

KÖRPERSCHALLIMMISSIONEN BEIM SPRENGVORTRIEB: VERGLEICH ZWISCHEN EINEM MATHEMATISCHEN MODELL UND MESSRESULTATEN

Angelo Bernasconi und Dario Bozzolo - IFEC Consulenze SA Rivera

1 Einführung

Die Infrastruktur der Strassentransportwege, insbesondere Autobahnen, ist heute zum Teil völlig überlastet. Gleichzeitig wird in Zukunft immer öfter die Situation auftreten, dass bei zum Teil veralteten Tunneln wichtige Wartungsarbeiten durchgeführt werden müssen. Ein für solche Fälle möglicher Ansatz besteht darin, dass die bestehende Infrastruktur ausgebaut wird: es wird ein Sanierungstunnel oder sogar ein neuer Tunnel gebaut. In Zukunft wird es immer öfters vorkommen, dass eine neue Tunnelröhre neben einer (oder zwei) bestehenden Röhren gebaut werden muss.

Für den Bau eines neuen Tunnels kommen zwei bautechnische Vortriebs-Varianten in Frage:

- Vortrieb mit Tunnelbohrmaschine (TBM) und
- Sprengvortrieb (SPV).

Dank der neuen Sprengstoff-Technologie ist der Sprengvortrieb insbesondere bei nicht zu langen Tunneln wirtschaftlich sehr interessant. Aus diesem Grund hat man ein grosses Interesse daran, wie sich der Einsatz von Sprengstoff beim Bau einer weiteren Tunnelröhre auf den bereits vorhandenen Verkehrslärm in bestehenden Tunneln auswirkt. Insbesondere soll geklärt werden, ob durch den Einsatz von Sprengstoff der induzierte Schallpegel im danebenliegenden Tunnel die Autofahrer erschrecken und damit Unfälle verursachen könnte.

Um diese Frage zu beantworten, wurde ein mathematisches Modell (Kapitel 2) entwickelt. Gleichzeitig wurden Sprengversuche in verschiedenen Tunneln durchgeführt (s. Kapitel 3). Das Modell wurde auf Grund der aus den Messungen gewonnenen Erkenntnisse verfeinert und kalibriert. Aus den Messresultaten wurde die Situation für die Autofahrer während einer realen Sprengung nachgebildet (s. Kapitel 4).

2 Mathematisches Modell

In einer Autobahntunnelröhre soll der Schalldruck in Abhängigkeit des Ortes geschätzt werden, wenn eine Sprengung im benachbarten Gestein stattfindet.

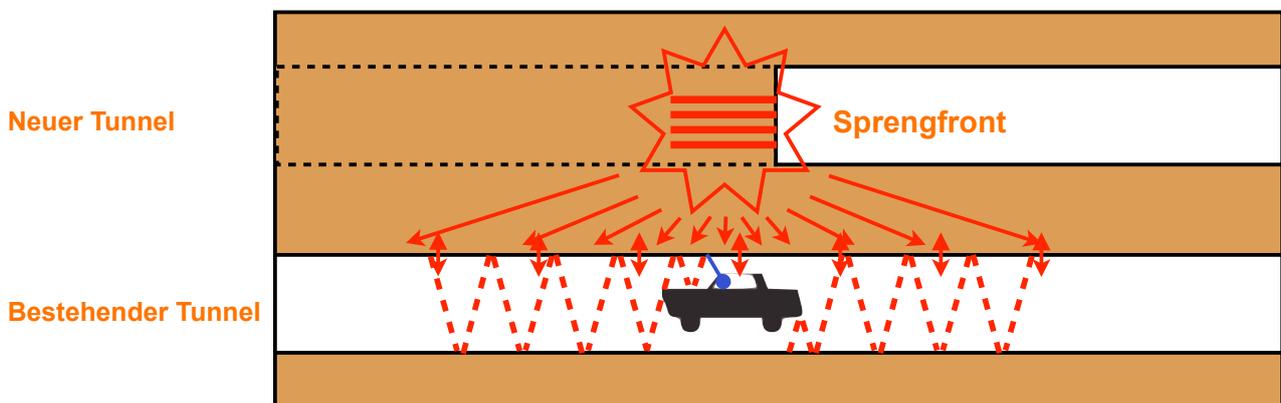


Abbildung 1: Methodologisches Vorgehen.

Das methodologische Vorgehen ist in Abbildung 1 dargestellt und besteht aus den folgenden Schritten:

- Sprengung (Q/Zündstufe);
- Ausbreitung elastischen Wellen (KS);
- Erregung Tunnelwand und Abstrahlung von Schall;
- Übertragung von mehreren Schallwellen im Tunnel (mit Reflexionen und Absorption);
- Pegelverlauf im Tunnel: $L_{eq}(x,t)$;
- Pegelverlauf im stillstehenden Auto;
- Pegelverlauf im fahrenden Auto mit Hintergrundlärm.

Es wird angenommen, dass der durch die Sprengung verursachte Körperschall als Oberflächenschwinggeschwindigkeit der Tunnelröhre durch eine Verallgemeinerung der sogenannten Koch'schen Formel berechnet werden kann:

$$v = 100 \cdot Q^{0.5} \cdot d^{-1} \quad (1)$$

Dabei sind v die Geschwindigkeit (mm/s), Q die Lademenge pro Zündstufe (kg) und d (m) die Entfernung zum Sprengort. In der Norm DIN 4150-1 (Erschütterungen im Bauwesen Teil 1: Vorermittlung von Schwingungsgrößen, Ausgabe Juni 2001) wird für die Vorabschätzung von Sprengerschütterungen die verallgemeinerte Koch'sche Formel

$$v = k \cdot Q^b \cdot d^{-m} \quad (2)$$

angegeben, wobei der Bodenfaktor (k), der Ladungsexponent (b) und der Entfernungsexponent (m) Parameter sind, die von Fall zu Fall ändern können.

Das Problem lässt sich demzufolge auf die Bestimmung des Schallfeldes in einer Röhre zurückführen, wenn die ortsabhängige Schwinggeschwindigkeit der Tunnelwand als Randbedingung gegeben ist. Vereinfachend und im Sinne einer „worst case“-Betrachtung wird generell von einem Abstrahlgrad von 1 ausgegangen, d.h. die von einem Flächenelement mit Flächeninhalt A_Q und Normalkomponente der Oberflächengeschwindigkeit v_Q abgestrahlte Schalleistung P_Q wird angesetzt als

$$P_Q = \rho c A_Q v_Q^2 \quad (3)$$

Damit kann bei bekannter Schnelle auch die abgestrahlte Schalleistung als bekannt angenommen werden. Für die Berechnung des erzeugten Schalldrucks sind sowohl die geometrischen Abmessungen der strahlenden Fläche als auch die verstärkende Wirkung durch Reflexionen an den Begrenzungsflächen zu berücksichtigen.

Für die numerische Behandlung des Problems wird die Tunnelröhre in Längsrichtung in einzelne N Scheiben unterteilt (s. Abbildung 2).

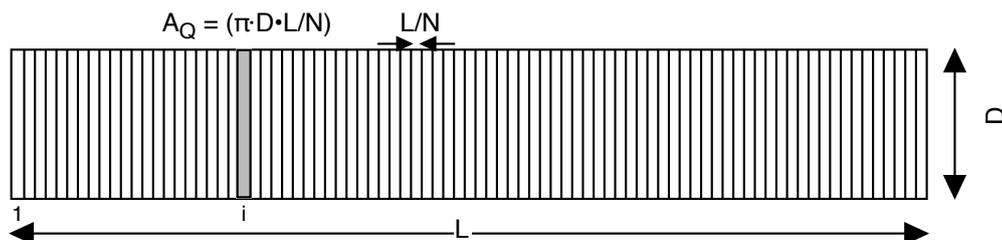


Abbildung 2: Tunnelteilung für die numerische Behandlung: jede Scheibe ist eine Quelle mit emittierender Oberfläche A_Q .

Eine Möglichkeit zur Berücksichtigung der Reflexionen besteht im sogenannten Diffusfeldansatz: d.h. es wird angenommen, dass sich in einer Tunnelscheibe (A_{Qi}) ein diffuses Schallfeld einstellt. Eine Tunnelscheibe kann als Raum mit einer totalen Absorptionsfläche A_{tot} aufgefasst werden. Wenn man für A_{tot} von einem typischen Wert von 80 m^2 (etwas weniger als die zweifache Tunnel-Querschnittsfläche, da durch die „Möblierung“ des Tunnels mit Fahrzeugen ein Teil dieser Stirnflächen abgedeckt wird) ausgegangen wird, ergibt sich ein Hallradius r_H von

$$r_H = \sqrt{\frac{A_{tot}}{16\pi}} = 1.8 \text{ m} . \quad (4)$$

Bei Punktquellen gilt damit, dass der Diffusfeldanteil ab Abständen von einigen Metern den Direktschall übersteigt. Obschon beim vorliegenden Problem nicht von einer Punktquelle sondern von einer auf der Oberfläche der Scheibe ausgedehnten Quelle gesprochen werden kann, ist es für eine Schallfeldabschätzung sinnvoll, nur den Diffusschall zu berücksichtigen, basierend auf dem Zusammenhang:

$$\frac{dW}{dt} = P_Q - P_{abs} - 2\alpha_L c \cdot W(t) , \quad (5)$$

wobei folgende Definitionen eingeführt werden:

$W(t)$: über das ganze Raumvolumen (V) verteilte Schallenergie,

P_Q : abgestrahlte Schalleistung,

P_{abs} : an der Raumbegrenzung absorbierte Energie pro Zeiteinheit,

α_L : Dämpfungskoeffizient der Luft (für den Schalldruck),

c : Schallgeschwindigkeit.

Der letzte Term der Gleichung (5) beschreibt die Luftdissipation, wobei der Faktor 2 auf die Umrechnung vom Druck in die Energiedichte zurückzuführen ist ($w \propto p^2$).

Die an den Raumbegrenzungsflächen absorbierte Energie pro Zeiteinheit lässt sich aus geometrischen Überlegungen herleiten und ist durch folgende Gleichung gegeben:

$$P_{abs} = \frac{1}{4} A_{tot} c \cdot w(t) , \quad (6)$$

wobei $w(t)$ die Schall-Energiedichte ist. Unter Berücksichtigung von (1) erhält man damit:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{\rho c A_Q v_Q^2}{V} - \frac{1}{4} \frac{A_{tot} c}{V} w(t) - 2\alpha_L c \cdot w(t) . \quad (5a)$$

Wenn die Anfangsbedingung $w(0) = 0$ gilt, lässt sich diese Gleichung ohne Einschränkung ganz allgemein wie folgt integrieren:

$$w(t) = \frac{\rho A_Q v_Q^2}{\frac{1}{4} A_{tot} + 2\alpha_L V} \cdot e^{-\left(\frac{1}{4} \frac{A_{tot} c}{V} + 2\alpha_L c\right)t} , \quad (7)$$

woraus sich das Schalldruckquadrat $p^2(t)$ ergibt:

$$p^2(t) = \frac{(\rho c)^2 A_Q v_Q^2}{\frac{1}{4} A_{tot} + 2\alpha_L V} \cdot e^{-\left(\frac{1}{4} \frac{A_{tot} c}{V} + 2\alpha_L c\right)t} . \quad (7b)$$

Um das Verhalten des nach dieser Formel berechneten Schalldruckes in Funktion der Dämpfungskonstante α_L der Luft und des Volumens V zu untersuchen, wurde ein Rechteckimpuls für v_Q berücksichtigt (s. Abbildung 3).

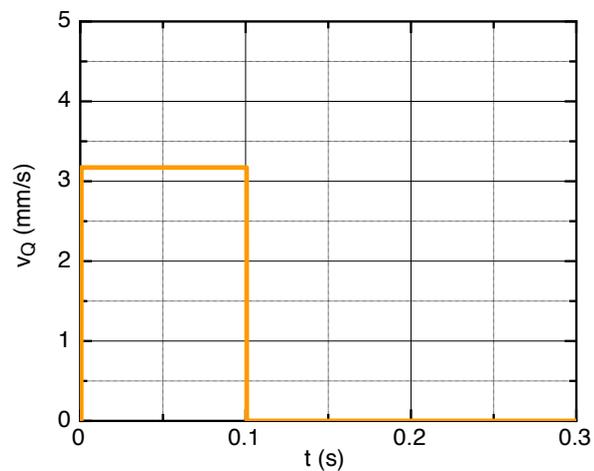


Abbildung 3: Oberflächengeschwindigkeit v_Q : Die Höhe des Impulses wurde gemäss der angepassten Koch'schen Formel mit den für die Tunnelwand des Belchen-Tunnels ($D = 10.4$ m und $L = 3'200$ m) bestimmten Parametern $k = 7'869$ mm/s, $b = 1.61$, $m = 2.26$ im Abstand von 38.3 m und für eine Lademenge $Q = 1.3$ kg berechnet.

