

# Berechnung von Mehrfachbeugung bei großen Entfernungen mit strahlbasierten Näherungsverfahren

Wolfgang Probst

Datakustik GmbH, 82205 Gilching, E-Mail: Wolfgang.Probst@Datakustik.de

## Einleitung

Die Verfahren zur Berechnung der Schallausbreitung lassen sich grob in zwei Gruppen einteilen. Die erste Gruppe betrifft die Verfahren, mit denen die Ausbreitung der Schallwellen nachgebildet wird und die – verkürzend – als wissenschaftlich basierte Simulationsverfahren bezeichnet werden können. Die zweite Gruppe sind die strahlbezogenen Engineering-Verfahren, bei denen versucht wird, den funktionalen Zusammenhang zwischen den beeinflussenden Parametern und den gesuchten Zielgrößen mit geeigneten Algorithmen herzustellen und so die wichtigsten Effekte zu berücksichtigen. Für die Berechnung von Umgebungslärm und insbesondere zur Anwendung im gesetzlich geregelten Bereich kommen aufgrund der Komplexität der vorkommenden Szenarien praktisch ausschließlich diese strahlbasierten Engineering-Verfahren zur Anwendung. Es mag für viele isoliert betrachtete Detailprobleme wesentlich genauere wissenschaftlich fundierte Theorien geben, doch deren Kombination bei der erforderlichen Einbeziehung von gegebenen Umweltbedingungen führt oft ins numerische Chaos. Insbesondere im gesetzlich geregelten Bereich und unter Berücksichtigung des verstärkten Trends zur Gesamtlärmbetrachtung ist ein komplettes die gesamte akustische Umweltproblematik umfassendes Berechnungsverfahren von erheblicher Bedeutung und schon aus Konsistenzgründen anzustreben. Beispiele für die genannten strahlbezogenen Engineering-Verfahren sind die ISO 9613-2 [1] sowie das für die Lärmkartierung im Europäischen Rahmen verwendete Verfahren CNOSSOS-EU:2015 [2]. Trotz ihrer vermeintlichen Einfachheit haben sich bei deren praktischer Anwendung Fehler ergeben, die aufzeigen, wie problematisch der Einbau von mehr und mehr Details in derartigen für die breite Anwendung gedachten Verfahren sein kann. Im Folgenden wird mit zwei Beispielen gezeigt, wie derartige Fehler im Nachgang im Zuge der software-technischen Qualitätssicherung behoben werden konnten.

## Die Mehrfachbeugung mit ISO 9613-2

Ein einfaches Beispiel einer fehlerhaften Festlegung ist die Schirmrechnung nach ISO 9613-2.

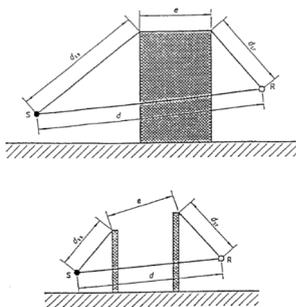


Abbildung 1: Schnittdarstellung zur Schirmrechnung in ISO 9613-2.

Abbildung 1 ist eine Darstellung aus der Norm, wobei die Strecken  $d_{ss}$  und  $d_{sr}$  entsprechend den textlichen Festlegungen die Lote auf die Beugungskanten in dieser Projektion sind. Unter Bezug auf diese Darstellung wird in der Berechnungsformel ein Versatz  $a$  der beiden Lotfußpunkte benötigt. Bei beliebig vielen abschirmenden Objekten sollen dann die zwei „wirksamsten“ Schirmkanten ausgewählt und entsprechend Abbildung 1 in die Berechnung einbezogen werden.

Allerdings wird in der Beschreibung verschwiegen, dass diese Konstruktion nur dann sinnvoll und möglich ist, wenn die beiden Beugungskanten – wie in Abbildung 1 vorausgesetzt – parallel sind. Im Allgemeinen ist dies nicht der Fall, und damit ist diese Konstruktion nicht umsetzbar bzw. führt zu fehlerhaften Ergebnissen.

Im Zuge der Qualitätssicherung des Berechnungsverfahrens ISO 9613-2 bzw. seiner Implementierung in Software nach ISO/TR 17534-3 [3] konnte dies quasi „nachgebessert“ werden.

