

Gegenstand: Durchführung einer Untersuchung zur Präzisierung der Spezifikationen gem. Anlage G TSI PRM (Türwarn- und Findesignale)



Auftraggeber: Bundesamt für Verkehr (BAV)
Abteilung Finanzen, Sektion Schienennetz
Fachstelle Barrierefreiheit im öffentlichen Verkehr
CH – 3003 Bern

Erstellt am: 06.12.2023

Bearbeiter: Prof. Dr.-Ing. Alfred Schmitz
Prof. Dr.-Ing. Anselm Goertz
Nicolas Sünß, B. Eng.
Daniel Labuda

Dieser Bericht umfasst 93 Seiten.

Büro Grevenbroich
Heinrich-Hertz-Straße 3
41516 Grevenbroich
☎ 02182 - 83221-0

Büro Braunschweig
Ölschlägern 6
38100 Braunschweig
☎ 0531 - 44626

Ihr Ansprechpartner
Prof. Dr.-Ing. Alfred Schmitz
☎ 02182 - 83221-0
✉ schmitz@tac-akustik.de

🌐 tac-akustik.de

Leistungen
Raumakustik
Bauakustik
Elektroakustik
Immissionschutz
Schwingungstechnik
Beratung
Messung
Schulung
Sachverständigengutachten

Qualifikationen
Von der Industrie- und Handelskammer Mittlerer Niederrhein öffentlich bestellt und vereidigte Sachverständige:
Prof. Dr.-Ing. Alfred Schmitz für Bau-, Raum- und Elektroakustik
Dipl.-Ing. Ulrich Wilms für Schallimmissionschutz

Für das Büro Grevenbroich:

VMPA anerkannte
Güteprüfstelle nach DIN 4109
VMPA-SPG-211-04-NRW



Messstelle nach §29b BImSchG für Messungen nach §§ 26, 28 BImSchG zur Ermittlung von Geräuschen

Bankverbindung
Sparkasse Aachen
IBAN DE43390500000047678123
BIC AACSD33XXX

S Management Summary - Präzisierungsvorschläge für die TSI PRM Anlage G

Zur Präzisierung der Festlegungen zu Türfindesignalen in der TSI PRM Anlage G wurde unter Einbeziehung einer Begleitgruppe eine Studie im Auftrag des Bundesamtes für Verkehr der Schweizerischen Eidgenossenschaft, BAV durchgeführt. Die Begleitgruppe bestand aus folgenden Vertretern:

- Bundesamt für Verkehr der Schweizerischen Eidgenossenschaft, BAV (Auftraggeber)
- Schweizerische Bundesbahnen AG, SBB (Rail Production and Fleet Strategy)
- Deutsche Bahn AG, DB (Innovation, Gremienarbeit und Service Technik Schienenfz., FE.EF 33)
- Deutsche Bahn AG, DB (Kompetenzzentrum Akustik und Erschütterungen, TT.TVE 35)
- EAO AG (Hersteller von Signalgebern, Schweiz)
- TSL-ESCHA GmbH (Hersteller von Signalgebern Deutschland)
- TAC - Technische Akustik (Auftragnehmer)

Die Ergebnisse wurden in der Arbeitsgruppe eingehend diskutiert und hieraus die nachfolgend beschriebenen abgestimmten Empfehlungen erarbeitet. Die Empfehlungen sind ebenfalls in Abschnitt 7 beschrieben und werden nachfolgend vorab zusammenfassend dargestellt:

S. 1.1 Begriffsbestimmung

Gemäß Abschnitt 3.4.2 sollten zunächst die Signaldefinitionen präzisiert werden:

L_S = Schalldruckpegel des Signalgebers, gemessen als L_{AFmax} (maximaler mit der Zeitkonstante „Fast“ gemessener „A“-bewerteter Schalldruckpegel)

L_{Smax} = maximaler Signalpegel L_S (gemessen als L_{AFmax})

L_{Smin} = minimaler Signalpegel L_S (gemessen als L_{AFmax})

L_N = Schalldruckpegel des Hintergrundgeräusches, gemessen wie folgt:

S.1.2 Messung des Störgeräusches

Die Störgeräuscherfassung ist als energetische Summe über 3 Oktaven durchzuführen. Alternativ wurde gezeigt, dass für die meisten Bahnsteiggeräusche auch ein breitbandiger, aber A-bewerteter Summenpegel nahezu gleiche Ergebnisse liefert. Aus technischer Sicht besitzt das Oktavverfahren einen gewissen Vorzug, weil hier für alle Hintergrundgeräuscharten zumindest weitgehend nur diejenigen Frequenzbereiche berücksichtigt werden, die auch zur Maskierung der Türsignale beitragen. In beiden Fällen muss die Signalverarbeitung der Mikrofone, die die Störgeräuschsituation erfassen, eine entsprechende Frequenzfilterung durchführen.

Eine wesentliche Verbesserung der Lesbarkeit und des Verständnisses der Anlage G ist dann gegeben, wenn zwischen der Signaldefinition, der Erfassung von Störgeräuschen beim Betrieb und der Erfassung von Störgeräuschen bei der Typprüfung oder Zulassung unterschieden wird.

S.1.2.1 Signaldefinition und Messung des Störgeräusches im Betrieb

Demnach können alternativ folgende Präzisierungen vorgenommen werden:

a.) Ähnlich wie bereits in TSI PRM Anlage G festgelegt:

L_N = Pegel des Umgebungsgeräusches (Noise)

L_N wird aus der energetischen Summe dreier Oktavbänder wie folgt gebildet:

$$L_N = 10 \cdot \log_{10} \sum \left(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} + 10^{\frac{L_3}{10}} \right)$$

$$L_1 = L_{oct,500Hz}$$

$$L_2 = L_{oct,1000Hz}$$

$$L_3 = L_{oct,2000Hz}$$

L_N wird zeitlich als energieäquivalenter Dauerschallpegel über einer Zeitdauer T ermittelt:

$$L_N = L_{eq,T}$$

Die Messung des Störgeräusches am Bahnsteig erfolgt unmittelbar vor der Aussendung des Türfindesignals und dann fortlaufend in den jeweiligen Signalpausen des Türfindesignals wie folgt:

Für das Single Tone Signal sind die Einzelmessungen in jeder Signalpause über eine Zeitdauer von min. 200 ms durchzuführen. Die Einzelmessungen für das Dual Tone Signal sind jeweils innerhalb einer Signalperiode in der langen Signalpause über eine Länge von mind. 800 ms durchzuführen.

Aus den Einzelmessungen ist ein sich über 5 s erstreckender, gleitender energetischer Mittelwert zu bilden. Für den gleitenden Mittelwert sind alle fortlaufenden Einzelmessungen zu mitteln, wobei alle Messungen, die jeweils zeitlich länger als 5 s zurückliegen aus der Berechnung entfernt werden.

Anmerkung: Bei der Erfassung des Hintergrundgeräusches mit einem Mikrofon an der Tür ist der dort auftretende Pegel aufgrund der Reflexion an der Grenzfläche 3 dB höher als am Referenzpunkt.

S.1.2.2 Messung des Störgeräusches am Fahrzeug

Es ist zu entscheiden, ob in der TSI PRM Anlage G auch Aussagen zu Messungen am Fahrzeug gemacht werden sollen. Es empfiehlt sich in jedem Fall, folgende Hinweise und Vorschläge zu berücksichtigen.

Bei der Messung am Fahrzeug muss ein künstliches Hintergrundgeräusch erzeugt werden. Hierzu eignet sich als Ersatzquelle der Einsatz von rosa Rauschen. Hier ist nun sicherzustellen, dass der Signalpegel am Referenzpunkt bestimmt wird, der Störgeräuschpegel wird aber an der Zugtür über das eingebaute Mikrofon ermittelt. Der an der Zugtür ermittelte Geräuschpegel muss parallel mit einem geeigneten Schallpegelmessgerät erfasst werden (Vergleichsmessung). Das Hintergrundgeräusch, das mithilfe eines rosa Rauschens erzeugt wird, wird so direkt an der Tür bestimmt. Der Ort der Schallquelle ist so zu wählen, dass der Pegelunterschied zwischen dem Referenzpunkt und dem Messpunkt an der Tür (unter Berücksichtigung der Grenzflächensituation) vernachlässigbar (typ. $\Delta L < 1\text{dB}$) ist.

Achtung: Bei der Erfassung des Hintergrundgeräusches mit einem Mikrofon an der Tür ist der dort auftretende Pegel aufgrund der Reflexion an der Grenzfläche 3 dB höher als am Referenzpunkt. Dies ist bei der Festlegung eines Messverfahrens für Messungen am Fahrzeug zu berücksichtigen.

Bei der Durchführung der Messung am Fahrzeug sollte die Mittelungszeit mindestens $T = 20\text{ s}$ betragen.