Es wird weiter angenommen, dass die Erschütterung *nur* auf der zum Sprengort am nächsten liegenden Scheibe auftritt. Die daraus resultierenden Pegelverläufe sind in Abbildung 4 für drei verschiedene Volumina ($V = n \cdot \Delta x \cdot \pi \cdot (D/2)^2$, mit $\Delta x = 3.6$ m und $n = 2, 10$ und 50) und einer Dämpfungskonstanten $\alpha_{L1} = 1.84 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ die für mittlere Frequenzen¹ (500 Hz) gültig ist, dargestellt.

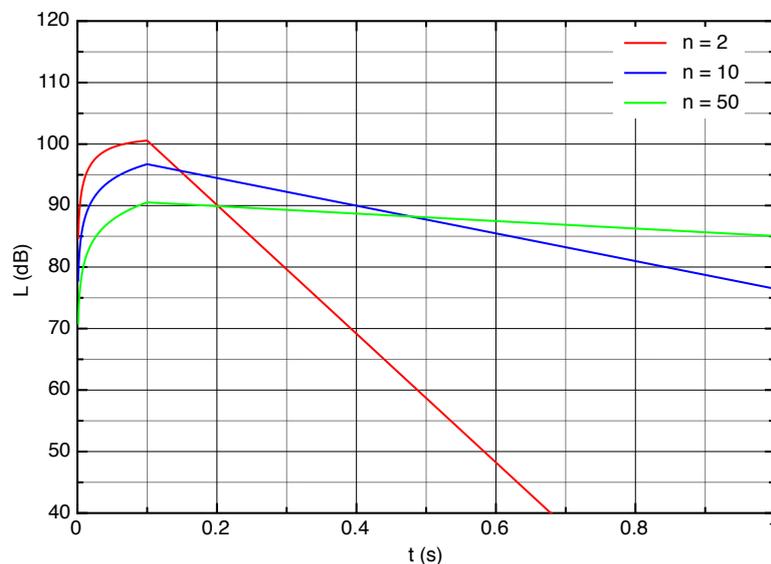


Abbildung 4: Pegelverläufe nach Gleichung 7(b) für eine Lademenge $Q = 1.3$ kg im Abstand von 38.3 m, im Fall wo nur eine Scheibe emittiert. Die Kurven wurden für eine Dämpfungskonstante $\alpha_{L1} = 1.84 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ berechnet und beziehen sich auf ein Raumvolumen V von 2 (rot), 10 (blau) und 50 (grün) Tunnelscheiben. Die Impulsdauer beträgt 0.1 s wie in Abbildung 3

In der graphischen Darstellung stellt man fest, dass für kleine Volumina (2 Scheiben) das diffuse Schallfeld

¹ H. Henn, G.R. Sinambari, M. Fallen: Ingenieurakustik (1984) S. 149

rasch aufgebaut bzw. abgebaut wird. Entsprechend ist die Nachhallzeit für kleine Volumen auch sehr kurz (ca. 0.6 s).

Zur Berechnung des Schallpegels im Tunnel muss man die Beiträge der verschiedenen Scheiben aufsummieren. Wenn man als Immissionspunkt die Scheibe i wählt, müssen zu dem in der Scheibe erzeugten Schallquadrat $p_{ii}^2(t)$

$$p_{ii}^2(t) = \frac{(\rho c)^2 A_Q v_Q^2}{\frac{1}{4} A_{tot} + 2\alpha_L \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \Delta x} \cdot e^{-\left(\frac{1}{4} \frac{2c}{\Delta x} + 2\alpha_L c\right)t}, \quad (8)$$

auch die Beiträge der anderen Scheiben

$$p_{ji}^2\left(t - \frac{\Delta x \cdot |j - i|}{c}\right), \text{ mit } j \neq i,$$

addiert werden, wobei die vom Schall benötigte Zeit zum Zurücklegen der Strecke zwischen Quelle (Scheibe j) und Immissionspunkt (Scheibe i) berücksichtigt wird. Man erhält damit

$$p_i^2(t) = \frac{(\rho c)^2 A_Q v_Q^2}{\frac{1}{4} A_{tot} + 2\alpha_L \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \Delta x} \cdot e^{-\left(\frac{1}{4} \frac{A_{tot} c}{V} + 2\alpha_L c\right)t} + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{(\rho c)^2 A_Q v_Q^2}{\frac{1}{4} A_{tot} + 2\alpha_L \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \Delta x \cdot (|j - i| + 1)} \cdot e^{-\left(\frac{1}{4} \frac{A_{tot} c}{V} + 2\alpha_L c\right)\left(t - \frac{\Delta x |j - i|}{c}\right)} \right). \quad (9)$$

Der Faktor $\frac{1}{2}$ vor dem zweiten Term berücksichtigt, dass die von jeder Scheibe j abgestrahlte Energie 50% nach links und 50% nach rechts abgestrahlt wird. Im Klartext bedeutet dies (s. Abbildung 5), dass für jede Scheibe j das erzeugte diffuse Feld im Volumen zwischen Emissionspunkt (j) und Immissionspunkt (i) evaluiert und energetisch aufsummiert wird.

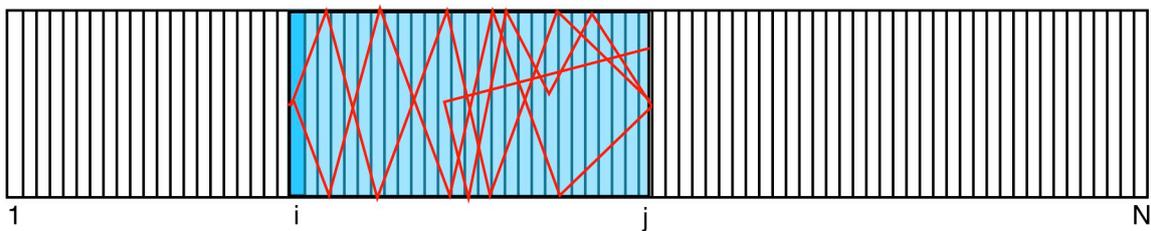


Abbildung 5: Schematische Darstellung des gebildeten diffusen Feldes im Volumen zwischen der Emissionsscheibe j und dem Immissionspunkt i .

Der zweite Term wird weiterhin nur hinzuaddiert, falls

$$t - \frac{\Delta x \cdot |j - i|}{c} > 0.$$

Obwohl in dieser Formel (zur Vereinfachung) die Geschwindigkeit des Körperschalls im Fels (4'000 m/s) nicht erscheint, wurde diese in unserem Modell auch berücksichtigt. Die zeitliche Verzögerung des Signals auf der ganzen Tunnellänge ($L=3'200$ m) kann etwa eine Sekunde betragen.

Im Modell wurde auch die Schallabsorption an den Seitenflächen berücksichtigt:

$$A_{\text{tot}} = 2 \cdot \text{Stirnfläche} + \alpha_p \cdot \text{Wandfläche} , \quad (10)$$

Wobei α_p der Absorptionskoeffizient des Wandmaterials ist.

Die Ergebnisse einer auf die ganze Tunnellänge bezogenen Simulation sind in Abbildung 6 dargestellt. Dabei wurde eine Sprengung im Mittelpunkt des Tunnels vorausgesetzt. Für v_Q wurde ein Impuls mit einer Dauer von 0.1 s wie in Abbildung 4 angenommen, wobei die Intensität für jede Scheibe nach der angepassten Koch'schen Formel mit dem Parameter $k = 7'869 \text{ mm/s}$, $b = 1.61$, $m = 2.26$ und für eine Lademenge $Q = 1.3 \text{ kg}$ berechnet wurde. Weitere Parameter sind: die Absorptionskonstante ($\alpha_{L1} = 1.84 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$) und der Abstand zwischen Sprengort und Tunnel (38.3 m). Die graphische Darstellung zeigt den zeitlichen Verlauf des Pegels an verschiedenen Standorten.

Man erkennt einen Übergang zwischen zwei Zuständen: einer ist charakterisiert durch die lokalen Emissionen und einer durch die Beiträge der entfernten Orte, welche sich mit der Schallgeschwindigkeit fortpflanzen. Der Übergang zwischen den zwei Zuständen verschiebt sich mit der Zeit, wenn man den Immissionspunkt in Richtung des Portals bewegt ($x = 0 \text{ m}$).

Die gestrichelte rote Kurve ist die Umhüllende (ab 1 s) zur Schar der Kurven. Für eine Sprengung der Dauer von 0.1 s mit einer Ladung von 1.3 kg in der Mitte des Tunnels liegt der maximale Pegel zwischen 107 dB (in der Tunnelmitte) und 90 dB (am Tunnelrand). Am Tunnelrand werden die höchsten Werte später erreicht, jedoch dauern sie länger.

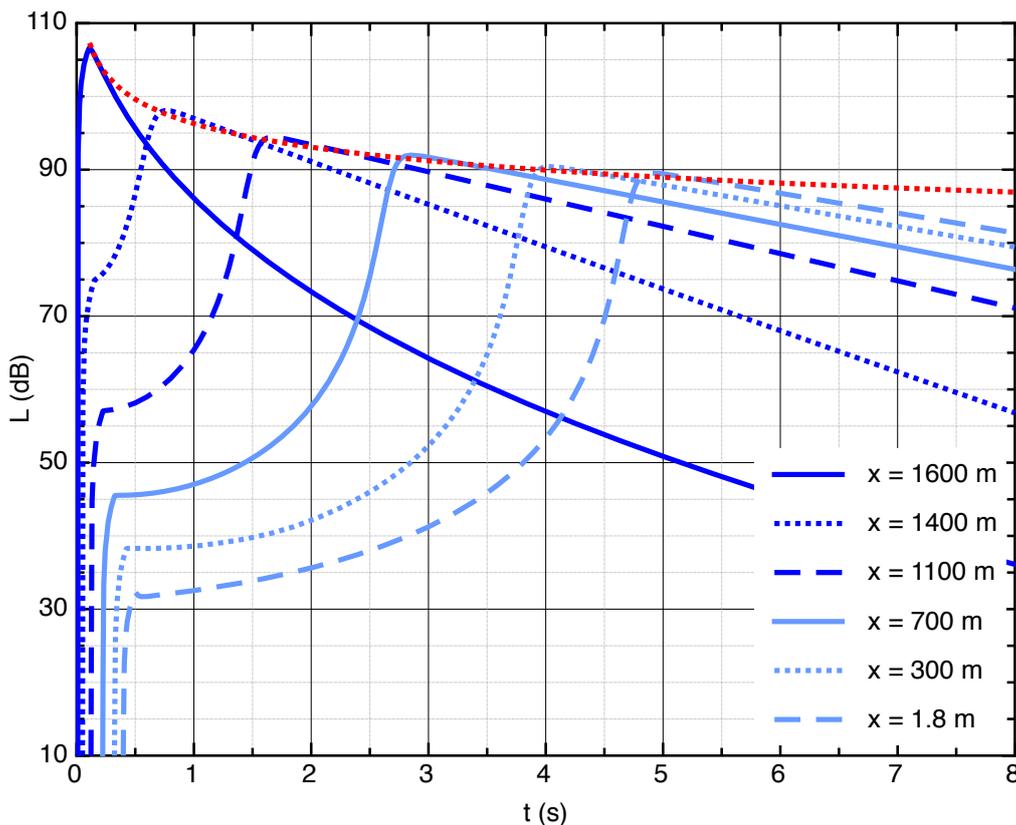


Abbildung 6: Simulation des Schallpegels (ohne Hintergrundlärm) für ausgewählte Orte im Tunnel als Funktion der Zeit mit folgenden Parametern: $\alpha_{L1} = 1.84 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$, $k = 7'869 \text{ mm/s}$, $b = 1.61$, $m = 2.26$, $Q = 1.3 \text{ kg}$, Impulsdauer = 0.1 s und Abstand zwischen Sprengort und Tunnel = 38.3 m. Die gestrichelte rote Kurve ist die Umhüllende zu den verschiedenen Kurve (ab 1 s). Der Wert von x ist gleich 0 m am Tunnelportal und beträgt 1'600 m in der Mitte.

