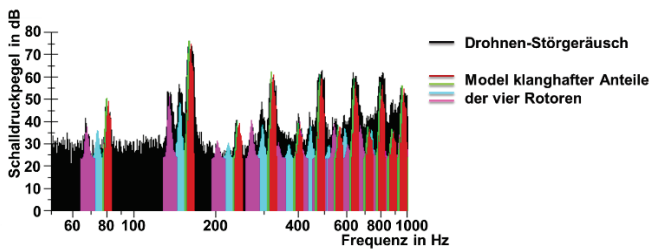


Abbildung 5, Klanghafte Anteile der Störgeräusche und modellhafte Nachbildung im Frequenzbereich

Drohngeräusche bei verschiedenen Belastungszuständen zeigen keine eindeutige Änderung im Mittelungspegel. Emissionen im A-gewichteten Mittelungspegel fallen deutlich geringer aus. Hier fällt auf, dass Geräusche mit Zusatzgewicht abweichen. Die Rotorfrequenzen der Drohne erhöhen sich bei Lastzunahme. Dominierende akustische Emissionen verschieben sich in Frequenzbänder, in denen die A-Gewichtung mit einer geringeren Amplitudenminderung eingeht, wodurch die Gesamtlautheit höher beurteilt wird. Akustische Emissionen variierender Belastungen zeigen keinen signifikanten Unterschied zu einem unbelasteten Flug. Die Ergebnisse der Messungen im reflexionsarmen Raum können der Abbildung 6 entnommen werden.

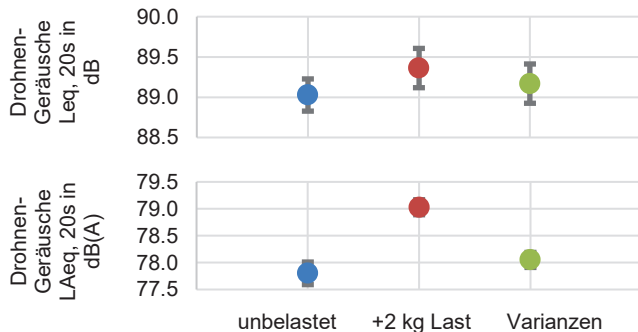


Abbildung 6, Drohngeräusche verschiedener Belastungsprofile im linearen (oben) und A-gewichteten (unten) äquivalenten Dauerschalldruckpegel

Abbildung 7 zeigt Ergebnisse des Beurteilungspegels bei Messungen von Glockengeläut des fliegenden Systems im reflexionsarmen Raum. Im A-gewichteten Signal liegen

Pegelunterschiede des Mess- zum Störsignal oberhalb des Anwendungsbereichs (>10 dB) vor. Wird der Beurteilungspegel dennoch berechnet, sind kaum Änderungen des Ergebnisses zum Messpegel zu sehen. Im Signal mit linearem Frequenzgang liegen Pegelunterschiede mitten im Anwendungsbereich der Formel. Korrekturen sind deutlich in Richtung der Messwerte reiner Glockenemissionen zu erkennen. Innerhalb sowie außerhalb des Anwendungsbereichs der Pegelkorrektur sind Abweichungen des Ergebnisses zum Referenzwert von etwa 1 dB anzunehmen.

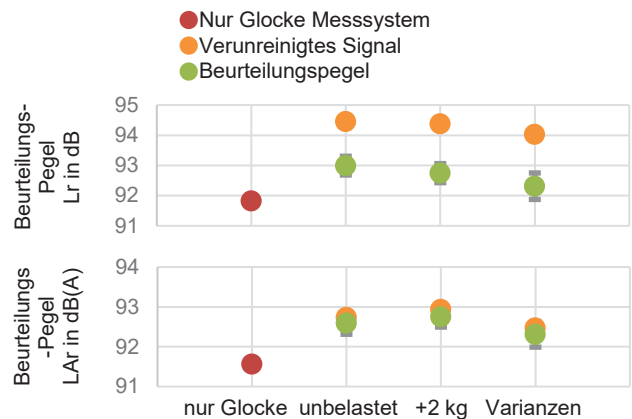


Abbildung 7, Beurteilungspegel unter verschiedenen Drohnenbelastungen im linearen (oben) und A-gewichteten (unten, außerhalb des Anwendungsbereichs der Pegelsubtraktion) äquivalenten Dauerschalldruckpegels

Störgeräusche, die während Flügen unter realen Bedingungen bei deutlich wahrzunehmenden Böen aufgezeichnet wurden, zeigen im Wechselschalldruck einen Amplitudenanstieg während anliegender Windgeschwindigkeiten oberhalb von etwa 2 m/s. Hier wurde der Grenzwert für weitere Messungen unter Realbedingungen gesetzt. Der Verlauf der Messwerte kann Abbildung 8 entnommen werden.