S.1.3 Festlegung der Signalpegel und des S/N Verhältnisses

- a.) Aus den Untersuchungen geht hervor, dass ein fester Signalpegel für die Türfindesignale in Bezug auf den zu erzielenden Kompromiss zwischen Hörbarkeit und übermäßiger Schallemission **keine adäquate Lösung** darstellt.

Es wird daher vorgeschlagen, Türfindesignale verpflichtend als adaptive Signale auszuführen.

- b.) Wegen der besseren Hörbarkeit sollte die Signalform verpflichtend rechteckförmig und nicht sinusförmig sein.
- c.) Aufgrund der Rückmeldung der Versuchspersonen sollte das Single Tone Signal mit einer möglichst niedrigen Taktrate abgestrahlt werden.

Daher sollte die Anzahl der Impulse von vormals 3 bis 5 je Sekunde auf 3 bis 4 je Sekunde verringert werden.

- d.) Als Kompromiss zwischen der Hörbarkeit in einer akzeptablen Entfernung und somit dem sicheren Auffinden der Tür und dem Schallimmissionsschutz ist für das **Single Tone Signal**

ein **S/N-Verhältnis von -6 dB** zu realisieren. Wegen der schlechteren Wahrnehmbarkeit des **Dual Tone Signals** gegenüber dem Single Tone Signal ist hier ein **S/N-Verhältnis von -3 dB** zu empfehlen.

Zudem ist es wichtig darauf zu achten, dass die Signale nicht in zu weiter Entfernung (typ. >6 m) hörbar sind, weil ansonsten Verwechslungen und Fehlortungen in Bezug auf Züge entstehen könnten, die auf dem gegenüberliegenden Bahnsteig stehen und ebenfalls Türfindesignale aussenden.

Bei einer ausschließlichen Realisierung von adaptiven Signalen sind auch die Belange des Immissionsschutzes sicher erfüllt, dass die durch die Türen emittierten Türfinde-Geräuschanteile ohnehin ab einer Entfernung >10 m sicher im Hintergrundgeräusch untergehen und somit die Nachbarschaft nicht mehr stören können.

- e.) Wie in Abschnitt 5 mit den Statistiken über Bahnsteiggeräusche gezeigt, wurde für sicherheitstechnische Belange bei der Festlegung von Pegeln für die Sicherheitsalarmierung über die Beschallungsanlage der L_{AF10} , der für die meisten Situationen ca. 75 dB beträgt, als Grundlage gewählt. Da es sich bei Türfindesignalen nicht um Sicherheitssignale im engeren Sinne handelt, wird empfohlen die Forderung abzuschwächen und den Perzentilpegel L_{AF20} , der typischerweise ca. 70 dB beträgt, heranzuziehen. Mit einem ausreichenden S/N-Verhältnis von -3 dB oder -6 dB ergäbe sich so ein Maximalpegel von ca. $L_{AFmax} = 67$ dB bzw. $L_{AFmax} = 64$ dB.

G. 3.1. Single Tone Signale

Merkmal	<p>Tonintervall (Rechteck), kein Ein- und Ausblenden</p> <p>Impulsart Rechteck (keine sinusförmigen Impulse)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Signalimpulsdauer = 5 ms ± 1ms „an“ (Tonimpuls) - Signalzeitdauer von 3 bis 4 Impulsen pro Sekunde
Grundfrequenz	<ul style="list-style-type: none"> - $f_{signal} = 630 \text{ Hz} \pm 50 \text{ Hz}$
Schalldruckpegel	<ul style="list-style-type: none"> - $L_S \geq L_N - 6 \text{ dB}$ - $L_{S \min} = 40 \text{ dB} \pm 2 \text{ dB}$ - $L_{S \max} = 67 \text{ dB} \pm 2 \text{ dB}$

G. 3.1. Dual Tone Signale

Merkmal	mit Ergänzung Signalform „Rechteck“ (nicht sinusförmig)
Frequenz	ohne Änderung
Schalldruckpegel	<ul style="list-style-type: none"> - $L_S \geq L_N - 3 \text{ dB}$ - $L_{S \min} = 45 \text{ dB} \pm 2 \text{ dB}$ - $L_{S \max} = 70 \text{ dB} \pm 2 \text{ dB}$

Der hier vorgeschlagene Dynamikumfang von 25 dB ist aus akustischer Sicht sachgerecht. Es ist jedoch mit den Herstellern der Signalgeber abzusprechen, inwieweit eine solche Dynamik in die Elektronik implementierbar ist.

Es ist wichtig anzumerken, dass bei Änderungen selbst bei herrschenden S/N-Verhältnissen $< 6 \text{ dB}$ (bis ca. -10 dB) die Tür immer noch sicher gefunden werden kann. Es verringert sich hier „lediglich“ die Entfernung zur Tür (ca. 3m), ab der das Signal dann gehört und somit als akustische Leitinformation dienen kann.

S.1.4 Zusätzliche Festlegungen

Eine weitere für die Gesamtbetrachtung wichtige Frage für die Festlegung der Signalpegel ist auch die Platzierung des Signalgebers. Wird dieser oben an der Tür angebracht, ist der Einbau größerer und leistungsstärkerer Schallsender viel einfacher möglich. Dies sollte ebenfalls Berücksichtigung finden.

Aus den Versuchen und den Befragungen der Sehbehinderten geht hervor, dass ein Signalgeber für Türfindesignale auch oberhalb der Tür angebracht werden kann. Gleiche oder ähnliche Sicherheit für das Auffinden des Tasters erscheint aber nur dann gegeben, wenn eine zusätzliche taktile Hilfe z.B. in Form einer Gummilippe (Blindentaststreifen) o.ä. angebracht wird. Beispiele hierfür sind in nachfolgenden Abbildungen zu sehen.



Abbildung 0.1 a-b: Ansicht einer Zugtür mit taktiler Hilfe (Blindentaststreifen)

Nicht zuletzt müssen auch die Inhalte des Abschnittes 4.2.2.3.2 „Außentüren“ der Durchführungsverordnung [6] wie folgt angepasst werden:

- (10) Die Schallquelle von Türsignalen muss sich entweder oberhalb der Tür in der Mitte der Türöffnung oder in der Nähe der Bedienelemente der Tür befinden.

Sofern keine Bedienelemente vorhanden sind und die Schallquelle nicht oberhalb der Tür angebracht werden soll, muss sich die Schallquelle von Türsignalen neben der Türöffnung befinden.

Wird eine separate Schallquelle für das Türschließsignal verwendet, so kann es sich entweder in der Nähe des Bedienelementes oder neben der Türöffnung befinden.

Ist ein externes Türsignal vorhanden, so muss sich auch dessen Schallquelle entweder in der Nähe des Bedienelementes neben der Türöffnung oder oberhalb der Tür mittig zur Türöffnung befinden. Wird die Schallquelle oberhalb der Tür angebracht, ist eine zusätzliche taktile Hilfe (Blindentaststreifen) zum Auffinden des Türtasters in die Tür zu integrieren. Die taktile Hilfe muss sowohl oberhalb als auch unterhalb des Türtasters mit ausreichender Länge angebracht sein. Der Kontrast zum Hintergrund gem. EN 16584-1 ist dabei zu beachten.

Weiterhin ist zu prüfen, an welcher Stelle der TSI PRM folgende Ergänzung eingefügt wird.

Türsignale dürfen nicht gleichzeitig mit Türöffnungs- und Tür-Schließsignalen ausgesendet werden.

