

# Lärmberechnung in Europa

## – Stand der Technik und Trends –

Wolfgang Probst, DataKustik GmbH, 86926 Greifenberg, Deutschland  
(wolfgang.probst@datakustik.de)

### **Einleitung**

Im folgenden soll ein kleiner Überblick zu den derzeit angewendeten Berechnungsverfahren gegeben werden, wobei nicht die Vollständigkeit im Vordergrund steht. Vielmehr soll versucht werden, die in nationalen, europäischen und auch internationalen Normen und Richtlinien beobachtbaren Trends aufzuzeigen und auch kritisch zu hinterfragen. Dies sind zum Teil auf Erfahrung des Autors basierende subjektive Erkenntnisse und sollten nur als Aufforderung zu einer breiteren Diskussion dieser Sachverhalte verstanden werden. Die wesentlichen Inhalte dieses Beitrags beruhen auf einer Studie, die vom Verfasser im Auftrage der deutschen Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) durchgeführt worden ist. Diese Studie hatte zum Ziel, die in den unterschiedlichen Europäischen Verfahren zur Berechnung des Lärms vom Straßenverkehr angewendeten Methoden zu vergleichen und im Hinblick auf eine Überarbeitung der deutschen RLS-90 zu bewerten.

### **Zur Systematik der Berechnungsverfahren**

Grundsätzlich sind derartige Berechnungen von Bedeutung, weil die durch geplante Projekte zu erwartende Lärmbelastung ermittelt und somit eine unakzeptable Exposition von Menschen verhindert werden soll oder weil bei einer Überschreitung von Grenz- oder Orientierungswerten entsprechende Lärminderungsmaßnahmen in ihrer Wirkung abgeschätzt werden sollen.

Zur Folie 2:

Diese Beurteilung erfolgt in der Regel für die Lärmarten Straße, Schiene, Flugverkehr und Industrie bzw. Gewerbe getrennt. Es gibt nationale Verfahren, die im gesetzlich geregelten Bereich angewendet werden und an die besonders hohe Anforderungen im Hinblick auf die Eindeutigkeit und Nachvollziehbarkeit gestellt werden müssen. Diese Verfahren sind in Normen und Richtlinien wie ISO 9613-2, RLS-90, StL86+, RVS, CRTN und NMPB festgelegt. Diese Berechnungsmethoden werden im folgenden als „**konventionelle Verfahren**“ bezeichnet.

Im Rahmen der Europäischen Direktive 2002/49/EC zum Umgebungslärm wurde und wird versucht, unter Einbeziehung neuester Erkenntnisse ein harmonisiertes Berechnungsverfahren zu entwickeln und zu implementieren. Mit Harmonoise/Imagine wurde von dem beauftragten Projektteam hierzu ein Verfahren vorgeschlagen, das leider so komplex ist, dass die erforderliche klare Beschreibung in Art einer Richtlinie bisher nicht geleistet werden konnte und auch in keiner Weise geklärt ist, ob es in dieser Form zur großflächigen Lärmkartierung überhaupt geeignet ist. Derzeit kann eher der Versuch beobachtet werden, aus diesen Ansätzen einzelne Elemente zu destillieren und unter Einbeziehung von Elementen der genannten nationalen Richtlinien auf ein praktisch umsetzbares Niveau „herunterzuberechnen“.

Aber auch auf nationaler Ebene sind neue Entwicklungen zu beobachten, bei denen der Versuch gemacht wird, die mathematische Beschreibung bisher nicht berücksichtigter physikalischer Phänomene zu integrieren. Harmonoise (Europa), NORD 2000

(Skandinavien), TNM (USA) und SonRoad (Schweiz) sind Beispiele für diese „**neueren Verfahren**“.

Zur Folie 3:

Lärmberechnungen werden durchgeführt, weil man im großen Maßstab sehen will, wie die Lärmexposition der Bevölkerung verteilt ist und wo die Schwerpunkte liegen. Dies ist der Bereich der Lärmkartierung, auf den sich auch die Umgebungslärmrichtlinie 2002/49/EC bezieht.