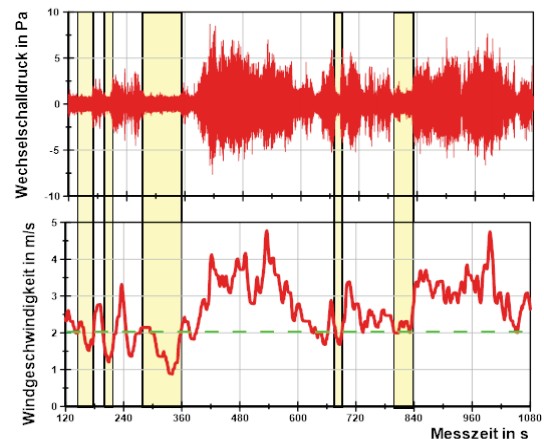


Abbildung 8, Amplitudenanstieg des Wechselschalldrucks bei Windgeschwindigkeiten oberhalb von 2 m/s während fliegenden Messungen

Abbildung 9 zeigt oben eine geringere Anfälligkeit des Messsystems gegenüber dem Wind im A-gewichteten Signal. Messungen bei niederen Windgeschwindigkeiten (unten) zeigen keine eindeutig zu identifizierende Änderung der Messpegel. Aufgrund notwendiger dauerhaft geringer

Windbedingungen wurden die beiden Verläufe an unterschiedlichen Orten und Tagen aufgezeichnet. Durch veränderte Umgebungsbedingungen und Aufbauten sind die beiden Messreihen nicht direkt miteinander vergleichbar.

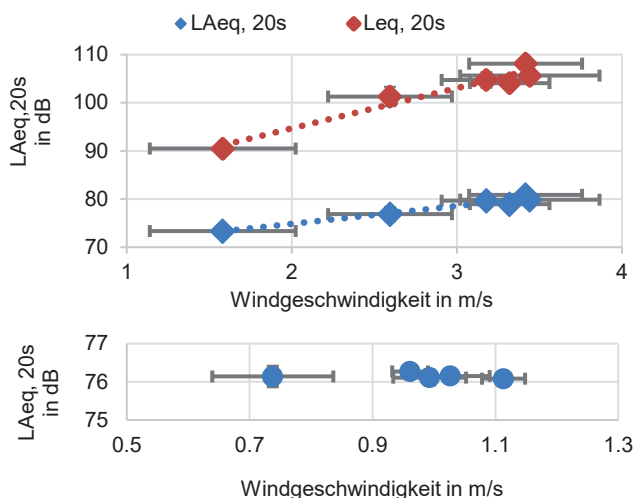


Abbildung 9, linear überlagernde Wirkung des Windes auf die Störgeräusche (oben) keine signifikante Änderung des Pegels bei geringen Windgeschwindigkeiten (unten)

Daten der Validierungsmessungen bei verschiedenen Abständen zur Kirchturmmitte wurden in Abbildung 10 auf logarithmisch angeordneten Abständen geplottet. Amplituden zeigen die Pegeldifferenz zum ersten Messpunkt. Die reinen Mittelwertpegel nehmen entgegen dem theoretischen Verlauf keine Linearität an. Berechnete Beurteilungspegel konnten an den ersten beiden Messpunkten innerhalb des Anwendungsbereiches bestimmt werden. Werte der nächsten beiden Punkte lagen unterhalb der Misch-/Störpegeldifferenz von 3 dB. Der letzte Punkt führte durch negative Pegeldifferenzen der Stichproben zu einem mathematischen Fehler. Auffällig ist der ansteigende Fehler bei Unterschreitung der 3 dB-Grenze. Dennoch ist ein eindeutiges lineares Verhalten der Ergebnisse zu sehen. Zum Vergleich wurde ein an die erste Pegeldifferenz von 7 dB bei Abstandsverdopplung angepasster Verlauf geplottet.