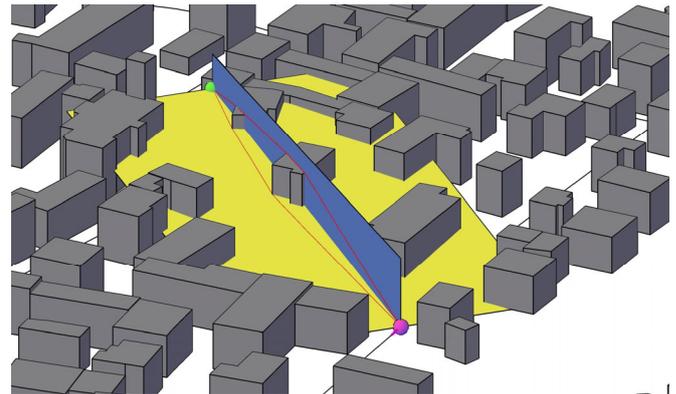


Abbildung 2: Das „nachgebesserte“ Verfahren mit einer Berechnung der kürzesten konvexen Umwege in einer vertikalen Schnittebene (blau) und einer zu ihr senkrechten lateralen Schnittebene (gelb).

Das mit Abbildung 2 dargestellte Verfahren der Umwegberechnung in zwei zueinander senkrechten Schnittebenen, die beide auch die Quelle und den Immissionsort enthalten, mag zwar im Einzelfall nicht den kürzesten und damit bestimmenden Schallweg ergeben, liefert aber eine konsistente und auch in anderen Verfahren seit langem bewährte Lösung des Problems mit hinreichender Genauigkeit der Ergebnisse.

## Die Mehrfachbeugung bei favorablen Bedingungen mit CNOSSOS-EU

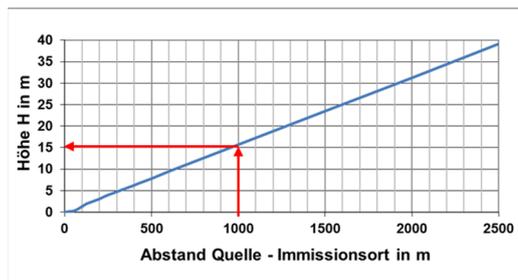
Das Verfahren CNOSSOS-EU:2015 wurde auf der Basis des französischen Verfahrens NMPB:2008 [4] entwickelt und soll in allen Mitgliedländern zur harmonisierten Berechnung der Schallausbreitung bei der vorgeschriebenen Lärmkartierung verwendet werden. Wie in Abbildung 3 für einen Abstand Quelle – Empfänger von 1000 m dargestellt, wird

dabei für favorable Ausbreitungsbedingungen unter Annahme eines vertikalen Temperaturgradienten und damit einer nach oben ansteigenden Schallgeschwindigkeit ein gekrümmter Strahlverlauf berücksichtigt.



**Abbildung 3:** Gekrümmter Strahlverlauf aufgrund eines vertikalen Temperaturgradienten (Für Darstellung  $z/x=15$ )

Wie das Diagramm Abbildung 4 zeigt, steigt der Strahl im Mittelbereich auf eine Höhe von ca. 15 m – er wird somit durch evtl. vorhandene niedrigere Hindernisse nicht blockiert.

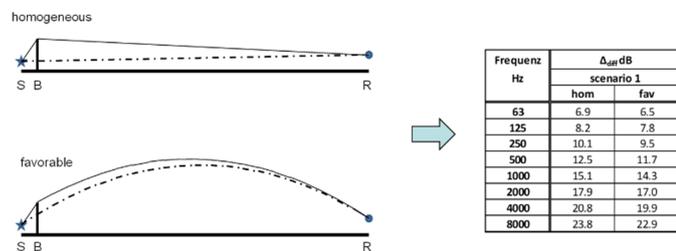


**Abbildung 4:** Die Höhe des gekrümmten Strahls im Scheitelpunkt

Entsprechend der Verfahrensbeschreibung in CNOSSOS-EU werden bei mehreren abschirmenden Objekten im ersten Schritt für den Ausbreitungszustand „homogene“ mit der üblichen „Gummibandmethode“ entsprechend Abbildung 2 die das überspannende Gummiband berührenden Kanten bestimmt – diese werden dann für den Ausbreitungszustand favorable statt mit geraden Linien mit Kreisbögen des aus dem Abstand Quelle-Empfänger berechneten Radius verbunden.

