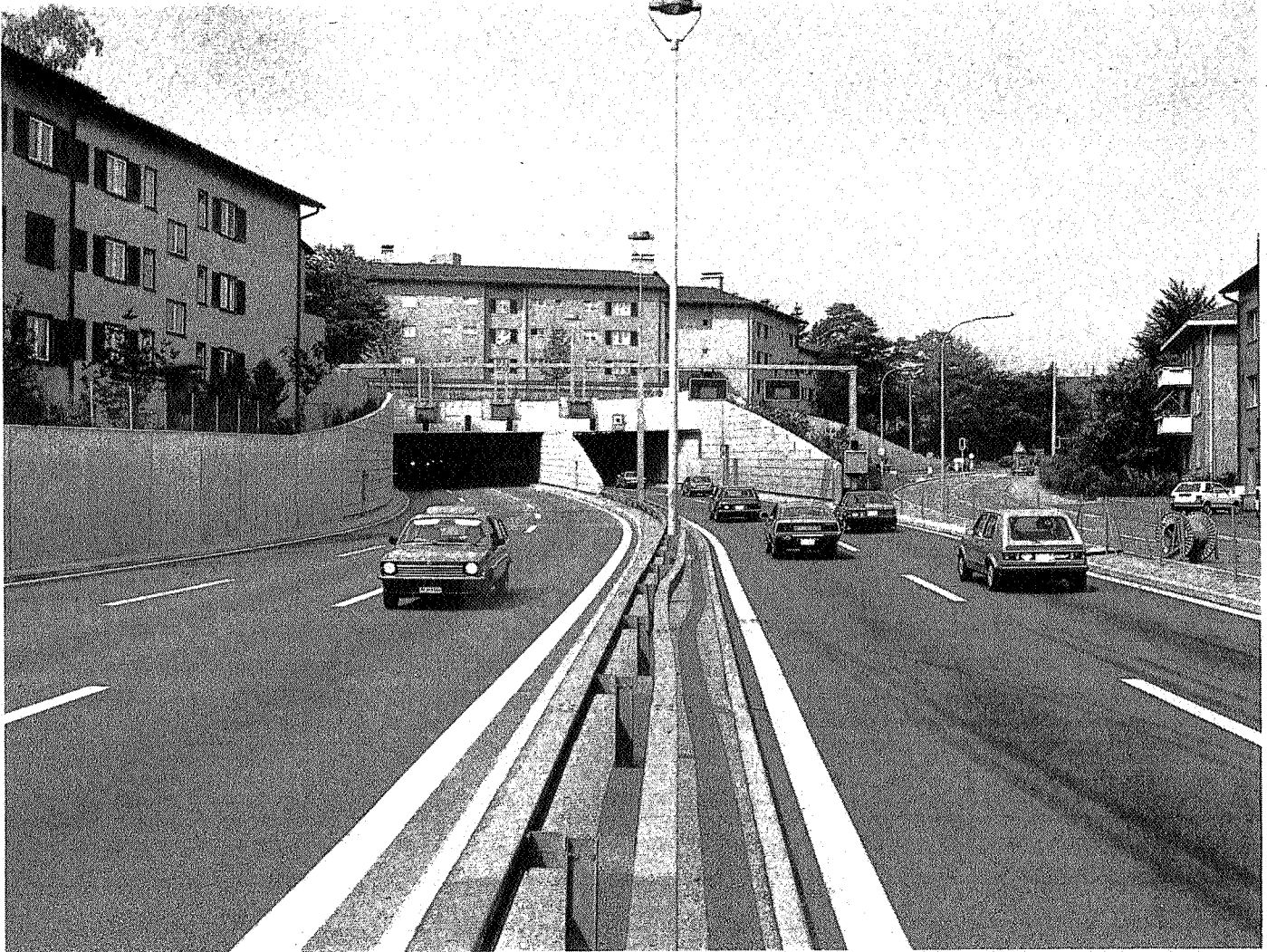


Die Lärmabstrahlung von Strassentunnel-Portalen



**EMPA, Abt. Akustik und Lärmbekämpfung, Dübendorf
Balzari und Schudel, Ingenieure und Planer, Bern**

VERFAHREN ZUR BERECHNUNG DER LAERMABSTRAHLUNG VON STRASSENTUNNEL - PORTALEN

Forschungsstelle:

EMPA Dübendorf, Abt. Akustik und Lärmbekämpfung
R. Hofmann und A. Rosenheck

Balzari & Schudel, Ingenieure und Planer, Bern
H.J. Grolimund und U. Petermann

Dezember 1983

INHALT:

Seite

1.	EINLEITUNG	1
1.1	Auftrag	1
1.2	Uebersicht	1
2.	GRUNDLAGEN	2
2.1	Modellansatz	2
2.2	Berechnung ohne Absorptions- und Reflexionsverluste	4
2.3	Berechnung unter Berücksichtigung der Verluste	5
2.4	Pegolverlauf bei der Durchfahrt eines Einzelfahrzeugs	7
2.5	Der Mittelungspegel L_{eq}	8
2.6	Zusätzliche Absorption im Tunnel	10
2.7	Modellmessungen und In-Situ Messungen	11
3.	DAS BERECHNUNGSMODELL	14
3.1	Berechnungsgrössen	14
3.2	Der Vorbeifahrtspegel	15
3.3	Der Mittelungspegel L_{eq}	18
3.4	Schallabsorption im Tunnel	22
3.5	Der Pegelmedian L_{50} ("mittlerer Lärm")	24
3.6	Massnahmen im äusseren Portalbereich	25
4.	BEISPIELE	26
4.1	Berechnungsvorgang	26
4.2	Tunnel und Strasse nicht abgeschirmt	27
4.3	Strasse abgeschirmt, Wirkung einer Tunnelverkleidung	29
4.4	Strasse abgeschirmt, Wirkung einer Schallschutzwand zur Abschirmung des Tunnelärms	31

A N H A N G

1. EINLEITUNG

1.1 Auftrag

Der weitere Ausbau unserer Strassen erfordert aus technischen Gründen und zum Schutz von Landschaft und Siedlung vermehrt Tunnellösungen. Allein für das schweizerische Nationalstrassennetz sind heute eine Vielzahl von Strassentunneln vorgesehen. Der überwiegende Teil davon wird in Siedlungsbereiche zu liegen kommen. Hier ist vielfach eine zuverlässige Beurteilung der zu erwartenden Lärmimmissionen notwendig.

Das Eidg. Departement des Innern hat deshalb der Abteilung Akustik und Lärmbekämpfung der Eidg. Materialprüfungsanstalt, Dübendorf, und dem Ingenieurbüro Balzari & Schudel, Bern, den Auftrag erteilt, gemeinsam ein Berechnungsmodell für Lärmprognosen im Portalbereich von Strassentunneln zu erarbeiten.

1.2 Uebersicht

Die Arbeit wurde in zwei Richtungen angegangen. Einerseits wurde ein numerisches Berechnungsverfahren entwickelt, das der allgemeinen Behandlung diene und als Grundlage für ähnliche Probleme verwendet werden kann. Andererseits wurden die Einflussparameter an Holzmodellen im Masstab 1:16 bzw. 1:20 studiert und das Berechnungsmodell an Realsituationen im Masstab 1:1 kontrolliert.

Die vorliegende Berichterstattung gliedert sich in 3 Teile. Zunächst wird das numerische Verfahren beschrieben und mit verschiedenen Messungen verglichen. Das erarbeitete Berechnungsmodell und die Grundlagen für die praktische Arbeit sind in einem weiteren Kapitel dargestellt. Abschliessend wird das Modell anhand von ausgewählten Fallbeispielen erläutert.

2. GRUNDLAGEN

2.1 Modellansatz

Der Strassenlärm wird durch Frequenzen über ca. 200 Hz dominiert. Die entscheidenden Schallwellenlängen sind daher kürzer als 2 Meter, während die Abmessungen von Tunnelquerschnitten normalerweise 6 bis 12 m betragen. Bei der Behandlung der Schallfortpflanzung in Strassentunneln und der Schallabstrahlung vom Portalbereich kann man daher zunächst vom Grenzfall der kurzen Wellen ausgehen. Der Tunnel wird als Raum mit den Verfahren der geometrischen Akustik behandelt. Im Gegensatz dazu steht etwa das Problem der Schallfortpflanzung in Ventilationskanälen und Kaminen, wo die Schallwellenlänge gleich gross oder grösser ist als die Querschnittsabmessungen. In solchen Fällen muss ein Berechnungsverfahren primär von der Wellennatur des Schalls ausgehen.

Als einfachster Fall sei derjenige eines einzelnen Fahrzeugs in einem Tunnel mit rechteckigem Querschnitt betrachtet; das Fahrzeug soll als ungerichtete Punktquelle behandelt werden (Beilage 1). Die Reflexionen werden durch Einführen von Spiegelquellen berücksichtigt. Alle diese Spiegelquellen liegen in einer zur Tunnelachse senkrechten Ebene, welche auch die Quelle selbst enthält, und zwar an den Punkten eines (zweidimensionalen) Gitters. Setzt man die Quelle willkürlich ins Zentrum des rechteckigen Querschnitts, so wird die Maschenweite des Gitters gerade gleich Breite b und Höhe h des Tunnels. (Andere Positionen der Quelle führen auf das gleiche Schlussresultat.) Die Position jeder Spiegelquelle ist durch zwei ganze Zahlen i und j (Indizes) gegeben, welche zugleich anzeigen, wie oft der Schall an den vier Begrenzungsflächen des Tunnels reflektiert wird. Beispiel: $i=2, j=3$. $2,3$ bezeichnet eine Spiegelquelle, die durch eine Decken-, eine Fahrbahn- und drei Wandreflexionen zustandekommt (vgl. Beilage 1).

Solange die Reflexion als verlustlos betrachtet und keine Luftabsorption angenommen wird, hat jede Spiegelquelle die akustische Leistung der eigentlichen Quelle. Infolge der tatsächlichen Reflexions- und Absorptionsverluste nimmt aber die Leistung der Spiegelquellen mit zunehmender Anzahl Reflexionen ab.

Die Schallintensität an einem Empfangspunkt im Tunnel berechnet sich als Intensitätssumme über alle (unendlich viele) Spiegelquellen. Die Phasenbeziehungen werden unter Annahme eines breitbandigen Quellenspektrums vernachlässigt. Die Verluste sichern die Konvergenz der Summe in jedem Fall. Für einen Empfangspunkt E im Freien andererseits erhält man eine endliche Summe, da nur jene Spiegelquellen einen Beitrag leisten können, welche von E aus durch die Tunnelöffnung direkt sichtbar sind. Diese Punkte liegen alle innerhalb der Projektion der Tunnelöffnung vom Punkt E auf das Gitter der Spiegelquellen (vgl. Beilage 1).

In der angedeuteten Weise kann die Gesamtintensität - und damit der Schallpegel - am Punkt E für eine bestimmte Quellenposition berechnet werden. Aus der Wiederholung für zeitlich aufeinanderfolgende Quellenpositionen gewinnt man den ganzen Zeitverlauf des Pegels und letztlich den Mittelungspegel L_{eq} durch zeitliche Integration.

2.2 Berechnung ohne Absorptions- und Reflexionsverluste:

Legt man gemäss Beilage 2 den Ursprung eines rechtwinkligen Koordinatensystems ins Symmetriezentrum der Tunnelöffnung, mit der x-Richtung in der Tunnelachse, und bezeichnet mit dem Index q und e die Koordinaten von Quelle und Empfänger, so lässt sich sofort die Zahl N der sichtbaren Spiegelquellen bestimmen:

$$N = \left(1 + \left| \frac{x_q}{x_e} \right| \right)^2 \quad (2.1)$$

Ist E nicht zu nahe am Portal ($R > \text{Max}(b, h)$), so lässt sich der Abstand d der Spiegelquellen von E in erster Näherung ausdrücken als:

$$d \approx R \left(1 + \left| \frac{x_q}{x_e} \right| \right) \quad (2.2)$$

mit $R = \text{Abstand vom Portal zum Empfänger (m)}$

Die gesamte Intensität I ist proportional zu N und zu $1/d^2$. In der betrachteten Näherung ist sie somit konstant und gleich der Intensität, die man erhält, wenn sich die Quelle gerade im Portal befindet. Ist die Quelle ein Fahrzeug, so wird sich dieses dem Empfänger auf der offenen Strasse weiter nähern. Der Pegel wird zunächst steigen, um dann später wieder mit $20 \log(\text{Distanz})$ abzufallen. Man würde in diesem verlustlosen Fall also folgenden zeitlichen Pegelverlauf erwarten:

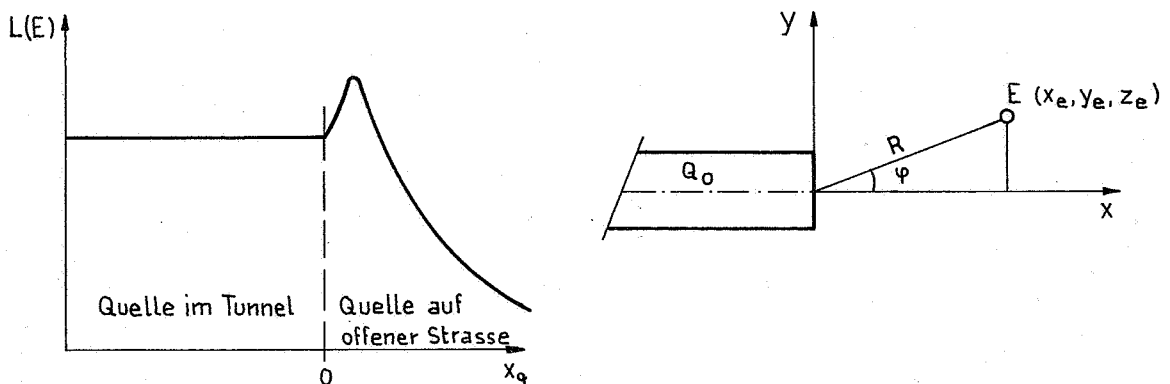


Fig. 2.1 Zeitlicher Pegelverlauf, ohne Verluste

2.3 Berechnung unter Berücksichtigung der Verluste

Bei Auftreten von Reflexionsverlusten werden die Spiegelquellen mit steigenden Indizes immer schwächer. Ihre Gesamtleistung wächst also nicht mit N , sondern langsamer. Dies wird qualitativ in Beilage 3 illustriert, welche verschiedene Fälle von reflexionsvermindernder Verkleidung zeigt. In jedem Fall wird eine bedeutende Reduktion der Anzahl wirksamer Spiegelquellen und damit der Schallenergie im Tunnel erreicht. Die Anordnung der Absorption bestimmt aber offenbar die Abstrahlcharakteristik am Portal. Dies wurde durch die Modellmessungen im Massstab 1:20 bestätigt; Beilage 4 zeigt entsprechende Resultate. Der Pegelverlauf in Beilage 4 entspricht dem angenommenen konkreten Fall, er kann nicht ohne weiteres verallgemeinert werden.

Die Verluste durch Luftabsorption werden durch eine Absorptionskonstante γ und durch die vom Schall durchlaufene Distanz d in die Rechnung einbezogen:

$$I(d) = I(0) \cdot e^{-\gamma \cdot d} \quad (2.3)$$

mit $I(d)$: Intensität nach Durchlaufen von d
 $I(0)$: ursprüngliche Intensität
 $\gamma = \alpha_L / 4.34$ mit α_L : Luft-Absorpt.koeff. in dB/m

Die Reflexionsverluste sollen durch einen Reflexionskoeffizienten erfasst werden ($\rho < 1$). Die Abhängigkeit vom Einfallswinkel wird vernachlässigt, dh ρ ist als statistischer Wert im Sinne der Nachhallberechnung im diffusen Schallfeld zu verstehen. Für eine einzige Reflexion gilt dann:

$$I_r = I_e \cdot \rho$$

mit I_r : reflektierte Intensität
 I_e : einfallende Intensität

Da der Schall zwischen der Spiegelquelle Q_{ij} und dem Empfänger E gerade $i+j$ Reflexionen erfährt, ist der Beitrag von Q_{ij} :

$$I = \frac{P}{4\pi d_{ij}^2} \cdot g^{i+j} \cdot e^{-\gamma d_{ij}} \quad (2.4)$$

mit $d_{ij} = \sqrt{(x_e - x_q)^2 + (y_e - i \cdot b)^2 + (z_e - j \cdot h)^2}$

wobei d_{ij} = Distanz (Q_{ij} E)
 P = Schalleistung der Quelle

Die Gesamtintensität I erhält man durch Summation über alle sichtbaren Spiegelquellen und über alle Frequenzbänder, welche bei der A-Bewertung von Belang sind. Aus der Gesamtintensität lässt sich der Intensitätspegel berechnen, der dem Schalldruckpegel L_p sehr nahe kommt:

$$L_p(E) \approx L_I(E) = 10 \log (I/I_0) \quad (2.5)$$

mit I_0 : Referenzintensität = 10^{-12} W/m²

Die Reflexionskoeffizienten von Wänden, Decke und Fahrbahn werden normalerweise unterschiedlich sein. Zusätzliche Absorptionsverkleidungen werden zweckmässigerweise nur bis in eine bestimmte Tiefe des Tunnels eingebaut. Will man diese Einflüsse berücksichtigen und die Summe über alle Spiegelquellen bilden, erfordert dies den Einsatz eines leistungsfähigen Computerprogrammes. Ein solches Programm (Fortran-V) wurde an der EMPA entwickelt.

2.4 Pegelverlauf bei der Durchfahrt eines Einzelfahrzeugs

Das geschilderte numerische Verfahren wurde für eine grosse Zahl von Empfangspunkten und verschiedene Tunnelabsorptionen eingesetzt. Bewegt man dabei schrittweise die Quelle im Tunnel, so erhält man eine lineare Beziehung zwischen dem Pegel in E und dem Abstand $|x_q|$ der Quelle vom Portal (siehe Beilage 5).

$$L(E) = L(P) - a|x_q| \quad (2.6)$$

mit $L(P)$: Pegel, wenn sich die Quelle im Portal befindet
 a : scheinbare Streckendämpfung

Dieser Zusammenhang gleicht formal einem Absorptionsgesetz. Der Tunnel wirkt somit als "Sprachrohr" mit einer scheinbaren Streckendämpfung a (dB/m). Die übliche Dämpfung durch Divergenz ("geometrische Dämpfung") dagegen verschwindet, da die Energieausbreitung auf die Richtung der Tunnelachse beschränkt ist.

Der Dämpfungskoeffizient a ist das Resultat der Luftdämpfung und der Reflexionsverluste. Mit wachsendem Winkel φ zwischen der Tunnelachse und der Verbindung Tunnelportal-Empfänger, wächst die Summe der Spiegelquellen-Indizes $i+j$, also die Zahl der Reflexionen, welche der Schall zwischen Quelle und Empfänger durchmacht; a nimmt somit ebenfalls zu. Unter der Annahme eines Reflexionsfaktors von 0.95, was für unverkleidete Tunnelwände realistisch ist, erhält man Werte von a im Bereich 0.02 bis 0.06 dB(A)/m. Die Messungen an realen Tunneln bestätigen diese Grössenordnung (vergl. Kapitel 2.7).

Die Wirkung einer 50 m langen schallabsorbierenden Verkleidung ist aus der Computersimulation (Beilage 5) ersichtlich.

Die Schallabstrahlung des Tunnels ist axial gerichtet, wobei die Richtwirkung umso grösser ist, je tiefer sich die Quelle im Tunnel befindet. Dies wird durch Beilage 6 illustriert, welche die Abstrahlidiagramme für $|x_q|$ von 50 und von 250 m zeigt. Für praktische Fälle sind diese komplexen Zusammenhänge aber von untergeordneter Bedeutung, da verschiedene Streufaktoren, wie gebogene Tunnelführung und geometrische Verhältnisse im Portalbereich, eine merkliche Glättung der Richtwirkung verursachen.

