

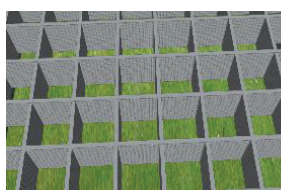
# Bestimmung der Schallminderung durch Rasterdecken auf Schießständen

Karl-Wilhelm Hirsch

Cervus Consult, consult@cervus.de

## Einleitung

Der bauliche Schallschutz auf Schießständen wird in der Regel auf die Minderung der Immissionen der Beiträge der maßgeblichen Schallwege ausgelegt. Dies führt zur gezielten schalltechnischen Behandlung einzelner Bauteile des Schießstandes, z. B. die Belegung der Hochblenden durch Absorber, eine Erhöhung von Wänden und Wällen über das aus Schießsicherheitsgründen hinausgehende Maß oder die Auskleidung des Schützenhauses durch reflexionsmindernde Materialien. In den Fällen, in denen mit schallweg- und bauteilspezifischen Schallschutzmaßen die Immissionen nicht hinreichend gemindert werden können, kann der Schießstand teilweise oder vollflächig durch eine so genannte Rasterdecke abgedeckt werden. Eine Rasterdecke besteht aus Längs- und



Skizze einer Rasterdecke

Querblenden, die eine lichte Abdeckung über einem Schießstand bilden. Die Raster der Rasterdecke haben typische Abmessungen (Länge / Breite / Höhe) von (1 m / 1 m / 1 m). Die Blenden bestehen beispielsweise aus einem 0,1 m dicken Absorber aus Mineralwolle, eingefasst in ein Aluminium-Lochblech.

Das im Folgenden beschriebene Verfahren prognostiziert das Einfügdämpfungsmaß einer Rasterdecke über einem Schießstand. Das Verfahren setzt voraus, dass der Schießstand allseitig durch eine bis zur Oberkante der Rasterdecke reichende Wand eingehaust ist. Das hier als ‚Technisches Modell einer Rasterdecke – TMCC‘ (Technical Model Of A Coffered Ceiling) bezeichnete Verfahren ergänzt das Quellmodell des ‚Leitfaden für die Genehmigung von Standortschießanlagen – LeitGeStand‘ [1]. Im TMCC ist das Einfügdämpfungsmaß abhängig von den Abmessungen und den akustischen Eigenschaften der Rasterdecke, von den Abmessungen des Schießstands und von der Lage und Höhe der Schützenposition.

## Grundsätzliche Vereinfachungen

Das TMCC geht von geraden Strahlen aus, die durch Reflexionen und Transmissionen von unten die Rasterdecke durchdringen. Die Raster bilden grundsätzlich Quader. Die Geometrie des Rasters wird durch seine Breite  $C_w$ , die Länge  $C_l$  und die Höhe  $C_h$  beschrieben. Die Dicke der Absorberelemente – hier manchmal auch als Rasterwangen bezeichnet – wird in den geometrischen Betrachtungen vernachlässigt. In den folgenden graphischen Darstellungen wird stets vereinfachend unterstellt, dass die Länge, die Breite und die Höhe der Rasterwangen gleich sind. In der Regel bestehen zurzeit eingesetzte Decken aus solch kubischen Rastern mit quadratischen Rasterwangen. Das Modell hingegen gilt auch für andere Abmessungen.

Das angewandte Strahlenmodell ist eine massive Vereinfachung, denn die Abmessungen des Rasters sind in der Größenordnung der Wellenlänge des spektralen Energieschwerpunkts eines Mündungsknalls der Handwaffen. Trotz dieses ‚vereinfachenden‘ Ansatzes gelingt es dem Modell mühelos, die Komplexität der Schallausbreitung durch eine Rasterdecke deutlich zu machen. Das vorliegende Modell wurde auf der Grundlage der Ergebnisse einer Messkampagne entwickelt. Es bedarf grundsätzlich einer weiteren Validierung.

Die Anwendung des technischen Modells ist auf die Anforderungen einer Schallausbreitungsrechnung für die für den Immissionsschutz relevante Nachbarschaft eines Schießstandes gerichtet. Deshalb sind Strahlen mit großem Vertikalwinkel nicht bedeutsam. Bei flachen Strahlen ist es dann gerechtfertigt, die Schallquelle durch ein ebenes

Wellenfeld zu beschreiben, und die Aufweitung der Strahlen der eigentlichen Kugelschallquelle zu vernachlässigen.