3 Sprengversuche

Es wurden verschiedene Sprengversuche – im Gubrist-Tunnel (in der Nacht vom 16. November 2011) und im Belchen-Tunnel (in der Nacht vom 2. Mai 2013) – durchgeführt, um den durch den Einsatz von Sprengstoff induzierten Schalldruckpegel (in den folgenden Ausführungen wird nur noch der Begriff "Schallpegel" bzw. "Pegel" verwendet) im Detail zu untersuchen. Hier wird über die Ergebnisse der Sprengversuche im Belchen-Tunnel berichtet.

3.1 Gemessene Daten

3.1.1 Lärmmessungen während der Sprengungen

Im Belchen-Tunnel wurden vier Sprengungen mit vier unterschiedlichen Ladungen ($Q_1 = 0.5 \text{ kg}$, $Q_2 = 1 \text{ kg}$, $Q_3 = 1.3 \text{ kg}$ und $Q_4 = 1.8 \text{ kg}$) an verschiedenen Stellen (mit getrennten Bohrungen) messtechnisch erfasst.

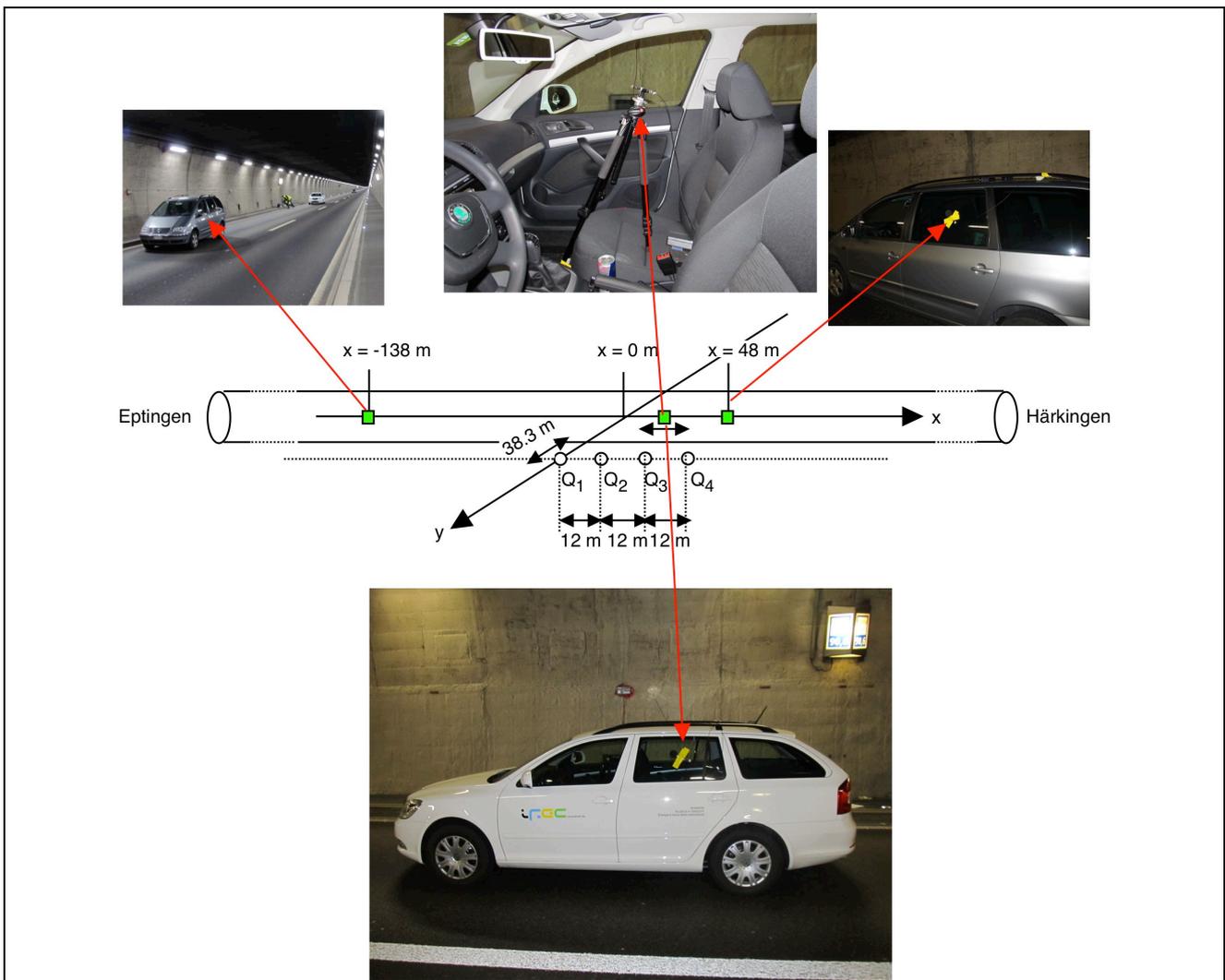


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Messstellen im Belchen-Tunnel. Mit einem grünen Punkt sind die Messstellen für die Lärmmessungen gekennzeichnet. Die weißen Kreise zeigen die vier verschiedenen Sprengorte.

Die während der Sprengversuche eingesetzte Messanordnung ist in Abbildung 7 schematisch und photographisch dargestellt. Der Lärm wurde in der West-Röhre im Sprengbereich und an zwei weiter entfernten Orten (138 m Richtung Eptingen und 48 m Richtung Härkingen, gemessen und von MQL1 km 35+096.00 aus) erfasst. In der Nähe des Sprengortes wurde der Lärm im Wageninnenraum sowie

im Tunnel gemessen. Die anderen zwei Messstellen blieben dagegen fix und der Lärm wurde nur im Tunnel gemessen. Alle Lärmmessungen wurden synchron durchgeführt. Zudem wurden für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse alle Messungen im Tunnel mit einer ähnlichen Anordnung durchgeführt.

Sprengung	Q (kg)	x_Q (m)	y_Q (m)
1	0.5	0	38.3
2	1.0	12	38.3
3	1.3	24	38.3
4	1.8	36	38.3

Tabelle 1: Angaben über die vier Sprengungen: Q ist die gezündete Masse Sprengstoff und (x_Q,y_Q) sind die Koordinaten des Sprengortes (s. Abbildung 7).

3.1.2 Lärmmessungen im befahrenen Tunnel (Grundbelastung)

Diese Messungen wurden durchgeführt, um den Verkehrslärm im Tunnel zu beschreiben und dessen Übertragung in einen Wageninnenraum zu bestimmen. Der Lärm im Auto und ausserhalb des Autos (im Tunnel) wurde *synchron* gemessen.

Die Abbildung 8 zeigt das mit dem Mikrophon ausgerüstete Auto. Man erkennt insbesondere, wie das Mikrophon am Fenster befestigt wurde. Dank dieser Messanordnung und einem Mikrofon im Auto war es möglich den Lärm beim Durchfahren des Tunnels zu messen. Es muss noch darauf hingewiesen werden, dass der ausserhalb des Autos gemessene Lärmpegel um -6 dB korrigiert werden musste, um die Effekte der Reflexionen an der Autoscheibe zu kompensieren.

Insgesamt wurden zwei solche Messungen durchgeführt (s. Tabelle 2).

Messung	Datum	Start	Röhre	Richtung	Verkehrsmenge	Geschwindigkeit
1	02.05.2012	15:51	West	Härkingen	1659 Fz/h	100 km/h
2	02.05.2012	16:14	West	Härkingen	1821 Fz/h	100 km/h

Tabelle 2: Angaben über die Messungen im befahrenen Tunnel. Die Verkehrsmengen entsprechen denjenigen der automatischen Zählstelle 033 (Eptingen N (AB)). Sie beziehen sich auf das Stundenintervall, während dem die jeweiligen Schallpegelmessungen durchgeführt wurden.



Abbildung 8: Messungen ausserhalb des Autos. Das Mikrophon wurde am Fenster befestigt. Aus den gemessenen Daten muss man 6 dB subtrahieren, um die Reflexionen des Fensters zu kompensieren.

3.2 Ergebnisse

3.2.1 Lärmmessungen im befahrenen Tunnel (Grundbelastung)

Die Messungen im befahrenen Tunnel dienen als "Nullmessungen" des Verkehrslärms. In Abbildung 9 sind die gemessenen Lärmpegel (L_{Aeq}) während der zwei Durchfahrten graphisch dargestellt.

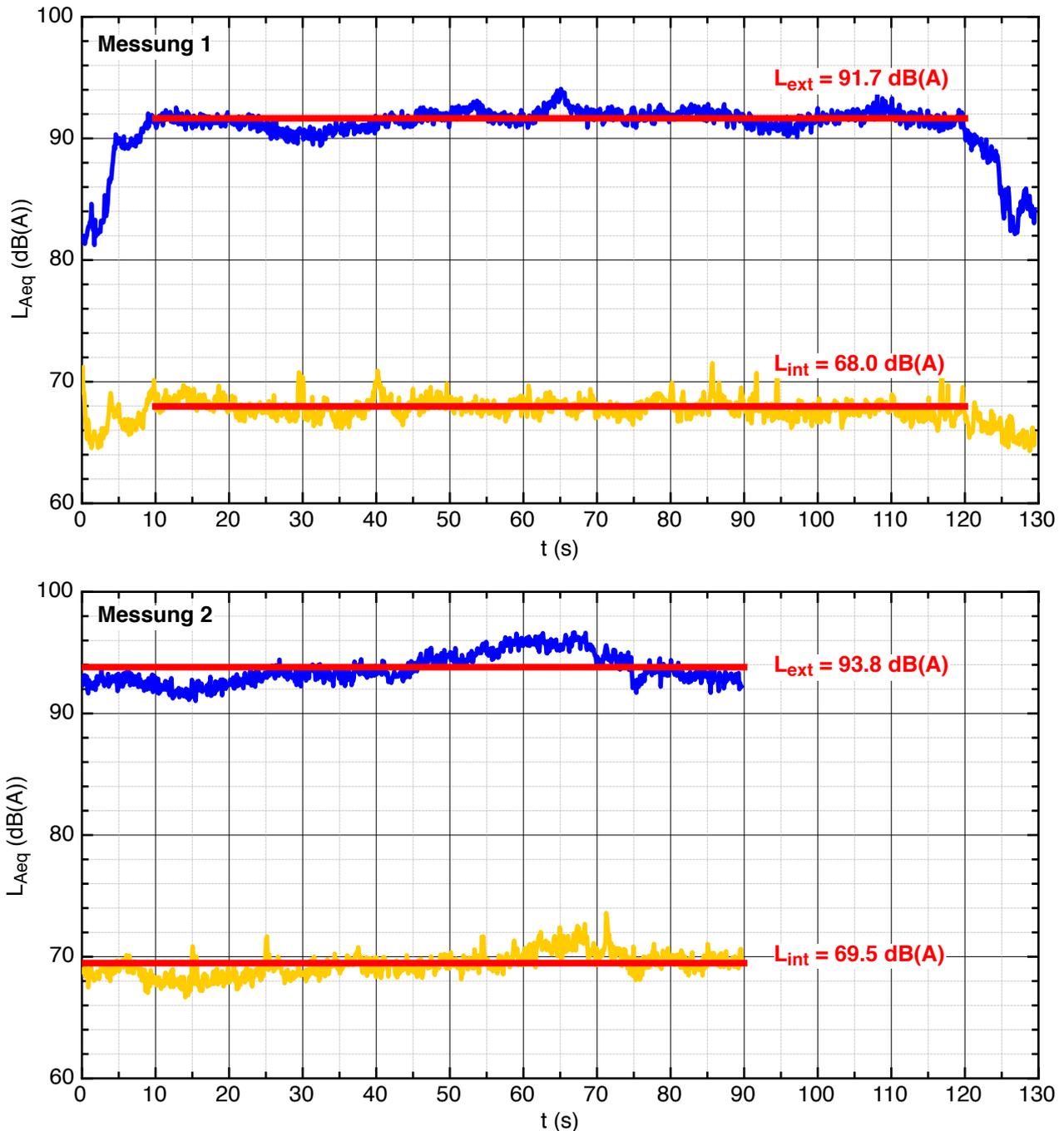


Abbildung 9: Zeitlicher Verlauf des Verkehrslärms ($L_{A,eq}$) während der zwei Durchfahrten in der West-Röhre (Richtung Härkingen). Die blauen Kurven zeigen den Lärmpegel im Tunnel und die gelben den Lärmpegel im Wageninnenraum. Mit roten Geraden werden die Mittelwerte dargestellt.