2.5 Der Mittelungspegel Leq

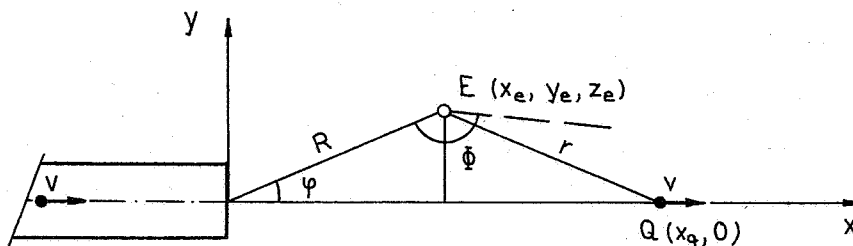


Fig. 2.2 Zur Definition der Bezeichnungen

Mit dem gefundenen linearen Zusammenhang zwischen Pegel und Abstand lässt sich die während der ganzen Fahrt der Quelle im Tunnel erzeugte und zum Empfänger E gelangende Schallenergie leicht berechnen:

$$W(E) = \int_0^T I(P) \cdot e^{-\frac{a}{4.34} \cdot v \cdot t} dt = I(P) \cdot \frac{4.34}{a \cdot v} (1 - e^{-\frac{a \cdot v \cdot T}{4.34}}) \quad (2.7)$$

mit v : Fahrgeschwindigkeit (m/s)
 $I(P)$: Intensität in E, wenn Quelle im Portal

In einem sehr langen Tunnel wird man den Exponentialterm in der Klammer (gegen 1) vernachlässigen können (Korrektur für kurze Tunnel: siehe Tabelle 3.3). Unter Annahme einer Verkehrsmenge m (Fzg/s) erhält man daraus die mittlere Intensität und durch Uebergang zum Pegel den L_{eq} :

$$L'_{eq}(E) = L(P) + 10 \log(m/v) + 10 \log \frac{4.34}{a} \quad (2.8)$$

In analoger Weise erhält man den Anteil der offenen Strasse, welche als gerade angenommen wird. Die Intensität in E mit der Quelle im Abstand r ist bekanntlich:

$$I''(E) = I(P) \cdot \frac{R^2}{r^2} \quad (2.9)$$

mit $R^2 = x_e^2 + y_e^2 + z_e^2$
 $r^2 = (x_e - x_q)^2 + y_e^2 + z_e^2$

Dabei sind Zusatzdämpfungen durch Luftabsorption und Bodeneinfluss vernachlässigt, was vertretbar ist, da diese Betrachtungen nur für kurze Abstände von der Strasse aktuell sind. Die Integration über die ganze Länge der offenen Strasse führt auf den Aspektwinkel Φ , der vom Empfangsort E abhängt ($\Phi \approx \pi - \vartheta$). Für den L_{eq} als Pegel der mittleren Intensität findet man in der Horizontalebene ($z_e = 0$):

$$L''_{eq}(E) = L(P) + 10 \log(m/v) + 10 \log \frac{(x_e^2 + y_e^2) \Phi}{y_e} \quad (2.10)$$

Aufschlussreich ist die Bestimmung jenes Gebietes, in dem der Tunnelanteil gerade dem Anteil der offenen Strasse entspricht ($L'_{eq} = L''_{eq}$). Man erhält die Gleichung für die Koordinaten x , y des Empfangspunktes E:

$$x_e^2 + (y_e - f)^2 = f^2$$

mit $f = \frac{2.17}{a \cdot \Phi}$

Wäre f eine Konstante, so erhielte man als Ortskurve für E Kreise mit Radius f und Mittelpunkt auf der y -Achse ($0, \pm f$). Tatsächlich ist aber f selbst wieder von der Position des Empfängers abhängig, so dass der Zusammenhang komplizierter wird. Für die praktische Anwendung wird im Kapitel 3 allerdings trotzdem ein Kreisbogen als Näherung verwendet.

2.6 Zusätzliche Absorption im Tunnel

Wenn eine schallabsorbierende Verkleidung im Tunnel eingebaut wird, lässt sich die Wirkung dieser Verkleidung auf den Mittelungspegel näherungsweise berechnen. Ausgehend von der Beziehung für den Mittelungspegel ohne Verkleidung ($L'_{eq}(E)$) erhält man:

$$\Delta L'_{eq}(E) = 10 \log \left[\left(\frac{a}{a_v} \right) \left(1 - e^{-a_v l_v / 4.34} \right) + \varrho_v \frac{l_v}{U} \cdot \frac{F}{U} \right] \quad (2.11)$$

- mit
- $\Delta L'_{eq}(E)$: die Reduktion des vom Tunnel abgestrahlten Mittelungspegels durch die Verkleidung
 - a : Streckendämpfung des Tunnels ohne Verkleidung (dB/m)
 - a_v : Streckendämpfung des Tunnels im Bereich der Verkleidung (dB/m)
 - l_v : Länge der Verkleidung (m)
 - ϱ_v : Reflexionskoeffizient der Verkleidung
 - F : Fläche des Tunnelquerschnittes
 - U : Tunnelumfang

ϱ_v kann man durch den mittleren Absorptionskoeffizienten des Tunnels, $\bar{\alpha}$ berechnen:

$$\varrho_v = 1 - \bar{\alpha}$$

Weiter kann man in einer ersten Annäherung a_v durch $\bar{\alpha}$ ersetzen (gültig für $\bar{\alpha} \leq 0.4$).

Man erhält also:

$$\Delta L'_{eq}(E) = 10 \log \left[\left(\frac{a}{\bar{\alpha}} \right) \left(1 - e^{-\bar{\alpha} l_v / 4.34} \right) + (1 - \bar{\alpha}) \frac{l_v \cdot U}{F \cdot U} \right] \quad (2.12)$$

Eine Methode zur Abschätzung des Werts $\bar{\alpha}$ wird im Abschnitt 3.4 angegeben.

2.7 Modellmessungen und In-Situ Messungen

Die Resultate des stark vereinfachenden theoretischen Modells mussten durch Messungen an Modellen und Realsituationen erhärtet werden. Dazu wurden zwei Modelle gebaut. Das erste bestand aus einem Kunststoffrohr von 8 m Länge und 60 cm Durchmesser, mit einer eingelegten Fahrbahnplatte (Beilage 7 oben). Diese Abmessungen ergaben einen Massstab von 1:16, so dass mit einem um 4 Oktaven verschobenen Strassenlärmspektrum gearbeitet werden konnte. Als Quelle wurde ein kleiner Hochtonlautsprecher verwendet, der in Längsrichtung des Rohrs mittels eines Seilzuges bewegt werden konnte. Die Messungen wurden sowohl in der Vertikal- als auch in einer Horizontalebene durchgeführt.

Beim zweiten Modell handelte es sich um die Nachbildung des Tunnels Schwamendingenstrasse der SN1.4 in Zürich, das vom Tiefbauamt des Kantons Zürich im Massstab 1:20 gebaut worden war, um die Wirkung von absorbierenden Verkleidungen zu untersuchen. Dieser Tunnel hat einen rechteckigen Querschnitt sowie Stütz- und Flügelmauern im Portalbereich, stellt also einen komplizierten Fall dar (Beilage 7 unten). Hier wurde als Schallquelle ein Knallfunke verwendet, damit die Reflexionen an einzelnen Flächen aufgrund ihrer zeitlichen Folge getrennt werden konnten.

Die Situation beim erwähnten Tunnelportal der SN1.4 gab die wertvolle Möglichkeit, einen solchen Fall auch in der Realität durchzumessen, und zwar vor und nach dem Anbringen einer Absorptionsverkleidung im äusseren Portalbereich und in den ersten 50 m des Tunnels (Untersuchung im Auftrag des Kt. Zürich, EMPA Bericht 43'569).

Als Beispiel eines Tunnels mit rundem Querschnitt wurde der Buchberg-tunnel (Schmerikon-Tuggen) ausgewählt, wo einerseits der Pegelverlauf bei der Durchfahrt einer einzelnen Quelle (PW mit auf dem Dach montierten Kugellautsprecher), andererseits bei stehender Lautsprecherquelle der Pegel in einem grösseren Bereich um das Portal unter Einsatz einer Autodrehleiter gemessen wurde (Beilage 8). Einfachere Messungen dieser Art wurden an den Strassentunneln Mariazell, Seelisberg, Gotthard und Arisdorf durchgeführt.

Zusammengefasst brachten diese Messungen folgende Ergebnisse:

Der Vergleich von berechneten und gemessenen Pegelverläufen bestätigt grundsätzlich die Gültigkeit der gemachten einfachen Annahmen. Beilage 9 gibt den Pegelverlauf bei einer Tunneldurchfahrt wieder, gemessen an zwei Punkten. Gleichzeitig ist der berechnete Verlauf eingetragen. Die Übereinstimmung ist sehr befriedigend. Der gemessene Dämpfungskoeffizient ("scheinbare Tunneldämpfung") fällt qualitativ beim Uebergang vom Punkt (10,18) zu (30,18) ab, wie das Modell voraussagt, quantitativ aber weniger als berechnet. Bei allen Messungen an realen Tunneln wurde eine geringere Richtwirkung gefunden, als sie das einfache Modell erwarten lässt. Hier zeigt sich offenbar die Grenze der geometrisch-akustischen Annahmen.

Aus dem Vergleich der Messresultate an Modellen mit kreisrundem wie mit rechteckigem Querschnitt ergibt sich zudem, dass die Form eine geringe Rolle spielt. Die praktischen Ergebnisse des Kapitels 3 sind daher für Tunnel beliebigen Querschnitts gültig.

Frequenzspektrum: Beilage 10 zeigt typische Spektren bei der Durchfahrt eines PW durch einen Tunnel, am Messpunkt in der Tunnelöffnung. Erwartungsgemäss verändert sich das Spektrum mit der Position des Fahrzeugs, indem die Frequenzen über 500 Hz mit zunehmendem Abstand rascher gedämpft werden. Sowohl die Luftabsorption als auch die Reflexionsverluste steigen mit der Frequenz stark an. Da schliesslich nur der A-bewertete Pegel interessiert, kann man sich auf die Oktavbänder von 500 und 1000 Hz beschränken.

Absorbierende Verkleidung: Die Wirkung einer solchen Verkleidung geht aus Beilage 11 hervor (Tunnel Schwamendingenstrasse). Die Absorptionsfläche ist hauptsächlich an der Decke angebracht, an den Wänden nur im obersten Drittel. Die Verkleidung reicht bis zu einer Tiefe von 50 m in den Tunnel. Vor dem Portal sind auch die Flügelmauern und die zusätzlichen Lärmschutzwände absorbierend abgedeckt. Als Resultat all dieser Massnahmen erhält man eine Reduktion des aus dem Tunnel abgestrahlten Schalls von 8-10 dB. Besonders wirksam er-

weisen sie sich am Punkt B, wo die Absorption auf der Schallschutzwand die Mehrfachreflexionen verhindert und damit nicht nur den Tunnelärm, sondern auch denjenigen der offenen Strasse reduziert.

Nachhall im Tunnel: Im Tunnel Schwamendingenstrasse wurden zusätzliche Nachhallmessungen durchgeführt. Die Anregung des Raums erfolgte mit einer Pistole. Der Messpunkt befand sich in einer Entfernung von ca. 15 m vom Schützen. Ohne Absorption erhielt man in der ersten Sekunde einen Abbau der Schallenergiedichte um ca. 10 dB, nach Anbringen der Absorption waren es ca. 30 dB (siehe Beilage 12).

In einem normalen, geschlossenen Raum (zB Konzertsaal) fällt die Energiedichte zeitlich exponentiell ab, der Pegel daher linear mit der Zeit. Der Tunnel mit Rechteckquerschnitt ist indessen als Raum aufzufassen, dessen eine Dimension unendlich ist. Man kann ihn sich auch als normalen Raum vorstellen, in dem zwei parallele Wände vollabsorbierend verkleidet sind. Die Energie wird dann nicht exponentiell abgebaut (vergl. zB H. Kuttruff, "Room Acoustics", AS London 1973, Abschnitt IV.4). Der Begriff der Nachhallzeit verliert hier seine Gültigkeit. Nachhallmessungen im Tunnel können somit zwar qualitative Auskünfte über die Wirksamkeit einer absorbierenden Verkleidung geben, eignen sich aber nicht für die Ueberprüfung des Absorptionsgrades der verwendeten Materialien.

3. DAS BERECHNUNGSMODELL

3.1 Berechnungsgrößen

Die folgenden Berechnungsgrößen werden für die praktische Anwendung des Modells verwendet:

a	(dB/m)	: scheinbare Streckendämpfung des Tunnels
a _v	(dB/m)	: scheinbare Streckendämpfung des Tunnels mit einer absorbierenden Verkleidung
F	(m ²)	: Fläche des Tunnelquerschnittes
K	(dB(A))	: Korrektur für endliche Tunnellängen
L(E)	(dB(A))	: Momentanpegel beim Empfänger
L(P)	(dB(A))	: Momentanpegel beim Empfänger, wenn sich die Quelle im Portal befindet. Referenzpegel.
L _{eq}	(dB(A))	: Mittelungspegel
L' _{eq}	(dB(A))	: Anteil des Mittelungspegels aus dem Tunnel
L'' _{eq}	(dB(A))	: Anteil des Mittelungspegels der Strasse
L _G	(dB(A))	: Grundwert des Mittelungspegels
L _S	(dB(A))	: Spitzenpegel
dL' _{eq}	(dB(A))	: Reduktion des Mittelungspegels aus dem Tunnel durch eine absorbierende Verkleidung
M	(Fz/h)	: Verkehrsmenge
R	(m)	: Distanz Tunnelportal-Empfänger
S	(m)	: kürzeste Distanz Strasse - Empfänger
TL	(dB(A))	: Spitzenpegel bei der nichtbeschleunigten Vorbeifahrt eines Fahrzeuges in 1 m Abstand
U	(m)	: Tunnelumfang
V	(km/h)	: Geschwindigkeit
W	(m)	: absorbierende Verkleidung pro Laufmeter
x _e , y _e	(m)	: Koordinaten des Empfängers
x _q , y _q	(m)	: Koordinaten der Quelle
$\bar{\alpha}$: mittlerer Absorptionskoeffizient des Tunnels
$\bar{\alpha}_S$: mittlerer statistischer Absorptionskoeffizient der Verkleidung
Φ		: Aspektwinkel
ψ		: Winkel zwischen Tunnelachse und R

3.2 Der Vorbeifahrtspegel

Pegolverlauf einer Einzeldurchfahrt (siehe Beilage 13)

Solange sich ein einzelnes Fahrzeug im Tunnel in Richtung Portal unterwegs befindet, wächst der Schallpegel L an einem Empfangspunkt E ausserhalb des Tunnel linear:

$$L(E) = L(P) - a|x_q| \quad (2.6)$$

mit $|x_q|$: Abstand des Fahrzeugs vom Portal (m)
 a : scheinbarer Absorptionskoeffizient (dB/m)
 $L(P)$: Pegel im Moment, wo das Fz den Tunnel verlässt

Verlässt das Fahrzeug den Tunnel, so folgt der Pegel dem üblichen Abstandsgesetz einer Punktquelle, im Falle der geraden Strasse also

$$L(E) = L(P) + 10 \log \frac{R^2}{(x_q - x_e)^2 + y_e^2} \quad (3.2)$$

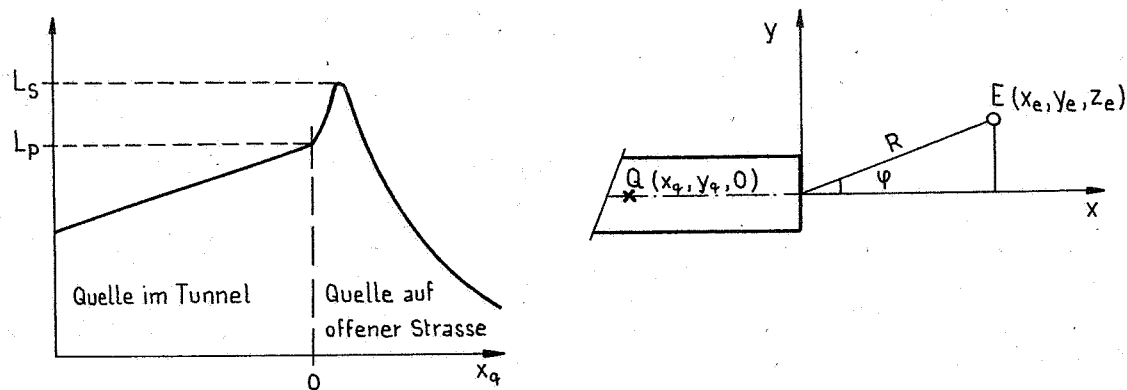


Fig. 3.1 Pegolverlauf der Einzeldurchfahrt, Bezeichnungen

- Der Tunnel bewirkt, dass das Fahrzeug länger zu hören ist als im Falle der Vorbeifahrt auf offener Strasse.
- Der scheinbare Absorptionskoeffizient a hängt einerseits vom Absorptionsgrad der Tunnelwände, andererseits von der Position des Empfangspunktes ab. Je kleiner der Winkel φ , desto kleiner ist a . In der Praxis liegt a im Bereich 0.02 bis 0.06 dB(A)/m. Da der ge-

naue Wert von Details abhängt, die selten exakt erfassbar sind, wird im folgenden vereinfachend mit einem konstanten $a = 0.03$ dB(A)/m gearbeitet.

- Für Winkel $\varphi > 90^\circ$ kann der Tunnellärm vernachlässigt werden.

Der Referenzpegel L (P) (siehe Beilage 13)

Aufgrund neuer Messergebnisse wurde der Spitzenpegel bei der nichtbeschleunigten Vorbeifahrt eines durchschnittlichen PW bzw. LW als Funktion der Geschwindigkeit bestimmt. Unter Vernachlässigung von Zusatzdämpfungen kann der Pegel im Portal, L(P), berechnet werden zu:

$$L(P) = T_1 - 20 \log R \quad (3.2)$$

Der Pegelwert T_1 in 1 m Abstand ab der Quelle variiert in Funktion der Geschwindigkeit und der Fahrzeugkategorie.

Geschwindigkeit Fahrzeug- kategorie km/h	50	60	80	100	130
Personenwagen	87	89	93	97	101
Lastwagen	99	100	103	105	(106)

Tab. 3.1: Pegelwerte T_1 in dB(A)

In Anbetracht der grossen Streuungen (Typ, Marke, Zustand, Gangwahl, Teillast/Vollast, Reifen, Strassenoberfläche) sind obige Angaben nur als Richtwerte zu betrachten.

Der Spitzenpegel L_S

Aus dem Pegelverlauf der Fig. 3.1 geht klar hervor, dass der momentane Pegel am Ort E sinkt, sobald das Fahrzeug in den Tunnel eintritt. Das Pegelmaximum wird in der Regel im kürzesten Abstand erreicht, wenn das Fahrzeug sich auf der offenen Strasse befindet. Der Tunnel hat somit keinen Einfluss auf die Lärmspitzen und die entsprechenden Masse wie L_1 (statistischer Pegel, überschritten nur in 1 % der Zeit). Als Spitzenpegel findet man im hindernisfreien Fall:

$$L_S = L(P) + 20 \log (R/S) \quad (3.3)$$

mit S : kürzester Abstand von E zur Strassenachse
 R : Abstand von E zum Portal

oder auch:

$$L_S = T_1 - 20 \log S \quad (3.4)$$

3.3 Der Mittelungspegel L_{eq} (siehe Beilagen 15, 16)

Der Mittelungspegel L_{eq} im Bereich eines Tunnelportales setzt sich zusammen aus dem Anteil aus dem Tunnel L'_{eq} und dem Anteil der offenen Strasse L''_{eq} . Durch eine energetische Addition wird aus diesen Anteilen der Mittelungspegel des gesamten Strassenlärms berechnet.

$$L_{eq} = L'_{eq} \oplus L''_{eq} \quad (3.5)$$

Der Anteil des Mittelungspegels aus dem Tunnel L'_{eq} berechnet sich entsprechend der Formel 2.8:

$$L'_{eq} = L(P) + 10 \log(M/V) + 10 \log(4.34/a) + K - 30$$

$L(P)$: Referenzpegel (dB(A))

M : Fahrzeugmenge (Fz/h)

V : Geschwindigkeit (km/h)

a : mittlere scheinbare Streckendämpfung (dB/m)

K : Korrektur für Tunnellänge

Die Konstante -30 ergibt sich aus der Einheit von V .