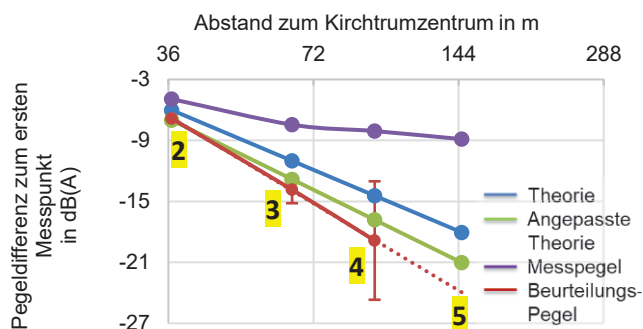


Abbildung 10, Validierungsdaten bei verschiedenen Abständen zum Kirchturm

Abbildung 11 zeigt A-gewichtete Beurteilungspegel um einen Kirchturm. Eingegangene Mittelwertpegel der Messdaten wurden über drei 40-Sekunden Messfenster berechnet. Störgeräusche wurden anhand von drei 20-Sekunden Messfenster bestimmt. Auf der östlichen Seite konnten bei unterschiedlichen Positionen hochwertige

Ergebnisse erbracht werden. Nach unten gerichtete Schallläden begründen eine geringere Minderung unten liegender Schallpegel im Vergleich mit oberen Werten.

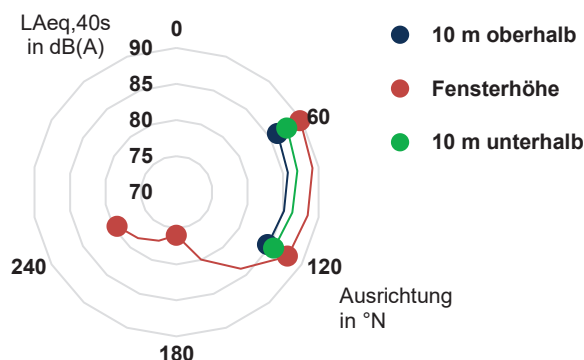


Abbildung 11, Ergebnisse einer Beispiel-Hüllkugelmessung am Kirchturm der Pfarrei St. Walburga

An der Süd- und Westseite ist oberhalb des Fensters der Anwendungsbereich des Beurteilungspegels unterschritten worden. Hier führen Korrekturberechnungen zu mathematischen Fehlern. Auf dieser Seite liegen zwei kleinere durch Holzbarrikaden verschlossene Schallöffnungen. Unterhalb des Fensters konnten die Punkte durch Bebauungen nicht angefliegen werden. Im Westen liegt eine kleine Schallöffnung. Hier ist ein Anstieg des Pegels zu erkennen. Messfehler liegen unterhalb von 0,22 dB.

Diskussion

Störpegel der Drohne weisen unter Realbedingungen einer Messreihe keine signifikanten Unterschiede auf. Messdaten des Systems verschiedener Tage variieren in der Amplitude, wodurch der Störpegel vor jeder Messung erneut aufgezeichnet werden muss. Zusätzliche Störungen durch den Wind können ab Geschwindigkeiten von 2 m/s im Messsignal identifiziert werden. Oberhalb dieser Schwelle sind Messwerte nicht mehr ohne weiteres zu verwenden. Der störgeräuschbereinigte Beurteilungspegel findet Verwendung. Ergebnisse zeigen auch außerhalb des definierten Anwendungsbereiches qualitativ richtig zu bewertende Pegeländerungen. Um die Güte der Ergebnisse beurteilen zu können muss der Fehler des Beurteilungspegels bestimmt werden. Eine A-Gewichtung der Messwerte erweitert das Einsatzgebiet des Systems. Messungen an Kirchtürmen mit gängigen Schallöffnungen und angebrachten Schallläden können realisiert werden.

Referenzen

- [1] Mittelung von Schallpegeln, DIN 45641, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 1990-06-00.
- [2] Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen: Teil 1: Geräuschmissionen in der Nachbarschaft, DIN 45645-1, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 1996-07-00.
- [3] H. V. Günther, Technische Akustik. - Ausgewählte Kapitel. Esslingen: expert Verlag, 1994.
- [4] W. M. Willems, K. Schild, and S. Dinter, Eds., Vieweg Handbuch Bauphysik Teil 2: Schall- und Brandschutz, Fachwörterglossar deutsch-englisch, englisch-deutsch. Wiesbaden: Vieweg, 2006.