

Ein neues Verfahren zur Berechnung der Zusatzdämpfung durch Waldstücke in technischen Schallausbreitungsmodellen

Karl-Wilhelm Hirsch, Frank Hammelmann

Cervus Consult, Willich, consult@cervus.de

Einleitung

Lärmschutz durch Wälder besteht – wenn man so will – aus dem Schallschutz, d.h. aus der tatsächlichen Minderung von Immissionspegeln, und aus einem natürlichen Sicht- und Staubschutz, d.h. aus einer Wirkung auf die Moderatoren der Lärmempfindung. Man kann folgern, dass ein Waldstück bei gleicher Pegelminderung gegenüber technischen Bauten des Schallschutzes zusätzlich Vorteile bietet. Dieser Aspekt macht den Lärmschutz durch ein Waldstück gerade dann attraktiv, wenn Lärmschutz in naturnaher Umgebung erforderlich wird. Dennoch wird die Lärmschutzfunktion von Wäldern bzw. Waldflächen im Rahmen einer Immissionsprognose nur selten berücksichtigt oder bei der Lärminderungsplanung als Lärmschutzmaßnahme vorgeschlagen.

Für die Berechnung der Pegelminderung, genauer der Zusatzdämpfung durch ein Waldstück, wird im Anhang A (informativ) der DIN ISO 9613 ein Verfahren vorgeschlagen, das neben anderen geometrischen Nebenbestimmungen auf die Durchdringung des Waldbestandes durch einen Kreisbogen mit dem Radius 5000 m von der Quelle zum Empfänger abstellt. Ein Bewuchs ist dabei als Wald anzusehen, wenn „es unmöglich ist, über eine kurze Strecke durch den Bewuchs hindurchzusehen“ (DIN ISO 9613). Das hier vorgestellte Waldmodell ersetzt diesen Ansatz so, dass andere Krümmungsradien, eine bewuchsspezifische Durchgangsdämpfung, die Höhe des Waldbestandes und eine Folge von unterschiedlichen Waldstücken sachgerecht berücksichtigt werden können.

Zur Entwicklung des Waldmodells

In [1] und [2] wird von bidirektionalen Pfadmessungen berichtet, die aufzeigen, dass Waldstücke im Ausbreitungspfad sowohl für den A- und C-bewerteten Expositionspegel, als auch für den Spitzenpegel zu einer signifikanten, zusätzlichen Ausbreitungsdämpfung führen. Diese zusätzliche "Walddämpfung" kann in Schallausbreitungsmodellen nicht vernachlässigt werden, von denen eine Prognoseunsicherheit von weniger als 3 dB erwartet wird. Dies gilt auch für Modelle der Lärmkartierung und Aktionsplanung.

In [1] werden sowohl Messergebnisse für einen dichten Nadelwald als auch für einen dichten Laubwald vorgestellt, die über einen zusammenhängenden Zeitraum von mehreren Tagen zeigen, dass pauschal bei gleichen geometrischen Abmessungen der Waldstücke davon auszugehen ist, dass Nadelwälder stärker dämpfen als Laubwälder. Es wurde inzwischen ebenfalls nachgewiesen, dass der Einfluss der Belaubung nur für so hohe Frequenzen signifikant sein wird, die bei typischen Abständen und typischen Geräuschen nicht pegelbestimmend sind.

Das hier vorgestellte Waldmodell zur Ergänzung technischer Schallausbreitungsmodelle wurde auf der Grundlage dieser Messungen und aus theoretischen und empirischen Studien der vielfältigen Phänomene des Einflusses eines Waldstückes auf die Schallausbreitung entwickelt. Das Waldmodell berücksichtigt dabei insbesondere die Anforderungen bei der Lärmkartierung und für ein Lärmmanagement. Die Wahl der Eingangsparameter orientiert sich deshalb auch an der Verfügbarkeit der Daten für große Flächen. Auf eine detaillierte Begründung des Ansatzes muss hier verzichtet werden.