Im Zuge der praktische Anwendung bei der Lärmkartierung wurde von einem Ingenieurbüro festgestellt, dass sich mit dieser Vorgehensweise teilweise völlig unplausible Resultate ergeben können.

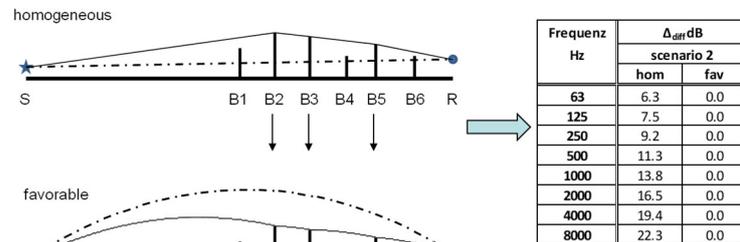
Das Problem wurde vom Verfasser im Zuge der Arbeiten zur Qualitätssicherung des Verfahrens näher untersucht – mit dem folgenden Beispiel wird das Problem verdeutlicht.



**Abbildung 5:** Eine 10 m hohe Lärmschutzwand in 50 m Abstand von der Quelle S -> berechnete Pegelminderung ca. 15 dB

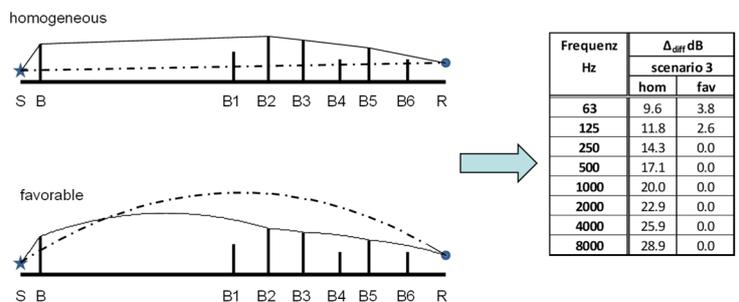
Nach Szenario 1 berechnet sich mit der 10m hohen Lärmschutzwand eine Pegelminderung von ca. 15 dB in 1 km Abstand.

Nun wurde ein Szenario 2 mit den Schirmen B1 bis B6 mit Höhen zwischen 6 und 12 m berechnet – im Ausbreitungszustand homogene betragen die Pegelminderungen ca. 12 dB, und die mit den so ermittelten Schirmen B2, B3 und B5 berechnete Pegelminderung ist wegen des wesentlich höher verlaufenden direkten Schallstrahls 0 dB.



**Abbildung 6:** Szenario 2 mit mehreren Schirmen B1 bis B6

Kombiniert man nun die beiden Szenarios 1 und 2 bzw. die dabei verwendeten Schirme, so ergibt sich mit Szenario 3 entsprechend Abbildung 7 überraschendes.



**Abbildung 7:** Szenario 3 mit Schirm B aus Szenario 1 und den Schirmen B1 – B6 aus Szenario 2

Wie die Tabelle zeigt, ergibt sich im Ausbreitungszustand favorable keine Schirmwirkung. Dies bedeutet, dass die Einfügungsdämpfung des Schirms B von ca. 15 dB (siehe Szenario 1) durch die Einfügung der 6 weiteren niedrigen Schirme B1 – B6 praktisch verschwindet – ein Ergebnis, das jeder praktischen Erfahrung widerspricht und so nicht akzeptiert werden kann..

### Analyse und Verbesserungsvorschlag

Die Analyse hat gezeigt, dass der Fehler des Verfahrens in der Verwendung der mit dem Zustand homogene ermittelten relevanten Beugungskanten liegt. Ohne näher auf die Begründung einzugehen - siehe hierzu [5] – sei nur angemerkt, dass für den Zustand favorable eine eigene Bestimmung der relevanten Schirme erfolgen muss. Hierzu wird das im Folgenden mit dem Szenario gemäß Abbildung 8 beschriebene Verfahren vorgeschlagen.