Inhaltsverzeichnis

S Management Summary - Präzisierungsvorschläge für die TSI PRM Anlage G.....	2
S. 1.1 Begriffsbestimmung.....	2
S.1.2 Messung des Störgeräusches.....	2
S.1.2.1 Signaldefinition und Messung des Störgeräusches im Betrieb.....	3
S.1.2.2 Messung des Störgeräusches am Fahrzeug.....	4
S.1.3 Festlegung der Signalpegel und des S/N Verhältnisses.....	4
S.1.4 Zusätzliche Festlegungen.....	6
1 Einleitung.....	11
2 Signale, Pegel und Schallfelder.....	16
2.1 Schalldruckpegel und Zeitbewertung.....	16
2.2 Schalldruckpegel und Frequenzbewertung.....	19
2.3 Konsequenzen für die Signalerfassung.....	21
2.4 Perzentilpegel.....	22
2.5 Pegeladdition und Hörbarkeit von Pegelunterschieden.....	22
2.6 Hörbarkeit von Signalen mit Störgeräusch.....	23
2.7 Maskierungseffekt.....	24
2.8 Direktschallpegel und Diffusschallfeld.....	25
2.9 Binaurale Maskierung und binauraler Gewinn.....	26
3 Türfindesignale.....	28
3.1 Anforderungen der Sehbehinderten.....	28
3.2 Anforderungen der Hersteller.....	29
3.3 Sonstige Anforderungen.....	30
3.3.1 Schallimmissionsschutz.....	30
3.3.2 Reizüberflutung.....	32
3.4 Normen und Regelwerke.....	33
3.4.1 Tasterposition gemäß 4.2.2.3.2 „Außentüren“ der TSI PRM.....	37
3.4.2 G. 1. Begriffsbestimmung.....	37
3.4.3 G. 2. Türöffnungs- und Türschließsignale.....	38
3.4.4 G. 3. Türfindesignale.....	39
4 Bahnsteiggeräusche.....	44
4.1 Pegelverteilung.....	44
4.2 Frequenzspektren von Bahnsteiggeräuschen.....	51
5 Hörversuche.....	55
5.1 Versuchsdesign.....	56
5.2 Versuchspersonen.....	57
5.3 Versuchsaufbau im Bahnhof Leipzig.....	58
5.4 Präparierung des Versuchszuges advanced TrainLab.....	59
5.5 Realisierung des kontrollierten Hintergrundgeräusches.....	63
5.5.1 Aufnahmetechnik und Rohdaten.....	64
5.5.2 Wiedergabeeinrichtung.....	65
5.5.3 Generierung der Hintergrundgeräusche.....	66
5.6 Festlegung der Szenarien und Einmessung der Anordnung.....	69
5.7 Steuerung und Versuchsdurchführung.....	71
5.8 Versuchsauswertung.....	73
5.9 Versuchsergebnisse.....	74
5.10 Weitere Versuchsergebnisse.....	81
6 Präzisierungsvorschläge für die TSI PRM Anlage G.....	84
6.1 Begriffsbestimmung.....	84
6.2 Messung des Störgeräusches.....	84
6.2.1 Signaldefinition und Messung des Störgeräusches im Betrieb.....	85
6.2.2 Messung des Störgeräusches am Fahrzeug.....	86

6.3 Festlegung der Signalpegel und des S/N Verhältnisses	86
6.4 Zusätzliche Festlegungen	88
Normen, Richtlinien und verwendete Unterlagen	91
Anhang A.1 Datenblatt des Schallsenders Visaton PL 7 RV	92
Anhang A.2 Datenblatt Radian 5208C.....	93

1 Einleitung

In den TSI - Technical Specifications for Interoperability - werden technische Spezifikationen festgelegt, die der Sicherstellung der Interoperabilität im Schienenverkehr und dessen strukturellen Teilsystemen im europäischen Wirtschaftsraum dienen. Die TSI finden in der Schweiz ebenfalls verbindlich Anwendung. Sie werden im europäischen Amtsblatt publiziert.

Die TSI PRM - Technical Specifications for Interoperability: Persons with Reduced Mobility [1] -, eine teilsystemübergreifende TSI – Fahrzeuge und Infrastruktur, regelt die Zugänglichkeit für Menschen mit Behinderung und Menschen mit eingeschränkter Mobilität. So wird hier etwa festgelegt, wie Außentüren von Schienenfahrzeugen unter anderem in Bezug auf die akustische Signalisierung ausgestattet sein müssen. Hierzu finden sich insbesondere Festlegungen zum Vorhandensein von Türöffnungs- und Türschließsignalen.

Im Jahr 2023 wurde in der TSI PRM (durch das Amtsblatt der Europäischen Union [6] verbindlich eingeführt) festgelegt, dass optional auch sog. Türfindesignale im Bereich der Außentüren zum Einsatz kommen können. Im Gegensatz zu den Türöffnungs- und Türschließsignalen sind die Türfindesignale keine Warnsignale, sondern Signale die das Auffinden der Tür für sehbehinderte Personen erleichtern sollen. Wenngleich für Türöffnungs- und Türschließsignale in der DIN EN 14752 „Bahnanwendungen - Seiteneinstiegssysteme für Schienenfahrzeuge“ und in der DIN 16584-2 [4] Festlegungen existieren, sind sowohl für die Türöffnungs- und Türschließsignale als auch für die bisher in keiner Norm spezifizierten Türfindesignale eigene Festlegungen in der TSI PRM getroffen. So finden sich in „Abschnitt 4.2.2.3.2 Außentüren“ Festlegungen hinsichtlich der Anordnung und Platzierung der Signalgeber sowie Art und Weise der Signaldarbietung. In Anlage G der TSI PRM sind die einzelnen Signale hinsichtlich ihrer Frequenz, ihrer Signalform, sowie ihrer herzustellenden Pegel festgelegt.

Bei den Türfindesignalen sind in Anlage G der TSI PRM zwei grundsätzlich unterschiedliche Signale definiert. Zum einen handelt es sich um einen getakteten Impuls (Single Tone Signal), so wie man ihn beispielsweise auch von deutschen Ampeln kennt, zum anderen um ein auf- und abschwelliges Zweiton-Signal (Dual Tone Signal). Die Festlegung des getakteten Impulses geht auf die Nutzung und den Vorschlag von Deutschland zurück, die Definition des Zweiton-Signals auf dessen bereits etablierte Nutzung in der Schweiz. Neben der eigentlichen Signaldefinition finden sich in Anlage G zudem Vorgaben für die zu realisierenden Schalldruckpegel der Signale, auch im Vergleich zum Hintergrundgeräusch.

Die Hörbarkeit von Signalen ist im starken Maße abhängig vom Verhältnis des Nutzsignalpegels zum Hintergrundgeräusch (Störgeräusch). Daher gibt es in Anlage G jeweils zwei verschiedene Festle-

gungen für den zu realisierenden Signalpegel, abhängig davon, ob eine Erfassung des Hintergrundgeräusches durchgeführt wird und somit der Signalpegel diesem angepasst werden kann (adaptiver Pegel), oder ohne Kenntnis des Hintergrundgeräusches mit einem festen Signalpegel gearbeitet werden muss.

Es sei bereits hier in der Einleitung erwähnt, dass es sich bei den Hintergrundgeräuschen um Geräusche auf den Bahnsteigen handelt, die durch das Zusammenwirken aller Schallquellen im Einwirkungsbereich zustande kommen. Dies sind maßgeblich sprechende Personen, Ansagen über die Beschallungsanlage und ein- oder ausfahrende Züge auf anderen Gleisen. Selten bis gar nicht handelt es sich um Hintergrundgeräusche, die durch denjenigen Zug verursacht werden, an dem die Tür gefunden werden soll. Das Hintergrundgeräusch hat also in der Regel keine direkte Korrelation mit den Geräuschen des Zuges, an dem das Signal gefunden werden soll. Eine Ausnahme bilden hier Dieseltriebzüge, deren Antriebe an den Türen maßgeblich zum Hintergrundgeräuschpegel beitragen.

Im Hinblick auf die obig erläuterte adaptive Regelung der Türsignale könnte man meinen, dass es einer solchen nicht bedarf, wenn man diese nur einmal „laut genug“ einstellt, sodass dieser Pegel für alle Anwendungsfälle (das bedeutet hier für alle Hintergrundgeräuschsituationen) ausreichend ist. Während man bei den Türöffnungs- und Türschließsignalen, die als Warnsignale funktionieren und somit in jedem Fall wahrgenommen werden müssen, mit vergleichsweise hohen Pegeln arbeiten kann und muss, besteht insbesondere bei der Festlegung der Pegel für Türfindesignale ein erheblicher Interessen- und somit Zielkonflikt.

Der Interessenkonflikt besteht in Bezug auf die Lautstärke von Türwarn- und Türfindesignalen zwischen den Bedürfnissen insbesondere von Menschen mit Sehbehinderung einerseits, welche u.U. zusätzlich eine Hörbeeinträchtigung haben (Bedürfnis Hör- und Ortbarkeit des Signals) und ein besonders lautes Türfindesignal bevorzugen, und den Lärmschutzbedürfnissen der Allgemeinheit bzw. der Anwohnerschaft von Bahnhöfen und anderen Fahrgästen andererseits, die wiederum ein sehr leises Signal erwarten. Dieser Interessenkonflikt kann grundsätzlich entschärft werden, indem die Lautstärke der Signale, wie bereits ausgeführt, dem jeweiligen Umgebungsgeräusch angepasst werden. Wenngleich es daher a priori naheliegend ist, dass die adaptive Regelung für den Interessenausgleich zwingend notwendig ist, bleibt jedoch zunächst unklar, welcher Signalpegel zur sicheren Hörbarkeit im Vergleich zum Hintergrundpegel eingestellt werden muss.

Ferner gilt es diesen Interessenkonflikt unter der Anwendung der beiden in der TSI PRM grundsätzlich beschriebenen Signalarten, dem Single Tone Signal sowie dem Dual Tone Signal, auszuloten. Hierbei sind die beiden Signalpegel aufgrund ihrer Unterschiedlichkeit jeweils so festzulegen, dass die obigen Ziele für beide Signale in ähnlicher Weise erfüllt werden.