Die praktische Berechnung des Mittelungspegels aus dem Tunnel ist in Anlehnung an das Strassenlärmmodell der EMPA auf einem Grundwert L_G aufgebaut:

$$\begin{aligned} L_G &= L(P) + 10 \log(R^2/V) - 30 + 10 \log \bar{\Pi} \\ L(P) &= L_G - 10 \log(R^2/V) + 30 - 10 \log \bar{\Pi} \end{aligned} \quad (3.6)$$

In der Formel 2.8 wird $L(P)$ durch 3.6 ersetzt.

$$L'_{eq} = L_G + 10 \log M - 10 \log R^2 + K - 10 \log \bar{\Pi} + 10 \log(4.34/a) \quad (3.7)$$

Die scheinbare Streckendämpfung a kann als Konstante angenommen werden: $a = 0.03$ dB/m. Damit ergibt sich für den Mittelungspegel aus dem Tunnel:

$$L'_{eq} = L_G + 10 \log M - 10 \log R^2 + K + 17 \quad (3.8)$$

v(PW) km/h	Lastwagenanteil (Anzahl LW / Totalzahl Fzg)							
	0	.02	.05	.10	.15	.20	.25	.30
40	44	45	46	48	49	50	51	51
50	45	46	47	49	50	51	51	52
60	46	47	48	50	51	52	52	53
70	48	49	50	51	52	53	53	54
80	49	50	51	52	53	54	54	55
90	50	51	52	53	54	55	55	56
100	52	52	53	54	55	55	56	56
110	53	53	54	55	55	56	56	57
120	54	54	55	55	56	56	57	57
130	55	55	55	56	56	57	57	57

Tab. 3.2 Grundwert L_G in dB(A) in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und dem Lastwagenanteil

Die Korrektur K reduziert den L_{eq} -Anteil bei kurzen Tunnels:

$$K = 10 \log (1 - e^{-0.0069 \cdot \text{Tunnellänge}}) \quad (3.9)$$

K kann auch der Tabelle 3.3 entnommen werden.

Tunnellänge (m)	50	75	100	150	200	300
K in dB	-5	-4	-3	-2	-1	0

Tab. 3.3: Korrektur K für kurze Tunnels

Der Anteil des Mittelungspegels der offenen Strasse wird nach 2.10 berechnet.

$$L''_{eq} = L(P) + 10 \log(M/V) - 30 + 10 \log \frac{(x_e^2 + y_e^2) \phi}{y_e} \quad (2.10)$$

Im Fall einer geraden Strasse ist

$\phi = \pi - \vartheta$	Aspektwinkel
$x_e^2 + y_e^2 = R^2$	Distanz Portal - Empfänger
$y_e = S$	kürzeste Distanz Strasse - Empfänger

$$L''_{eq} = L(P) + 10 \log(M/V) + 10 \log(\pi - \vartheta) + 10 \log R^2/S \quad (3.10)$$

Ersetzt man $L(P)$ durch 3.6 ergibt sich für den Anteil des Mittelungspegels aus der offenen Strasse:

$$L''_{eq} = L_G + 10 \log M - 10 \log S + 10 \log \frac{\pi - \vartheta}{\pi} \quad (3.11)$$

Zusammenfassung der Formeln für die Berechnung des Mittelungspegels:

Anteil aus dem Tunnel	
$L'_{eq} = L_G + 10 \log M - 10 \log R^2 + K + 17$	(3.8)
Anteil der offenen Strasse	
$L''_{eq} = L_G + 10 \log M - 10 \log S + 10 \log \frac{\pi - \vartheta}{\pi}$	(3.11)
Gesamter Strassenlärm	
$L_{eq} = L'_{eq} \oplus L''_{eq} = 10 \log (10^{0.1 L'_{eq}} + 10^{0.1 L''_{eq}})$	(3.5)

Die aufgeführten Formeln gelten für Strassen mit einer Längsneigung i bis 3 % und einen schwarzen, trockenen Belag.

Beilage 14 zeigt den Bereich, in dem der L_{eq} -Beitrag des Tunnels grösser ist als derjenige der offenen Strasse, wobei die Zusatzdämpfung vernachlässigt wurde. Sind empfindliche Objekte in diesem Gebiet vorhanden, so kann eine absorbierende Tunnelverkleidung eine spürbare Pegelreduktion bringen, welche in den folgenden Abschnitten berechnet werden wird.

3.4 Schallabsorption im Tunnel

Wo Wohnhäuser sich im kritischen Bereich gemäss Beilage 14 befinden, wo die offene Strasse wegkurvt oder durch Hindernisse derart abgedeckt wird, dass die Lärmimmissionen aus dem Tunnel dominieren, ist eine absorbierende Auskleidung des Tunnels zu erwägen. Allerdings ist die Wirkung einer solchen Verkleidung in der Richtung der Tunnelachse nicht wirksam. Wenn die offene Strasse wegkurvt (Gebirge!), kann die stark gerichtete Schallabstrahlung eines Tunnels zu erheblichen Störungen führen, selbst wenn die Belastungsgrenzwerte nicht erreicht werden. Direktes Ausrichten einer Tunnelachse auf lärmempfindliche Gebiete muss in solchen Fällen vermieden werden.

In den übrigen Gebieten ($15^\circ < \psi < 90^\circ$) reduziert eine absorbierende Verkleidung die Lärmimmissionen aus dem Tunnel.

Die Reduktion des Mittelungspegels berechnet sich nach 2.12:

$$\Delta L'_{eq} = 10 \log \left[\frac{a}{\bar{\alpha}} (1 - e^{-\bar{\alpha} l_v / 4.34}) + (1 - \bar{\alpha}) l_v \cdot U / F \cdot \pi \right] \quad (2.12)$$

a : Streckendämpfung des Tunnels ohne abs. Verkleidung

$\bar{\alpha}$: mittlerer abs. Koeff. des Tunnels

l_v : Länge der abs. Verkleidung

Die Streckendämpfung wird als konstant angenommen $a = 0.03$ dB/m.

Der mittlere Absorptionskoeffizient $\bar{\alpha}$ berechnet sich aus dem statistischen Absorptionskoeffizienten der Verkleidung und dem Verhältnis zwischen der verkleideten Wandfläche zur gesamten Wandfläche (Tunnelumfang):

$$\bar{\alpha} = 0.85 \cdot \bar{\alpha}_s \frac{w}{U} \quad (3.12)$$

$\bar{\alpha}_s$: mittlerer statistischer Absorptionskoeffizient der Verkleidung gemittelt über die Oktavbänder 250 - 2000 Hz

w : verkleidete Wandfläche pro Laufmeter

U : Tunnelumfang

Der Faktor 0.85 entspricht einer Korrektur von $\bar{\alpha}_s$, da die Absorption im Tunnel kleiner ist als die im Hallraum gemessene Absorption.

Aus dem nachstehenden Diagramm kann $\Delta L'_{eq}$ in Funktion von $\bar{\alpha}$, l_v und aus dem Verhältnis der Fläche F zum Umfang U bestimmt werden:

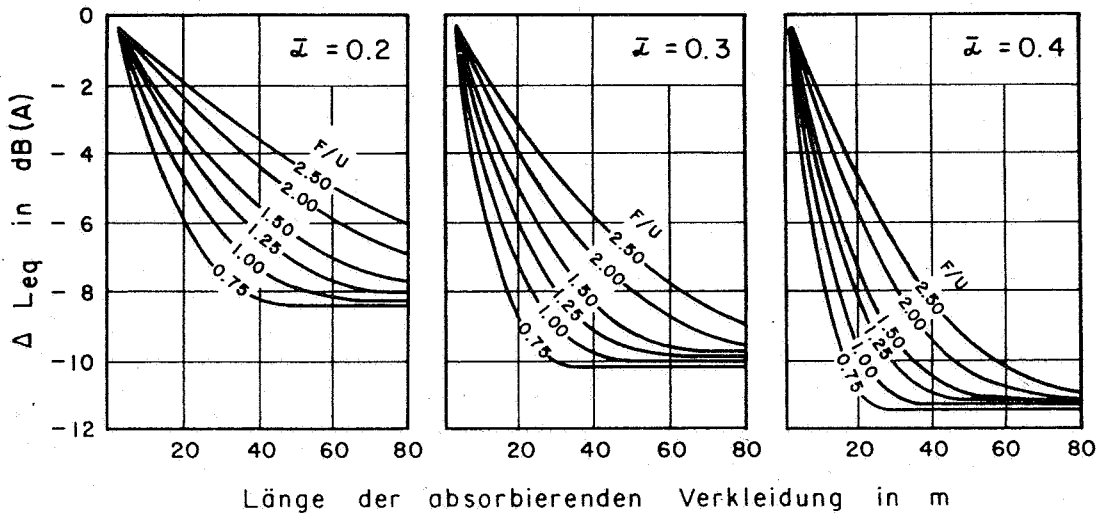


Fig. 3.1: Wirkung einer absorbierenden Verkleidung

Im allgemeinen genügt eine Verkleidung des Tunnels auf einer Länge von 50 - 80 m, wenn ca. 50 % der Oberfläche verkleidet wird.

Der statistische Absorptionskoeffizient α_s der absorbierenden Verkleidung sollte die folgenden Werte nicht unterschreiten:

Frequenz in Hz	125	250	500 bis 2000	4000
abs. Koeff. α_s	0.25	0.70	0.85	0.60

Tab. 3.4: Mindestwerte des statistischen Absorptionskoeffizienten im Hallraum gemessen.

Die gleichmässige Verteilung des Materials auf Wand und Decke ist vorteilhaft, jedoch unkritisch.

3.5 Der Pegelmedian L₅₀ ("mittlerer Lärm")

Der statistische Pegel L₅₀ (der Pegelwert, der während 50 % der Zeit überschritten ist) wird in der Schweiz seit rund 20 Jahren als Mass für den mittleren Lärm verwendet. Seine Ablösung durch den L_{eq} steht allerdings bevor. Obwohl angesichts des komplizierten Zeitverlaufs des Pegels (Fig. 3.1) eine geschlossene Berechnung des L₅₀ ausgeschlossen ist, soll hier wenigstens qualitativ diskutiert werden, wie sich der Tunnellärm auf den L₅₀ auswirkt.

Solange der Verkehr dicht ist, wird sich L₅₀ nur wenig von L_{eq} unterscheiden, und die Folgerungen des Abschnitts 3.3 lassen sich unverändert übernehmen. Bei schwachem Verkehr dagegen fällt bekanntlich der L₅₀ der offenen Strasse stark ab, bis in den Bereich des Grundgeräusches. Der Anteil des Tunnels an den L₅₀ dagegen verändert sich solange nur schwach, als durchschnittlich sich wenigstens ein Fahrzeug im Tunnel befindet. Dies hat zur Folge, dass der L₅₀ nachts wesentlich durch den Tunnellärm bestimmt wird, und zwar in einem Bereich, der grösser ist als derjenige der Beilage 14 für den L_{eq}.

Nun ist allerdings erfahrungsgemäss die Lärmbelastung nachts bei Verwendung der Masse L₁/L₅₀ (Grenzwertschema 1963) fast immer durch L₁ bestimmt, während L₅₀ ganz selten zum kritischen Mass wird. Selbst die Erhöhung durch den Tunnelschall wird dies nicht wesentlich ändern. Trotzdem zeigt die Betrachtung des L₅₀ deutlich, dass die Störwirkung eines Tunnelportals auf der Verlängerung der Durchfahrzeit beruht, welche in erster Linie nachts wahrnehmbar wird.

3.6 Massnahmen im äusseren Portalbereich

Im Mittelpunkt der bisherigen Ueberlegungen stand der Vergleich der Lärmanteile aus dem Tunnel und von der offenen Strasse. Allfällige Massnahmen sollen immer in ihrer Auswirkung auf beide Anteile untersucht werden, speziell hinsichtlich der Bewahrung eines vernünftigen Gleichgewichts. Es wäre sinnlos, mit grossem Aufwand den einen Anteil stark zu reduzieren, wenn nicht auch beim andern eine ähnliche Reduktion angestrebt wird.

In erster Dringlichkeit steht, wie Beilage 14 zeigt, auch im Bereich der Tunnelportale die Abschirmung des Lärms aus der offenen Strasse. Die Dimensionierung entsprechender baulicher Massnahmen geschieht in der Regel auf der Grundlage der Formel von Meakawa. Als Faustregel kann gelten, dass eine solide optische Abdeckung bereits auch eine akustische Abschirmwirkung hat.

An Stellen, wo die offene Strasse abgeschirmt ist, kann der Tunnellärm eine weit wichtigere Rolle spielen, als aus Beilage 14 hervorgeht. Sein Anteil an den L_{eq} wird nach Abschnitt 3.3 berechnet. Für die Bestimmung der Wirkung äusserer Schallschutzmassnahmen wird der Tunnel durch eine Ersatzschallquelle in der vertikalen Symmetrieebene des Tunnels, auf $2/3$ der Scheitelhöhe, ersetzt. Die Wirkung des Hindernisses wird nach Maekawa für diese (Ersatz-)Punktquelle in dB berechnet und vom zuvor erhaltenen L_{eq} subtrahiert. Im allgemeinen genügt es, eine solche Berechnung für die Frequenz 500 Hz durchzuführen.

Stütz- und Flügelmauern im Portalbereich müssen in eine ganzheitliche Betrachtung der Lärmprobleme einbezogen werden. Häufig wirken sie als Reflektoren für den Schall aus der offenen Strasse, besonders ungünstig in jenen Fällen, wo der Direktschall bereits abgedeckt ist. Sie müssen dann absorbierend verkleidet werden. Entschliesst man sich zu einer absorbierenden Auskleidung der Tunnelmündung, so ist diese Massnahme in der Regel auch auf parallele Flügelmauern auszudehnen.

4. BEISPIELE

4.1 Berechnungsvorgang

Berechnung des Mittelungspegels aus dem Tunnel

In einer ersten Etappe wird der Anteil des Mittelungspegels aus dem Tunnel L'_{eq} berechnet:

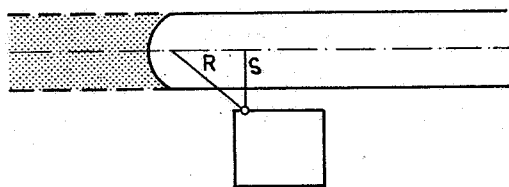
<u>Schritt</u>	<u>Ausgangsgrößen</u>	<u>Beilage</u>	<u>Wert</u>
	Konstante		17
1	Lastwagenanteil Geschwindigkeit	15	L_G
2	Verkehrsmenge	15	$+ 10 \log M$
3	Distanz Portal-Empfänger	16	$- 10 \log R^2$
4	Tunnellänge	16	$+ K$
5	Querschnittfläche/Umfang mittlerer abs. Koeffizient des Tunnels Länge der Verkleidung	16	$dL'_{eq} \text{ dB(A)}$
6	Hindernisdämpfung	17	dH
7	Mittelungspegel aus dem Tunnel		$L'_{eq} \text{ dB(A)}$ =====

Anschliessend wird in einer zweiten Etappe der Mittelungspegel der offenen Strasse L''_{eq} berechnet und energetisch zum L'_{eq} addiert.

<u>Schritt</u>	<u>Ausgangsgrößen</u>	<u>Beilage</u>	<u>Wert</u>
8	Lastwagenanteil Geschwindigkeit	15	L_G
9	Verkehrsmenge	15	$10 \log M$
10	Distanz Strasse-Empfänger	16	$10 \log s$
11	Hindernisdämpfung	17	dH
12	Aspektwinkel	18	$10 \log$
13	Anteil der offenen Strasse		$L'_{eq} \text{ dB(A)}$ =====
14	Gesamter Strassenlärm $L'_{eq} + L''_{eq}$	19	$L_{eq} \text{ dB(A)}$ =====

4.2 Tunnel und Strasse nicht abgeschirmt

Situation:



Ausgangsgrößen:

- | | |
|-------------------------------|----------|
| - Lastwagenanteil | 20 % |
| - Geschwindigkeit | 60 km/h |
| - Verkehrsmenge | 800 Fz/h |
| - Distanz Portal-Empfänger R | 12 m |
| - Tunnellänge | 100 m |
| - Distanz Strasse-Empfänger S | 8 m |
| - Aspektwinkel | 140° |

Berechnung des Mittelungspegels aus dem Tunnel

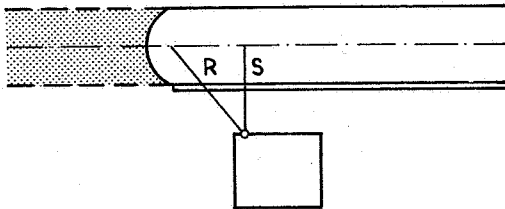
<u>Schritt</u>	<u>Ausgangsgrößen</u>	<u>Wert</u>
	Konstante	17
1	Lastwagenanteil 20 %	
	Geschwindigkeit 60 km/h	52
2	Verkehrsmenge 800 Fz/h	+ 29
3	Distanz R 12 m	- 22
4	Tunnellänge 100 m	- 3
5	F/U	
	Absorption	0
	Länge der Verkleidung	
6	Hindernisdämpfung	0
7	Mittelungspegel aus dem Tunnel L'_{eq}	= 73 dB(A)
		=====

Berechnung des Mittelungspegels der offenen Strasse

<u>Schritt</u>	<u>Ausgangsgrößen</u>	<u>Wert</u>
8	wie Schritt 1	52
9	wie Schritt 2	+ 29
10	Distanz S 8 m	- 9
11	Hindernisdämpfung	0
12	Aspektwinkel 140°	- 1
13	Anteil der offenen Strasse L''_{eq}	= 71 dB(A)
		=====
14	Gesamter Strassenlärm L_{eq}	= 75 dB(A)
		=====

4.3 Strasse abgeschirmt, Wirkung einer Tunnelverkleidung

Situation:



Ausgangsgrößen:

- Lastwagenanteil	20	%
- Geschwindigkeit	60	km/h
- Verkehrsmenge	800	Fz/h
- Distanz Portal-Empfänger R	15	m
- Tunnellänge	200	m
- Distanz Strasse-Empfänger S	12	m
- Distanz Strasse-Hindernis	5.5	m
- Distanz Hindernis-Empfänger	6.5	m
- Hindernishöhe	0.6	m
- Aspektwinkel	125°	
- Querschnittsfläche F	64	m ²
- Umfang U	31	m
- Länge der Verkleidung	50	m
- $\bar{\alpha}_s$ der Verkleidung	0.8	
- verkleidete Wandfläche pro m'	14	m ²
- mittlerer abs. Koeffizient		

$$\bar{\alpha} = 0.85 \cdot \bar{\alpha}_s \frac{W}{U} = 0.85 \cdot 0.8 \cdot \frac{14}{31} = 0.3$$

Berechnung des Mittelungspegels aus dem Tunnel

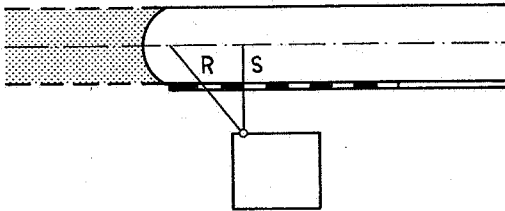
<u>Schritt</u>	<u>Ausgangsgrößen</u>	<u>Wert</u>
	Konstante	17
1	Lastwagenanteil 20 %	
	Geschwindigkeit 60 km/h	52
2	Verkehrsmenge 800 Fz/h	+ 29
3	Distanz R 15 m	- 24
4	Tunnellänge 200 m	- 1
5	F/U 1.9	
	Absorption 0.3	
	Länge der Verkleidung 50 m	- 8
7	Mittelungspegel aus dem Tunnel L'_{eq}	= 65 dB(A)
		=====

Berechnung des Mittelungspegels der offenen Strasse

<u>Schritt</u>	<u>Ausgangsgrößen</u>	<u>Wert</u>
8	wie Schritt 1	52
9	wie Schritt 2	+ 29
10	Distanz S 12 m	- 11
11	Hindernisdämpfung	- 8
12	Aspektwinkel 125°	- 2
13	Anteil der offenen Strasse L''_{eq}	= 60 dB(A)
		=====
14	Gesamter Strassenlärm	
	$L'_{eq} \oplus L''_{eq}$ mit Verkleidung L_{eq}	= 66 dB(A)
		=====
	$L'_{qq} \oplus L''_{eq}$ ohne Verkleidung L_{eq}	= 73 dB(A)
		=====