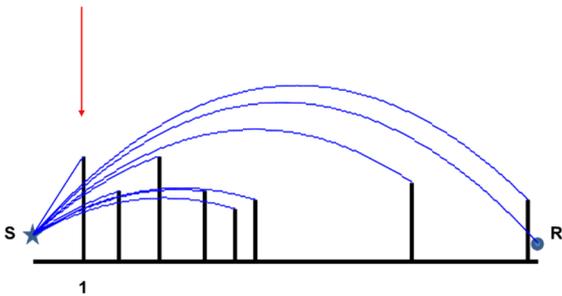
	x (m)	y (m)
S	0	3
R	1000	2
Schirme		
1	100	12
2	170	8
3	250	12
4	340	8
5	400	6
6	440	7
7	750	9
8	980	7



**Abbildung 8:** Quelle S, Empfänger R und 8 Schirme

Um die für den Ausbreitungszustand favorable relevanten Beugungskanten zu ermitteln, wird analog zu dem Gummibandverfahren beim Zustand homogene eine quasi konvexe Hülle unter Berücksichtigung von Kreisbögen gebildet. Der Radius der Kreisbögen ergibt sich mit dem Abstand S-R von 1000 m zu 8000 m.

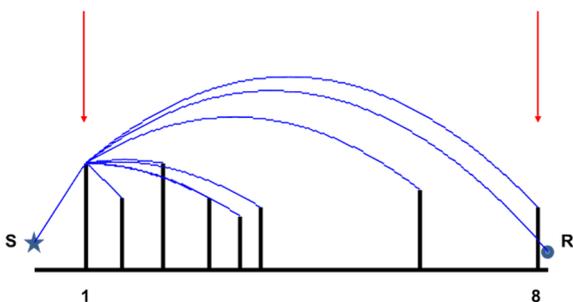
Im ersten Schritt wird die Quelle S mit allen nachfolgenden Profilverpunkten mit je einem Kreisbogen dieses Radius verbunden – der Kreisbogen mit der größten Steigung in S bestimmt den ersten relevanten Schirm.



**Abbildung 9:** Der Kreisbogen S – Schirm 1 hat in S die größte Steigung

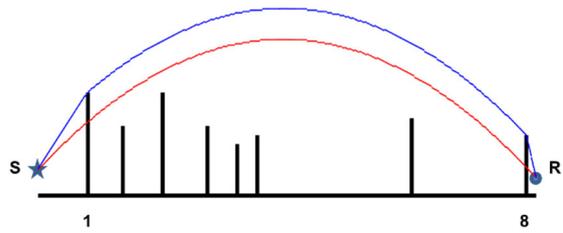
Würde der Kreisbogen zu R die höchste Steigung aufweisen, wäre der Strahl nicht blockiert.

Dasselbe Verfahren wird nun – ausgehend von der Beugungskante 1 – wiederholt. Dies führt gemäß Abbildung 10 zur nächsten relevanten Beugungskante Schirm 8



**Abbildung 10:** Ausgehend von Schirm 1 ergibt sich der nächste relevante Schirm 8

Im letzten Schritt wird dann der Immissionspunkt R erreicht.

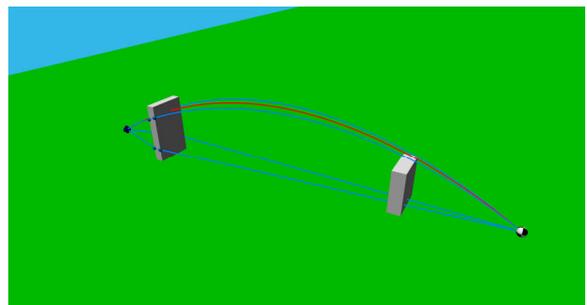


**Abbildung 11:** Der gesamte für die Beugung favorable relevante Strahlweg (blau)

Dieser relevante Ausbreitungsweg kann auch auf anderem Weise – z. B. über konforme Abbildung – ermittelt werden. Die dargestellte Methodik hat sich aber für die softwaretechnische Umsetzung als einfach, transparent und somit optimal erwiesen.