Die derzeitige TSI PRM enthält für die obigen Fragestellungen bereits Festlegungen, die jedoch in einigen Punkten Anlass zur Kritik gaben und daher einer Anpassung und Präzisierung bedürfen. Die Kritikpunkte waren im Einzelnen:

- Der festgelegte Pegel für die Türfindesignale ist zu hoch.
- Die Art der Signaldefinition ist abweichend von denen der Türöffnungs- und Türschließsignale und sollte vereinheitlicht werden.
- Die Messmethodik für Türöffnungs- und Türschließsignale sollte überprüft und mit der Methode der Türfindesignale vereinheitlicht werden.
- Die Pegel für beide Signalarten der Türfindesignale sollten überprüft und angepasst werden.

Ein weiterer Kritikpunkt bezog sich auf die Lage des Türsignalgebers. Dieser soll sich nach der aktuell geltenden Vorgabe der TSI PRM für Türfindesignale in der Nähe des Türtasters befinden. Dies trägt der Tatsache Rechnung, dass das Türfindesignal, so wie es zumindest in der Schweiz erdacht wurde, im eigentlichen Sinne ein **Türtaster**findesignal sein sollte und somit die festgelegte Positionierung sinnvoll erscheint. Seitens der Hersteller für solche Signalgeber wird jedoch eingewendet, dass es einfacher und weniger aufwendig sei, den Signalgeber oberhalb der Tür zu platzieren. In diesem Fall könnten die Signalgeber mehrere Funktionen gleichzeitig erfüllen und hinsichtlich Pegel und Leistung ausreichend ausgestattet werden. Letzteres gestaltet sich bei der Implementierung in der Tür schwierig. Insoweit ist die Frage offen, ob die Tür bzw. der Türdrücker nicht auch mit einem Signalgeber oberhalb der Tür ausreichend sicher – oder je nach Situation (z.B. andere wartende Reisende auf dem Bahnsteig, die das Signal auf Türdrückerhöhe abschatten) gar besser – gefunden werden kann.

Zur Klärung der obigen Fragestellung hat das Bundesamt für Verkehr (BAV) eine dreiteilige Studie beauftragt mit dem Ziel, die überarbeiteten Spezifikationen der Anlage G der TSI PRM [6] respektive, wenn verfügbar, die finale adaptierte Fassung der TSI PRM mit Blick auf den obigen Zielkonflikt zu überprüfen, nötigenfalls zu ergänzen und zu erklären.

Die Untersuchung gliedert sich in drei Teile:

Teil A Theoretische Überlegungen und Berechnungen

Anhand von theoretischen Überlegungen sollen folgende Fragen untersucht und bestmöglich beantwortet werden:

- Welche Störgeräuscharten bezüglich der vorkommenden Pegel und Frequenzen (Hintergrundpegel) treten typischerweise auf Bahnhöfen auf?
- Welcher Frequenzbereich ist als maskierender Bereich (Störwirksamkeitsbereich) für die Anwendung der Findesignale wirksam?

- In welcher Entfernung und Richtung zur geöffneten Tür soll das Findesignal für Normalhörende sicher detektiert werden?
- Welche Konsequenzen ergeben sich ggf. für Hörbehinderte?
- Welcher Mindestpegel muss immer erreicht werden?
- Welcher Maximalpegel sollte nicht überschritten werden?
- Welcher Pegel sollte für Dual Tone Signale bei nicht adaptiver Regelung (statischer Pegel) favorisiert werden?
- Welche Dynamik (Unterschied zwischen dem geringsten und dem höchsten Pegel) sollte das Findesignal unter Berücksichtigung theoretischer, aber auch praktischer Gesichtspunkte (Dynamik der eingesetzten Signalgeber) besitzen?
- In welcher Art und Weise sind die Störgeräusche für eine adaptive Regelung zu erfassen?
- In wieweit lassen sich die Überlegungen auf das getaktete Puls-Signal (deutsche Anwendung) übertragen?
- Wie kann eine Angleichung der Signalarten (Single Tone Signal und Dual Tone Signal) in Bezug auf den Zielkonflikt (möglichst geringe Pegel bei bestmöglicher Signaldetektion) erfolgen?
- Wie müssen ggf. die zugehörigen Signalparameter der Signale in Bezug auf den Zielkonflikt definiert werden?

Teil B Hörversuche

Die praktischen Untersuchungen sollen mit einer geeigneten Anzahl (typischerweise bis zu 10 Personen) an Vertreter/-innen von Personen mit Sehbeeinträchtigungen sowie mit altersbedingten (leichten) Hör- und Sehbeeinträchtigungen sowohl im Labor als auch, wann immer möglich, im Feld (d.h. an Bahnhöfen / Bahnhaltstellen mit eingebauten akustischen Signalgebern) Versuche angestellt werden. Die Untersuchungen sollen folgende Punkte umfassen:

- Verifizierung der theoretischen Untersuchungen für verschiedene Störgeräusch- und Signalsituationen
- Gegebenenfalls Anpassung der in den theoretischen Untersuchungen gefundenen Erkenntnisse durch die praktischen Untersuchungen.

Teil C Diskussion und Berichterstellung

- Zusammenfassung der Untersuchungen in einem Ergebnisbericht
- Erstellen eines Vorschlags zur Anpassung der TSI PRM

Für diesen Auftrag wurde eine Begleitgruppe gebildet, die die Fragestellungen und das Vorgehen des Versuches inhaltlich begleiteten und die abschließend auf Basis der Ergebnisse und den zugehörigen Folgerungen die entsprechenden Empfehlungen zur Präzisierung der TSI PRM Anlage G erarbeiteten.

Die gesamte Begleitgruppe bestand aus Vertretern von:

- Bundesamt für Verkehr der Schweizerischen Eidgenossenschaft, BAV (Auftraggeber)
- Schweizerische Bundesbahnen AG, SBB (Rail Production an Fleet Strategy)
- Deutsche Bahn AG, DB (Innovation, Gremienarbeit und Service Technik Schienenfz., FE.EF 33)
- Deutsche Bahn AG, DB Systemtechnik (Kompetenzzentrum Akustik und Erschütterungen, TT.TVE 35)
- EAO AG (Hersteller von Signalgebern, Schweiz)
- TSL-ESCHA GmbH (Hersteller von Signalgebern Deutschland)
- TAC - Technische Akustik (Auftragnehmer)

Die Zusammenfassung der in der Studie erlangten Ergebnisse ist Gegenstand dieses Berichtes.

2 Signale, Pegel und Schallfelder

In diesem Abschnitt sollen wesentliche Grundlagen zu akustischen Signalen, deren Erfassung und Beurteilung kurz erläutert werden, um die in den Normen gegebenen Signaldefinitionen, gegebenenfalls deren Widersprüche, sowie die späteren Schlussfolgerungen und Empfehlungen nachvollziehen zu können. Sofern die akustischen Grundlagen bekannt sind, kann dieser Abschnitt überschlagen werden.

2.1 Schalldruckpegel und Zeitbewertung

Als Schallwechseldruck p oder kurz Schalldruck bezeichnet man die Druckschwankungen um den statischen Ruhedruck, die durch das Vorhandensein von Schallwellen auftreten. Das zugehörige Zeitsignal wird mit $p(t)$ gekennzeichnet. Der Schalldruck im Hörbereich umfasst dabei typischerweise einen Frequenzbereich von 20 Hz bis 20.000 Hz. Der Frequenzumfang der menschlichen Sprache reicht von etwa 100 Hz für die tiefen Töne bis 7000 Hz für die hohen Sprachanteile wie z.B. Zisch- und Plosivlaute. Zur Bemessung der Schallstärke wird in der Regel eine energetische Betrachtung herangezogen. Hierzu wird die Zeitfunktion zunächst quadriert ($p(t)^2$), da die Energie des Signals zum Quadrat des Schalldruckes proportional ist. Wegen des großen Dynamikbereiches, den das menschliche Ohr in der Lage ist wahrzunehmen, sowie wegen grundlegenden Gesetzmäßigkeiten der Lautstärkewahrnehmung wird die Schallstärke nicht in Form des Zeitsignals $p(t)$ oder in der zur Energie proportionalen Form $p(t)^2$ angegeben, sondern als sogenannter Schalldruckpegelverlauf $L_p(t)$, wobei das „L“ für „Level“ und der Index „p“ für „Pressure“ steht. Der Schalldruckpegel L_p ist dabei definiert als relatives logarithmisches Maß gemäß Gleichung 1. p_0 ist hierbei der Bezugsschalldruck, der mit $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2$ der menschlichen Hörschwelle bei 1 kHz entspricht.