Der zweite Anwendungsbereich ist die Prüfung von Anforderungen im gesetzlich geregelten Bereich, wenn über die Zulässigkeit eines geplanten Vorhabens entschieden wird bzw. wenn Maßnahmen festgelegt werden sollen, um diese Zulässigkeit herbei zu führen. In diesen Fällen kommt es darauf an, wie im Bild dargestellt, dass jeder einzelne berechnete Schallbeitrag am Immissionsort exakt nachgewiesen werden kann.

Zur Folie 4

Es kann zwischen „Wissenschaftsbasierten Verfahren“ und „Ingenieurtechnischen Verfahren“ unterschieden werden (diese Wortwahl ist ein subjektiv gewählter Kompromiss und könnte sicher auch anders erfolgen). Während die erste Gruppe darauf basiert, die Lösungen der Wellengleichung bei den vorgegebenen Randbedingungen näherungsweise zu bestimmen bzw. durch Diskretisierung des Mediums und Anwendung der Euler- und Kontinuitätsgleichung auf die Elemente die sich ändernden Zustandsgrößen zu bestimmen, werden bei der zweiten Gruppe die Phänomene der Schallausbreitung in separierter Weise durch teilweise empirische Beziehungen ermittelt.

Die wissenschaftsbasierten Verfahren erfordern in ihrer Anwendung Expertenwissen, werden in ihrem – meist relativ beschränkten – Anwendungsbereich als sehr genau betrachtet, sind aber aufgrund der erforderlichen Modellvereinfachung bei realistischen Randbedingungen relativ unpräzise und sehr schwer nach zu vollziehen.

Die ingenieurtechnischen Verfahren sind in der Regel in Normen und Richtlinien niedergelegt, deshalb präziser und auch einfacher nach zu vollziehen. Sie beruhen auf geometrischen Strahl- oder Teilchenmodellen und werden auch in allgemein verfügbaren Softwarelösungen umgesetzt. Berechnungen zur großflächigen Lärmkartierung wie auch die nationalen Berechnungsverfahren für Nachweise im gesetzlich geregelten Bereich sind derartige ingenieurtechnische Verfahren.

### ***Richtlinienunabhängige Verfahren zur Geometrieaufbereitung***

Zur Folie 5

Bei der softwaretechnischen Realisierung von ingenieurtechnischen Verfahren werden zwei grundsätzlich unterschiedliche Methoden angewendet. Beim RT-Verfahren (Ray-Tracing) werden die Schallquellen geradlinig mit den Immissionsorten verbunden, um den direkten Schallweg im Grundriss zu ermitteln. Beim AS-Verfahren (Angle-Scanning) werden ausgehend vom Immissionsort Suchstrahlen in festgelegten Winkelschritten berechnet. Den mehr am akustischen Inhalt interessierten Fachleuten ist die Bedeutung des Unterschieds zwischen diesen Verfahren völlig entgangen – deshalb wird auch in den Berechnungsnormen kaum darauf Bezug genommen. Beide Verfahren haben Vor- und Nachteile, wobei aus Sicht des Verfassers die Vorteile des RT-Verfahren bei den meisten Anwendungen überwiegen.

Zu den Folien 7 bis 11

Ausgedehnte Quellen wie Linienquellen müssen in kleinere Elemente zerlegt werden. Das in Bild 7 Mitte dargestellte Verfahren, den Pegelanteil eines Linienquellenteilstücks aus kürzestem Abstand und Aspektwinkel zu berechnen, ist veraltet und sollte in neueren

Richtlinien nicht mehr angewendet werden. Die Teilstücke sollten vielmehr so klein gewählt werden, dass sie durch eine mittige Punktquelle ersetzt werden können. Damit ist die „Auflösung“ ausreichend fein, dass das in den Bildern 8 bis 11 dargestellte Projektionsverfahren zur Berücksichtigung von freien Lücken zwischen Gebäuden oder zur Reflexionsberechnung – auch mit teilabgeschirmtem reflektierten Schall – korrekt angewendet werden kann.