### Laterale Beugung um vertikale Kanten

Eine Sache ist die Verkomplizierung von Berechnungsmethoden durch die Berücksichtigung komplexerer Zustände, wie dies durch die Einbeziehung gekrümmter Schallstrahlen mit CNOSSOS-EU der Fall ist. Eine andere Sache ist aber dann die Einbeziehung dieser Zustände bei der Ausbreitung in dicht bebauten Gebieten mit der Kombination unterschiedlicher Effekte. Als Beispiel sei hier nur die Berücksichtigung von lateraler Beugung um die vertikalen Kanten von Häusern und anderen Objekten genannt. Soll die Abschirmwirkung der den Ausbreitungsweg blockierenden Objekte aufgrund der lateralen Beugung um die vertikalen Kanten berechnet werden, dürfen nur die den direkten Strahl blockierenden Objekte berücksichtigt werden. Die Beugungsrechnung selbst erfolgt mit der Projektion des – in der vertikalen gekrümmten – Strahls in die laterale Ausbreitungsebene.



**Abbildung 12:** Die zur Beugungsrechnung verwendeten unteren Strahlen scheinen das rechte Hindernis zu durchdringen – sie sind aber nur die Projektion des durch das zweite Hindernis nicht blockierten in der Vertikalen gekrümmten Strahlwegs

Dieses Beispiel zeigt schon, welche komplizierte Strahlkonstruktionen sich bei der dichten Anordnung von Objekten ergeben können.

Um trotz dieser Schwierigkeiten eine präzise und identische Ergebnisse erzeugende Softwareimplementierung sicher zu stellen, wurden mit dem Entwurf ISO/DTR 17534-4 [6] entsprechende Testaufgaben entwickelt und mit Zwischen- und Endergebnissen zur Überprüfung bei der Software-

Implementierung zur Verfügung gestellt. Abbildung 13 zeigt die Anordnung der speziell auf die Mehrfachbeugung mit favorablen Bedingungen ausgerichteten Testaufgabe.

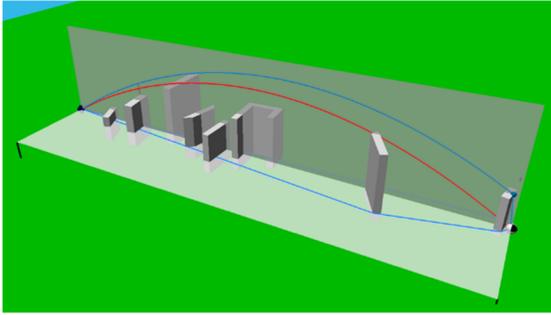


Abbildung 13: Objektpositionierung einer Testaufgabe aus ISO/DTR 17534-4

Die wenigen Beispiele mögen aufgezeigt haben, welche Schwierigkeiten sich bei der widerspruchsfreien Integration zusätzlicher Phänomene der Schallausbreitung in ein konsistentes Gesamtsystem ergeben. Es mag im Einzelfall noch relativ überschaubar sein, für isoliert betrachtete Ausbreitungssituationen wie Einschnitte, Straßenschluchten, Waldbewuchs oder dichter Bebauung algorithmische Beschreibungen zu entwickeln. Kombiniert man das Ganze aber unter Berücksichtigung gekrümmter Schallstrahlen, werden schnell Grenzen erreicht, bei denen die Sinnhaftigkeit in Bezug auf die Genauigkeit des Endergebnisses hinterfragt werden muss. Insbesondere sollte bei Verfahren zur Anwendung im gesetzlich geregelten Bereich die detaillierte Einbeziehung aller möglichen Phänomene einer möglichst hohen Präzision und Transparenz nachgeordnet werden.

## Literatur

- [1] ISO 9613-2: Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2: General method of calculation. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1996.
- [2] Commission Directive (EU)2015/996 of 19 May 2015 establishing common noise assessment methods according to Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council.
- [3] ISO/TR 17534-3: Acoustics – Software for the calculation of sound outdoors – Part 3: Recommendations for quality assured implementation of ISO 9613-2 in software according to ISO 17534-1
- [4] NF S31-133:2011: Acoustique – Bruit dans l’environnement – Calcul de niveaux sonores (Acoustics – Outdoor noise calculation of sound levels)
- [4] Probst W., Schade L.: Calculation of Multiple Diffraction in a Downward Refracting Atmosphere With Ray-Based Engineering Models, Acta Acustica united with Acustica, Vol. 105 (2019), pp 226 - 230