$$L_p(t) = 10 \log \frac{p(t)^2}{p_0^2} \quad (1)$$

Die Pseudoeinheit des Schalldruckpegels ist das Dezibel (dB). Häufig wird beim Schalldruckpegel der Index p weggelassen, insbesondere dann, wenn eindeutig ist, dass ein Schalldruckpegel gemeint ist. Nachfolgend wird daher zum besseren Verständnis und der besseren Lesbarkeit in Übereinstimmung mit DIN EN 61672-1:2014-07 [5] der Index p nicht mit aufgeführt, da es sich bei den hier behandelten Pegeln immer um Schalldruckpegel handelt. Mithilfe des Schalldruckpegels lässt sich also eine der Energie des Schallsignals proportionale Größe im logarithmischen Maßstab anzeigen. Historisch bedingt hat man früher zur Bestimmung des Schalldruckpegels analoge Schallpegelmesser mit einer Zeigerdarstellung eingesetzt. Bringt man den Schalldruckpegelverlauf eines beliebigen

Schallsignale im Hörbereich mit einer solchen Zeigerdarstellung zur Anzeige, so ist die Zeigeranzeige aufgrund der starken Schwankungen des Schalldruckpegelverlaufs sehr zappelig und nicht ablesbar. Aus diesem Grunde sowie weiteren hörphysiologischen Gründen hat man mithilfe einfacher Technik eine Zeigerträgheit eingeführt, die das Zappeln der Anzeige beruhigt und somit eine Ablesung möglich machten. Realisiert wurde diese Zeigerträgheit mithilfe einer einfachen elektronischen Schaltung, bei dem ein sogenanntes RC-Glied (Resistor und Capacity, also elektr. Widerstand und Kondensator) zum Einsatz kam. Kennzeichen solcher Schaltungen ist, dass sich für sehr schmale, impulshaltige Schalle (technisch Diracstoß) der Anstieg und der Abfall der Energie nach einem exponentiellen Gesetz verhält (siehe auch [5]). Seinerzeit wurden zwei Zeitkonstanten definiert:

- a.) „F“ = „fast“ für geringe Zeigerträgheit, Zeitkonstante $\tau=125$ ms
- b.) „S“ = „slow“ für große Zeigerträgheit, Zeitkonstante $\tau= 1$ s

Dies bedeutet in der Praxis, dass die Pegelverläufe mit einem Exponentialfenster einer Kurzzeitmittelung unterzogen werden. Ganz grob und zum einfachen Verständnis kann man sagen, dass die Signale je nach Einstellung „F“ oder „S“ immer innerhalb eines Zeitfensters von 125 ms bzw. 1 s energetisch gemittelt werden. Die Darstellung eines $L_{pF}(t)$ oder $L_F(t)$ ist demnach die Darstellung eines jeweils über die Zeitkonstante energetisch gemittelten Schalldruckpegelverlaufes. Bei der Einstellung „F“ kann der Pegel nach Abschalten eines Impulses maximal mit einer Abklingrate von 34,75 dB/s abfallen. Bei der Einstellung „S“ beträgt die maximale Abklingrate 4,35 dB/s.

In der Praxis wird zur Darstellung von Schalldruckpegelverläufen häufig die Zeitkonstante „F“ benutzt, weil diese Zeitkonstante zum einen noch eine hinreichende zeitliche Auflösung des Pegelverlaufes erlaubt, zum anderen aber auch schon eine gute Ablesbarkeit gewährleistet. Zudem ist die Zeitkonstante „F“ grob mit der Zeitkonstante des menschlichen Gehörs korreliert.

In der Praxis werden aber zeitlich veränderliche Schalldruckpegelverläufe entweder bezüglich ihres Maximums oder bezüglich ihres Mittelwerts charakterisiert. Die Anwendung von Maximalwerten ist immer dann sinnvoll, wenn es sich um sogenannte transiente, also zeitlich flüchtige Signale handelt. Der zugehörige Kennwert heißt dann maximaler (Fast-)Schalldruckpegel L_{Fmax} .

Mittelwerte werden meist herangezogen, wenn die Signale weitgehend stationär sind und somit in ihrer Energie über die Zeit nur wenig schwanken. Als Maß für den Mittelwert dient der sogenannte energieäquivalente Dauerschallpegel L_{eq} . Gleichung 2 zeigt hierzu die entsprechende mathematische Definition.

$$L_{eq} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p(t)^2}{p_0^2} dt \right) \quad (2)$$

Nicht selten werden jedoch auch Signale, die nicht stationär sind, also deutliche impulshaltige oder transiente Anteile enthalten, mithilfe eines energieäquivalenten Dauerschallpegels L_{eq} gekennzeichnet. Bei einem solchen Vorgehen muss jedoch immer zusätzlich die Mittelungszeit mit angegeben werden, da bei transienten Signalen der erzielte Mittelwert in erheblichem Maße von der Mittelungsdauer abhängt. Ein extremes Beispiel macht dies deutlich: Würde z.B. der Schalldruckpegel eines Hammerschlages, der ja nur aus einem kurzen Impuls besteht, als L_{eq} wiedergegeben, so würde es von der Dauer der Mittelungszeit abhängen, welcher Wert für den Hammerschlag herauskommt. Verdoppelt sich die Mittelungszeit, verteilt sich die Energie des Impulses im Mittel auf einer doppelt so langen Zeit. Der kennzeichnende Schalldruckpegel würde bei einer Verdopplung der Mittelungszeit um 3 dB abfallen. Die Mittelungszeit wird durch einen zusätzlichen Index mit angegeben (z.B. L_{eq30}), wobei vorher definiert wird, ob es sich hierbei um Sekunden, Minuten, Stunden o.ä. handelt.

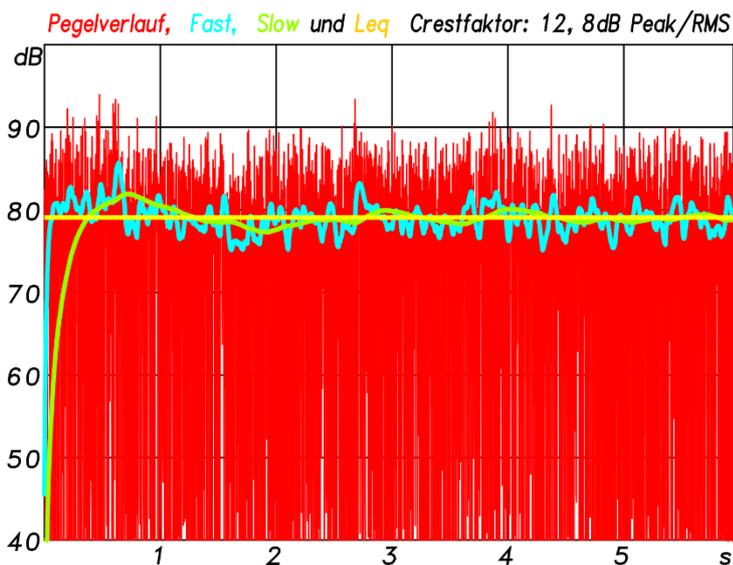


Abbildung 2.1: Beispielhafter Schalldruckpegelverlauf unter Anwendung unterschiedlicher Zeitkonstanten

Zusammenfassend zeigt Abbildung 2.1 hierzu beispielhaft einen Schalldruckpegelverlauf unter Anwendung unterschiedlicher Zeitkonstanten.

2.2 Schalldruckpegel und Frequenzbewertung

So wie Schalle hinsichtlich ihres zeitlichen Verhaltens unterschiedlich gekennzeichnet und charakterisiert werden können, kann dies auch im Frequenzbereich geschehen. Ein idealer Schallpegelmesser würde in dem angegebenen Frequenzbereich (z.B. Hörbereich 20 Hz bis 20 kHz) den Schalldruck aller Frequenzen mit gleicher Sensitivität erfassen und zur Anzeige bringen. In vielen Fällen ist es jedoch notwendig, nach der Erfassung eine sogenannte Frequenzbewertung durchzuführen. So kann zum einen die Schallanalyse in einzelnen Frequenzgruppen erfolgen. Hierbei wird das Frequenzband in einzelne Abschnitte eingeteilt, meist Terzen oder Oktaven (siehe Abbildung 3.2). Die Schallanalyse erfolgt dann für jedes Frequenzband getrennt. Schallanalysen können auch als energetische Summe über mehrere Terz- oder Oktavbänder durchgeführt werden, sofern nur dieser Frequenzbereich von Belang ist.

Norm-Frequenz f_m [Hz]	
Terz	Oktave
16	16
20	
25	
31,5	31,5
40	
50	
63	63
80	
100	
125	125
160	
200	
250	250
315	
400	
500	500
630	
800	
1000	1000
1250	
1600	
2000	2000
2500	
3150	
4000	4000
5000	
6300	
8000	8000
10000	
12500	
16000	16000
20000	

Abbildung 2.2: Darstellung der Norm-Terzen und Norm-Oktaven

Eine andere Form der Frequenzanalyse ist die Einbeziehung der Eigenschaft des menschlichen Gehörs. Das menschliche Gehör ist nicht für alle Frequenzen gleich empfindlich. So besitzt es seine maximale Empfindlichkeit bei mittleren Frequenzen, die Empfindlichkeit fällt jedoch zu tiefen Frequenzen stark ab und nimmt auch zu sehr hohen Frequenzen ab. Zudem ist die Gesamtempfindlichkeit des menschlichen Gehörs auch noch abhängig vom Absolutpegel: Je höher der Pegel, desto geringer sind die Unterschiede der Empfindlichkeit zwischen den mittleren und den tiefen bzw. hohen Frequenzen.