Eine weitere Vereinfachung betrifft die Betrachtung der Reflexionen. Bei schräger Durchdringung der Rasterdecke erfolgen die Reflexionen im Dreidimensionalen so, dass der Strahl aus der Ebene der Ausbreitungsrichtung (beschrieben durch den Horizontalwinkel  $\varepsilon_s$  nach LeitGeStand) abgelenkt wird. Im technischen Modell werden alle Reflexionen weiterhin dieser Ebene zugeordnet.

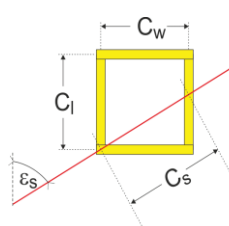


Abb. 1  
Projektion eines Strahls auf die Grundfläche (Basis) der Rasterdecke  
 $\varepsilon_s$  Horizontalwinkel des Strahls  
 $C_l$  Länge des Raster (Abmessung in Schussrichtung)  
 $C_w$  Breite des Rasters (Abmessung quer zur Schussrichtung)  
 $C_s$  Länge der Projektion des Strahls in der Grundfläche

Abb. 1 skizziert einen Strahl in der Aufsicht auf ein Raster einer Rasterdecke, der schräg durch das Raster läuft. Die Reflexionen und Transmissionen werden in der Ausbreitungsebene  $\varepsilon_s$  betrachtet; Reflexionen und Transmissionen werden in einem effektiven Rasterabstand  $C_s$  berechnet.

Für die Berechnung des effektiven Rasterabstands wird der Schallweg von der Quelle zum Empfänger so parallel verschoben, dass er durch eine Ecke des Rasters geht. Für die Bestimmung von  $C_s$  gilt Gl. 1 bzw. Gl. 2

$$C_s = \frac{C_w}{\cos\left(\frac{\pi}{2} - \varepsilon_s\right)} \quad \text{falls } \varepsilon_s > \arctan\left(\frac{C_w}{C_l}\right) \quad \text{Gl. 1}$$

$$C_s = \frac{C_l}{\cos(\varepsilon_s)} \quad \text{falls } \varepsilon_s \leq \arctan\left(\frac{C_w}{C_l}\right) \quad \text{Gl. 2}$$

Aus Abb. 1 ist zu entnehmen, dass  $C_s$  maximal so groß werden kann wie die Länge der Diagonalen der Grundfläche des Rasters.

## Dämpfungseigenschaften eines Rasterelements

Die spezifischen Dämpfungseigenschaften eines Rasterelements werden durch den spektralen Absorptionsgrad und den spektralen Transmissionsgrad angegeben. Der Absorptionsgrad und der Transmissionsgrad lassen sich durch standardisierte Messungen nach DIN CEN/TS 1793-5 bestimmen. Die Messung wird in Terzen für verschiedene Einfallswinkel durchgeführt. Bei den Ausbreitungssituationen beim Einsatz des Absorbers als Rasterelement in einer Rasterdecke ist der Winkelbereich kleiner als  $45^\circ$  ( $90^\circ =$  senkrechter Einfall) des streifenden Einfalls nicht relevant. Zudem ist in dem relevanten Winkelbereich  $45^\circ$  bis  $90^\circ$  die Winkelabhängigkeit nicht signifikant ausgeprägt, so dass für das hier vorgestellte technische Modell einer Rasterdecke es hinreicht, den Mittelwert der Dämpfungsgrade über den relevanten Winkelbereich zu betrachten. Der so bestimmte Absorptions- und Transmissionsgrad ist nicht vergleichbar mit den Werten, die in einem Hallraum bestimmt werden.

Es gelten allgemein für den Zusammenhang zwischen Absorptionsgrad  $\alpha$ , dem Transmissionsgrad  $\tau$ , dem Reflexionsgrad  $\rho$  und dem Verlustgrad  $\sigma$  Gl. 3 und Gl. 4

$$\rho = 1 - \alpha \quad \text{Gl. 3}$$

$$\sigma = 1 - (\rho + \tau) \quad \text{Gl. 4}$$

Zur Sicherstellung der Konsistenz (Energieerhaltung) der in unabhängigen Messungen des Terz-spektralen Absorptionsgrads und Transmissionsgrad, werden die im Verfahren verwendeten Parameter korrigiert.