4.4 Strasse abgeschirmt, Wirkung einer Schallschutzwand zur Abschirmung des Tunnellärms

Situation:



Längenprofil:



Ausgangsgrößen:

- Lastwagenanteil	20	%
- Geschwindigkeit	60	km/h
- Verkehrsmenge	800	Fz/h
- Distanz Portal-Empfänger R	15	m
- Distanz Portal-Hindernis	6.5	m
- Distanz Hindernis-Empfänger	8.5	m
- Hindernishöhe	0.6	m
- Tunnellänge	200	m
- Distanz Strasse-Empfänger S	12	m
- Distanz Strasse-Hindernis	5.5	m
- Distanz Hindernis-Empfänger	6.5	m
- Hindernishöhe	0.6	m
- Aspektwinkel	125°	

Berechnung des Mittelungspegels aus dem Tunnel

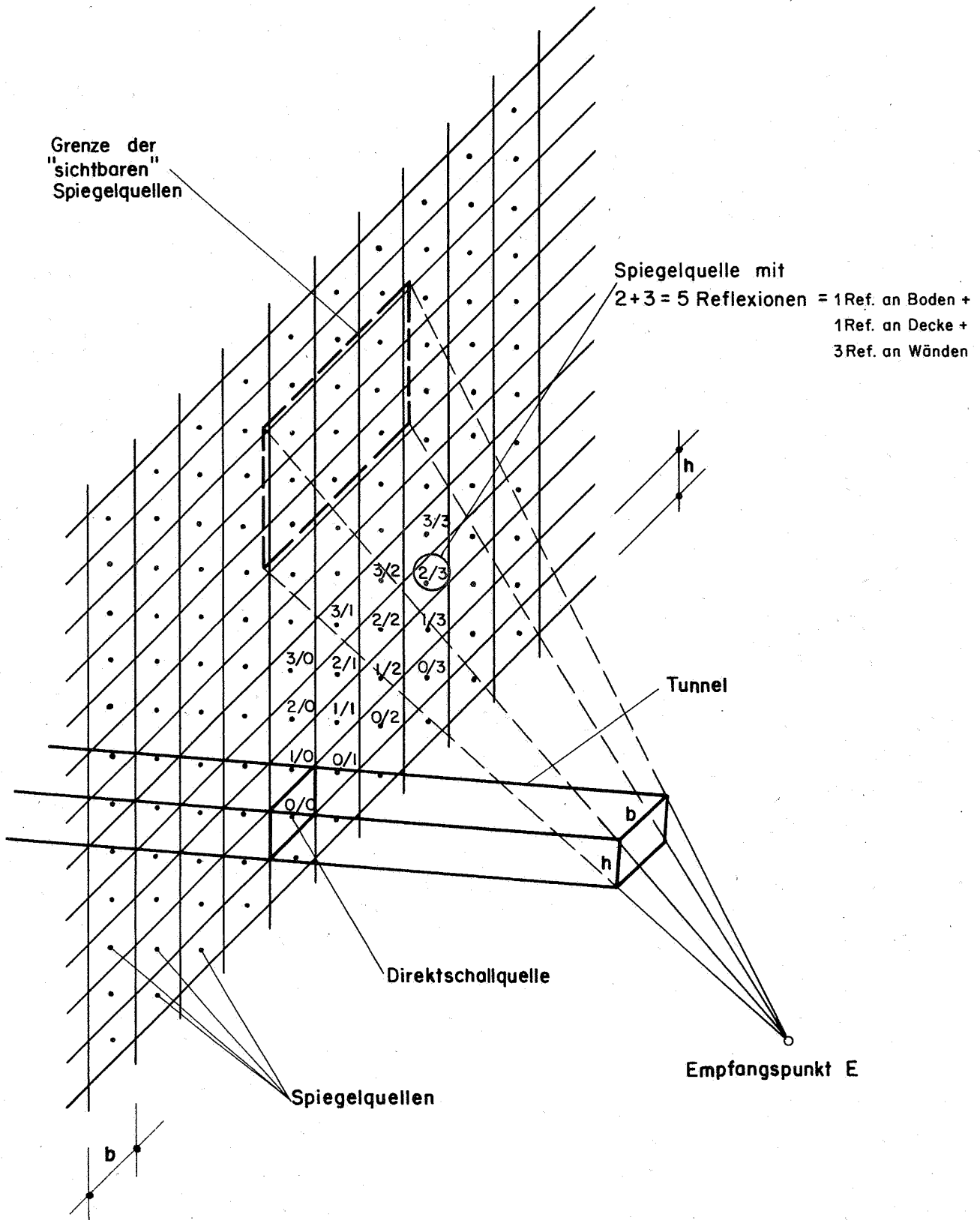
<u>Schritt</u>	<u>Ausgangsgrößen</u>	<u>Wert</u>
	Konstante	17
1	Lastwagenanteil	20 %
	Geschwindigkeit	60 km/h
2	Verkehrsmenge	800 Fz/h
3	Distanz Portal-Empfänger	15 m
4	Tunnellänge	200 m
5	F/U	
	Absorption	
	Länge der Verkleidung	0
6	Hindernisdämpfung	- 8
7	Mittelungspegel aus dem Tunnel L'_{eq}	= 65 dB(A)
		=====

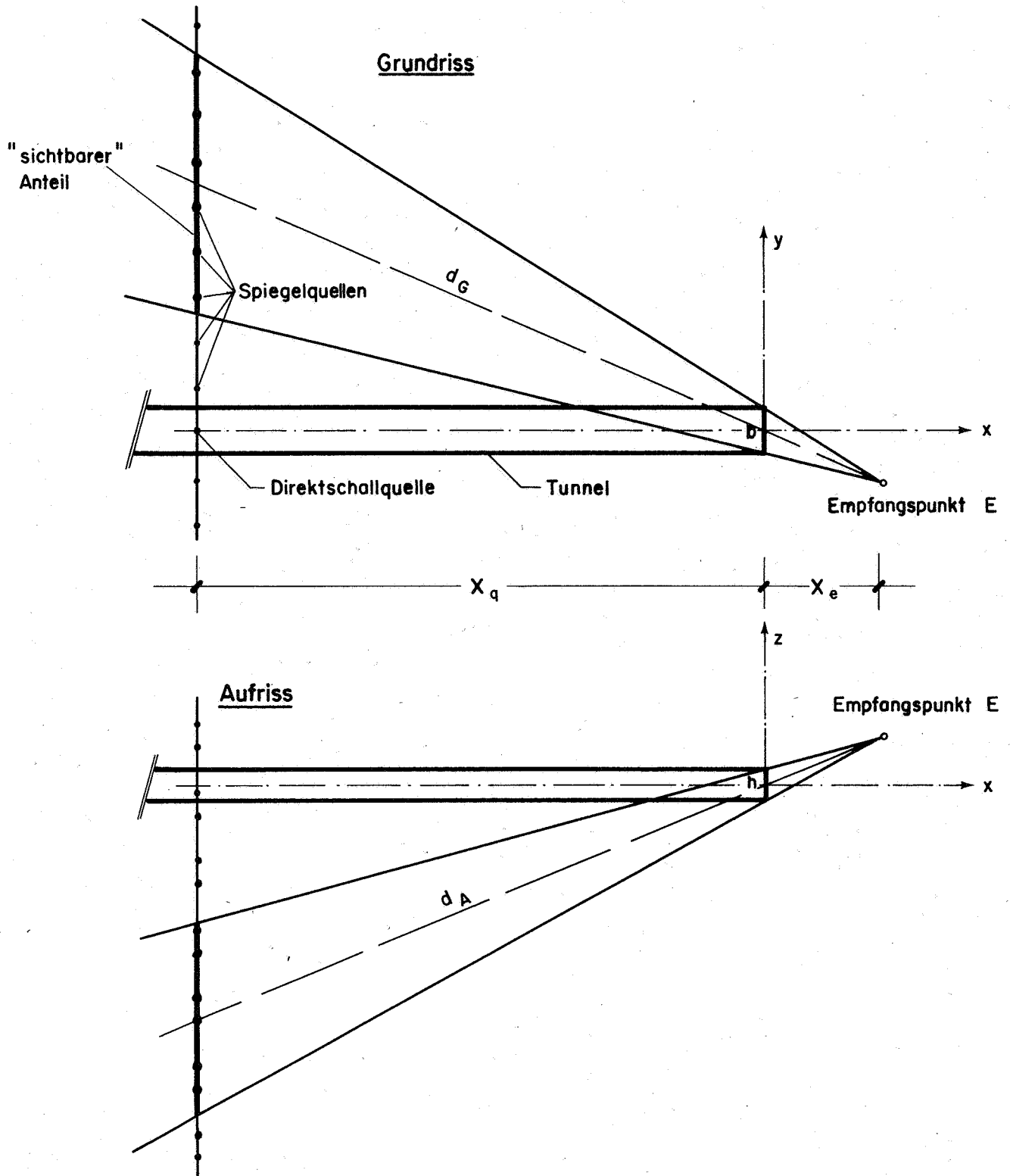
Berechnung des Mittelungspegels der offenen Strasse

<u>Schritt</u>	<u>Ausgangsgrößen</u>	<u>Wert</u>
8	wie Schritt 1	52
9	wie Schritt 2	+ 29
10	Distanz S	12 m
11	Hindernisdämpfung	- 9
12	Aspektwinkel	125°
13	Anteil der offenen Strasse L''_{eq}	= 59 dB(A)
		=====
14	Gesamter Strassenlärm	
	$L'_{eq} \oplus L''_{eq}$ mit Wand L_{eq}	= 66 dB(A)
		=====
	$L'_{eq} \oplus L''_{eq}$ ohne Wand L_{eq}	= 73 dB(A)
		=====

ZUSAMMENSTELLUNG

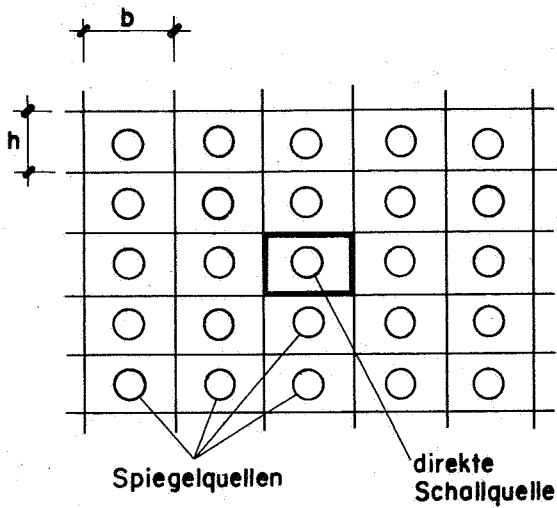
- 1 Darstellung der Spiegelquellen im Tunnel
- 2 Die Spiegelquellen in horizontaler und vertikaler Projektion
- 3 Die Spiegelquellen im Tunnel bei unterschiedlicher Schallabsorption
- 4 Schallabstrahlung aus einem Tunnel (Modellmessung)
a) ohne absorbierende Verkleidung b) mit absorbierender Verkleidung
- 5 Berechneter Pegelverlauf bei einer PW-Vorbeifahrt
- 6 Berechnete Schallabstrahlung eines Tunnels
- 7 Fotos, Modellmessung der Schallabstrahlung eines Tunnels
- 8 Fotos, In-Situ Messung der Schallabstrahlung eines Tunnels
- 9 Vergleich zwischen gemessenem und berechnetem Pegelverlauf
- 10 Typische Schallspektren im Tunnelportal
- 11 Tunnel Schwamendingerstrasse, Wirkung einer schallabsorbierenden Verkleidung
- 12 Tunnel Schwamendingerstrasse, Nachhall mit und ohne schallabsorbierende Verkleidung
- 13 Vorbeifahrtspegel $L(E)$, Referenzpegel $L(P)$
- 14 Kritischer Bereich der Tunnel-Abstrahlung $Leq(\text{Tunnel}) > Leq(\text{Strasse})$
- 15 Grundwert L_G und Verkehrsmengenzuschlag $10 \log M$
- 16 Abstandsdämpfung, Korrektur K für kurze Tunnels, absorbierende Verkleidung
- 17 Hindernisdämpfung d_H
- 18 Aspektwinkelreduktion d_ψ
- 19 Pegeladdition





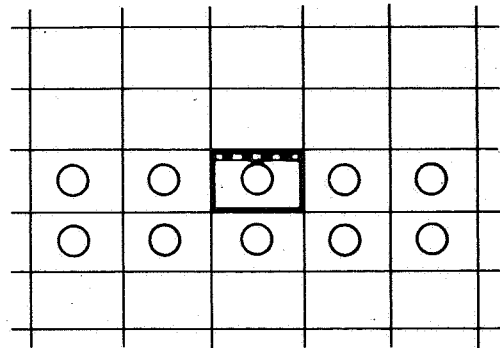
(d_G und d_A entsprechen den Projektionen des mittleren Abstandes d)

a) ohne Verkleidung



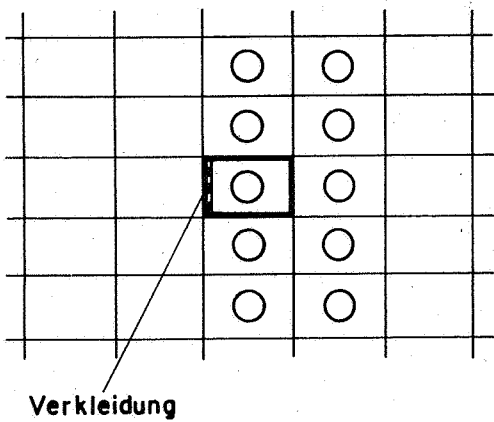
d) Decke verkleidet

$\alpha_s = 1$ (voll- absorbierend)



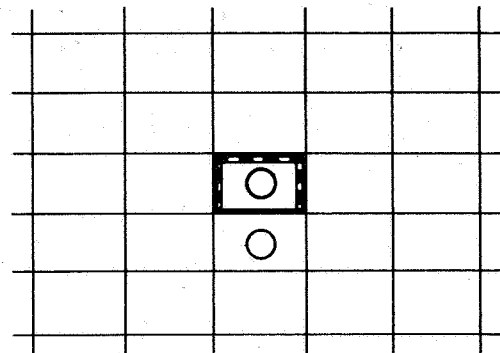
b) 1 Wand verkleidet

$\alpha_s = 1$ (voll- absorbierend)



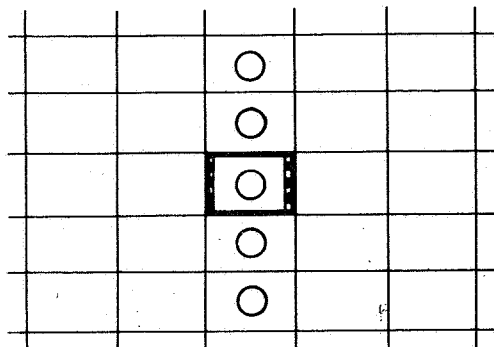
e) 2 Wände und Decke verkleidet

$\alpha_s = 1$ (voll- absorbierend)



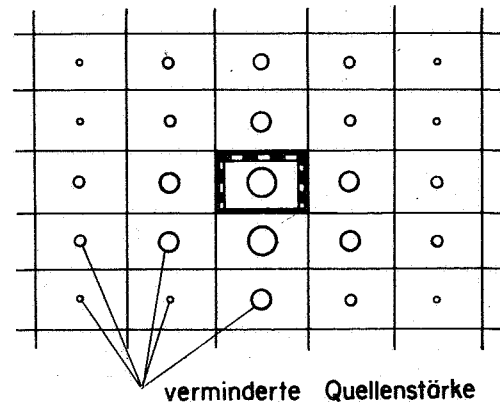
c) 2 Wände verkleidet

$\alpha_s = 1$ (voll- absorbierend)

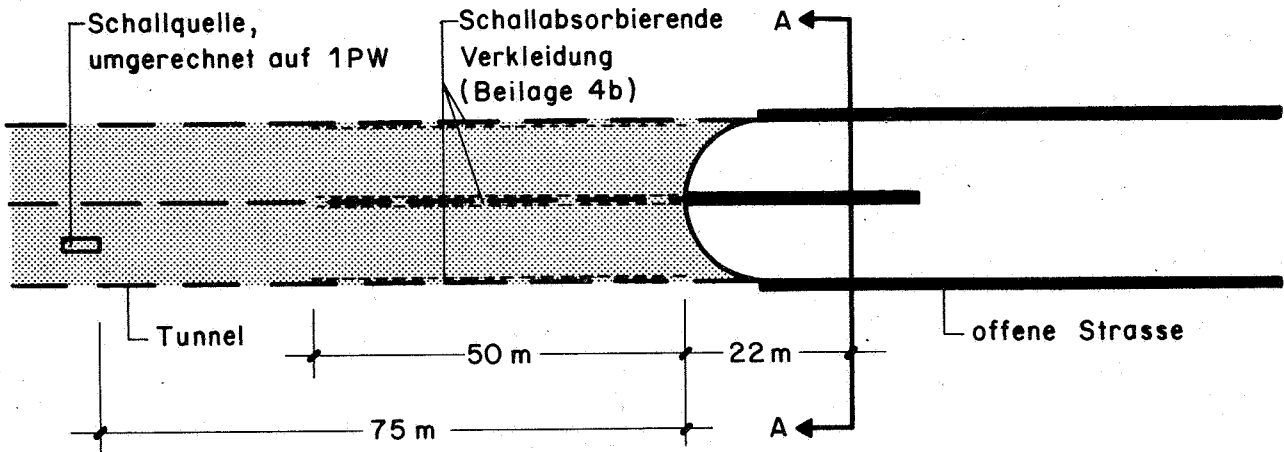


f) 2 Wände und Decke verkleidet

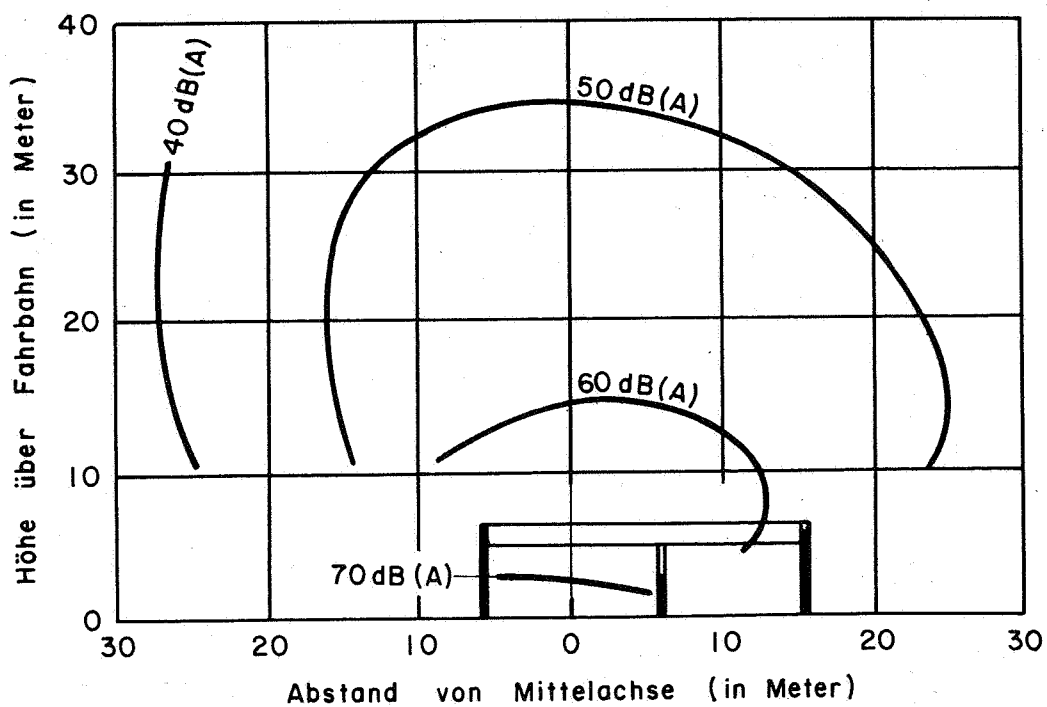
$\alpha_s < 1$ (teil- absorbierend)