Um dem Rechnung zu tragen, besitzt jeder Schallpegelmesser sogenannte Frequenzbewertungsfunktionen. Diese Funktionen sind für verschiedene Pegelbereiche jeweils der Empfindlichkeit des menschlichen Ohres nachempfunden. Die Pegelbereiche wurden in verschiedene Stufen eingeteilt, von A, B über C bis D, wobei jedem dieser Bereiche eine eigene Frequenzbewertungsfunktion zugeordnet wurde. Die am häufigsten angewandte Bewertungskurve ist die sogenannte A-Bewertungskurve, die die Empfindlichkeitskurve des Ohres bei relativ niedrigen Absolutpegeln zwischen 20 dB und 40 dB wiedergibt. Es sei angemerkt, dass aufgrund neuer Vermessungen des menschlichen Wahrnehmungsvermögens (Hörschwelle nach DIN ISO 226 [7]) die A-Bewertung heutzutage der Empfindlichkeit des Ohres zwischen 40 dB und 60 dB entspricht.

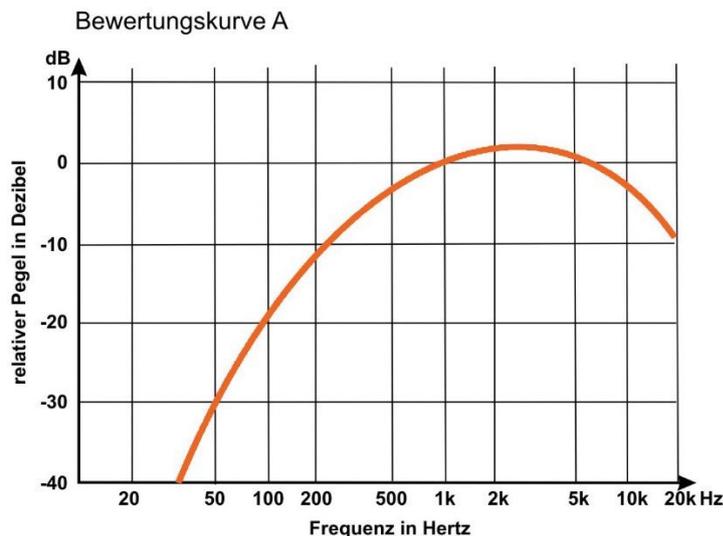


Abbildung 2.3: A-Bewertungskurve

Abbildung 2.3 zeigt den frequenzabhängigen Verlauf der A-Bewertungskurve. Schallereignisse, die über den Schallpegelmesser eine A-Bewertung erhalten, werden demnach bei tiefen Frequenzen analog zu der Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs abgesenkt und auch bei sehr hohen Frequenzen entsprechend reduziert. Bei Frequenzen zwischen 1 kHz und etwa 6 kHz erfolgt hingegen eine leichte Anhebung, um der höheren Empfindlichkeit des Gehörs in diesem Frequenzbereich Rechnung zu tragen. Der so ermittelte Schalldruckpegel heißt A-bewerteter Schalldruckpegel L_A . Korrekterweise wird ein A-bewerteter Schalldruckpegel, der mit L_A gekennzeichnet ist, ebenfalls mit der Einheit dB angegeben. Nicht selten wird aber zur Verdeutlichung, dass es sich um einen A-bewerteten Schalldruckpegel handelt, die Einheit dB(A) verwendet.

Um deutlich zu unterscheiden, ob es sich um einen frequenzbewerteten Schalldruckpegel oder einen hinsichtlich der Frequenz unbewerteten Pegel handelt, wird bei unbewerteten Pegeln ein Index z für „zero“ – (L_z) zugefügt.

Grundsätzlich folgt daraus, dass sich bei breitbandigen Schallen, die nicht die meiste Energie im mittleren Frequenzbereich aufweisen, der unbewertete Schalldruckpegel L_z vom A-bewerteten Schalldruckpegel L_A deutlich unterscheidet. In der Regel ist der A-bewertete Schalldruckpegel dann niedriger als der unbewertete.

2.3 Konsequenzen für die Signalerfassung

Wie aus den vorangegangenen Abschnitten deutlich wird, muss bei jeder Signaldefinition und Signalanalyse festgelegt werden, welche zeitliche und welche frequenzmäßige Bewertung den Angaben zugrunde liegt.

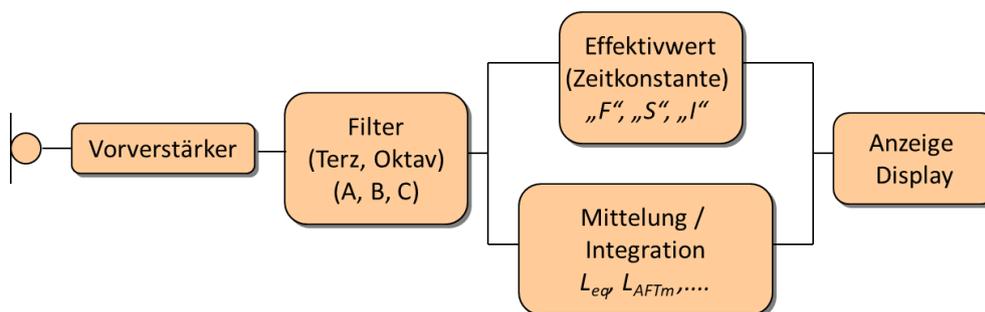


Abbildung 2.4: Prinzipschaltbild eines Schallpegelmessers

Abbildung 2.4 zeigt hierzu den prinzipiellen Aufbau eines Schallpegelmessers. Hieraus ist erkennbar, dass bei der Schallerfassung zunächst eine Frequenzbewertung erfolgt und dann eine entsprechende Zeitbewertung. Ohne die konkrete Festlegung dieser Größen sind die zugehörigen Zahlenwerte nicht bewertbar und auch nicht vergleichbar.

Als Konsequenz bedeutet dies für die später behandelten Türöffnungs- und Türschließsignale sowie die Türfindesignale, dass die hier zuvor beschriebenen Aspekte beachtet und geeignet angewandt werden müssen. So sind die Signale z.B. als maximaler A-bewerteter mit der Zeitkonstante „Fast“ gemessener Schalldruckpegel L_{AFmax} oder A-bewerteter, energieäquivalenter Dauerschallpegel L_{Aeq} zu definieren oder zu messen.

2.4 Perzentilpegel

Um für die späteren Betrachtungen, bei denen es unter anderem um die Frage der auftretenden Hintergrund- oder Störschalldruckpegel geht, beantworten zu können, soll hier noch kurz der Begriff des Perzentilpegels erläutert werden.

Dieser ist eine statistische Größe und bezieht sich dabei auf eine Auswertung einer Schalldruckpegelverteilung. Er stellt den Pegel dar, der während der Messzeit zu x % der Messdauer erreicht oder überschritten wurde. Mit Hilfe des Perzentilpegels kann später beantwortet werden, welche Pegel häufig und welche weniger häufig als Hintergrundgeräusch am Bahnsteig auftreten und somit die Grenzen für die Betrachtungen festgelegt werden.

2.5 Pegeladdition und Hörbarkeit von Pegelunterschieden

Das Rechnen mit Pegeln bereitet manchmal ein wenig Schwierigkeiten. So entspricht grundsätzlich eine Addition im logarithmischen Bereich einer Multiplikation im linearen Bereich. Abbildung 2.5 zeigt, wie die Änderung des Schalldruckpegels mit der Energie des Signales (bzw. der Schallleistung der Quelle) zusammenhängt. Demnach bedeutet bspw. eine Erhöhung des Schalldruckpegels um 3 dB eine Verdopplung der Signalenergie und umgekehrt eine Minderung des Schalldruckpegels um 3 dB eine Halbierung der Signalenergie.

Die Hörbarkeit von Pegelunterschieden folgt jedoch nicht den linearen, sondern den logarithmischen Gesetzen. Zur Verdopplung der Lautstärke (die Lautstärke ist ein Maß für die empfundene(!) Schallstärke) muss die Signalenergie nicht verdoppelt, sondern verzehnfacht werden. Dies bedeutet, dass der Schalldruckpegel nicht um 3 dB, sondern um 10 dB angehoben werden muss. Umgekehrt halbiert sich die Lautstärke erst bei einer Pegelreduktion um 10 dB und nicht bereits bei einer Halbierung der Signalenergie von 3 dB. Diese Abhängigkeit gilt in guter Näherung für alle absoluten Schalldruckpegel oberhalb von 40 dB und damit für diejenigen Schalldruckpegelbereiche, wie wir sie auf Bahnsteigen vorfinden.