Die im Folgenden vorgestellten Formeln und Bezeichnungen orientieren sich an der Formulierung des Schallausbreitungsmodells der Lärmmanagementsrichtlinie [3]. In Tab. 1 sind die wesentlichen Begriffe und Formelzeichen zusammengestellt.

Konzept des Waldmodells

Abb. 1 skizziert den Grundgedanken des Modells. Das Modell geht davon aus, dass Schall, der den Empfänger erreicht, nur aus einem bestimmten Winkelbereich des zur Horizontalen gemessenen Abstrahlwinkels α stammen kann. Im Beispiel in Abb. 1 ist dies der Bereich von 0° bis 15° . Im Falle von Querwind bleibt dieser Bereich stets ein Sektor (gerade Strahlen). Im Falle von Mitwind (nach unten gekrümmte Kreisstrahlen) verengt sich dieser Sektor mit kleiner werdendem Krümmungsradius. Im Falle von Gegenwind weitet sich der Sektor entsprechend auf.

Im Abstand des Waldrandes wird der durch den gesamten Sektor gegebene ‚Gesamtstrahl‘ in einen ‚Freistrah‘ und einen ‚Waldstrahl‘ nach Maßgabe der Waldhöhe und der Höhe des Sektors über dem Waldrand aufgeteilt. Der Freistrah kennzeichnet den Schallanteil, der sich oberhalb des Waldes ungedämpft ausbreiten kann; der Waldstrahl entsprechend den Anteil, der durch den Wald dringt und einer Zusatzdämpfung proportional zur Tiefe des Waldstückes und einem waldspezifischen Absorptionskoeffizienten unterliegt.

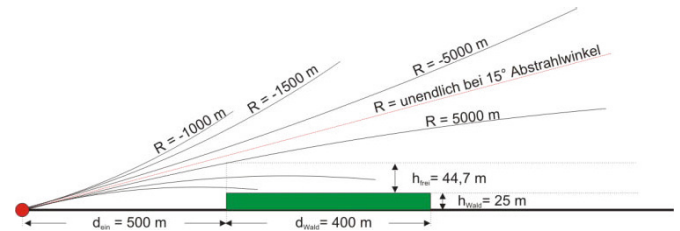


Abb. 1 Veranschaulichung der Aufteilung der Schallbeiträge bei Anwesenheit eines Waldstückes im Ausbreitungspfad

In Abb. 1 ist diese Aufteilung für einen Krümmungsradius von 5000 m dargestellt. Es ergibt sich bei der hier unterstellten Waldhöhe von 25 m und einem Abstand von 500 m vom Waldrand eine freie Höhe des Sektors oberhalb des Waldes von 44,7 m. Die Schallanteile sind entsprechend dem Verhältnis 44,7:25 zwischen Freistrah und Waldstrahl aufzuteilen. Nach getrennter Schallausbreitungsrechnung für beide Strahlen werden im Empfänger die sich ergebenden Schallanteile des Freistrahls und des Waldstrahls energetisch addiert.

Waldstück	bewaldete Fläche mit konstanten forstlichen Eigenschaften
Freistrah	die Fläche zwischen einer Geraden mit dem Grenzwinkel α in der Quelle und dem Kreisbogen mit dem Radius R , der Quelle und Immissionsort verbindet, der den Waldbestand gerade am Waldrand berührt, ohne ihn zu schneiden.
Waldstrahl	der Strahl unterhalb des Freistrahls bis zur Erdoberfläche.
K_{lin}	die längenbezogene Dämpfung des Waldstückes
h_{Wald}	die mittlere Höhe des Waldes im Waldstück
d_{ein}	der Abstand der Quelle vom Waldrand in Richtung Empfänger
d_{aus}	der Abstand des Empfängers vom Waldrand in Richtung Quelle
d_{Wald}	die Länge des Streckenabschnitts durch das Waldstück
h_Q	Höhe der Quelle
h_E	Höhe des Empfängers
α	Abstrahlwinkel
R	Krümmungsradius

Tab. 1 Definitionen zum Waldmodell

Die Betrachtungen, die oben für die Verhältnisse zwischen der Quelle und dem Waldrand skizziert wurden, gelten aus Reziprozitätsgründen auch für den Empfänger im Bezug zu dem ihm zugewandten Waldrand. Die Geometrie, die den jeweils höchsten Anteil des Waldstrahls ergibt, ist maßgebend.