Diese letztgenannten Strategien zur Bearbeitung in Rechenprogrammen haben nichts mit Physik, aber eine Menge mit Geometrieaufbereitung zu tun. Sie sind extrem zeitaufwändig und müssen bei großflächiger Lärmkartierung entweder ganz vernachlässigt oder auf den Nahbereich von Straßen und Schienenwegen beschränkt werden. Damit ist die Endgenauigkeit derartiger Lärmberechnungen von der erforderlichen bzw. noch akzeptablen Rechenzeit abhängig. Ein größerer Aufwand bei der eigentlichen Schallpegelberechnung ist deshalb sorgfältig abzuwägen – er erzwingt eine ungenauere Geometrieberechnung und kann so zu ungenaueren Endergebnissen führen.

### ***Beispiel Straßenverkehr - Berücksichtigung mehrerer Fahrspuren einer Straße***

Zur Folie 12

Im einfachsten Fall wird eine Straße durch eine Linienschallquelle repräsentiert. Dies ist auch richtig, wenn energieäquivalente Mittelungspegel bestimmt werden sollen, deren Bezugszeit wesentlich länger als die zum Durchfahren des relevanten Straßenabschnitts erforderliche Zeitdauer ist.

Je nach Berechnungsrichtlinie werden Emissionslinien in einer oder mehreren Höhen berücksichtigt. Dasselbe gilt für die Verteilung der Emission auf einzelne Spuren – während die französische NMPB die „Simulation“ jeder Fahrspur durch eine eigene Linienquelle empfiehlt, berücksichtigt die deutsche RLS-90 die Achsen der äußersten Fahrspuren und verwendet somit zwei Linienquellen. Die britische CRTN schließlich verwendet eine Emissionslinie im Straßenraum auf der zum Immissionsort näheren Straßenseite.

Zu den Folien 13 bis 16

Zur genaueren Untersuchung dieses Einflusses der Spurverteilung wurden die Schallpegel in einer vertikal zu einer 8-spurigen Straße angeordneten senkrechten Ebene berechnet und als Lärmkarte dargestellt. Die Berechnung erfolgte bei Simulation eines auf alle 8 Fahrspuren gleichverteilten Verkehrs – also mit 8 Linienquellen – sowie entsprechend RLS-90 mit jeweils dem halben Verkehr auf der Achse der äußersten Fahrbahn. Die Differenzkarte zeigt, dass die Pegelunterschiede sehr klein sind und die Simulation durch zwei Linienquellen deshalb eine gute Näherung darstellt. Diese Unterschiede werden bei Berücksichtigung einer Abschirmwand zwar etwas größer, sind aber immer noch so gering, dass dieser Lösung mit zwei Linienquellen der Vorzug zu geben ist. Dies gilt umso mehr, da die genaue Verteilung der Verkehre auf die einzelnen Fahrspuren ohnehin nicht bekannt ist. In Sonderfällen kann dann immer noch jede Spur wie eine eigene Straße behandelt und separat in die Berechnung einbezogen werden.

### ***Beispiel Straßenverkehr – die unterschiedlichen Emissionsansätze***

Zu den Folien 17 und 18

Zum Vergleich der Emissionsansätze in den verschiedenen nationalen Richtlinien wurde der Schalldruckpegel in 10 m Abstand von einer langen geraden Straße unter Variation der Geschwindigkeit – bei sonst gleichen technischen Parametern – berechnet. Dieser Weg über

die Immission im Nahbereich wurde gewählt, um unterschiedliche Emissionshöhen und Einflüsse des Bodens im Quellbereich einzuschließen.

Wie die Bilder 17 und 18 zeigen, streuen die Emissionsansätze bei PKW oberhalb 50 km/h in einem Bereich von 5 dB – bei LKW sogar bis 8 dB.