$$\Gamma_{vm} = \alpha_{vm} + \tau_{vm} \quad \text{Gl. 5}$$

$$\Gamma_v = \Gamma_{vm} \quad \text{falls } \Gamma_{vm} > 1 \quad \text{Gl. 6}$$

$$\Gamma_v = 1 \quad \text{falls } \Gamma_{vm} \leq 1$$

$$\alpha_{vc} = \frac{\alpha_{vm}}{\Gamma_v} \quad \text{Gl. 7}$$

$$\tau_{vc} = \frac{\tau_{vm}}{\Gamma_v} \quad \text{Gl. 8}$$

$$\rho_{vc} = 1 - \alpha_{vc} \quad \text{Gl. 9}$$

$$\sigma_{vc} = 1 - (\rho_{vc} + \tau_{vc}) \quad \text{Gl. 10}$$

In den Gl. 5 bis Gl. 10 bedeuten

- $v$  Index des Terzbandes
- $m$  Index der durch Messung bestimmten Parameter
- $C$  Index der für das TMCC bestimmten Parameter
- $\alpha_{vm}$  der durch Messung bestimmte terzspektrale Absorptionsgrad für die Terz  $v$
- $\tau_{vm}$  der durch Messung bestimmte terzspektrale Transmissionsgrad für die Terz  $v$
- $\rho_{vm}$  der aus der Messung bestimmte terzspektrale Reflexionsgrad für die Terz  $v$
- $\sigma_{vm}$  der aus der Messung bestimmte terzspektrale Verlustgrad für die Terz  $v$
- $\Gamma_{vm}$  der aus der Messung bestimmte Korrekturfaktor
- $\Gamma_{vf}$  der Korrekturfaktor für den Absorptions- bzw. Transmissionsgrad
- $\alpha_{vc}$  der korrigierte terzspektrale Absorptionsgrad für die Terz  $v$
- $\tau_{vc}$  der korrigierte terzspektrale Transmissionsgrad für die Terz  $v$
- $\rho_{vc}$  der korrigierte terzspektrale Reflexionsgrad für die Terz  $v$
- $\sigma_{vc}$  der korrigierte terzspektrale Verlustgrad für die Terz  $v$

Das oktavspektrale Reflexionsmaß  $A_{fR}$  bzw. das Transmissionsmaß  $A_{fT}$  ergeben sich aus Gl. 11 bzw. Gl. 12. Die Summe ist über die Terzen  $v$  zu erstrecken, die zu ihrer Oktave beitragen, gekennzeichnet durch  $v(f)$  in den beiden Gleichungen.

$$A_{fR} = \sum_{v(f)} 10 \lg(\rho_{vc}) \quad \text{Gl. 11}$$

$$A_{fT} = \sum_{v(f)} 10 \lg(\tau_{vc}) \quad \text{Gl. 12}$$

Das oktavspektrale Reflexionsmaß  $A_{fR}$  und das Transmissionsmaß  $A_{fT}$  kennzeichnen im TMCC die akustischen Eigenschaften eines Rasterelements vollständig.

### Dämpfungseigenschaften einer Rasterdecke

Die Schallwege durch eine Rasterdecke mit Reflexionen und Transmissionen an bzw. durch die Rasterwangen hängen entscheidend vom maßgeblichen Vertikalwinkel  $\eta_c$  des auf die Rasterdecke einfallenden Schallstrahls ab. Der maßgebliche Vertikalwinkel  $\eta_c$  hängt von den Abmessungen des Schießstands und von der Lage und Höhe der Schützenposition ab.

In Abb. 2 wird deutlich, dass Strahlen, die mit einem größeren Winkel als der nach Gl. 13 für  $i = 1$  bestimmte Vertikalwinkel der Rasterdecke im Modell unbeeinflusst durchdringen können. Im Folgenden wird  $i$  als Reflexionsordnung bezeichnet. Der berechnete Winkel  $\eta_{c0}$  trennt also den Winkelbereich zwischen keiner und einer Reflexion. Der Winkel  $\eta_{c1}$  trennt den Winkelbereich zwischen einer und zwei Reflexionen.

$$\eta_{c0} \geq \arctan\left(\frac{C_s}{i C_v}\right)$$

Gl. 13

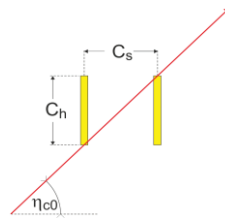


Abb. 2

Strahl ohne Reflexion durch eine Rasterdecke senkrecht zur Schussrichtung

$C_s$  Rasterweite,  
 $C_h$  Rasterhöhe,  
 $\eta_{c0}$  Vertikalwinkel des Strahls

Abb. 3 zeigt die Strahlenverläufe bei flacher werdendem Vertikalwinkel für  $i = 2$  bis  $i = 4$ . Bei dem hier betrachteten kubischen Raster treten unterhalb von ca.  $14^\circ$  bereits mehr als 4 Reflexionen auf.