In Abb. 1 ist aus Gründen der Übersichtlichkeit die Höhe $h_Q = 0$ m angenommen und deshalb nicht eingetragen. In der Modellgeometrie kann diese Höhe jeweils dadurch berücksichtigt werden, dass die Waldhöhe h_{Wald} durch die effektive Waldhöhe $h_{Wald,eff}$ nach den folgenden Formeln für die Quellseite (links hochgestellter Index Q) bzw. die Empfängerseite (links hochgestellter Index E) ersetzt wird:

$${}^Q h_{Wald,eff} = h_{Wald} - h_Q \quad (1)$$

$${}^E h_{Wald,eff} = h_{Wald} - h_E \quad (2)$$

Die Höhen $h_{Wald,eff}$ an der Quellseite bzw. an der Empfängerseite sind auf 0 m zu begrenzen, wenn Werte kleiner 0 m für $h_{Wald,eff}$ berechnet werden.

In einem ersten Schritt erfolgt die Berechnung der Strahlhöhe des freien Strahls h_{frei} eines unter einem Winkel von α abgestrahlten Kreisstrahls oberhalb der Quelle (${}^Q h_{frei}$) und dem Empfänger (${}^E h_{frei}$) zugewandten Waldrandes. Folgende Fälle sind zu unterscheiden:

1. Fall: $R \geq 0$ und $d_{ein} \leq R \sin(\alpha)$, bzw. $d_{aus} \leq R \sin(\alpha)$

(Mitwind, der Kreisbogen erreicht den Waldrand)

$${}^Q h_{frei} = -R \cos(\alpha) + \sqrt{R^2 - (d_{ein} - R \sin(\alpha))^2} - {}^Q h_{Wald,eff} \quad (3)$$

$${}^E h_{frei} = -R \cos(\alpha) + \sqrt{R^2 - (d_{aus} - R \sin(\alpha))^2} - {}^E h_{Wald,eff} \quad (4)$$

2. Fall: $R \geq 0$ und $d_{ein} > R \sin(\alpha)$, bzw. $d_{aus} > R \sin(\alpha)$

(Mitwind, der Kreisbogen des Strahls erreicht den Waldrand nicht)

$${}^Q h_{frei} = R(1 - \cos(\alpha)) - {}^Q h_{Wald,eff} \quad (5)$$

$${}^E h_{frei} = R(1 - \cos(\alpha)) - {}^E h_{Wald,eff} \quad (6)$$

3. Fall: $R < 0$ und $d_{ein} \leq R(1 - \sin(\alpha))$, bzw. $d_{aus} \leq R(1 - \sin(\alpha))$

(Gegenwind, der Kreisbogen erreicht den Waldrand)

$${}^Q h_{frei} = -R \cos(\alpha) - \sqrt{R^2 - (d_{ein} - R \sin(\alpha))^2} - {}^Q h_{Wald,eff} \quad (7)$$

$${}^E h_{frei} = -R \cos(\alpha) - \sqrt{R^2 - (d_{aus} - R \sin(\alpha))^2} - {}^E h_{Wald,eff} \quad (8)$$

4. Fall: $R < 0$ und $d_{ein} > R(1 - \sin(\alpha))$, bzw. $d_{aus} > R(1 - \sin(\alpha))$

(Gegenwind, der Kreisbogen erreicht den Waldrand nicht)

$${}^Q h_{frei} = R \cos(\alpha) - {}^Q h_{Wald,eff} \quad (9)$$

$${}^E h_{frei} = R \cos(\alpha) - {}^E h_{Wald,eff} \quad (10)$$

Die Höhen h_{frei} an der Quellseite bzw. an der Empfängerseite sind auf 0 m zu begrenzen, wenn Werte kleiner 0 m berechnet werden.