Schalldruck- pegeländerung	Leistungsänderung um Faktor
+ 1 dB	1,25
+ 3 dB	2
+ 6 dB	4
+10 dB	10
+ 20 dB	100
-1 dB	0,79
- 3 dB	0,5
- 6 dB	1/4 = 0,25
- 10 dB	1/10 = 0,1
- 20 dB	1/100 = 0,01

Abbildung 2.5: Pegeländerung versus Leistungsänderung in einem Signal

Ferner ist zu beachten, dass es kein akustisches Langzeitgedächtnis gibt. Pegelunterschiede von 3 dB lassen sich im A-B-Vergleich, also dem direkten und unmittelbaren Vergleich zwischen zwei Situationen, gut wahrnehmen. Pegelunterschiede von 1 dB sind nur unter sehr guten Randbedingungen im A-B-Vergleich hörbar. Hieraus folgt, dass Pegeldefinitionen sorgfältig vorgenommen werden sollten. Wird z.B. ein um 3 dB höherer Schalldruckpegel gefordert, bedeutet dies zwar eine wahrnehmbare Erhöhung der Lautstärke, jedoch bei Weitem keine Verdopplung. Die Leistung des Signalgebers hingegen muss aufgrund der Verdopplung der Signalenergie bei einer Pegelerhöhung von +3 dB in der Tat in doppelter Höhe zur Verfügung gestellt werden. Eine sorgfältige Betrachtung der notwendigen Schalldruckpegel hat also einen unmittelbaren und erheblichen Einfluss auf die technischen Eigenschaften des Signalgebers. Dies ist im Weiteren ebenfalls zu beachten.

2.6 Hörbarkeit von Signalen mit Störgeräusch

Grundsätzlich gelten alle Schallsignale als wahrnehmbar (hörbar), wenn ihre Signalenergie oberhalb der sog. Hörschwelle liegt. Die Hörschwelle des Menschen ist vielfach untersucht und aktuell in DIN ISO 226 [7] niedergelegt. Im Zusammenspiel zweier Signale, bei denen ein Signal als Nutzsignal, also als das zu hörende, und das andere als Störsignal definiert ist, ist die Darstellung der Hörbarkeit des Nutzsignals mit dem Pegel L_S (L_S = „level signal“) bei gleichzeitig vorliegendem Störsignal mit dem Pegel L_N (L_N = „level noise“) deutlich komplizierter. Im Wesentlichen hängt hier die Hörbarkeit des Nutzsignals von zwei Faktoren ab:

- a.) von der Art und Weise des sog. Maskierungseffektes

b.) von der Wirkung des binauralen Gewinns

Beide Effekte werden nachfolgend kurz erläutert und die Konsequenzen hieraus für die weiteren Betrachtungen gezogen.

2.7 Maskierungseffekt

Der Maskierungseffekt beim Hören bezieht sich auf die Eigenschaft des menschlichen Gehörs, bestimmte Schallinformationen (hier des Nutzsignals) zu überdecken oder zu "maskieren", wenn gleichzeitig andere Signale (hier Störgeräusche) vorhanden sind. Dieser Effekt spielt eine wichtige Rolle in der auditiven Wahrnehmung und erklärt, warum bestimmte Töne in lauten Umgebungen schwerer zu hören sind.

In den hier betrachteten Fällen handelt es sich um eine sogenannte Simultanverdeckung. Bei der Simultanverdeckung sind das Nutzsignal und das Störsignal gleichzeitig vorhanden. Entscheidend bei der Simultanverdeckung ist, dass sich Schalle nur dann gegenseitig maskieren können, wenn sie im gleichen oder in unmittelbar benachbarten Frequenzbereichen liegen. Genauere Untersuchungen hierzu finden sich im Standardwerk „Psychoakustik“ von Zwicker [8].

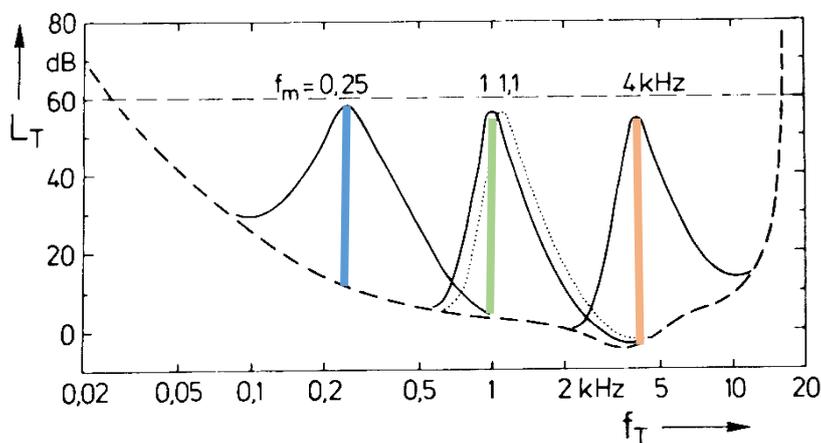


Abbildung 2.6: Verdeckungseffekt – Mithörschwellen für drei Maskierfrequenzen nach Zwicker [8]

Abbildung 2.6 zeigt das Prinzip der Simultanverdeckung. Zu erkennen ist die Ruheshwelle sowie die frequenzabhängigen Mithörschwellen, die von einem Signal, hier mit den Beispielen 250 Hz, 1 kHz, und 5 kHz, generiert werden. Alle Schalle, die gleichzeitig vorhanden sind und hinsichtlich Frequenz und Pegel unterhalb der Mithörschwelle liegen, werden maskiert und sind somit nicht gleichzeitig hörbar. Das laute Signal verdeckt („maskiert“) in diesen Bereichen das leise.

Das Prinzip der Maskierung ist für den diotischen Fall (Darbietung zweier gleicher Signale auf beiden Ohren) vergleichsweise gut untersucht. Aus dieser einfachen Darstellung würde man folgern, dass Signale beim Vorhandensein von Störgeräuschen dann gut hörbar sind, wenn das Nutzsignal für den schlechtesten Fall (die Frequenzen oder Frequenzbereiche von Nutz- und Störsignal sind gleich) einen höheren Pegel besitzt. Man spricht hier von dem S/N-Verhältnis (signal to noise), das zur sicheren Hörbarkeit für diese Fälle typischerweise 3-5 dB betragen sollte. Diese Betrachtung ist jedoch für den in dieser Studie betrachteten Zusammenhang bei Weitem nicht ausreichend. Dies wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

2.8 Direktschallpegel und Diffusschallfeld

Die im Weiteren zu betrachtende Ausgangslage ist die, dass ein Nutzsignal, hier Türfindesignal, ausgehend von einem diskreten Punkt (hier Zugtüre) von einem Störgeräusch überlagert wird, welches jedoch nicht aus einer diskreten Richtung, sondern diffus eintrifft.

Technisch gesehen, entspricht der Türsignalgeber einer sog. Punktschallquelle. Schall, der punktuell von einer Quelle ausgeht, breitet sich als Kugelwelle (oder im Fall der Türsignalgeber als Halbkugelwelle) aus und erfährt im Zuge seiner Ausbreitung aufgrund der immer größer werdenden Kugelflächen eine Minderung des Schalldruckpegels von -6 dB je Entfernungsverdopplung. Der Schalldruckpegel der Türsignale nimmt entsprechend mit der Entfernung zur Tür ab.

Das Hintergrundgeräusch wird aber maßgeblich von sprechenden Personen, Ansagen über die Beschallungsanlage und ein- oder ausfahrenden Zügen auf anderen Gleisen hervorgerufen. Die Summe all dieser Schallquellen erzeugt in guter Näherung ein diffuses Schallfeld. Diffuse Schallfelder haben grundsätzlich zwei Eigenschaften: Zum einen trifft in einem gewählten Punkt die Schallenergie aus allen Richtungen gleichmäßig ein; es gibt bezüglich der einfallenden Energie keine Vorzugsrichtung. Zum anderen ist der Schalldruckpegel in einem diffusen Schallfeld, sofern dieser in gewissen Grenzen zeitlich und frequenzmäßig gemittelt wird, nahezu ortsunabhängig.

Hintergrundgeräusche auf den Bahnsteigen können in sehr guter Näherung als diffus angesehen werden.