Bei der Messung 1 wurde die Aufnahme vor der Einfahrt in den Tunnel begonnen und nach der Ausfahrt aus dem Tunnel beendet. Das lässt sich an den Rändern der Kurven (mit der Pegelzunahme zwischen 0 und 10 s und der Pegelabnahme zwischen 120 und 130 s) erkennen. Für die Messung 2 sind die Pegelverläufe

während eines Zeitintervalls von ca. anderthalb Minuten dargestellt. Während des betrachteten Intervalls befindet sich der Messwagen ausschliesslich im Tunnel.

Diese beiden Messungen erlauben es, das Schalldämm-Mass R' des Autos zu bestimmen. Wenn man mit L_e den Lärmpegel im Tunnel und L_i den Pegel im Auto bezeichnet, wird:

$$L_i = L_e - R' \quad \text{mit} \quad R' = R + 10 \cdot \log\left(\frac{A_{ges}}{4S}\right) \quad (11)$$

wobei A_{ges} die gesamte Absorptions-Fläche im Auto und S die Oberfläche des Autos darstellen. Die erhaltenen Werte für R' für den verwendeten Wagen (Skoda-Octavia, Model 2012) sind im Histogramm in der Abbildung 10 graphisch dargestellt. Das Schalldämm-Mass des Wagens ist bei hohen Frequenzen (> 1.6 kHz) grösser als 30 dB mit einem Einbruch zwischen 3.15 kHz und 4 kHz, welcher der Koinzidenzfrequenz von Einfachglas der entsprechenden Dicke entspricht. Im Bereich der – für den durch die Erschütterungen induzierten Lärm – wichtigsten Frequenzen (erfahrungsgemäss: 50 Hz bis 315 Hz) liegt R' zwischen 2 und 18 dB.

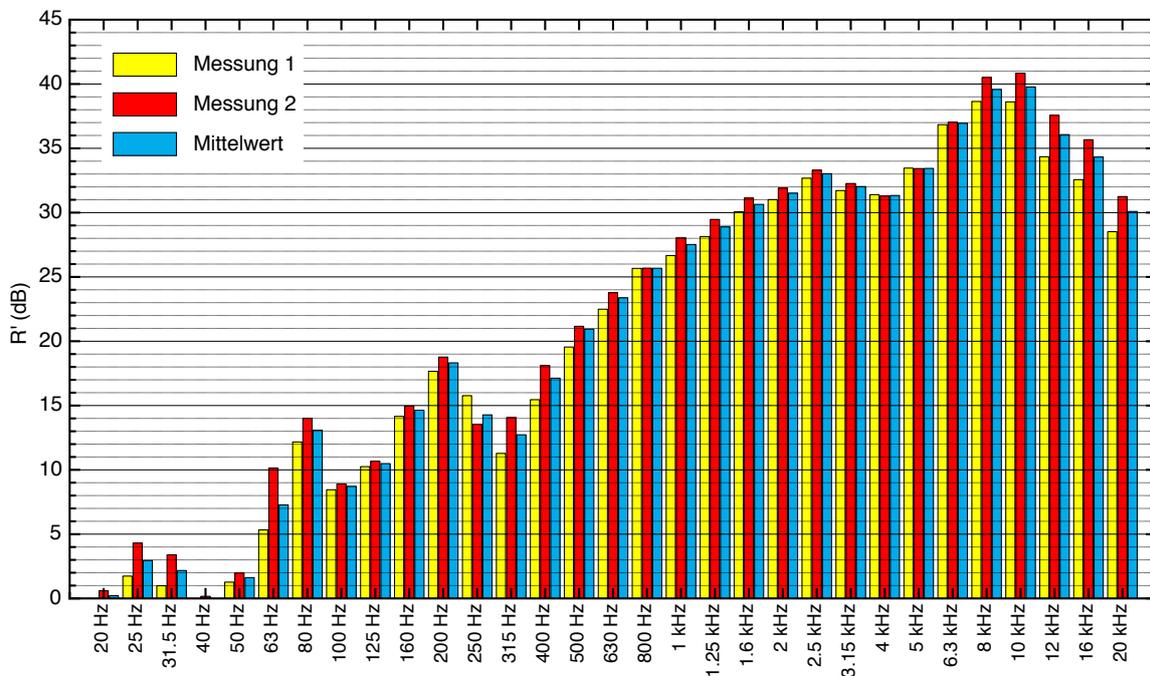


Abbildung 10: Schalldämm-Mass R' des verwendeten Autos (Skoda-Octavia, Model 2012): die gelben Balken entsprechen den Messwerten während der ersten Durchfahrt und die roten Balken denjenigen der zweiten Durchfahrt (beide in der West-Röhre Richtung in Härkingen). Die Mittelwerte (hellblaue Balken) wurden aus den energetisch gemittelten Spektren für die zwei Messungen berechnet.

3.2.2 Messungen während der Sprengungen

Das Verhalten des Lärmpegels während der Sprengungen mit vier unterschiedlichen Ladungen wurde im Detail – für die einzelnen Terzen zwischen 20 Hz und 10 kHz – analysiert. Für Frequenzen ≥ 80 Hz stellt man eine sprunghafte Zunahme des Pegels nach der Sprengung und danach ein exponentielles Abklingen desselben fest. Bei den niedrigen Frequenzen < 80 Hz ist dagegen das Rauschen dominierend. Um den Effekt des Rauschens zu unterdrücken, werden im folgenden die A-bewerteten Schallpegel ($L_{A,eq}$) analysiert.

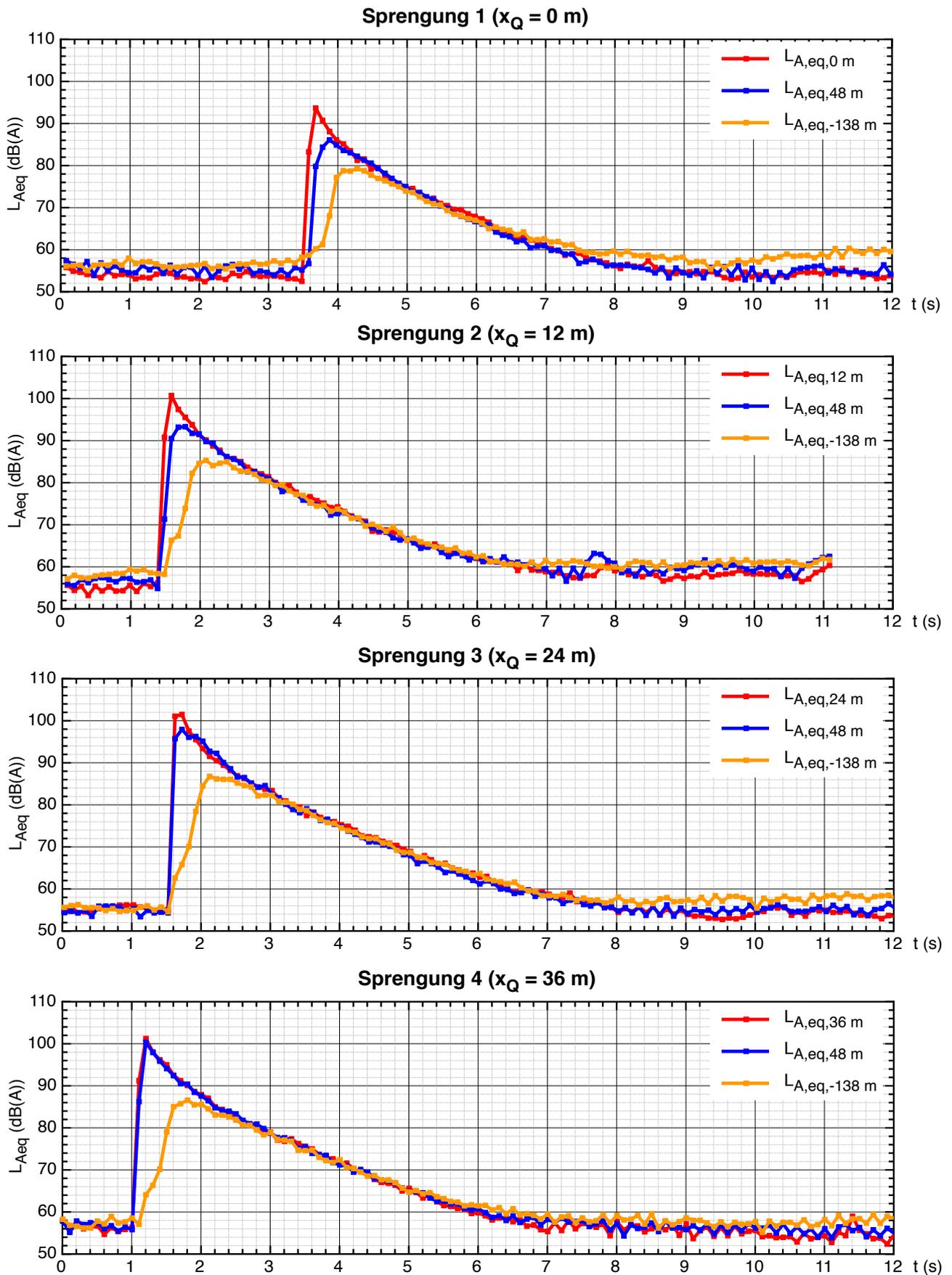


Abbildung 11: Pegelverläufe im Tunnel gemessen an den verschiedenen Messstellen für die vier Sprengungen (s. Tabelle 1).

In Abbildung 11 werden die während der vier Sprengversuche gemessenen Schallpegel an den verschiedenen Messstellen direkt verglichen. Man stellt folgendes fest:

- 1) Direkt neben dem Sprengort verursacht die Sprengung eine sprunghafte Zunahme des Schallpegels.
- 2) Bei einem grösseren Abstand zum Sprengort (138 m) nimmt der Schallpegel in zwei Schritten zu: die erste Zunahme wird fast gleichzeitig mit der Sprengung nachgewiesen und wird durch die lokale Abstrahlung des Körperschalls verursacht; der zweite Pegelanstieg tritt etwas 0.4 s nach der Sprengung auf und wird durch die am Sprengort abgestrahlte Schallwelle verursacht. Dies entspricht den Erwartungen nach dem mathematischen Modell (s. Abbildung 6).
- 3) Das Langzeitverhalten des Sprenglärms ist – wie erwartet (s. Abbildung 6) – überall durch ein ähnliches Abklingen charakterisiert.
- 4) Der Sprenglärm nimmt mit dem Abstand vom Sprengort ab.
- 5) Neben dem Sprengort – siehe rote Kurven in den graphischen Darstellungen von Abbildung 11 – nimmt der Sprenglärm mit der Lademenge (s. Tabelle 1) zu. Die Beziehung ist einfach nachvollziehbar, wenn man vom Anfangswert des Sprenglärms ausgeht:

$$\Delta L_{A,eq} = L_{A,eq,max} - L_{A,eq,0} \quad (12)$$

Dabei ist $L_{A,eq,max}$ der höchste gemessene Wert und $L_{A,eq,0}$ der Hintergrundlärm (die Subtraktion ist energetisch anzusetzen). Wenn man $\Delta L_{A,eq}$ als Funktion der Lademenge Q graphisch darstellt (s. Abbildung 12), gilt erwartungsgemäss (s. Gleichung (9) unter Berücksichtigung der verallgemeinerte Koch'schen Formeln für v_Q) die folgende Beziehung:

$$\Delta L_{A,eq} = 10 \cdot \log(Q^a) + C, \quad (13)$$

mit $C = 99.9 \pm 0.5 \text{ dB(A)}$ und $a = 2 \pm 0.2$ (was einem Koch'schen Koeffizient von 1 entsprechen würde).