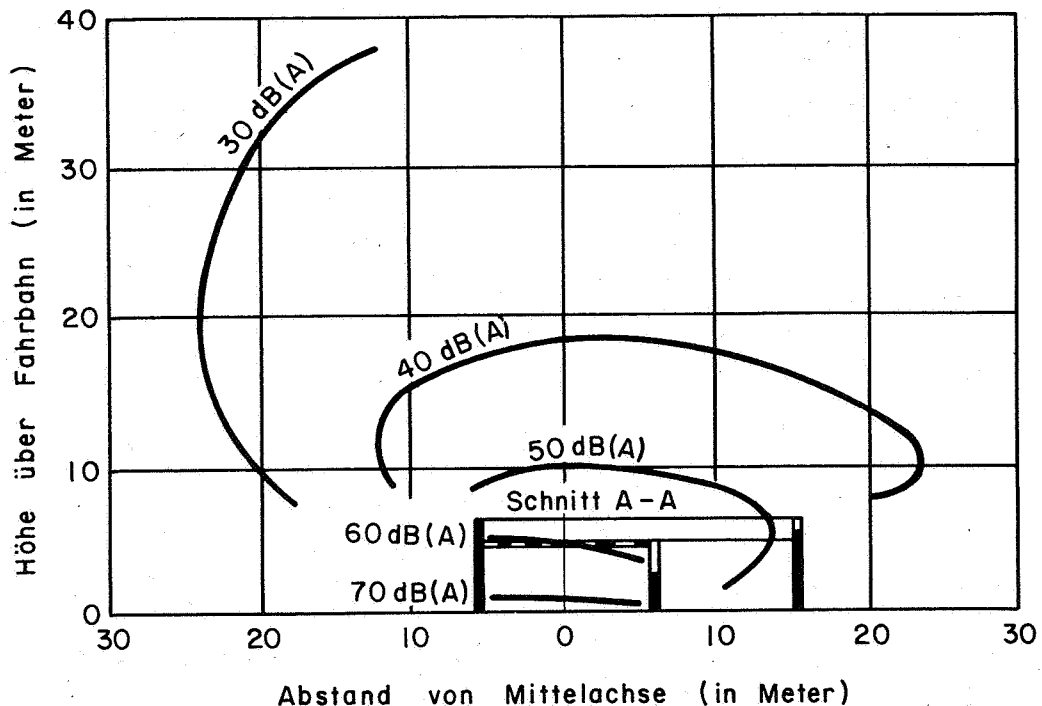
Situation für Ausbreitungsmessungen (Grundriss)



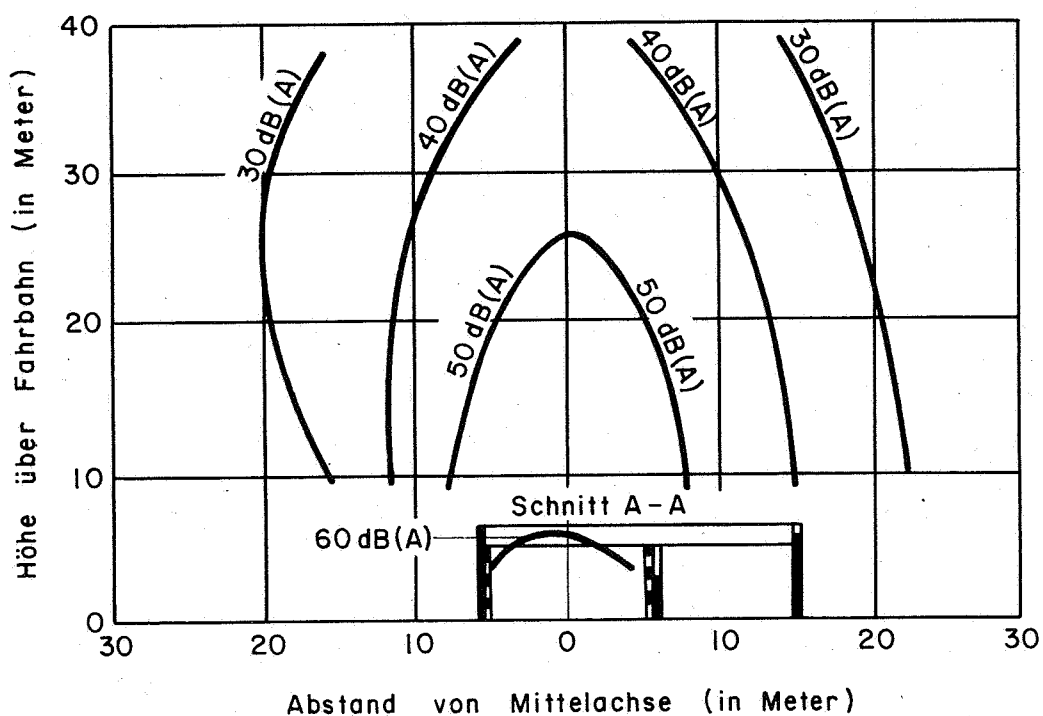
Schallabstrahlung im Schnitt A-A. Zustand: ohne Verkleidung



Schallabstrahlung im Schnitt A-A. Zustand: Decke verkleidet

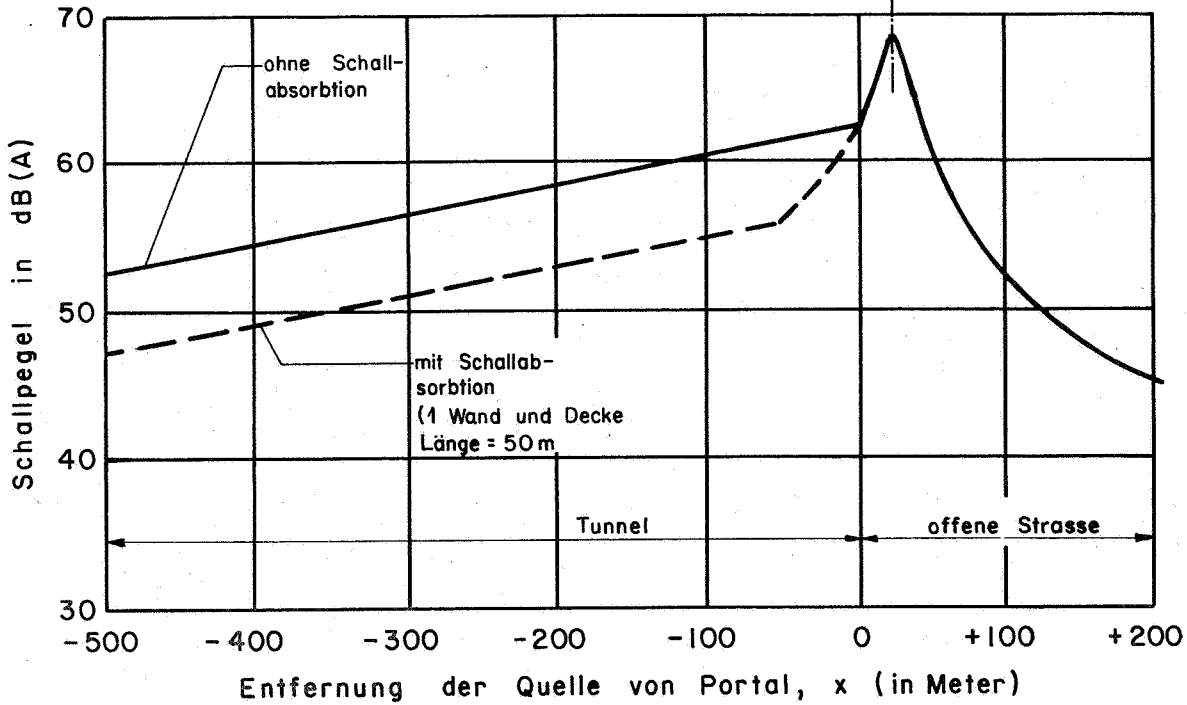
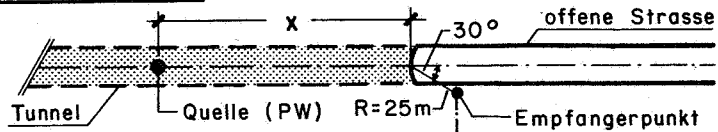


Schallabstrahlung im Schnitt A-A. Zustand: Wände verkleidet



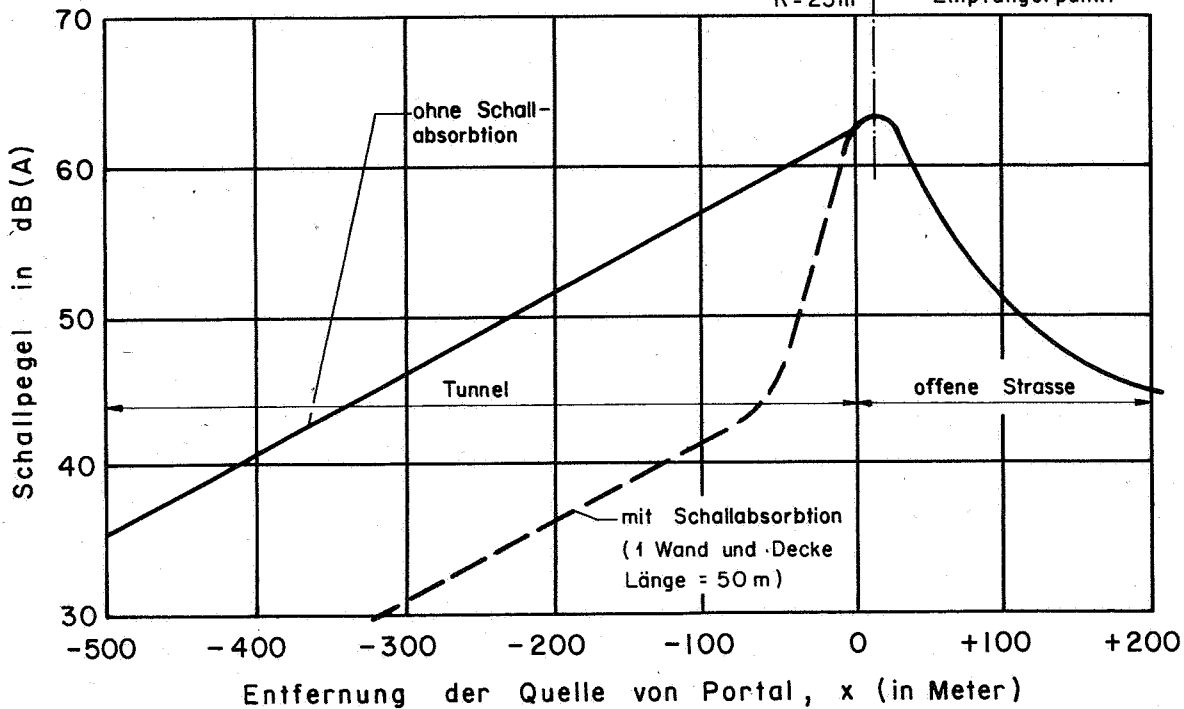
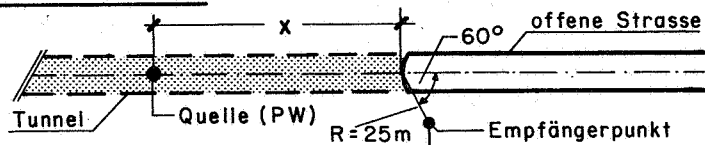
a) Winkel zur Tunnelachse $\varphi = 30^\circ$

Grundriss:



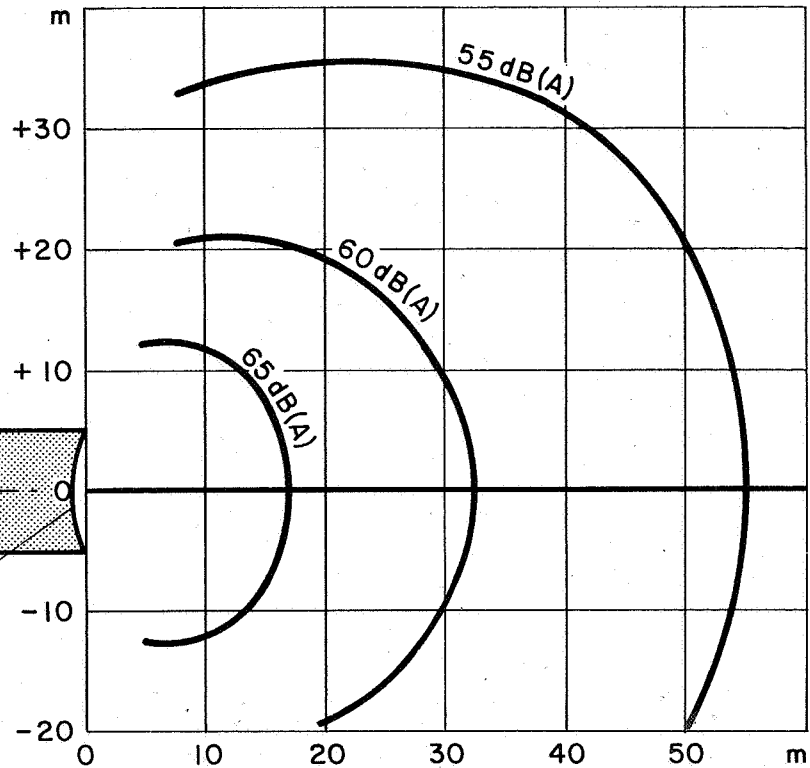
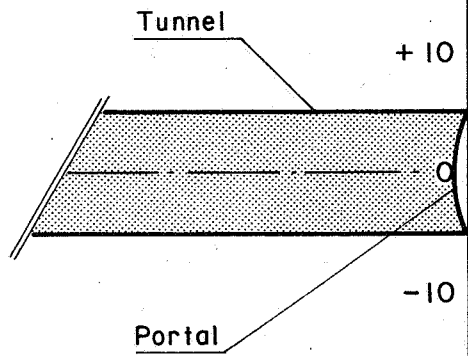
b) Winkel zur Tunnelachse $\varphi = 60^\circ$

Grundriss:



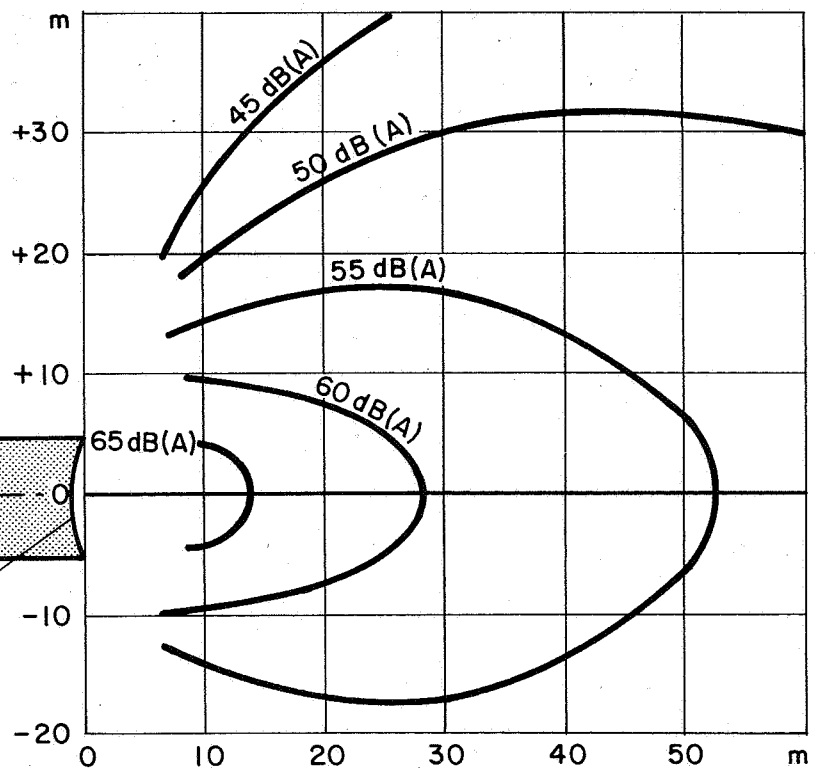
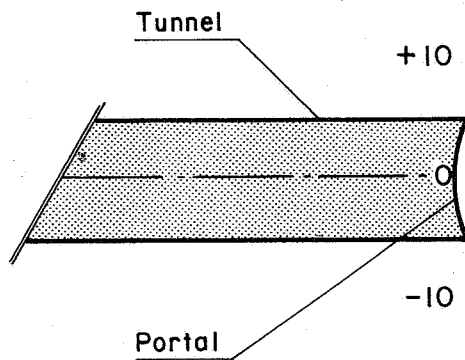
a) Schallquellenposition:
50 m im Tunnel

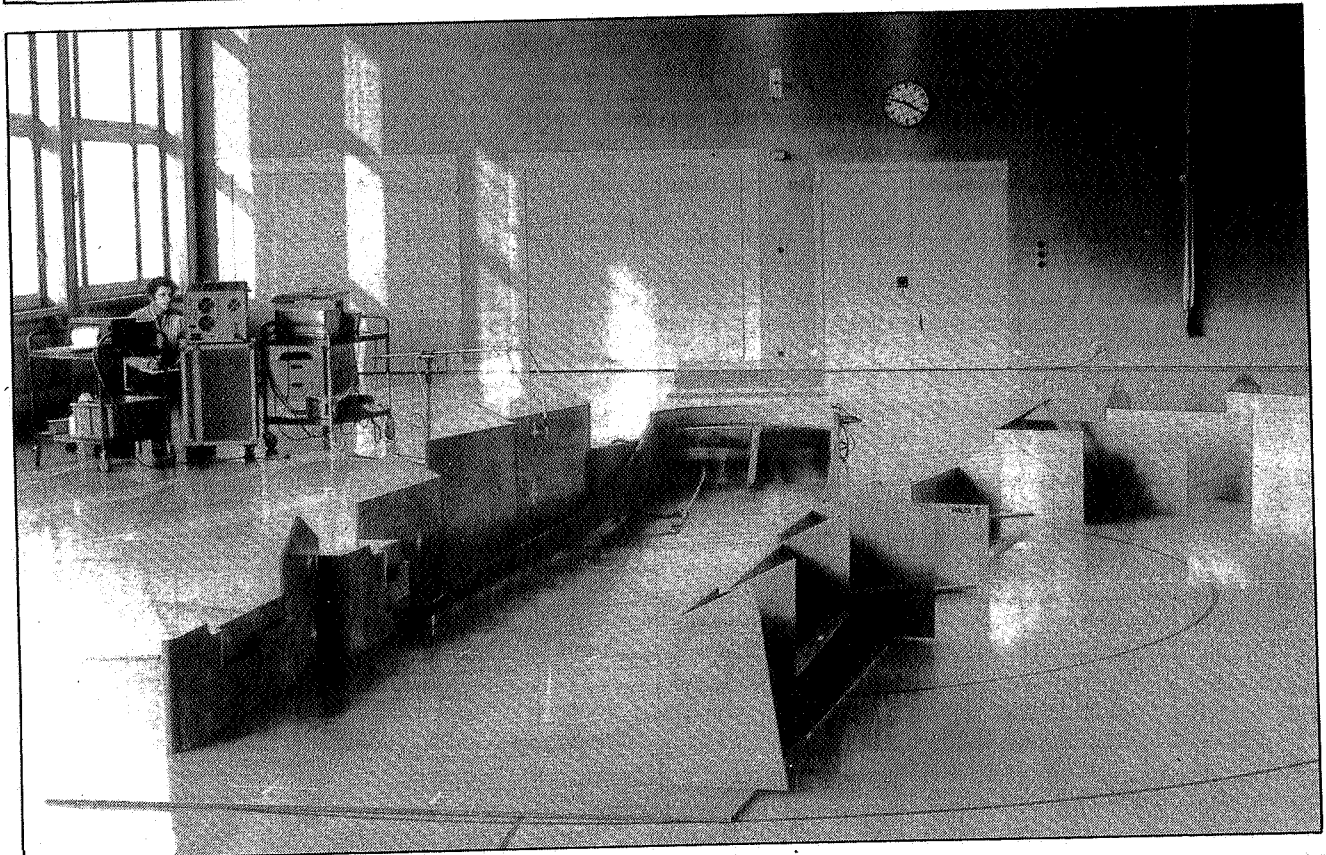
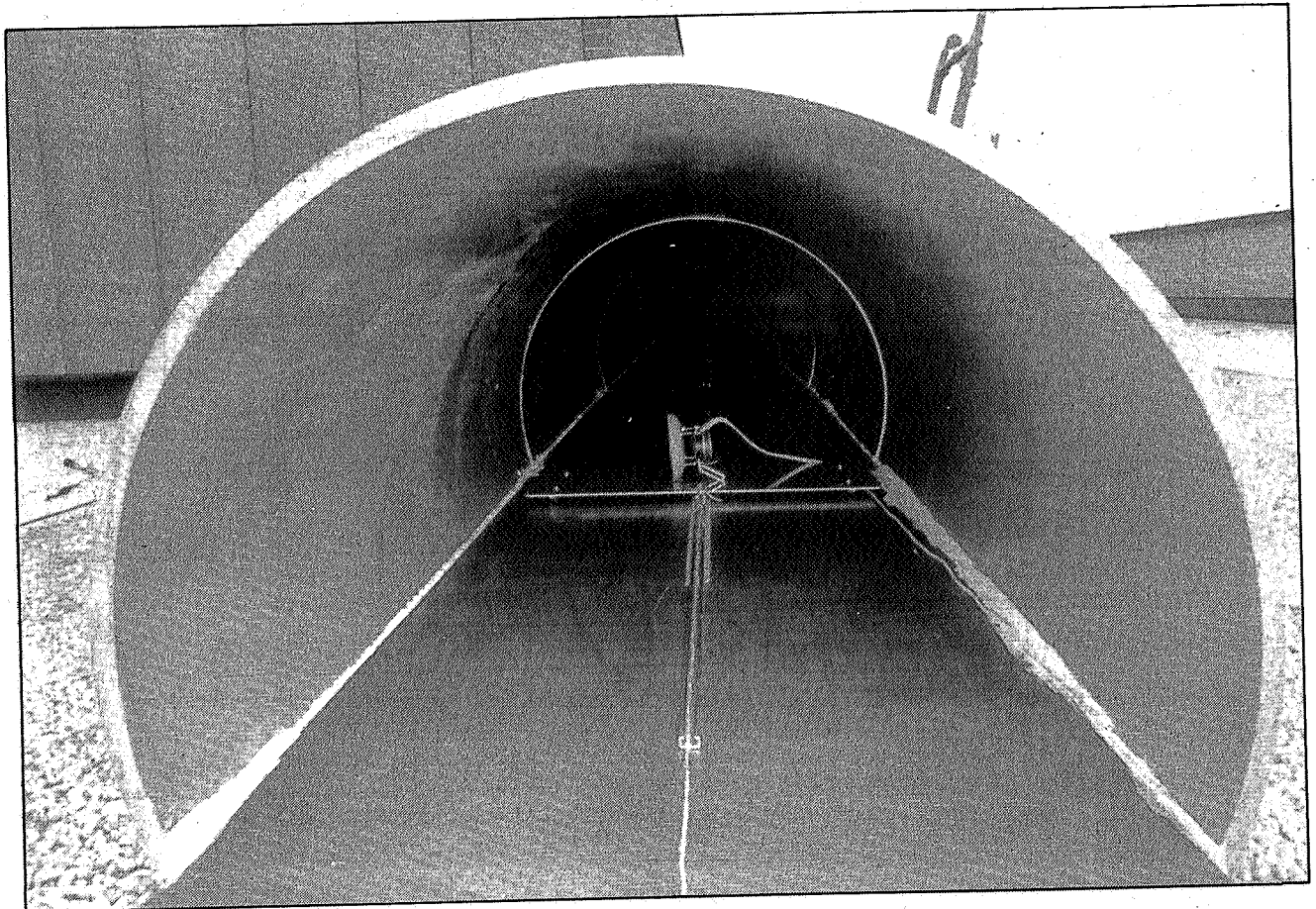
Grundriss:



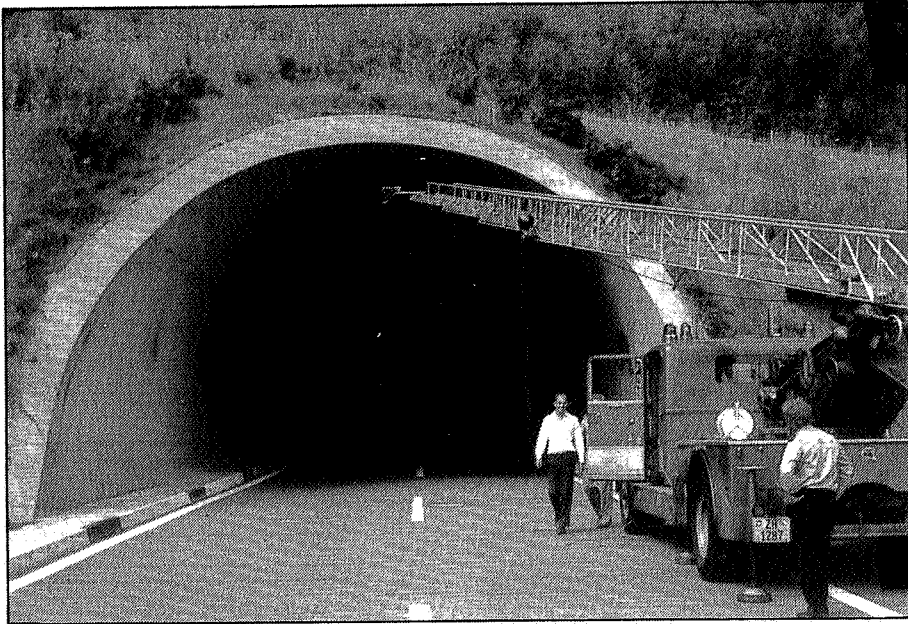
b) Schallquellenposition:
250 m im Tunnel

Grundriss:



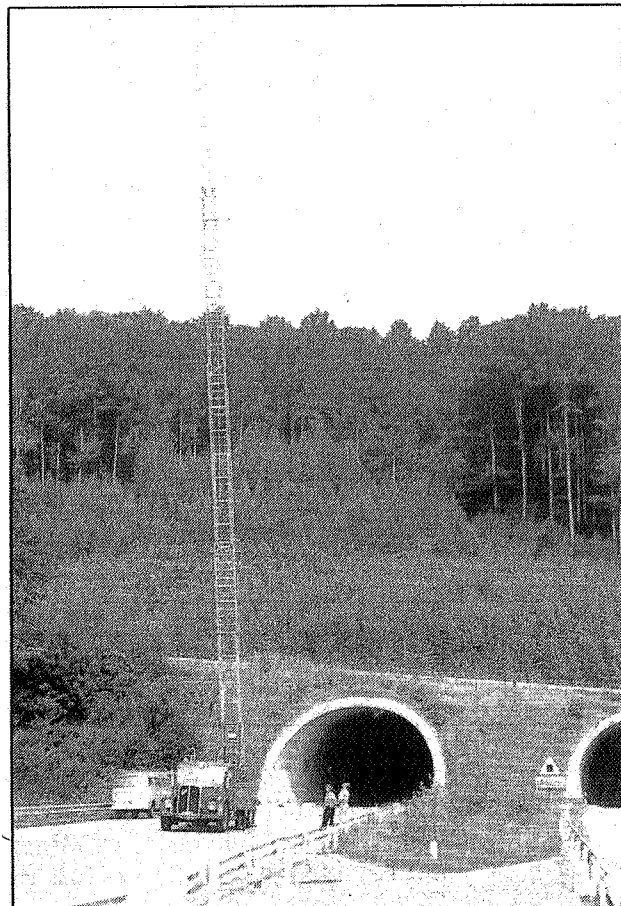


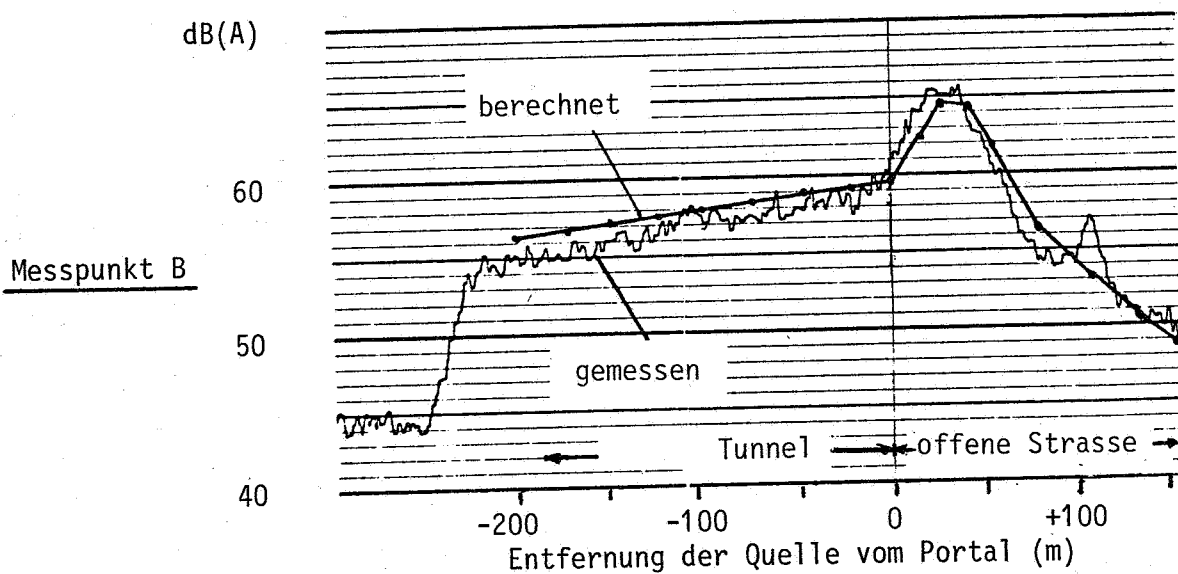
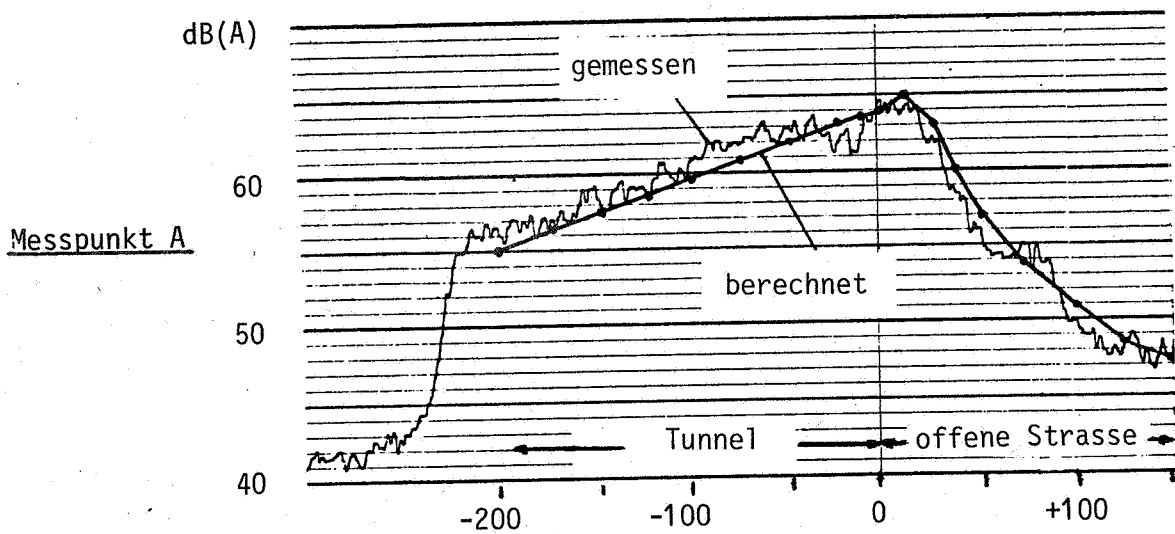
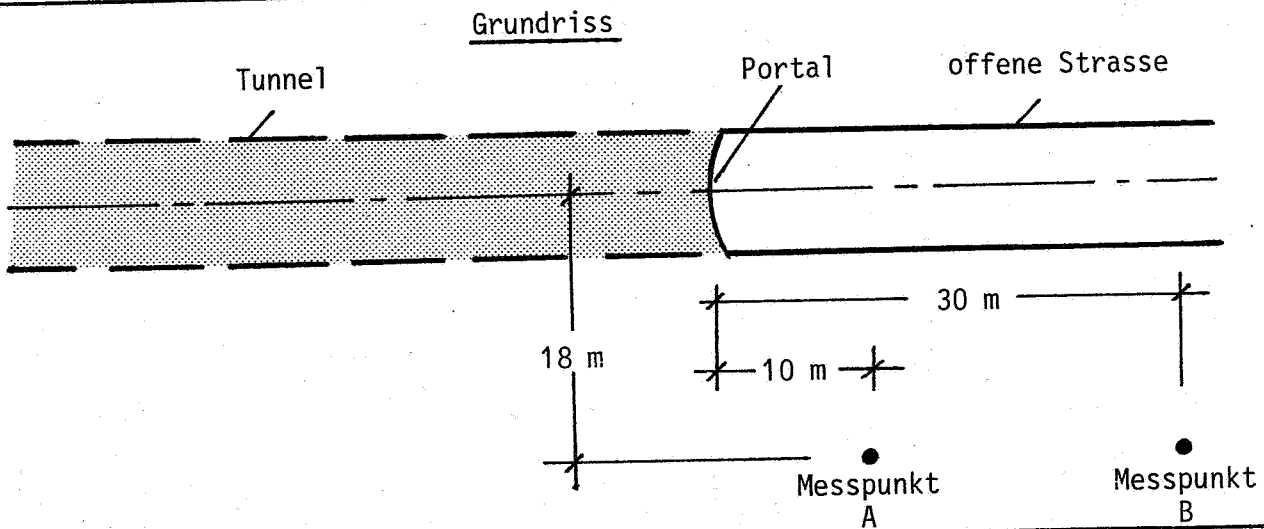
Messungen am Buchbergtunnel, 21.8.79

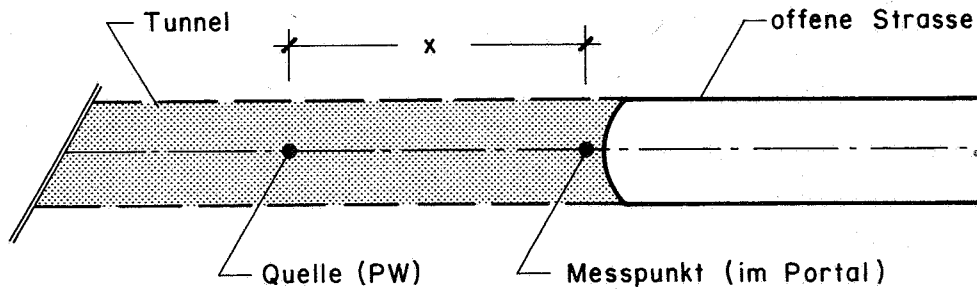


Referenzpunkt in der Tunnelöffnung

Messungen seitlich und vertikal über der Fahrbahn

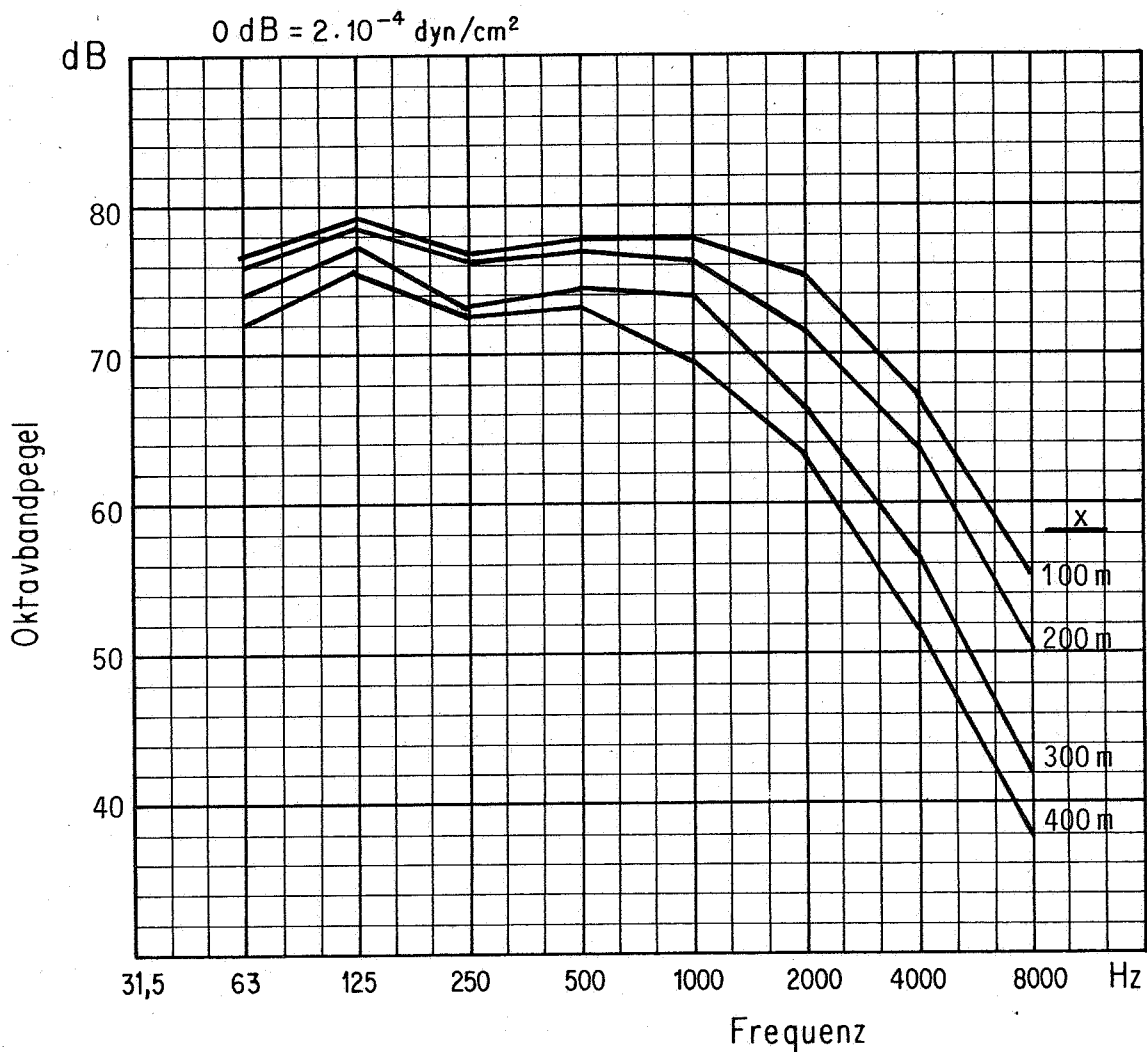




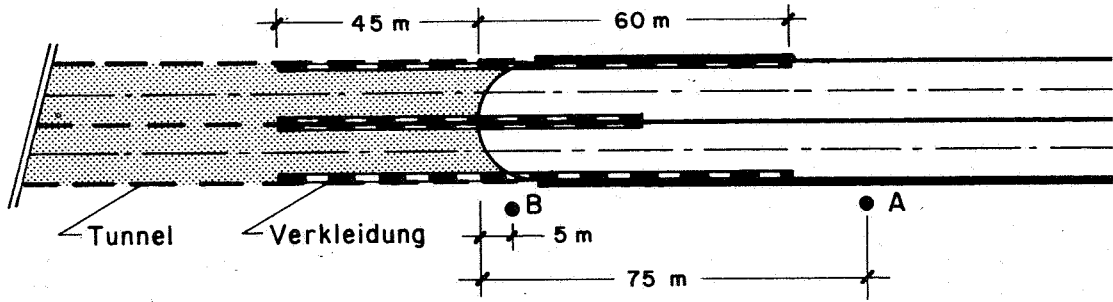


Messort: Buchberg - Tunnel

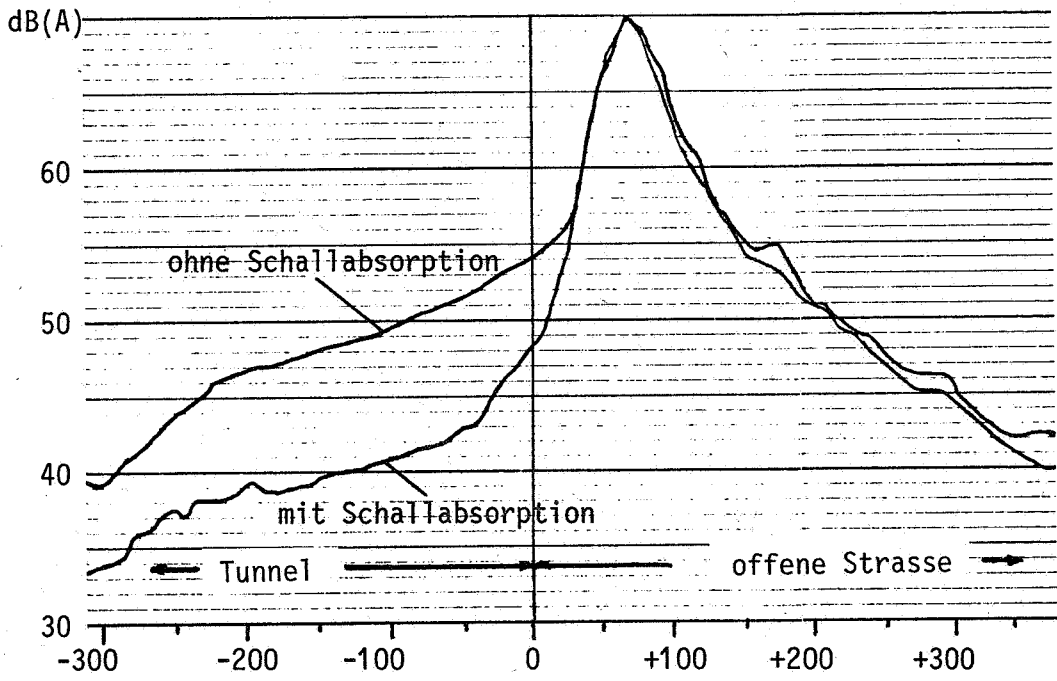
Geschwindigkeit: 80 - 100 Km/h (Durchschnitt von 3 PW-Vorbeifahrten)