### **Die Berücksichtigung des Bodeneinflusses**

Bei konventionellen Verfahren wie ISO 9613-2, RLS-90 und anderen wird der Einfluss des Bodens durch einen aus den relativen Höhen von Quelle, Strahlweg und Immissionsort berechneten empirischen Zuschlag berücksichtigt. In der frequenzabhängigen Rechnung nach ISO 9613-2 geht auch ein die Absorptionseigenschaften berücksichtigender Bodenfaktor G in die Berechnung ein.

Zur Folie 19

Bei neueren Verfahren wie Harmonoise, NORD 2000, TNM und SonRoad wird die kohärente Überlagerung von Direktschall und Bodenreflexion einbezogen. Dies erfordert die Berücksichtigung der Phasenlage für die unterschiedlich langen Wege von Direktschall und Bodenreflexion.

Die akustischen Eigenschaften des Bodens im reflektierenden Bereich müssen in diesem Fall durch die komplexe Impedanz beschrieben werden. In allen genannten Verfahren wird diese komplexe Impedanz aus dem Einzahlwert „Strömungswiderstand“ nach einer von Delany und Bazley veröffentlichten Beziehung abgeleitet. Dieser Strömungswiderstand wird in relativ grober Weise tabellarisch den einzelnen Bodenarten wie Gras, Weide, Acker oder Asphalt zugeordnet.

Um die stark frequenzabhängigen Kohärenzeffekte richtig abzubilden, erfolgt die Berechnung bei den neueren Verfahren in schmalere Frequenzbändern. Mit SonRoad sind die 1/3 Oktavbänder nochmals in 9 Bänder gleicher relativer Bandbreite aufgeteilt – dies erfordert für eine einzige Punkt zu Punkt Berechnung die Einzelberechnung für 216 Frequenzbänder.

Zu den Folien 20 bis 26

Für die als spiegelnd angenommene Reflexion wird entsprechend der physikalischen Realität nicht nur ein einzelner Reflexionspunkt, sondern ein Reflexionsbereich mit einer von der Wellenlänge abhängigen Ausdehnung berücksichtigt. Nach dem Konzept der Fresnelzonen wird der anteilige Reflexionsschall jedes einzelnen Elements der Bodenoberfläche bestimmt.

Zu den Folien 27 und 28

In der Praxis zeigt sich, dass diese kohärente Überlagerung von Direktschall und Bodenreflexion unter Berücksichtigung des Konzepts der Fresnelzonen die Rechenzeiten extrem verlängert. Dies wird durch eine Berechnung alternativ mit ISO 9613-2 und mit Harmonoise auf einem senkrechten Raster über einem sinusförmig gewellten Boden demonstriert.

Zu den Folien 29 und 30

Es ist zu bezweifeln, dass diese die Rechenzeiten verlängernden Berechnungskonzepte in der Praxis die Genauigkeit erhöhen können. Wenn sich der Verkehr in nicht bekannter Weise über mehrere Fahrspuren verteilt, wird der von einem Fahrzeug abgestrahlte Schall durch die Fahrzeuge der Nachbarspuren teilweise gestreut und es ist kaum anzunehmen, dass die kohärente Überlagerung von Direktschall und Bodenreflexion die richtige und vor allem ökonomische Beschreibungsweise ist. Auch ist zu bezweifeln, dass die Genauigkeit durch Übergang zu immer schmalere Frequenzbändern erhöht werden kann, wenn die Zuschläge für Straßenoberflächen, Steigungen oder sonstige Einflüsse durch pauschale auf den A-Pegel

bezogene Einzahlwerte erfolgt. Tatsächlich ändern diese Einflüsse das Spektrum, und die auf Frequenzbänder bezogenen Pegel werden nach der Anwendung von pauschalen Korrekturen somit fehlerbehaftet. Anders ausgedrückt: eine Rechnung in über 20 Frequenzbändern ist relativ uneffektiv, wenn dann der Einfluss eines Straßenpflasters mit 5 dB Zuschlag berücksichtigt wird.

## **Die Abschirmung**

Zur Folie 31

In neueren Verfahren wird bei der Berechnung der Abschirmung auch eine Bodenreflexion vor und/oder hinter dem Schirm einbezogen.