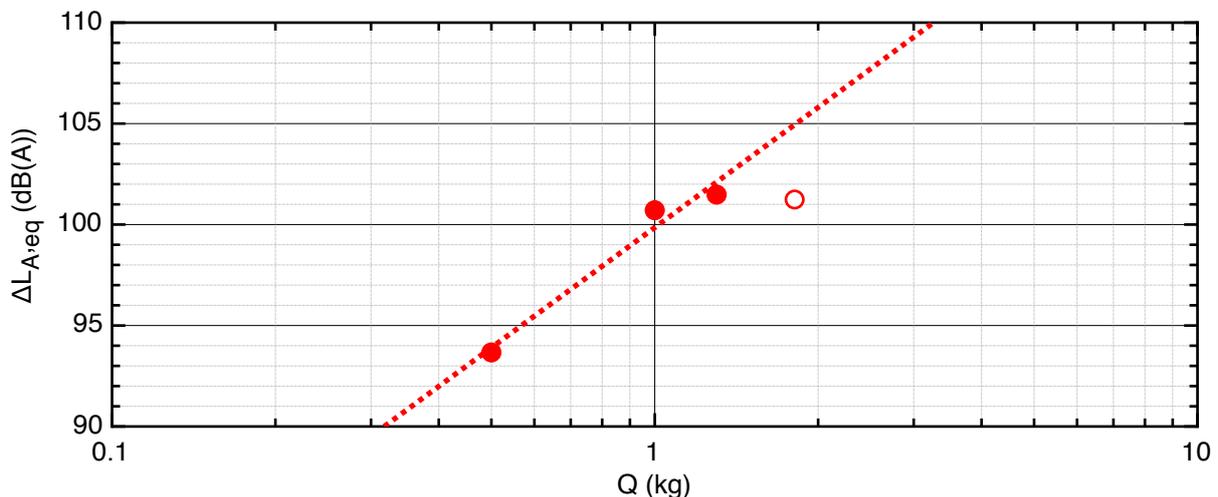


Abbildung 12: Sprenglärm (s. Gleichung 12) am Sprengort als Funktion der Lademenge (Q). Die gestrichelte Kurve zeigt die Funktion von Gleichung 3 mit den Parametern: $a = 2$ und $C = 99.9 \text{ dB(A)}$, die ohne Berücksichtigung der vierten Sprengung (roter Kreis) bestimmt wurde.

Da die vierte Sprengung (roter Kreis) einen unerwartet niedrigen Sprenglärm aufweist, wird man sich in den folgenden Betrachtungen auf Sprengung 3 konzentrieren: die Sprengung mit der höchsten Ladung („worst-case“) mit einem in der Messreihe passenden Verhalten.

4 Vergleich mit Modell

Da die Frequenz bei diesem Vergleich eine grosse Rolle spielt, war es wichtig, die Frequenzabhängigkeit im Modell einzuführen. Dazu wurde die Formel von Gleichung (9) für jedes Terzspektrum getrennt angewendet und danach wurden die so errechneten Beiträge aufsummiert, um den gesamten Pegel zu erhalten.

Für jede Frequenz f wurde es damit möglich, ihren eigenen Dämpfungskoeffizienten der Luft $\alpha_L(f)$ zu berücksichtigen (s. Abbildung 13).

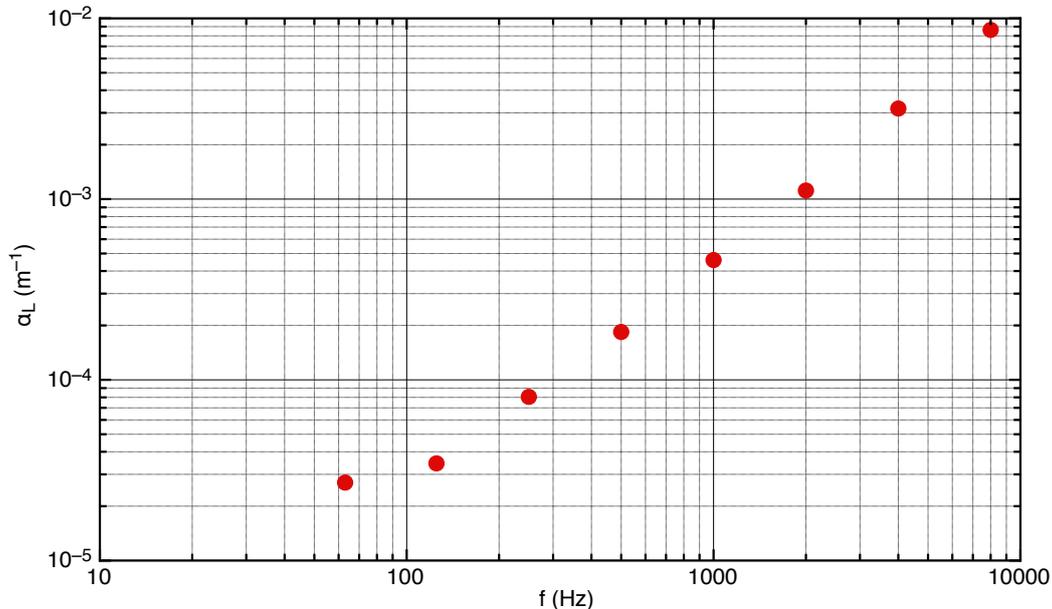


Abbildung 13: Dämpfungskoeffizient $\alpha_L(f)$ der Luft als Funktion der Frequenz (Henn, Sinambari und Fallen, "Ingenieurakustik" S. 149)

Das Modell wurde anschliessend mit Hilfe der gemessenen Daten korrigiert, indem man für die Oberflächengeschwindigkeit einen Rechteckimpuls der Dauer von 10 ms angenommen hat. Die Höhe des Rechteckimpulses wurde nach der verallgemeinerten Koch'schen Formeln berechnet:

$$v_Q = k(f) \cdot Q^b \cdot d^{-m}, \quad (14)$$

wobei $b = 1.61$ und $m = 2.26$, wie sie aus den Erschütterungsmessungen auf der Tunnelwand nach der dritten Sprengung resultierten. Die frequenzabhängigen Koch'schen Konstanten $k(f)$ wurden durch Anpassen der Verläufe der Pegel in den verschiedenen Terzen numerisch bestimmt. Dazu ist zu bemerken, dass für jedes Terzband nur drei Parameter frei gelassen wurden: der Hintergrundpegel, $k(f)$ und α_p .

Die Ergebnisse für die während der Sprengung 3 gemessenen Daten sind in Abbildung 14 graphisch dargestellt. Es kann festgehalten werden, dass das Modell in der Lage ist, die gemessenen Daten (L_{Aeq}) relativ gut wiederzugeben. Wenn man im Detail den Verlauf des Modells mit demjenigen der Messungen vergleicht, stellt man fest, dass für die Messstation am Rand (-138 m) das Modell die gemessenen Daten sehr gut wiedergibt. Das mathematische Modell trifft dagegen auf einige Schwierigkeiten beim Reproduzieren der Spitze für die zwei zentralen Messstationen. Dies hängt einerseits mit dem Diffusfeldansatz zusammen: in kleinen Abständen von der Sprengung, wo die Schwinggeschwindigkeit der Tunnelwand am grössten ist, könnte der Direktschall das Diffusfeld übersteigen. Andererseits soll bei einem solchen Vergleich auch berücksichtigt werden, dass das Modell Momentanwerte berechnet, im Gegensatz zu den gemessenen Werten, welche auf 0.100 s gemittelt sind.

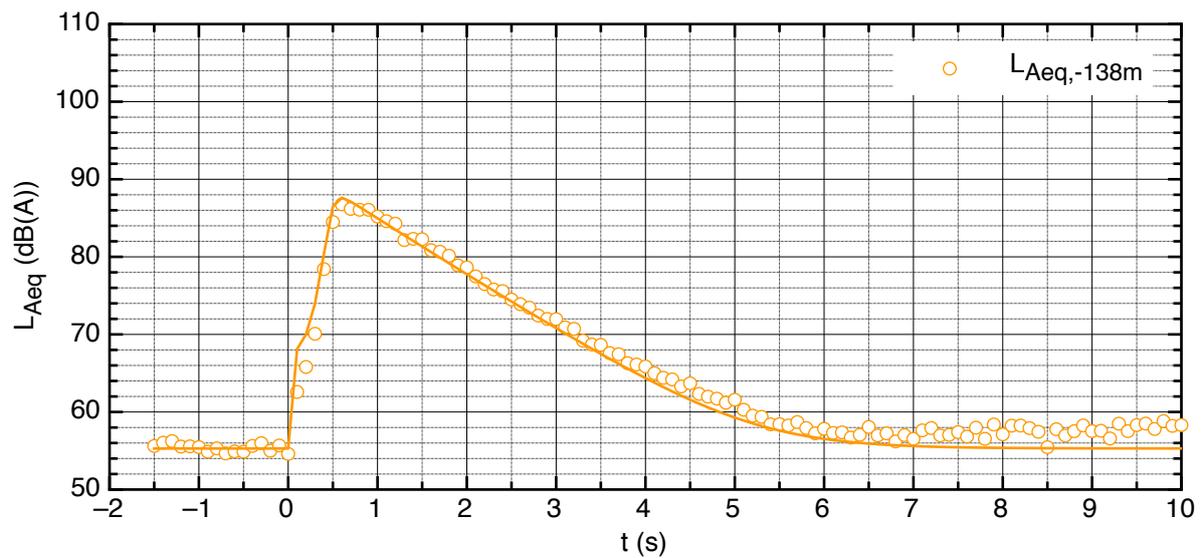
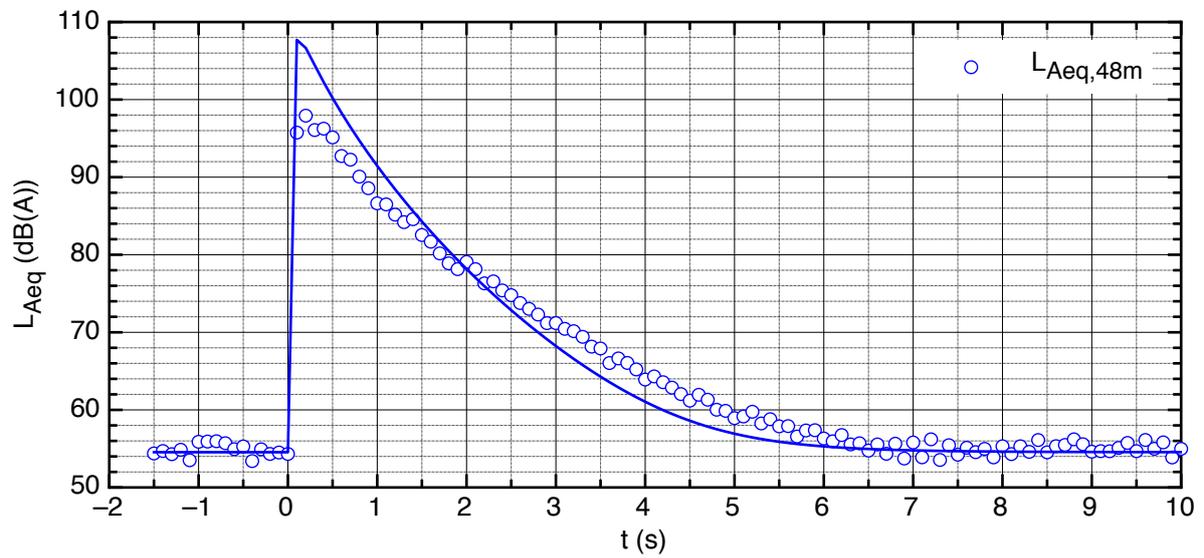
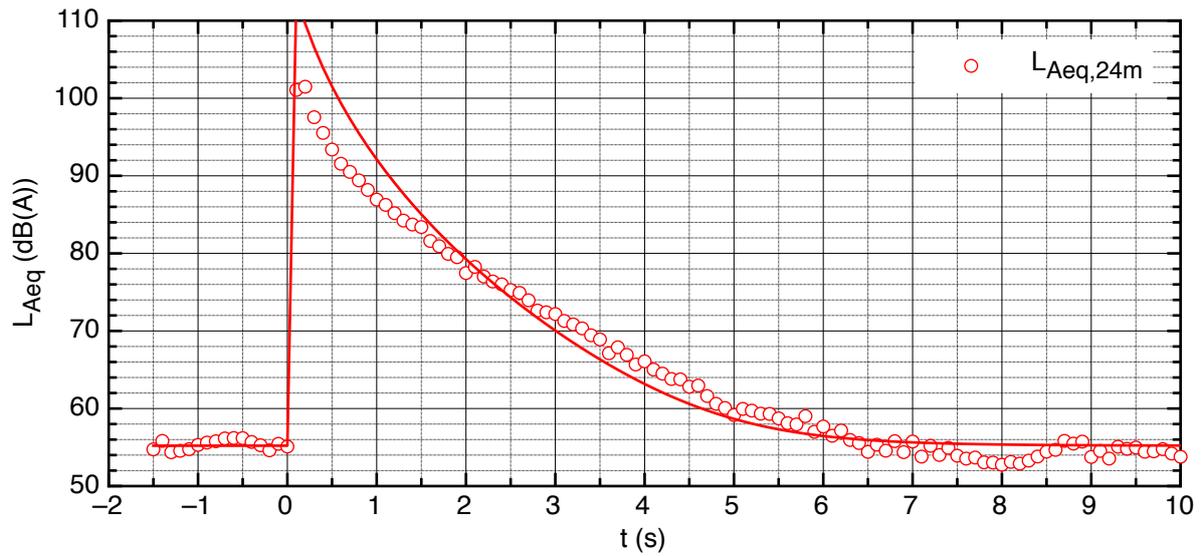


Abbildung 14: Ergebnisse der Anpassung des mathematischen Modells an den gemessenen Daten in den 3 Messstationen während des dritten Sprengversuchs. Die berechneten L_{Aeq} -Werte nach dem mathematischen Modell (durchgezogene Kurve) sind mit den gemessenen Werten verglichen.