Die Seite mit dem höheren Waldeinfluss bestimmt die maßgebliche Höhe h_{frei} und die maßgebliche Höhe $h_{Wald,eff}$.

$$h_{frei} = \begin{cases} {}^Q h_{frei}, & \text{falls } \frac{{}^Q h_{Wald,eff}}{{}^Q h_{frei} + {}^Q h_{Wald,eff}} \geq \frac{{}^E h_{Wald,eff}}{{}^E h_{frei} + {}^E h_{Wald,eff}} \\ {}^E h_{frei}, & \text{falls } \frac{{}^Q h_{Wald,eff}}{{}^Q h_{frei} + {}^Q h_{Wald,eff}} < \frac{{}^E h_{Wald,eff}}{{}^E h_{frei} + {}^E h_{Wald,eff}} \end{cases} \quad (11)$$

$$h_{Wald,eff} = \begin{cases} {}^Q h_{Wald,eff}, & \text{falls } \frac{{}^Q h_{Wald,eff}}{{}^Q h_{frei} + {}^Q h_{Wald,eff}} \geq \frac{{}^E h_{Wald,eff}}{{}^E h_{frei} + {}^E h_{Wald,eff}} \\ {}^E h_{Wald,eff}, & \text{falls } \frac{{}^Q h_{Wald,eff}}{{}^Q h_{frei} + {}^Q h_{Wald,eff}} < \frac{{}^E h_{Wald,eff}}{{}^E h_{frei} + {}^E h_{Wald,eff}} \end{cases} \quad (12)$$

Dann ergibt sich die Walddämpfung D_{Wald} nach folgender Formel:

$$D_{Wald} = -10 \lg \left(\frac{h_{frei}}{h_{frei} + h_{Wald,eff}} + \frac{h_{Wald,eff}}{h_{frei} + h_{Wald,eff}} 10^{\frac{d_{Wald} K_{lin}}{10000 \text{ dB}}} \right) \quad (13)$$

Wenn $h_{frei} = 0$ m und $h_{Wald,eff} = 0$ m, dann ist keine Walddämpfung vorhanden ($D_{Wald} = 0$ dB).

Die Gleichungen machen auch den Rechenaufwand deutlich, der je Waldstück erforderlich ist. Dieser Rechenaufwand ist im Vergleich zur Bestimmung der Geometrie Größen d_{ein} und d_{aus} aus der Schnittlinie des Waldstück-Polygons und des Streckenabschnitts zwischen Quelle und Empfänger eher gering.

In den Fällen, in denen zwei oder mehrere Waldstücke im Schallausbreitungspfad liegen oder wenn das Waldstück geometrisch so ausgebildet ist, dass der Waldstrahl das Waldstück zwischendurch

verlässt, ergeben sich mehrere Waldabschnitte. Für die Berechnung mehrerer Waldabschnitte w sind weitere Regeln für das Waldmodell aufzustellen. Folgende Regeln können bei Folgen von Waldstücken mit ähnlichen Waldhöhen angewendet werden, führen aber beispielsweise bei Emissions- oder Immissionsorten im Wald zu nicht sachgerechten Aussagen:

1. Bei der Bestimmung der Freistrahllhöhe h_{frei} und der effektiven Waldhöhe $h_{Wald,eff}$ ist jeweils das Waldstück maßgebend, das den höchsten Einfluss des Waldes liefert. Dies können unterschiedliche Waldstücke sein.
2. Die Dämpfung des Waldstrahls ist bei einem einzigen Waldstück proportional zum K_{lin} des Waldstückes und zu der Strecke des Strahls durch das Waldstück d_{Wald} . Folgen mehrere Waldstücke hintereinander, können deren Beiträge nur addiert werden, solange die Waldhöhen gleich sind. Unterscheiden sich die Waldhöhen, lässt sich dieser Einfluss über eine Gewichtung des Beitrags eines Waldstückes berücksichtigen. Die Gewichtung ist gerade das Verhältnis der Waldhöhe $h_{Wald,eff,w}$ des Waldstückes w zu der effektiven Waldhöhe $h_{Wald,eff}$.