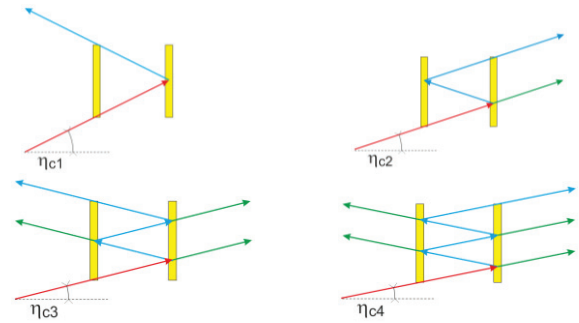


Abb. 3 Strahl mit einer steigenden Anzahl von Reflexionen bei fallendem Erhöhungswinkel

Rot: einfallender Strahl, Blau: Reflexionen, Grün: Transmissionen  
oben links 1 Reflexion, oben rechts 2 Reflexionen,  
unten links 3 Reflexionen, unten rechts 4 Reflexionen

### Dämpfung für ganzzahlige Reflexionsordnung

Jeder mögliche Schallweg durch die Rasterdecke trägt zum Immisionspegel bei. Um das zu verdeutlichen, skizziert Abb. 4 exemplarisch im Falle von 4 Reflexionen unter Beibehaltung (grüner Strahl) bzw. Umkehrung (blauer Strahl) der Ausbreitungsrichtung die Beiträge aus den Nachbarrastern.

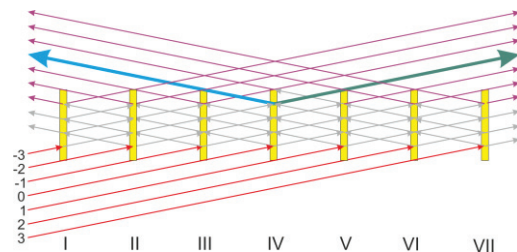


Abb. 4 Strahl mit Reflexionen und Transmissionen aus den Nachbar-Rastern unter Beibehaltung der Ausbreitungsrichtung

Fall 4 Reflexionen nach Abb. 3 unten rechts  
Rot: einfallende Strahlen, Magenta: ausfallende Strahlen

Für jeden Schallweg ist die Ausbreitungsgeschichte durch die Folge der mit römischen Ziffern gekennzeichneten Rasterwangen angegeben. Die Anzahl der möglichen Schallwege  $K_i$  in Abhängigkeit von der Anzahl der überhaupt möglichen Reflexion  $i$  ist durch Gl. 14 angegeben.

$$K_i = 2^i \quad \text{Gl. 14}$$

Die Welt der  $K_i$  teilt sich in jeder Reflexionsordnung hälftig in Strahlen, die die Ausbreitungsrichtung des einfallenden Strahls beibehalten bzw. umkehren. Das Kriterium zur Unterscheidung der beiden Welten ist die Anzahl der Reflexionen: Ist sie ungerade, führt der Weg in umgekehrte Richtung, sonst behält der Weg die Schallausbreitungsrichtung.

Das so genannte Einfügungsdämpfungsmaß nach diesem technischen Modell hat also – wenn man so will – neben einer Dämpfungswirkung in Ausbreitungsrichtung auch eine ‚entdämpfende‘ Wirkung in umgekehrter Schallausbreitungsrichtung. In der dreidimensionalen

Welt verteilt eine Rasterdecke den Schall aus der Ausbreitungsrichtung in Abhängigkeit von der Rastergeometrie und der Reflexions- und Transmissionsdämpfung der Absorberelemente.

Der Beitrag jedes Schallwegs  $k$  wird nach Gl. 15 bestimmt.

$$A_{f,k} = \sum_{P(k)} A_{fR} + \sum_{Q(k)} A_{fT} \quad \text{Gl. 15}$$

In Gl. 15 kennzeichnen die  $A_{fR}$  bzw. die  $A_{fT}$  das nach Gl. 11 bestimmte Reflexionsdämpfungsmaß bzw. nach Gl. 12 bestimmte Transmissionsdämpfungsmaß in Dezibel eines Absorberelements (Rasterwange) bei einmaliger Reflexion bzw. Transmission für das Oktavband mit dem Index  $f$ , vgl. DIN ISO 9613-2 oder LeitGeStand.  $P(k)$  bzw.  $Q(k)$  sind die Anzahl der Reflexionen bzw. Transmissionen auf dem Schallweg  $k$ .