Weiter ist das Modell nur anwendbar, wenn die eingesetzten Werte für seine Parameter plausibel sind. Das gilt insbesondere für die Parameter, welche mit dem Regression-Verfahren bestimmt wurden. Für die Absorptionskoeffizienten der Tunnelwand ergab sich aus diesem Verfahren einen Wert von 0.012 und ist sicher für Beton ein vernünftiger Wert. Die erhaltenen Koch'schen Koeffizienten $k(f)$ (bei einer Impulsdauer von 0.01 s) sind für die Daten der dritten Messstation – wo die Daten am besten reproduzierbar sind – kleiner als 4'097 und die Wurzel der Summe der Quadrate ergibt 8'677. Die Grössenordnung ist sicher realistisch, da sie im Bereich des aus den Erschütterungsmessungen geschätzten Wertes von 7'869 liegen. Für die Daten der Messstationen näher zur Tunnelmitte werden tendenziell höhere $k(f)$ berechnet.

In Abbildung 15 ist der Verlauf von $k(f)$ dargestellt. Dabei wurden die Daten für die drei Messstationen normiert, damit die Wurzel der Summe der Quadrate den experimentellen Erschütterungswert von 7'869 ergeben. Wie man in Abbildung 15 feststellt, steigen die Koch'schen Konstanten bis zu einer Frequenz von ungefähr 630 Hz an und erst ab dieser Frequenz nehmen sie stark ab. Da die Messungen der Erschütterungen in der Regel mit einer Abtastrate von 800 Hz erfolgen und damit keine Information über das Spektrum oberhalb 400 Hz liefern, kann dieses (zum Teil unerwartete Ergebnis) mit den vorliegenden Daten nicht überprüft werden.

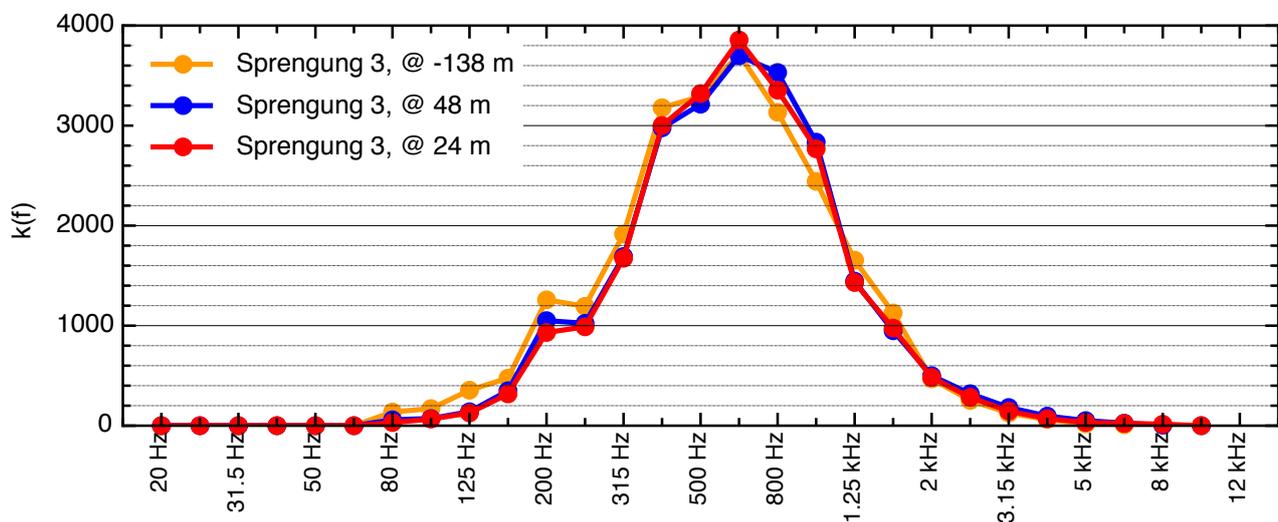


Abbildung 15: Aus der Ausgleichrechnung erhaltene Koch'sche Konstanten $k(f)$ für die drei Messstationen. Die Daten wurden so normiert, dass die Wurzel der Summe der Quadrate den experimentellen Erschütterungswert von 7'869 ergeben.

5 Übertragung auf Sprengvortrieb

5.1.1 Berechnung des abgestrahlten Körperschalls im befahrenen Tunnel

Durch Verbindung der in 3.1.1 und in 3.1.2 vorgestellten Messergebnisse lässt sich der durch die Sprengungen in einem befahrenen Tunnel verursachte Lärm berechnen. Dazu wurde zum gemessenen Lärm im befahrenen Tunnel (in Richtung Härkingen) der Sprenglärm energetisch addiert.

Diese Berechnungen wurden sowohl für den Lärm im Tunnel als auch für den Lärm im Auto durchgeführt. Die Ergebnisse für die Sprengung 3 ($Q = 1.3 \text{ kg}$) sind in Abbildung 18 (für den Zustand „im Tunnel“) und in Abbildung 20 (für den Zustand „im Auto“) als Pegelverläufe ($L_{Aeq}(t)$) und in Form von Spektren graphisch dargestellt. Da für die Sprengungen die gemessenen Pegel in der Tunnelmitte verwendet wurden, stellen diese Ergebnisse das „Worst-case-Szenarium“ dar.

Der A-bewertete Pegel nimmt nach einer Sprengung sowohl im Tunnel wie auch in einem vorbeifahrenden Auto deutlich zu. Die Zunahme des Pegels liegt im Tunnel bei 11 dB(A). Im Auto selber ist die Pegelzunahme dank der Schalldämmung etwas kleiner, aber immerhin von Bedeutung: der Gesamtpegel im Auto steigt von 68 dB(A) auf etwa 77.5 dB(A). Die Messungen zeigen, dass der Frequenzbereich zwischen 200 Hz und 1.25 kHz am stärksten betroffen ist. Die Pegelerhöhung ist bei 500 Hz am höchsten (17 dB(A) sowohl im Tunnel wie auch im Auto).

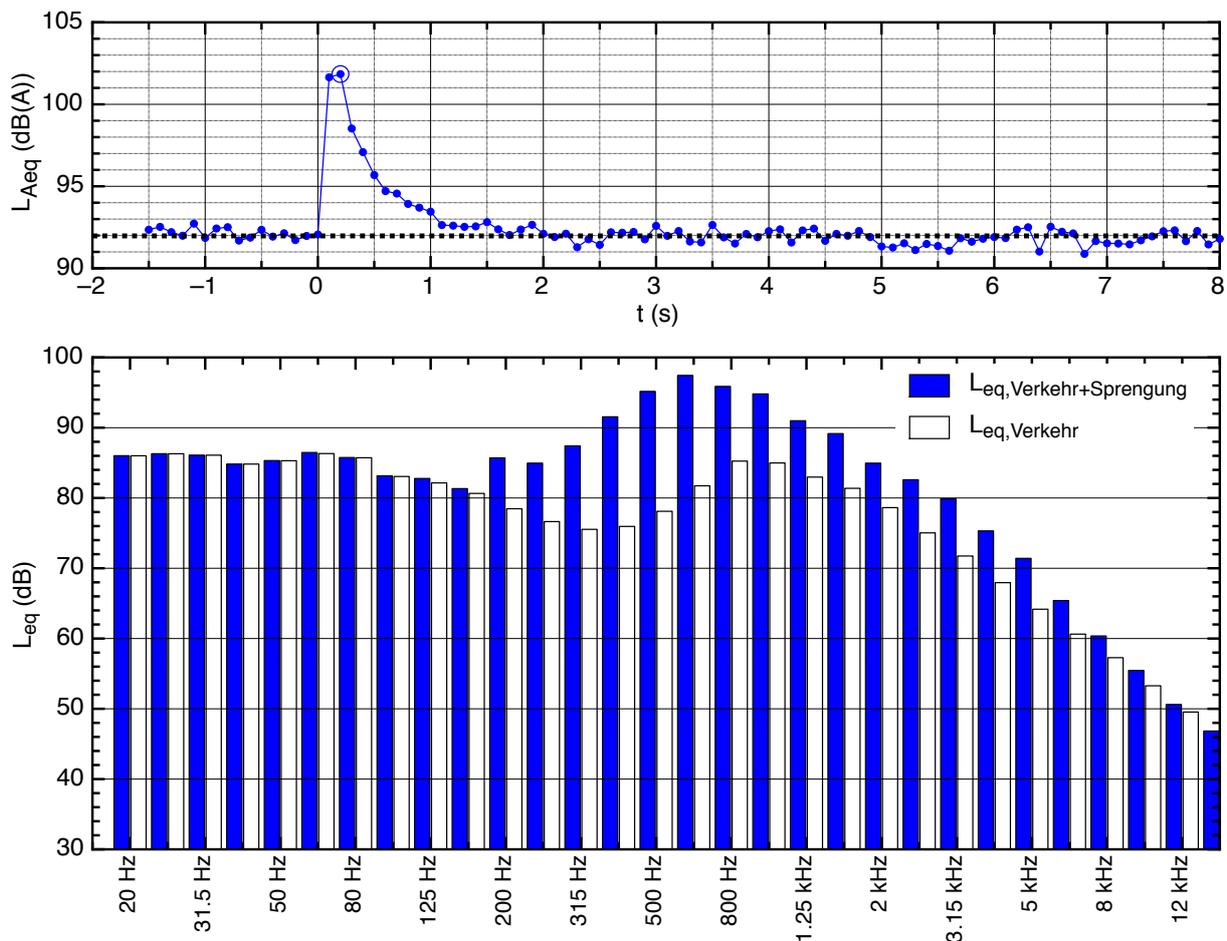


Abbildung 16: Die obere graphische Darstellung zeigt den Pegelverlauf im befahrenen Tunnel (am Sprengort) für die Sprengung 3 ($Q = 1.3 \text{ kg}$). Die punktierte Gerade im oberen Diagramm zeigt den mittleren Verkehrslärmpegel im Tunnel. Im unteren Diagramm werden die Spektren des Verkehrslärms und des Gesamtlärms (Verkehr + Sprengung) für den mit einem Kreis markierten Punkt (im oberen Pegelverlauf) dargestellt.