Zur Folie 32

In Normen und Richtlinien wird zur Darstellung der zu berücksichtigenden Strahlwege stets ein zum Schirm senkrechter Schnitt dargestellt. Die Pegelminderung durch den Schirm wird dann zumeist in Anlehnung an Maekawa aus dem auf die Wellenlänge bezogenen Umweg berechnet. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass Quelle und Immissionsort parallel zur Schirmkante gegeneinander versetzt sein können – für diesen Fall ist in einigen Richtlinien angegeben, dass der kürzeste Umweg zugrunde zu legen sei.

Zu den Folien 33 bis 37

Tatsächlich ergibt sich der kürzeste Umweg bzw. der Übertrittspunkt über den Schirm nur im Ausnahmefällen aus einer Geraden im Grundriss. Für beliebige zueinander windschiefe Beugungskanten endlicher Länge (Folie 37) ist bislang kein ausreichend „schneller“ Algorithmus bekannt, der den kürzesten Umweg zu berechnen gestattet.

Zu den Folien 38 und 39

Rechenprogramme zur Schallausbreitung arbeiten auf 2,5-D Basis, d. h. der Strahlweg wird zuerst im Grundriss ermittelt und dann werden im zweiten Schritt allen relevanten Punkten die Höhen zugeordnet. Aufgrund dieser Strategie besteht bei beliebig bebauten Gebieten der beste Kompromiss darin, den Direktschall als gerade Verbindungslinie Quelle – Empfänger anzunehmen und dann eine evtl. Abschirmung aus dem Umweg einer „Gummibandlinie“ über alle Objekte zu bestimmen. Nimmt man noch zwei Seitenumwege als kürzestmögliche konvexe Umhüllende hinzu, erhält man eine gute und bewährte Näherung für die Schirmrechnung in bebauten Gebieten – wohl wissend dass in einigen Fällen ein kürzerer Schallweg zwischen Quelle und Immissionsort bestehen könnte (Folie 39).

Zu den Folien 40 bis 42

Dieses bewährte Verfahren der Geraden im Grundriss schlägt allerdings völlig fehl, wenn sich die Quelle unter einem abgeknickten Schirm befindet. Hier führt die Gerade zu einem viel zu langen Umweg und damit zu einer bei weitem überschätzten Pegelminderung durch den abgeknickten Schirm. Die Folien 41 und 42 zeigen, wie der Übertrittspunkt des kürzesten Wegs ermittelt werden kann. Dieses Verfahren liegt auch der Beschreibung des „dicken Schirms“ in ISO 9613-2 zugrunde. Allerdings funktioniert es nur, wenn die beiden Beugungskanten als parallel angenommen werden können.

Derartige auf die Praxis abgestellten „Sonderlösungen“ sind entschieden wichtiger als die Einbeziehung der Kohärenz von Direktschall und Bodenreflexion, wenn es um Lärm in bebauten Gebieten geht. Berücksichtigt man die wirklichen Probleme bei realen Umgebungsbedingungen gemäß den Darstellungen 38 und 39, so relativiert sich die

Bedeutung dieser in den neueren Verfahren mit sehr viel Aufwand behandelten physikalischen Effekte.

### ***Der Einfluss der Meteorologie***

Auch die Meteorologie wird in einigen Verfahren (NMPB, Harmonoise...) bei der Berechnung der Schallausbreitung berücksichtigt. Im Harmonoise Engineering Verfahren sind hierzu die zutreffende Stabilitätsklassen S1 bis S5, die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit in m/s anzugeben.