Ist  $P(k)$  gleich 0 oder gerade, dann trägt der Schallweg in Immissionsorten in der Ausbreitungsrichtung  $\varepsilon$  bei, sonst in der umgekehrten Richtung  $\varepsilon + \pi$ . Das Einfügungsdämpfungsmaß einer Rasterdecke  $D_{fM}$  setzt sich deshalb aus dem Transmissionsdämpfungsmaß  $D_{fM,T}$  und dem Reflexionsdämpfungsmaß  $D_{fM,R}$  zusammen.

$$D_{fM,T}(i) = 10 \lg \left( \sum_{k=1}^K \left( 10^{0,1 A_{f,k}} \right) \right) \text{ dB falls } P(k) \text{ gerade} \quad \text{Gl. 16}$$

$$D_{fM,R}(i) = 10 \lg \left( \sum_{k=1}^K \left( 10^{0,1 A_{f,k}} \right) \right) \text{ dB falls } P(k) \text{ ungerade} \quad \text{Gl. 17}$$

Als Formelzeichen für das Einfügungsdämpfungsmaß einer Rasterdecke wird  $D_M$  in Anlehnung an die Symbole der DIN ISO 9613-2 eingeführt, da dieses Maß eng zu den Quelleigenschaften und nicht zu den Ausbreitungseigenschaften gehört, vgl. Gl. 21.

### Dämpfung für beliebige Reflexionsordnungen

Gl. 16 und Gl. 17 gelten für die Fälle, in denen der Vertikalwinkel  $\eta_C$  gleich einem  $\eta_{C_i}$  nach Gl. 13 entspricht. Die Dämpfungsmaße sind also Funktionen der (ganzzahligen) Ordnung  $i$ . Diese Funktionen sind für Ordnungen größer 2 durch eine Gerade mit einer für typische Rasterdecken vernachlässigbarer Unsicherheit ( $< 1$  dB für das Dämpfungsmaß) anzunähern.

Die durch die Regression bei Ordnungen kleiner 3 verursachten signifikanten Abweichungen spielen eine untergeordnete Rolle, weil dann der zugehörige Vertikalwinkel zu Teilersatzquellen und Strahlenwegen gehören, die für den Immissionsschutz keine Bedeutung haben, vgl. Kapitel 5.7.2 des LeitGeStand.

Die Parameter der Geraden,  $a_T$  und  $b_T$  für die Transmissionsdämpfung bzw.  $a_R$  und  $b_R$  für die Reflexionsdämpfung lassen sich durch lineare Regression ermitteln.

$$D_{fM,T}(\psi) = a_T \psi + b_T \quad \text{Gl. 18}$$

$$D_{fM,R}(\psi) = a_R \psi + b_R \quad \text{Gl. 19}$$

In Gl. 18 und Gl. 19 ist mit  $\psi$  eine nicht ganzzahlige, effektive Reflexionsordnungsanzahl eingeführt. Für einen beliebigen Vertikalwinkel  $\eta_C$  lässt sich die zugehörige Reflexionsordnungsanzahl  $\psi_C$  nach Gl. 20 bestimmen.

$$\psi_C = i - \frac{\eta_{C,i+1} - \eta_C}{\eta_{C,i+1} - \eta_{C,i}} \quad \text{mit } \eta_{C,i} \leq \eta_C \leq \eta_{C,i+1} \quad \text{Gl. 20}$$

Bei der Schallausbreitungsrechnung nach DIN ISO 9613-2 ergänzt dieses Einfügungsdämpfungsmaß  $D_{fM}$  entweder als  $D_{fM,T}$  oder als  $D_{fM,R}$  deshalb die Gleichung 3 der Norm für den äquivalenten Oktavband-Dauerschallpegel  $L_{fT}(DW)$ . Dann wird Gleichung 3 zur Gl. 21.

$$L_{fT}(DW) = L_{fW} + D_{fC} + D_{fM} - A_f \quad \text{Gleichung 3 der DIN ISO 9613-2} \quad \text{Gl. 21}$$

Wiederum wird hier die Gleichung der DIN ISO 9613-2 um den Index  $f$  ergänzt.