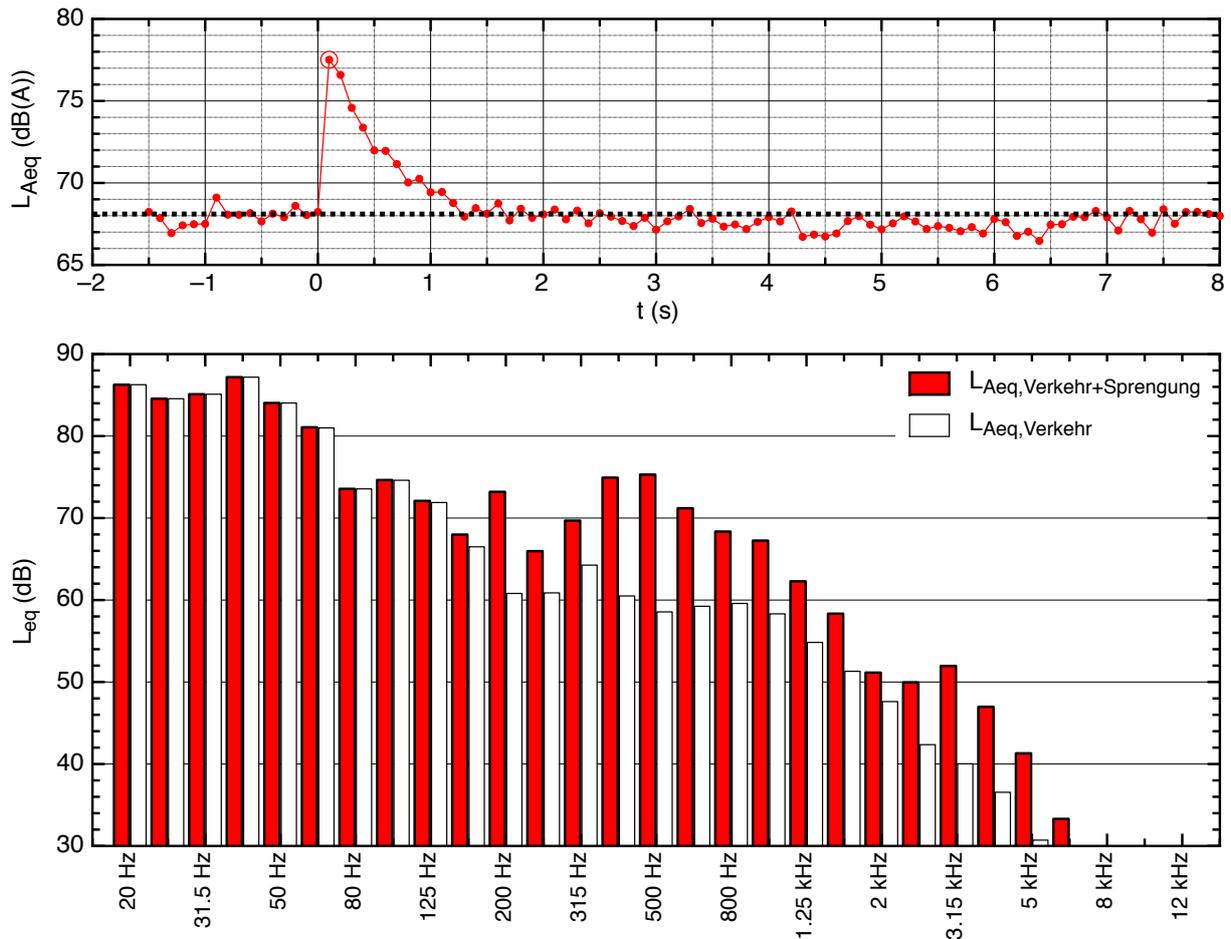


Abbildung 17: Die obere graphische Darstellung zeigt den Pegelverlauf in einem vorbeifahrenden Auto am Sprengort für die Sprengung 3 ($Q = 1.3$ kg). Die punktierte Gerade im oberen Diagramm zeigt den mittleren Verkehrslärmpegel im Auto. Im unteren Diagramm werden die Spektren des Verkehrslärms und des Gesamtlärms (Verkehr + Sprengung) für den mit einem Kreis markierten Punkt (im oberen Pegelverlauf) dargestellt.

5.1.2 Sound-Signalverarbeitung und Simulationen

Um eine subjektive Beurteilung des abgestrahlten Körperschalls im Innenraum eines durch den Tunnel fahrenden Wagens zu ermöglichen, ist es wichtig, die während der Messungen aufgezeichneten Audio-Signale zu kombinieren.

Dabei wurde der Lärm der **dritten Sprengung** mit dem während der Tunnelfahrt im Wageninnenraum gemessenen Lärm addiert. Der Schallpegel des so erhaltenen Signals ist in Abbildung 18 dargestellt. Dabei muss bemerkt werden, dass trotz der Verwendung der gleichen Daten (Verkehr und Sprenglärm) nach Abbildung 17 kleine Unterschiede auftreten können. Der Grund hierfür liegt in der Tatsache, dass die „Sound-Signalverarbeitung“ nicht nur eine energetische Summe ergibt, sondern auch eine Summe von Signalen, in denen auch Interferenzerscheinungen nachgewiesen werden.

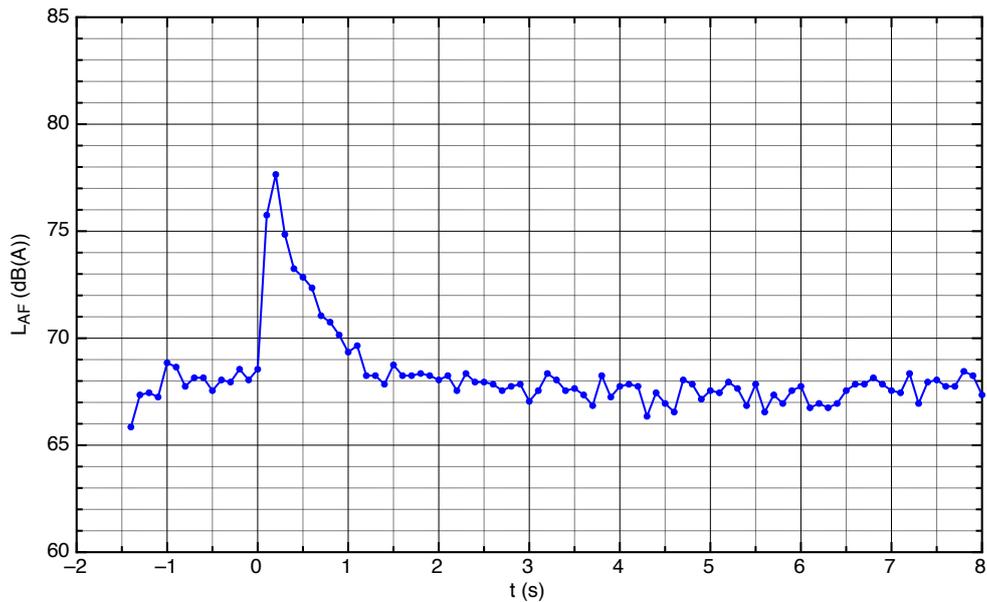


Abbildung 18: Lärmpegel (L_{AF}) im Innenraum eines durch den Tunnel fahrenden Wagens während einer Sprengung. Das Signal wurde durch Addieren des Hintergrundgeräusches des Verkehrs mit dem Sprenglärm des dritten Sprengversuches berechnet.

In der Abbildung 18 wird dargestellt, dass bei einer Sprengung mit einer Ladung von 1.3 kg (Sprengmuster M1 in Abbildung 19) der Pegel in einem durch den Tunnel fahrenden Wagens um 9 dB(A) zunimmt.

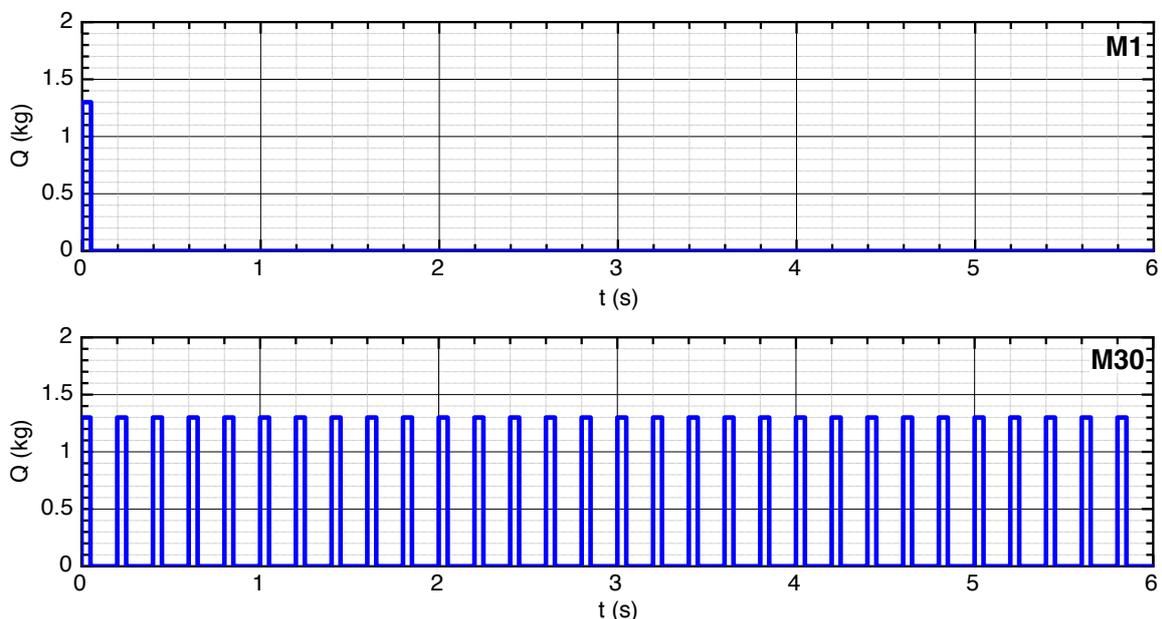


Abbildung 19: Zeitlicher Verlauf der betrachteten Sprengmuster.

Um die Wirkung einer realen Sprengung nachzubilden, wurde angenommen, dass sie aus 30 Sprengstufen mit je einer Ladung von 1.3 kg besteht (s. Sprengmuster M30 in Abbildung 19). Dabei wurde der Sprenglärm vom dritten Versuch 30-mal in zeitlichen Abständen von 0.150 s wiederholt und zum Hintergrundgeräusch des Verkehrs aufsummiert. Das Ergebnis ist in Abbildung 20 graphisch dargestellt. Der gesamte Pegelverlauf erreicht – als Folge der Überlappung der Signale – deutlich höhere Werte als derjenige einer einzelnen Sprengung. Insgesamt beträgt die Pegelzunahme ungefähr 11.5 dB(A).

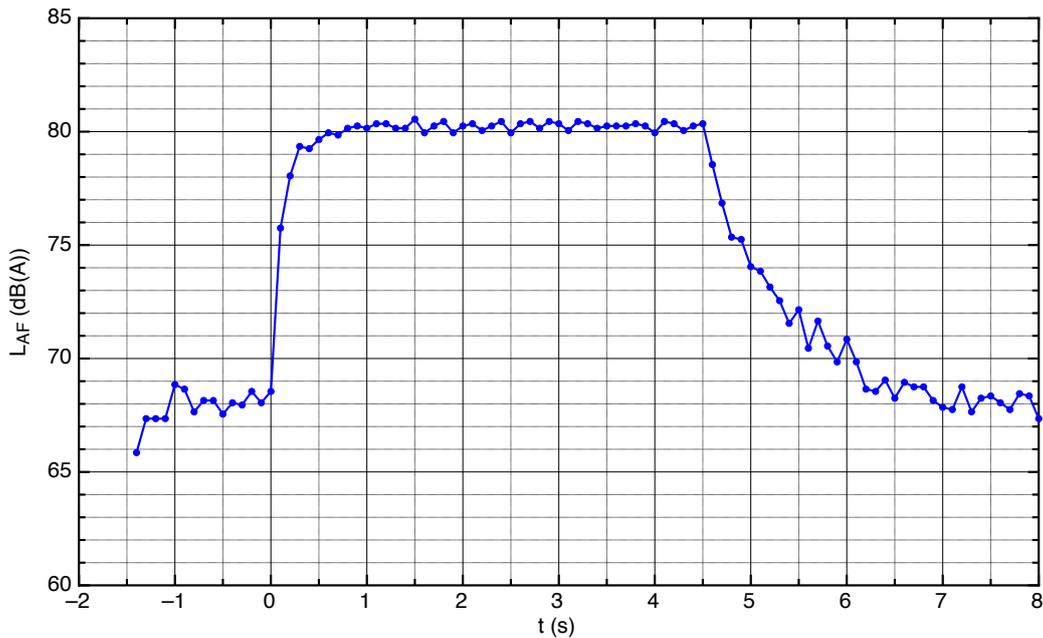


Abbildung 20: Lärmpegel (L_{AF}) im Innenraum eines durch den Tunnel fahrenden Wagens während einer Sprengung mit 30 Zündstufen mit $Q = 1.3$ kg. Das Signal wurde durch Addieren des Hintergrundgeräusches des Verkehrslärms mit 30 um 0.150 s zeitlich verschobenen Schallpegeln einzelner Sprengungen berechnet.

Mit Hilfe des kalibrierten Modells können verschiedene Simulationen durchgeführt werden. Insbesondere können die Körperschall-Immissionen für verschiedene Zeiten und Orte für komplexe Sprengmuster berechnet werden. Die Ergebnisse der Simulationen für das Sprengmuster M30 (d.h. mit 30 Zündungen in zeitlichen Abständen von 0.2 s) sind in Abbildung 21 dargestellt, wo die zeitliche Entwicklung des Lärmpegels (L_{Aeq}) im Wageninnenraum entlang eines befahrenen Tunnels (mit Hintergrundpegel von ca. 68 dB(A)) mit Hilfe von sogenannten "staggered-plots" dargestellt wird: ganz hinten ist das Profil zur Zeit 0.5 s (nach Beginn der Sprengung), dann darauf gestaffelt kommt das Profil für $t = 1$ s u.s.w. bis zum Profil für $t = 20$ s, das ganz vorne steht. Für diese Simulationen wurden die für die verschiedenen Messstationen bestimmten Koch'schen Konstanten gemittelt.