Zur Folie 43

Um einen Hinweis auf die Größenordnung dieses Einflusses bei der Berechnung des Lärms vom Straßenverkehr in bebauten Gebieten zu erhalten, wurde das einfachere Verfahren der französischen Richtlinie NMPB angewendet. Entsprechend den in Bild 43 dargestellten Eingabefenstern wird nach NMPB zwischen den beiden Ausbreitungsbedingungen „favorable“ sowie „homogene“ unterschieden – mit der Eigenschaft „favorable“ nimmt der Schall mit wachsendem Abstand Quelle – Empfänger weniger ab als mit der Eigenschaft „homogene“. Entsprechend dieser Richtlinie muss für den betreffenden Ort, auf den sich die Berechnung bezieht, für unterschiedliche Richtungen und bezogen auf die betrachteten Zeitintervalle bekannt sein, mit welchem Zeitanteil die Bedingung „favorable“ vorliegt. Es werden dann für jeden Schallstrahl die auf diese beiden Bedingungen bezogenen Ausbreitungsrechnungen durchgeführt und zu einem für das gesamte Jahr zutreffenden Mittelwert gewichtet addiert.

Die Fenster in Bild 43 zeigen diese meteorologische Statistik für die beiden Städte Brest und Nantes. Zur Prüfung des Einflusses der Meteorologie im dicht bebauten Gebiet wurde die Lärmkarte der Stadt Augsburg (80000 Häuser, 275000 Einwohner) unter Anwendung der NMPB alternativ unter Verwendung der Meteorologie von Brest und von Nantes berechnet.

Zur Folie 44

Die Pegeldifferenzkarte in Bild 44 zeigt erwartungsgemäß, dass der Einfluss im dicht bebauten Stadtgebiet weniger als ein Zehntel dB beträgt und somit vernachlässigt werden kann. Lediglich in größeren Abständen außerhalb der Stadt ergeben sich geringe Unterschiede. Auch die Statistik der Einwohner über den Pegelintervallen Tag wie auch Nacht kann als nahezu identisch betrachtet werden.

Dies mag sich bei Berücksichtigung der Bodenabsorption in Bereichen mit porösem Boden und großen Abständen geringfügig ändern – aufgrund des Aufwands der Doppelberechnung und dem damit verbundenen Verlust an Transparenz und Nachvollziehbarkeit kann eine Einbeziehung der Meteorologie bei der Berechnung des Lärms von Strassen nicht empfohlen werden, wenn es um Berechnungen im gesetzlich geregelten Bereich geht.

Zur Folie 45

Vergleicht man die „konventionellen Verfahren“ wie RLS-90, RVS, StL86+ usw. mit den „neueren“ Verfahren wie NORD 2000, Harmonoise/Imagine usw., so ergeben sich u. a. die in Bild 45 genannten Unterschiede. Durch schmälere Frequenzbänder, kohärente Überlagerung Direkt- und Reflexionsschall, Fresnelzonen Konzept und teilweise Einbeziehung der Meteorologie wird versucht, die Übereinstimmung mit der physikalischen Realität zu erhöhen. Allerdings führt dies zu extrem höheren Rechenzeiten und in einigen Fällen auch zum Verlust von Näherungen, die mit konventionellen Verfahren die Genauigkeit erhöht haben.

Zur Folie 46

Eine Berechnungsmethodik sollte nach den Aspekten Genauigkeit, Präzision und Transparenz sowie – in Bild 46 nicht dargestellt – Einfluss auf die Performance von Software beurteilt werden. Bei der Anwendung im gesetzlich geregelten Bereich kommt es wesentlich auf die Präzision eines Verfahrens an, damit z. B. die Genehmigungsfähigkeit eines Vorhabens von unterschiedlichen Gutachtern in derselben Weise beurteilt wird. Hierzu dürfen nur möglichst wenig Interpretationsspielräume bei der Berechnung bestehen und auch die Eingangsdaten sollten auf das zur Klärung notwendige Mindestmaß beschränkt werden.

Dies gilt auch im Hinblick auf die Transparenz – es ist nicht akzeptabel, dass ein unverständliches Ergebnis nicht Schritt für Schritt überprüft werden kann, wenn dieses Ergebnis über die Zulässigkeit oder Unzulässigkeit eines Vorhabens entscheidet.

Zu den Folien 47 und 48

Diese Aufzählung gibt eine Zusammenfassung wichtiger Aspekte zur Beurteilung von Berechnungsverfahren.