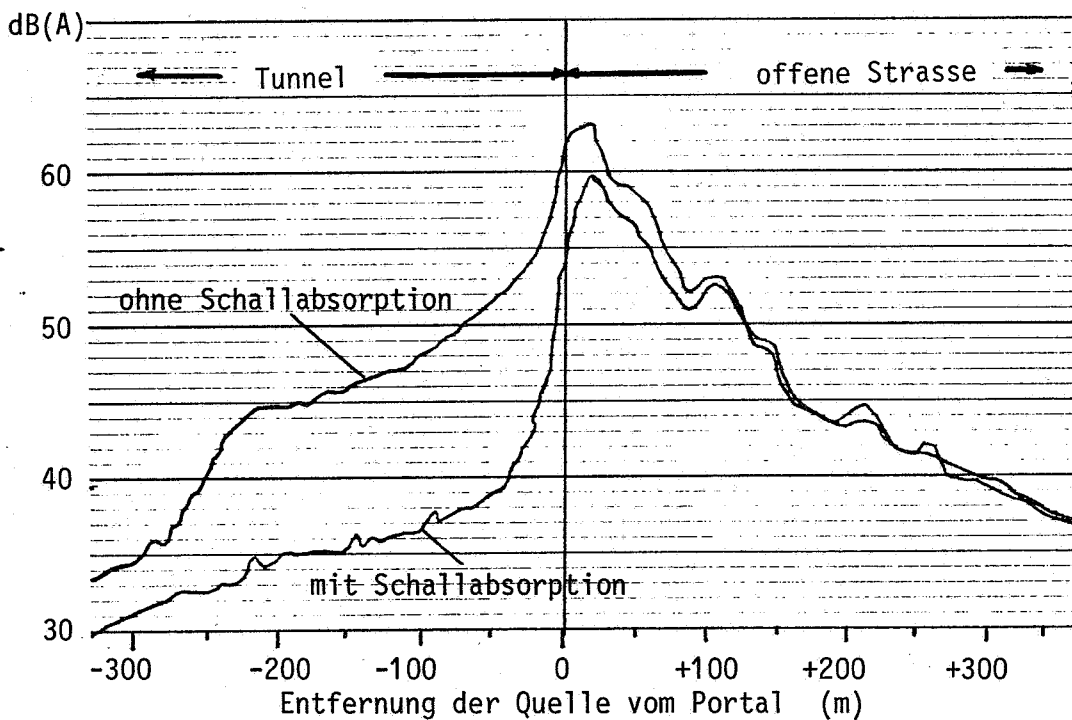
Grundriss



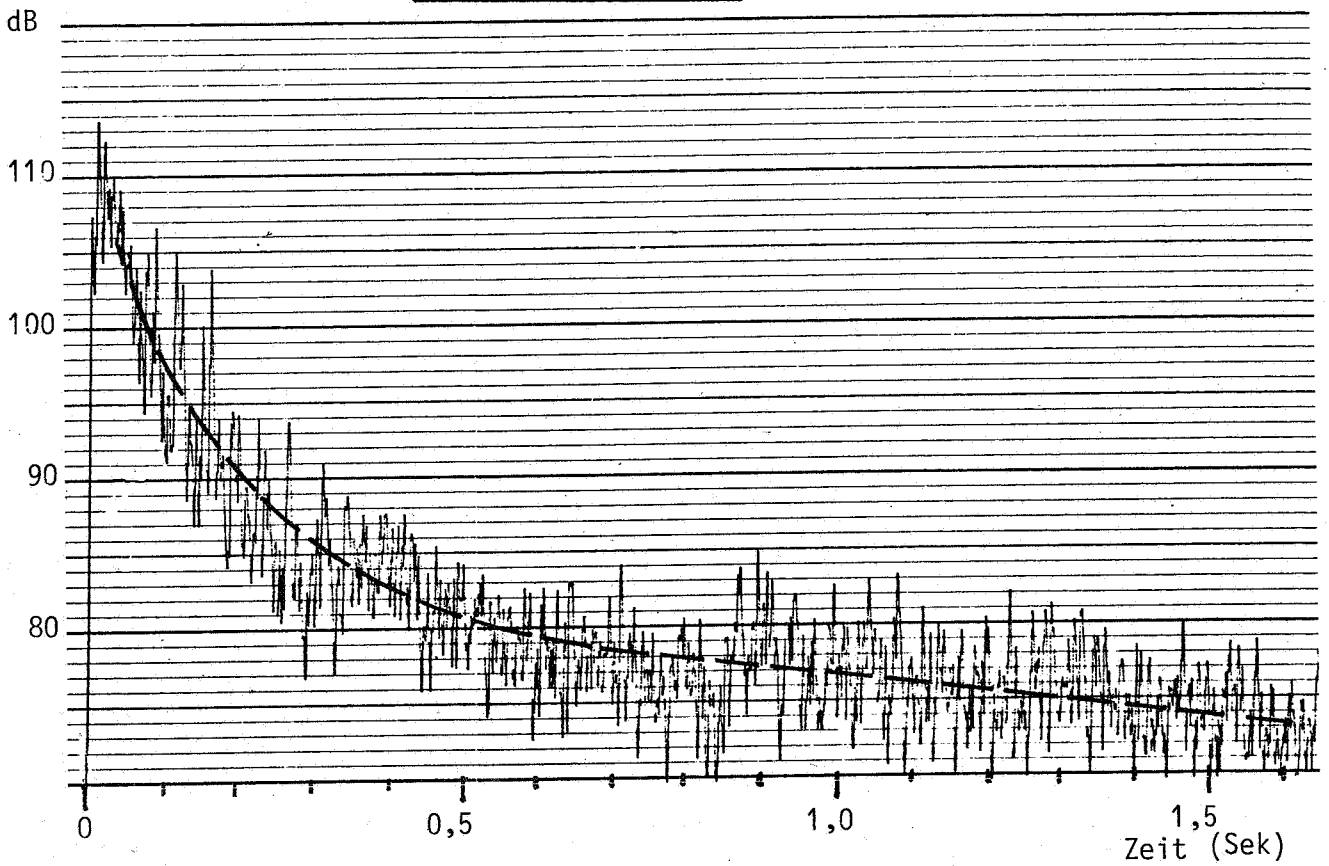
Messpunkt A



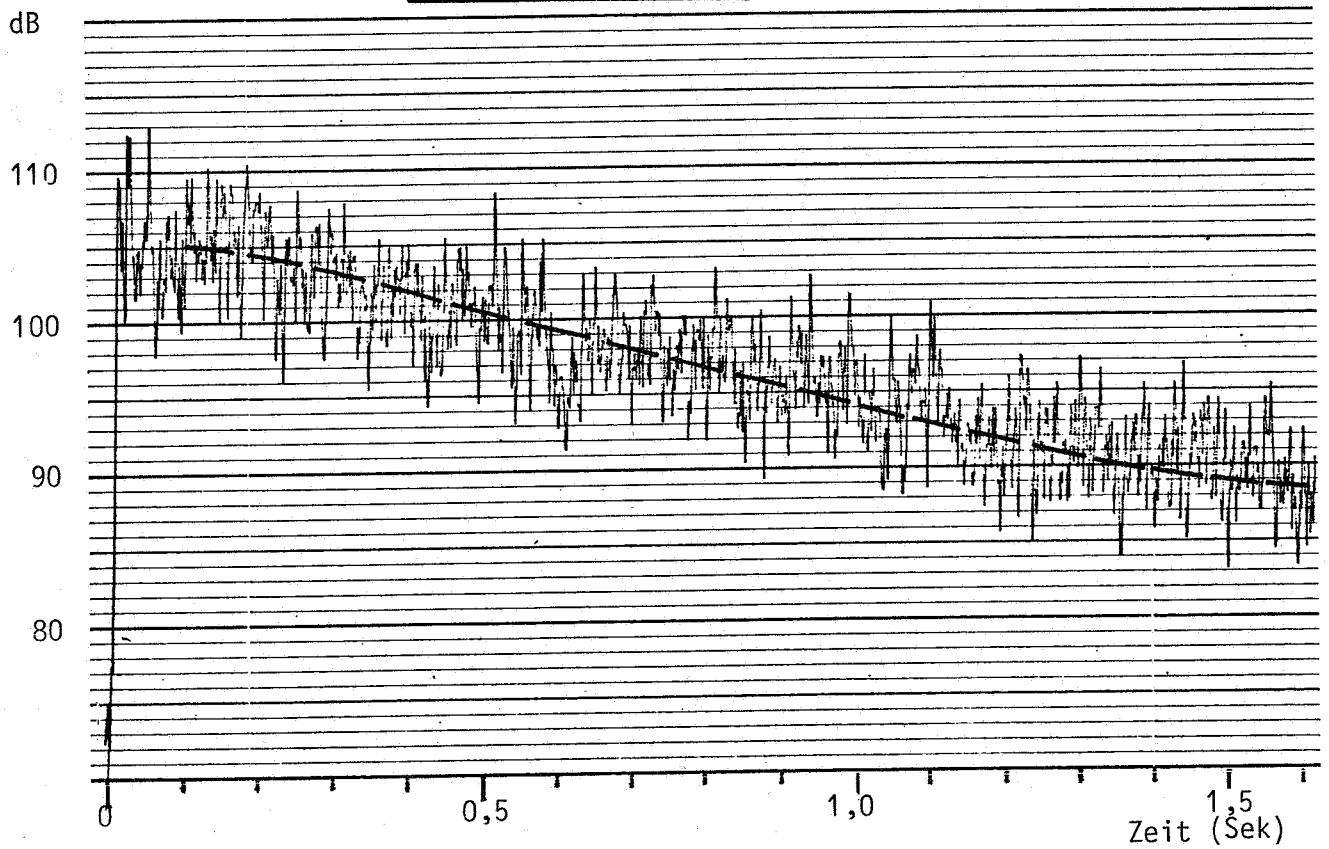
Messpunkt B



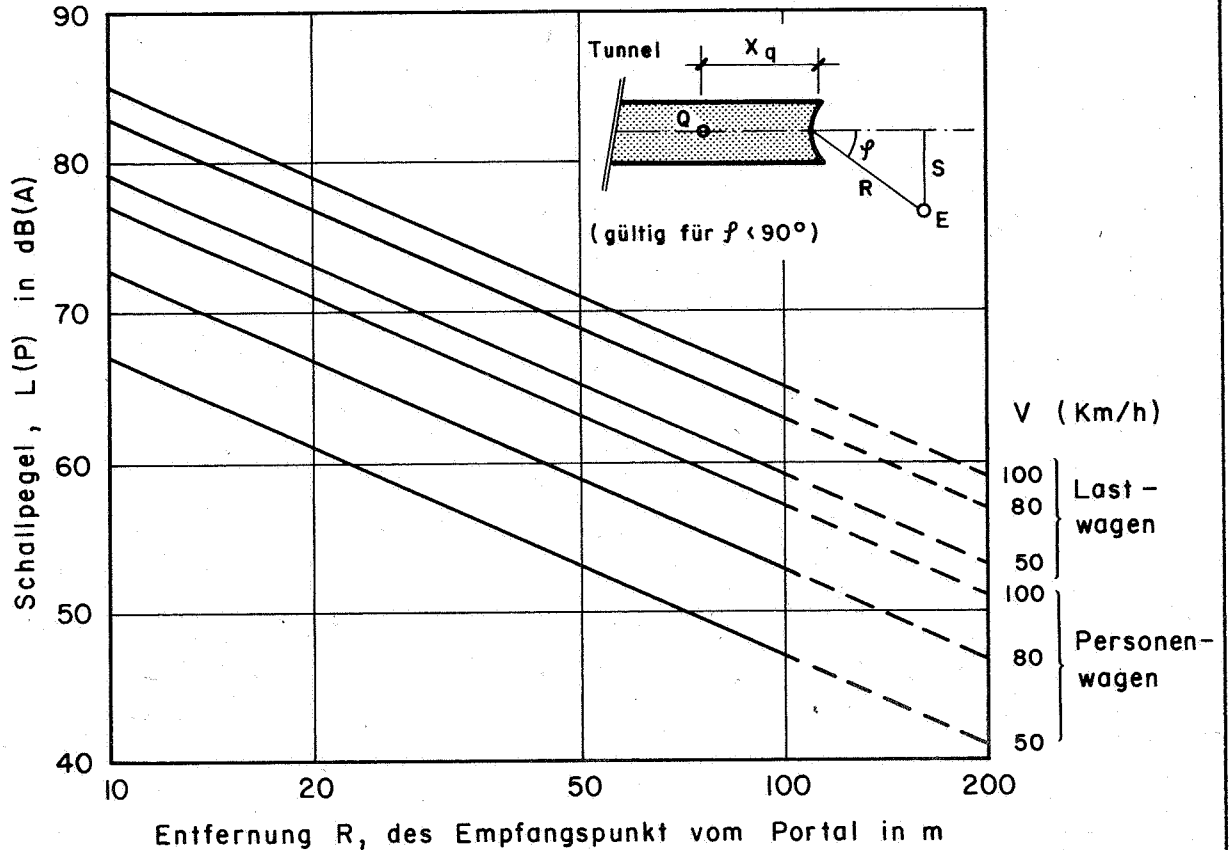
mit Schallabsorption



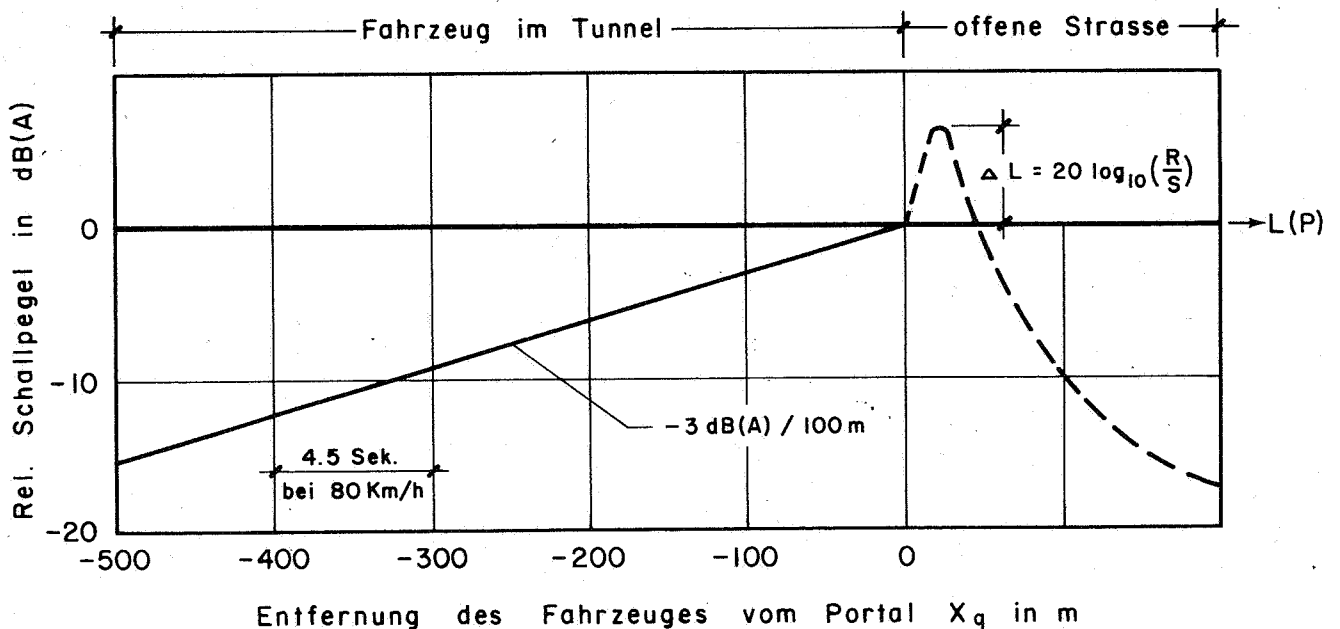
ohne Schallabsorption



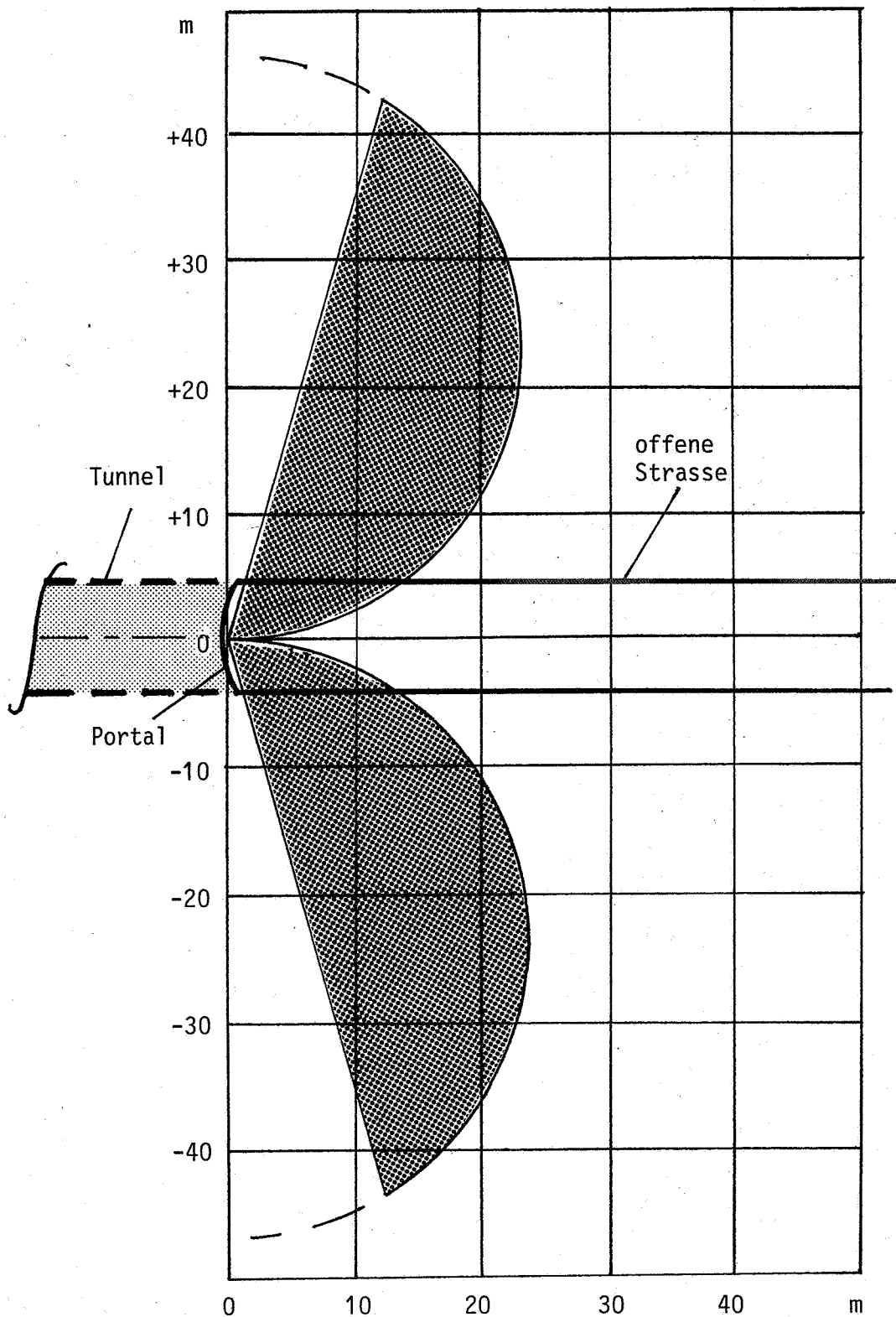
a) Schallpegel L(P), wenn sich das Fahrzeug im Portalquerschnitt befindet



b) Vereinfachter Pegelverlauf bei einer Vorbeifahrt
($0 \text{ dB} = L(P)$, siehe a))