In den graphischen Darstellungen sieht man, wie sich die Wellenfront in Richtung der Portale fortpflanzt, wie das Auftreten nach einigen Sekunden von zwei Maxima im L_{Aeq} -Profil deutlich zeigen. Die Pegel-Zunahme in der Tunnel-Mitte ist höher als 15 dB(A) und erst nach ungefähr 5 s (aber bereits vor der Zündung der letzten Ladungen des Musters) wird die Fortpflanzung in Richtung der Portale ersichtlich. In allen Fällen dauert es nach der Sprengung der letzten Ladung ungefähr 10 s, bis im Innenraum der durchfahrenden Wagen die Anfangssituation (mit den durch den Verkehrslärm verursachten 68 dB(A)) wieder hergestellt ist.

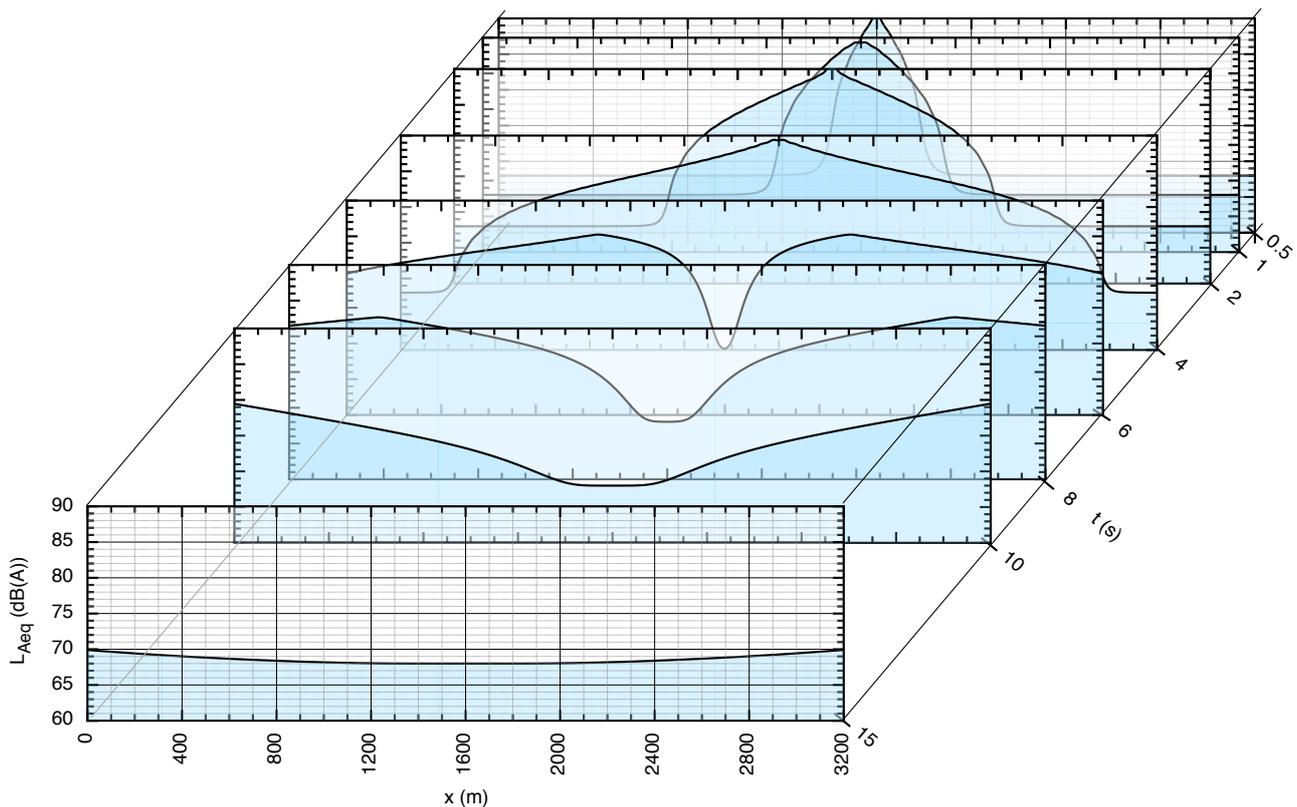


Abbildung 21: Zeitliche Entwicklung des Lärmpegel-Profiles ($x = 1600$ m entspricht der Tunnelmitte) bei befahrenem Tunnel im Wageninnenraum (mit Grundpegel von 68 dB(A)) für das Sprengmuster M30 (s. Abbildung 19). Von hinten nach vorne sind die für verschiedene Zeiten ($t = 0,5, 1, \dots 15$ s nach Beginn der Sprengung) berechneten Pegel-Profile graphisch dargestellt.

6 Schlussfolgerungen

Mit den Sprengversuchen konnten verschiedene detaillierte Informationen über die Wirkung des abgestrahlten Körperschalls gewonnen werden. In Bezug auf die Hauptfrage, nämlich der Abschätzung des Risikos für das Erschrecken eines Autofahrers, verursacht durch Sprengungen, sind folgende Ergebnisse von zentraler Bedeutung:

- der von der Sprengung verursachte Lärmpegel *im Wageninnenraum* übersteigt den Verkehrslärmpegel um maximal $11,5$ dB(A), wobei der genaue Wert vom gewählten Zündungsschema und von den eingesetzten Ladungen pro Zündstufe abhängt;
- der von der Sprengung verursachte Lärmpegel ist ziemlich breitbandig und verteilt sich zwischen 200 Hz und ca. $1,6$ kHz, wo die Terzspektren um bis ca. 10 dB (bei 500 Hz) gegenüber dem Verkehrslärm ansteigen.

Eine Sprengung ist im Innenraum eines durch den Tunnel fahrenden Wagens sicher wahrnehmbar. Die Wahrnehmung eines solchen Ereignisses führt aber nicht unbedingt zu Fehlreaktionen der Fahrer. In einem Tunnel sind Schwankungen des Lärmpegels üblich. Sie können durch das schnelle Annähern von lauten Fahrzeugen (wie z.B. einigen Motorrädern) oder durch Hupen verursacht werden. In Abbildung 22 wird der Pegelanstieg einer LKW-Hupe im Gubristunnel gezeigt. In solchen Fällen nimmt der Pegel auch plötzlich um etwa 10 dB(A) zu. Trotz Überraschungseffekt sind in solchen Fällen keine Fehlreaktionen eines Fahrers zu erwarten. Sicher spielt dabei die Tatsache eine Rolle, dass unmittelbar nach einem solchen Ereignis eine eindeutige Beziehung zwischen Ursache (LKW) und Wirkung (Lärm) hergestellt wird.

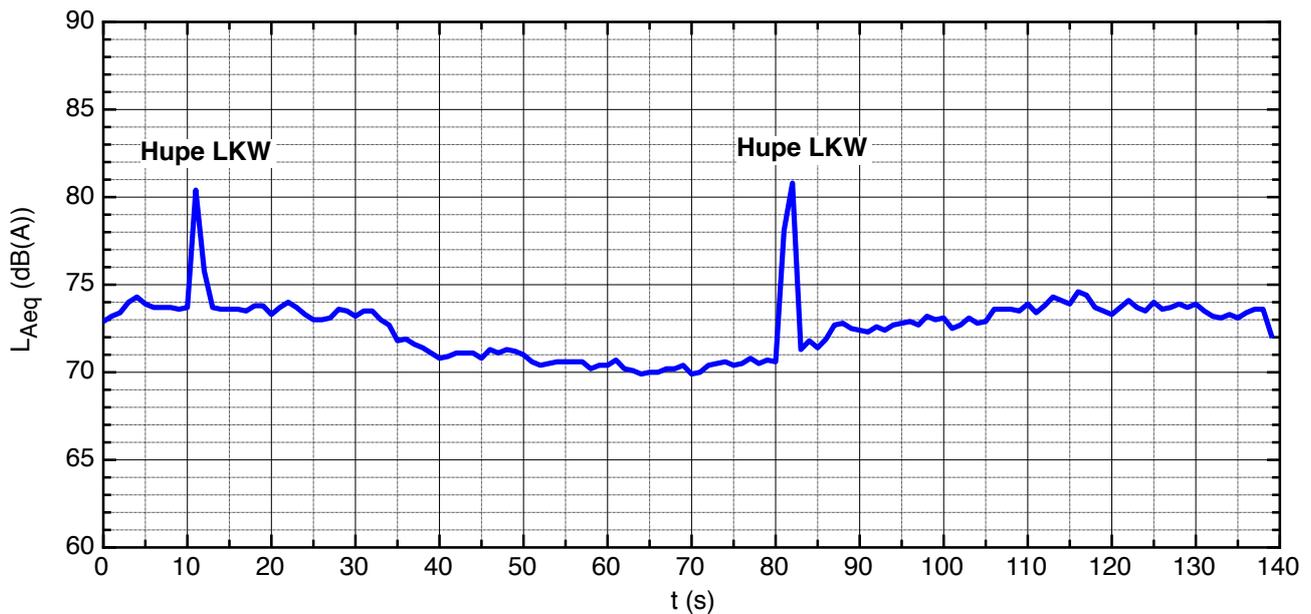


Abbildung 22: Lärmmessungen im Innenraum eines durch den Gubristtunnel fahrenden Autos² zeigen den Pegelanstieg durch ein LKW-Hupe.

Diese Schlussfolgerungen basieren auf Messungen, die mit einem Skoda-Octavia (Baujahr 2012) durchgeführt wurden. Die repräsentativen Aussagen können aber durchaus auch auf andere Fahrzeugkategorien übertragen werden. Speziell in Fahrzeugen mit einer höheren Luftschalldämmung (z.B. höherklassige Fahrzeuge) ist der Sprenglärm niedriger. Aber auch die Hintergrundbelastung wie der eigene Motorlärm und der Verkehrslärm werden in diesem Fall niedriger sein als der Lärm mit dem eingesetzten Skoda (68 dB(A)). Der Pegel des Sprenglärms – als Differenz zur Hintergrundbelastung – bleibt daher in einer ersten Näherung unverändert. Das gleiche gilt für weniger abgeschirmte Fahrzeuge (was im Allgemeinen für ältere Fahrzeuge zutrifft): der Sprenglärm nimmt wohl zu, aber gleichzeitig steigt auch die Hintergrundbelastung (Eigenlärm des Fahrzeuges und Verkehrslärm) und die Differenz bleibt praktisch auch in diesem Fall unverändert. Als Extremfall muss ein Cabriolet (ohne Verdeck) betrachtet werden: der Sprenglärm wird überhaupt nicht abgeschirmt, aber die Hintergrundbelastung entspricht derjenigen im Tunnel, d.h. ungefähr 92 dB(A) im Belchen-Tunnel. Somit liegt für diese Situation die Schallpegelzunahme infolge einer Sprengung (wie im Sprengversuch) nicht höher als 10 dB(A). Bei Motorrädern wird die Pegelerhöhung wegen des höheren Eigenlärms kleiner sein als bei einem Cabriolet.

Das Risiko von Fehlreaktionen durch Autofahrer als Folge der Wahrnehmung von abgestrahltem Körperschall kann durch die folgenden Massnahmen weiter eingeschränkt werden:

- 1) Optimierung des Zündschemas:
 - a) die Zeitintervalle zwischen den einzelnen Zündstufen müssen **mindestens** 0.2 s betragen, um eine Überlappung der Schallwellen zu reduzieren;
 - b) da bei der ersten Ladung im Zündungsschema die Freiheitsgrade geringer sind als bei den nachfolgenden Sprengungen, sollte diese in einem möglichst **grossen Abstand** von der befahrenen Tunnel-Röhre gezündet werden.
- 2) Reduktion der Lademenge pro Zündstufe: auf Grund der Erkenntnisse aus den Sprengversuchen kann der maximale Sprenglärm im Wageninnenraum als Funktion der Masse Sprengstoff pro Sprengung

² Ausbau Nordumfahrung Zürich: 3. Röhre Gubristtunnel – Ergebnissen aus dem Sprengversuch vom 16. November 2011, IFEC Consultenze SA, November 2011

bestimmt werden. Auf der Basis der messtechnisch erfassten Effekte der Überlappung der durch die einzelnen Zündstufen verursachten Schallwellen können Forderungen für die Ausschreibung bestimmt werden.

- 3) Aufstellungen von Schildern bei den Tunneleingängen, um die Fahrer über den möglichen Sprenglärm zu informieren ("Achtung Sprenglärm", für fremdsprachige Automobilisten allenfalls mit einem Piktogramm ergänzt).