### Bestimmung des maßgeblichen Vertikalwinkels

Der maßgebliche Vertikalwinkel  $\eta_C$  ist der Winkel unter dem die Schallwege die Rasterdecke von unten erreichen. Dieser Winkel ist

nicht gleichzusetzen mit dem Vertikalwinkel  $\eta_S$  einer Teilersatzquelle nach LeitGeStand.  $\eta_S$  beschreibt den vertikalen Abgangswinkel der Teilersatzquelle nach Reflexionen und Beugungen im Quellmodell des LeitGeStand. Der Schallweg innerhalb des Schießstands, den die Teilersatzquelle repräsentiert, ist bekannt. Der maßgebliche Vertikalwinkel  $\eta_C$  ist deshalb durch ein Ersatzverfahren zu bestimmen.

Ausgangspunkt aller Schallwege im Schießstand ist die Schießgeräuschquelle an ihrem Emissionsort. Der direkte Weg von der Quelle zum Immissionsort führt in Richtung  $\varepsilon_S$  durch die Rasterdecke an der Begrenzung des Schießstands. Sein Winkel ist der maßgebliche Vertikalwinkel.

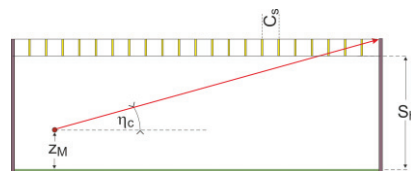


Abb. 5 Zur Bestimmung von  $\eta_C$  Querschnitt durch den Schießstand von der Quelle in Richtung Immissionsort

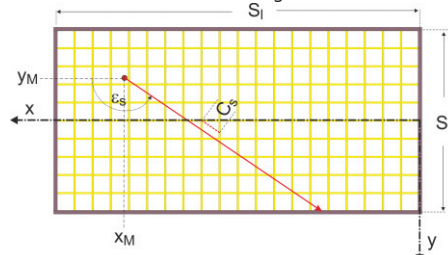


Abb. 6 Zur Bestimmung von  $\eta_C$  Aufsicht auf den Schießstand

Abb. 5 und Abb. 6 stellen den direkten Weg als Strahl vom Emissionsort zur relevanten Oberkante der den Schießstand umfassenden Wand dar. Der Winkel  $\eta_C$  lässt sich bei gegebenem Emissionsort ( $x_M, y_M, z_M$ ) im Schießstandbezugssystem, den Abmessungen des Schießstands, Länge  $S_l$ , Breite  $S_w$  und Unterkante der Rasterdecke  $S_h$  und dem Horizontalwinkel  $\varepsilon_S$  zum Immissionsort geometrisch bestimmen.

Schallwege über Reflexionen an Blenden, Wällen oder Seitenwänden werden flacher sein und deshalb zu einer Unterschätzung der Einfügungsdämpfung bei diesem Verfahren führen. Bodenreflexionen können zu größeren  $\eta_C$  und damit zu einer Überschätzung der Einfügungsdämpfung führen; allerdings sind diese Wege durch die Bodenreflexion selbst in der Regel weniger signifikant als der direkte Weg.

### Unsicherheit

Die Unsicherheit dieses technischen Modells wird im Regelfall bei Mündungsknallen von Handwaffen kleiner 3 dB sein.

### Zusammenfassung

Eine Rasterdecke ist im Schießstandbau eine probate Schallschutzmaßnahme, wenn in der gesamten Nachbarschaft eine Pegelminde- rung von 10 dB bis 15 dB erreicht werden soll. Die Wirkung der Rasterdecke ist abhängig von ihrem Aufbau, den Abmessungen des Schießstands und der Schützenposition ausgeprägt richtungsabhän- gig. Dem vorgestellten Technische Modell TMCC gelingt für die Zwecke des Immissionsschutzes eine plausible Vorhersage des Ein- fügungsdämpfungsmaßes der Rasterdecke und erlaubt zumindest im Ansatz eine bauliche Optimierung ihrer Parameter.

Die messtechnische Validierung des TMCC ist äußerst aufwendig und wird im Zuge des Neubaus von Schießanlagen und Vergleichs- messungen erfolgen müssen.

### Literaturhinweise

- [1] Leitfaden für die Genehmigung von Standortschießanlagen – LeitGeStand, Version 0.96, Herausgeber Länderar- beitsgemeinschaft für Immissionsschutz