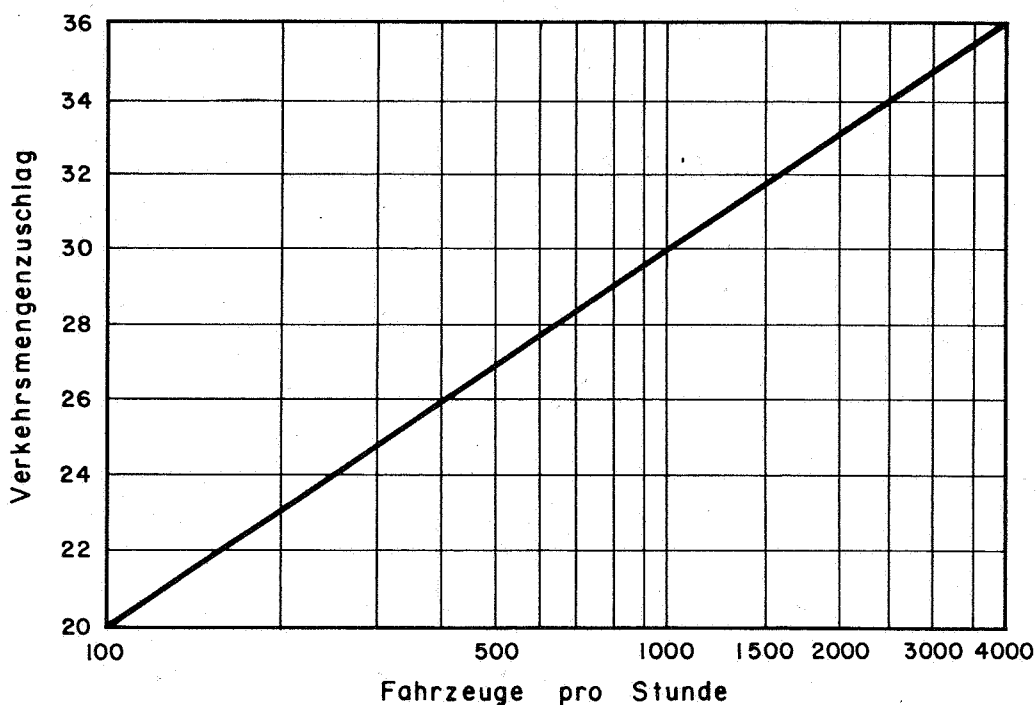
Grundriss:



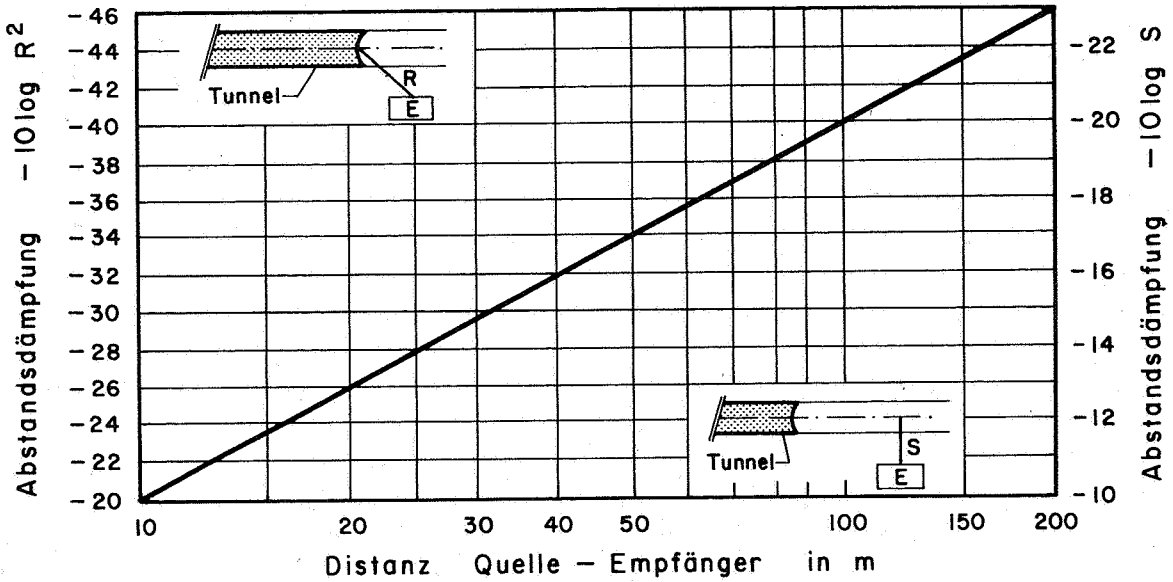
GRUNDWERT DES MITTELUNGSPEGELS L_G

v(PW) km/h	Lastwagenanteil (Anzahl LW / Totalzahl Fzg)							
	0	.02	.05	.10	.15	.20	.25	.30
40	44	45	46	48	49	50	51	51
50	45	46	47	49	50	51	51	52
60	46	47	48	50	51	52	52	53
70	48	49	50	51	52	53	53	54
80	49	50	51	52	53	54	54	55
90	50	51	52	53	54	55	55	56
100	52	52	53	54	55	55	56	56
110	53	53	54	55	55	56	56	57
120	54	54	55	55	56	56	57	57
130	55	55	55	56	56	57	57	57

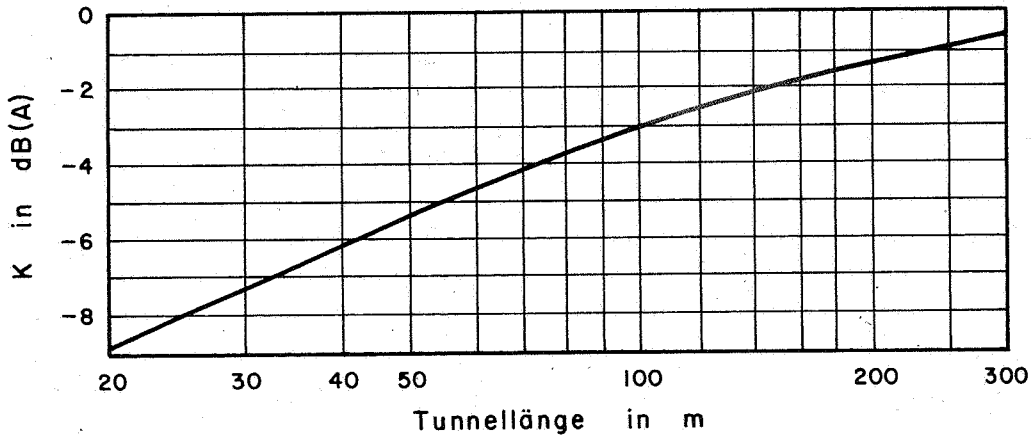
VERKEHRSMENGENZUSCHLAG $10 \log M$



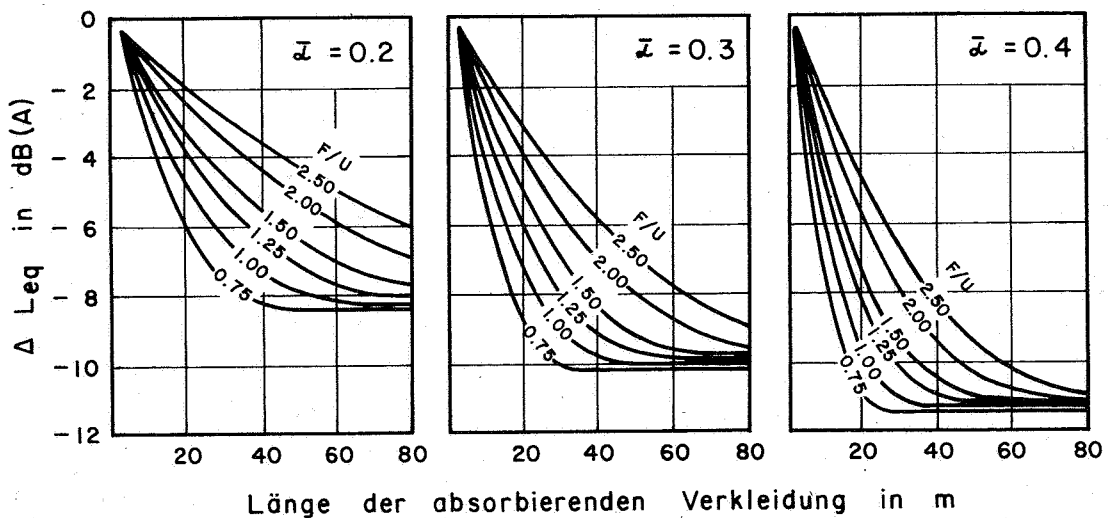
Abstandsdämpfung

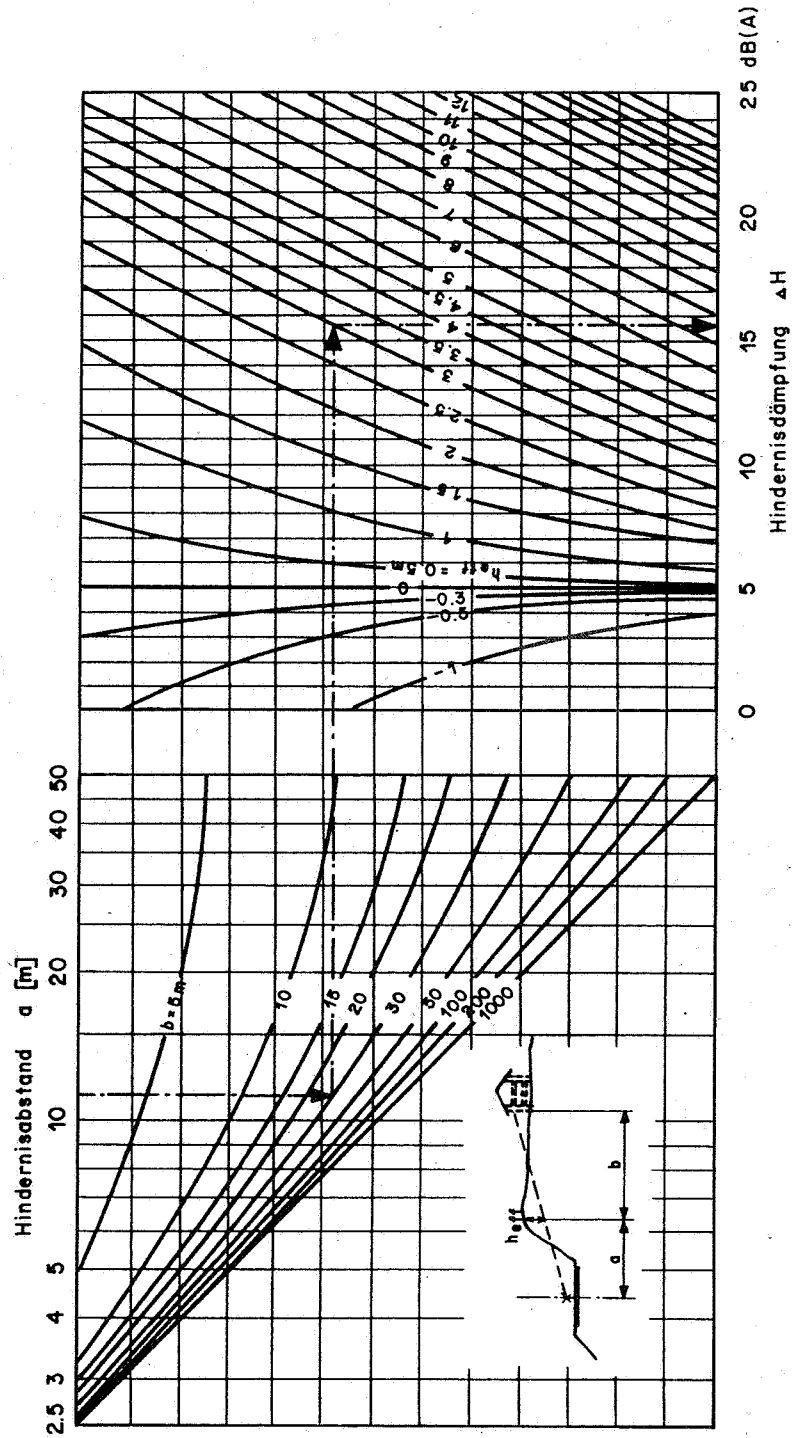


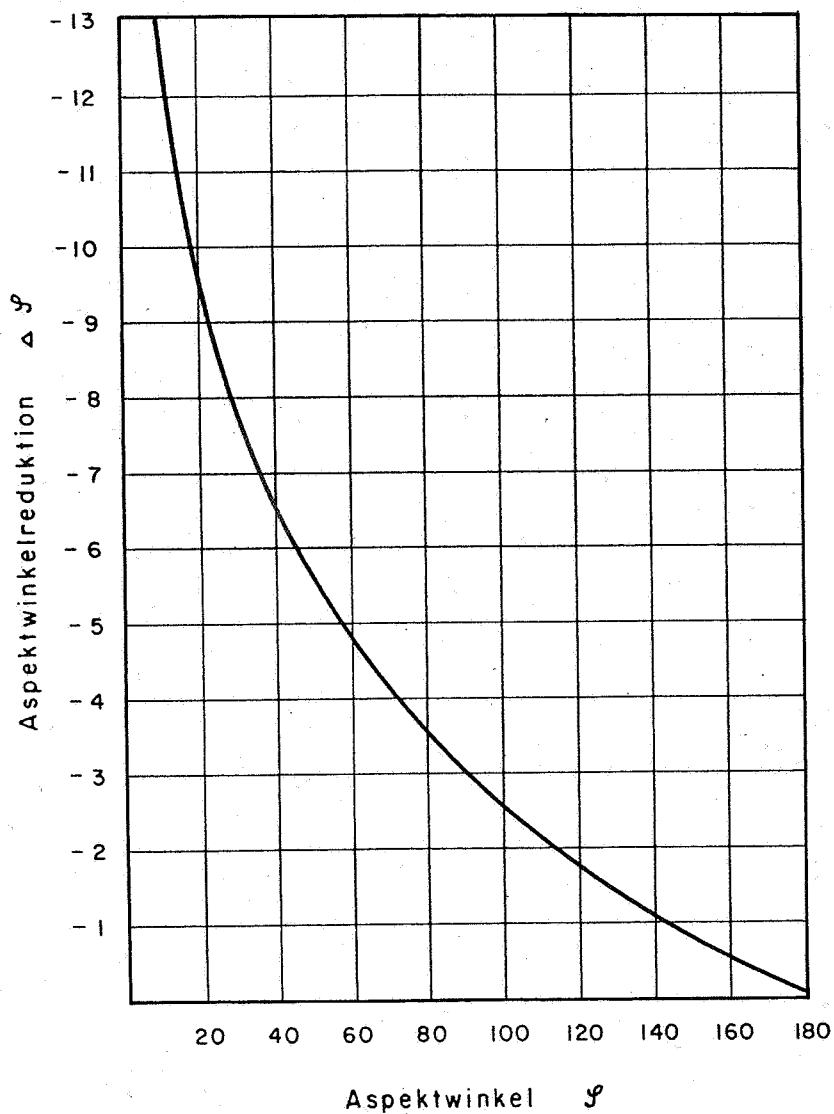
Korrektur K für kurze Tunnels



Absorbierende Verkleidung







Energetische Addition "⊕" von Schallpegeln

Allgemein:

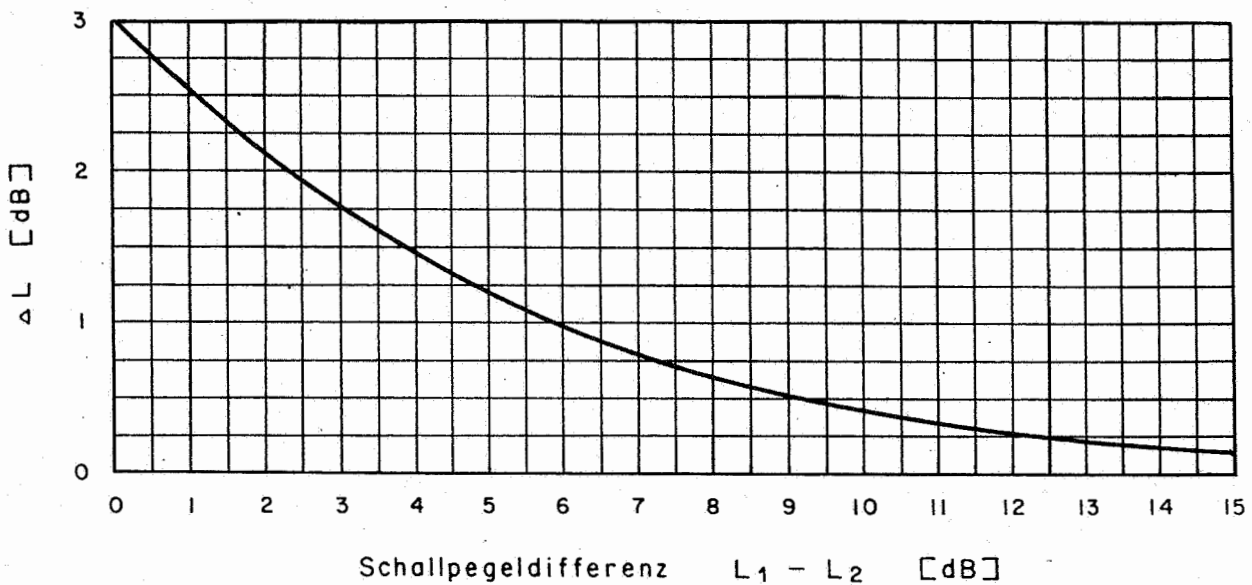
$$L_{tot} = 10 \log \left[\sum_i 10^{0.1 L_i} \right]$$

Addition von 2 Schallpegeln:

Es sei $L_1 \geq L_2$.

$$L_{tot} = 10 \log \left[10^{0.1 L_1} + 10^{0.1 L_2} \right] = L_1 + 10 \log \left[1 + 10^{-0.1(L_1-L_2)} \right]$$

$$L_{tot} = L_1 + \Delta L$$



Beispiel: $L_1 = 71$ dB $L_2 = 70$ dB $L_3 = 68$ dB.

$$L_2 - L_3 = 2 \text{ dB} \quad \Delta L = 2.1 \text{ dB} \quad L_2 = 72.1 \text{ dB}$$

da $L_2 \geq L_1$

$$L_2 - L_1 = 1.1 \text{ dB} \quad \Delta L' = 2.5 \text{ dB} \quad L_{tot} = 74.6 \text{ dB}$$

$$L_{tot} = L_1 \oplus L_2 \oplus L_3 = \underline{74.6 \text{ dB}}$$