Für eine Folge von Waldstücken ergibt sich dann die Walddämpfung D_{Wald} durch eine einfache Erweiterung der Gleichung (13):

$$D_{Wald} = -10 \lg \left(\frac{h_{frei}}{h_{frei} + h_{Wald,eff}} + \frac{h_{Wald,eff}}{h_{frei} + h_{Wald,eff}} 10^{\frac{\sum [h_{Wald,eff,w} \cdot d_{Wald,w} \cdot K_{lin,w}]}{h_{Wald,eff} 10000 \text{ dB}}} \right) \quad (14)$$

Wenn $h_{frei} = 0$ m und $h_{Wald,eff} = 0$ m, dann ist auch hier keine Walddämpfung vorhanden ($D_{Wald} = 0$ dB).

Die Möglichkeit, eine Folge unterschiedlicher Waldstücke hintereinander sachgerecht zu berücksichtigen, ist eine wesentliche Eigenschaft des Waldmodells, die gerade dann essentiell ist, wenn großflächig, z.B. bei der Lärmkartierung, gerechnet werden soll. Die obigen Regeln reichen aber nicht aus, um das Problem in allen Fällen zu lösen.

Dämpfungskoeffizienten K_{lin}

Die Bestimmung des Dämpfungskoeffizienten K_{lin} ist eine forstlich-akustische Herausforderung. Erste Ansätze, diesen Koeffizienten mit einer sogenannten „Waldformel“ aus klassierten, rein forstlichen Kenngrößen des Waldstückes zu schätzen, sind durchaus vielversprechend. Für den Einsatz im Rahmen des Lärmmanagements auf Schießplätzen nach [3] finden weitere Studien statt.

Aus den oben zitierten Messungen lässt sich für Knalle mit einem spektralen Schwerpunkt bei ca. 300 Hz ein K_{lin} von 12 dB/km für dichten Nadelwald und 6 dB/km für dichten Laubwald begründen. Der Koeffizient wird zu höheren Frequenzen ansteigen. Da der Koeffizient eine Durchgangsdämpfung darstellt, lässt er sich durch Dämpfungsmessungen über im Waldstück bestimmen.

Dieses Waldmodell wurde inzwischen in das Schallausbreitungsmodell für Waffenknalle der Lärmmanagementrichtlinie der Bundeswehr [3] optional aufgenommen. Im Rahmen der ständigen Überwachungsmessungen für das Lärmmanagement muss das Waldmodell – insbesondere der Ansatz für eine Folge von Waldstücken im Ausbreitungspfad – weiter validiert werden.

Verweise

- [1] Trimpop, M., Hirsch, K.-W.: „Lärmschutz durch Wald – Teil 1, Bestimmung der Schallpegelminderung durch Pfadvergleichsmessungen“, Fortschritte der Akustik DAGA '2010; DPG GmbH Bad Honnef S.167-168
- [2] Hirsch, K.-W.; Trimpop, M.: „Lärmschutz durch Wald – Teil 2, Forstliche Aspekte bei der Schallausbreitungsrechnung“, Fortschritte der Akustik DAGA '2010; DPG GmbH Bad Honnef S.169-170
- [3] „Richtlinie für das Lärmmanagement auf Schießplätzen (Lärmmanagementrichtlinie - LMR)“, Herausgeber Bundesministerium der Verteidigung