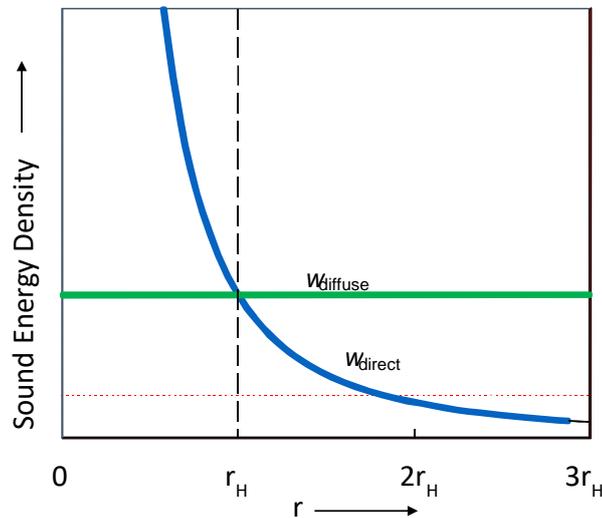


Abbildung 2.7: Energiedichte von Direktschallfeld (Kugelwelle) und Diffusschallfeld über der Entfernung

Abbildung 2.7 zeigt das prinzipielle Verhalten der Energiedichten eines Direktschallfeldes und eines in einem Raum erzeugten Diffusschallfeldes über der Entfernung. Die Grafik zeigt deutlich, dass ab einer gewissen Entfernung $> r_H$ (sog. Hallradius) die Energiedichte des Direktschallfeldes unter die des Diffusschallfeldes absinkt.

2.9 Binaurale Maskierung und binauraler Gewinn

Wie im vorangegangenen Abschnitt kurz erläutert, handelt es sich bei der Wahrnehmung von Türsignalen auf Bahnsteigen um die Überlagerung zweier Schallanteile. Das Nutzsignal ist eine Punktquelle, die aus einer diskreten Richtung Schall emittiert, das Störsignal bildet ein diffuses Schallfeld aus, bei dem sich die Schallenergie richtungsunabhängig mehr oder minder gleichmäßig verteilt auf dem Bahnsteig ausbreitet.

Bei dieser Konstellation der Schallsignale sind zwei weitere Effekte bezüglich der Hörbarkeit des Nutzsignals aus einem Störsignal bedeutsam:

- a.) Richtwirkung der Ohren, die zu einer Minderung der diffusen Anteile gegenüber den Anteilen aus der „vorne“-Richtung führen.
- b.) Binaurale Signalverarbeitung (Kreuzkorrelationsbildung zwischen den Ohrsignalen), die eine zusätzliche Erhöhung des S/N bewirkt.

Die Summe beider Effekte ist u.a. unter dem Begriff des „Cocktailparty-Effektes“ bekannt. Der Cocktailparty-Effekt bezieht sich dabei auf die Fähigkeit des menschlichen Gehörs, relevante Informationen aus einer Vielzahl von Geräuschen herauszufiltern, insbesondere in einer lauten Umgebung wie einer Cocktailparty. Auch wenn viele Gespräche und Geräusche gleichzeitig stattfinden, kann eine

Person ihre Aufmerksamkeit auf eine bestimmte Stimme oder ein bestimmtes Geräusch richten. Die Wirkung der beiden Effekte a.) und b.) kann technisch gut mit dem sogenannten binauralen Gewinn gekennzeichnet werden. Der binaurale Gewinn beschreibt dabei, welcher zusätzliche Gewinn des S/N-Verhältnisses durch die Wahrnehmung von Schallen im binauralen (beidohrigen) Hören eben durch die Effekte a.) und b.) gegenüber dem monoauralen Hören erzielt wird. Die genaue Höhe des binauralen Gewinns kann variieren und ist von verschiedenen Faktoren abhängig, einschließlich der Art des Schallsignals, der Frequenz des Schalls, der Richtung der Schallquelle und individueller Unterschiede im Gehör des Einzelnen. Dennoch kann aus den bisherigen Untersuchungen gefolgert werden, dass der binaurale Gewinn mehrere dB und bis weit über 10 dB betragen kann [8].

Es bedarf an dieser Stelle keiner genaueren theoretischen Betrachtung, sondern nur der Kenntnis dieses Effektes und dessen Wirkung, weil dieses im Weiteren zur Erläuterung der einzustellenden Pegel für Türsignale bedeutsam ist.

3 Türfindesignale

3.1 Anforderungen der Sehbehinderten

Die Anforderung der Sehbehinderten an Türfindesignale scheinen zunächst offensichtlich zu sein. Sehbehinderte wollen sich weitgehend mithilfe ihres Blindenstockes oder Blindenführhundes frei und ohne Hilfe einer weiteren Person auf dem Bahnsteig bewegen und entsprechend die Zugtüre und den Türtaster zum Ein- und Aussteigen finden. Im Zuge der für diese Studie geplanten und später beschriebenen Hörversuche wurden im Vorfeld die Sehbehinderten, die an der Studie teilnehmen wollten, nach ihren Anforderungen befragt. Demnach ist zunächst festzustellen, dass sich Sehbehinderte am Bahnsteig in Bezug auf das Auffinden der Zugtüre meist ein entsprechendes Ablaufschema angeeignet haben. Dieses Schema ist in Deutschland und in der Schweiz im Wesentlichen gleich, jedoch gibt es gewisse Unterschiede.

In Deutschland wird die Barrierefreiheit unter anderem durch den Einsatz taktiler Wegeleitungen zum Bahnsteig und taktiler Blindenleitstreifen auf dem Bahnsteig umgesetzt. Die taktilen Blindenleitstreifen befinden sich meist in einem Abstand von 40-50 cm von der Bahnsteigkante. Zum Auffinden der Tür geht der Sehbehinderte auf den Zug bis zum Blindenleitstreifen zu, dann entlang des Zuges, bis idealerweise das Türfindesignal akustisch vernehmbar ist und zur Zielführung und Auffindung der geöffneten oder noch geschlossenen Tür verhilft. Das Türfindesignal wird bei noch geschlossener Tür auch zum Auffinden des Türtasters eingesetzt. In Deutschland sind zurzeit etwa 63 % der Bahnsteige mit taktilen Blindenleitstreifen ausgerüstet. Sofern auf den Bahnsteigen kein Blindenleitstreifen vorhanden ist, wird ersatzweise die Bahnsteigkante mit dem Blindenstock ertastet und dient als entsprechende „Ersatz“orientierung.

In der Schweiz werden die Bereiche des Bahnsteigs in sogenannte „sichere Bereiche“ und „Gefahrenbereiche“ eingeteilt. Der sichere Bereich ist eine Fläche, auf der sich die Reisenden aufhalten können, ohne dass sie gefährlichen Interaktionsrisiken mit dem Zug ausgesetzt sind. Der Gefahrenbereich kennzeichnet den Bereich, der von allen Benutzenden nur betreten werden darf, wenn ein Zug für den Fahrgastwechsel angehalten hat und erst dann eine gewollte Interaktion mit dem Zug (Drücken des Türöffnungstasters, Abtasten der Außenwand durch Sehbehinderte, Ein-/Aussteigen) möglich ist. Der Gefahrenbereich wird immer durch eine taktil-visuelle Sicherheitslinie (ähnlich dem Blindenleitstreifen in Deutschland) abgegrenzt. Die Position bemisst sich als Mindestbreite gemäß eines Forschungsberichtes des BAV [11] mit 2,20 m ab Gleismitte (entspricht 40-60 cm vor der Bahnsteigkante).

Grundsätzlich ist hier das Vorgehen zum Auffinden der Tür aber das gleiche. Die Sehbehinderten suchen die taktilen Linien an der Grenze zum Gefahrenbereich auf, gehen dort entlang, bis sie das Türfindesignal vernehmen und sich dann akustisch zur Tür leiten zu lassen.

Der Anspruch der Sehbehinderten lässt sich aus diesem Vorgang und nach Rücksprache mit betroffenen Personen wie folgt zusammenfassen:

1. Das Türfindesignal soll eine entsprechende Auffälligkeit und Wiedererkennbarkeit aufweisen.
2. Die Hörbarkeit des Signals muss bereits in **ausreichendem Abstand** bestehen, sodass ein sicheres Geleit zum Auffinden der Tür möglich ist.
3. Das Türfindesignal muss bei geschlossener Tür helfen, **den Türtaster** sicher zu finden.
4. Das Türfindesignal soll so laut wie möglich sein, um auch Personen mit Seh- und Hörbehinderung entsprechend leiten zu können.
5. Die Situation am Bahnsteig soll so gestaltet sein, dass ein Versperren des Signalgebers oder eine Abschirmung durch andere Personen bestmöglich vermieden wird.

Bereits hier wird deutlich, dass sich nicht alle Kriterien ohne Widerspruch umsetzen lassen. So wird zunächst bevorzugt, dass das Türfindesignal aus dem Taster oder aus der Nähe des Tasters ausgesendet wird, damit durch akustische Führung auch der Taster selber sicher gefunden wird. Da sich der Taster aber gemäß Abschnitt 4.2.2.3.2 der TSI PRM in einer Höhe von 800 mm bis 1200 mm über dem Bahnsteig befinden muss, lässt sich nicht verhindern, dass das von dort abgestrahlte Signal durch umstehende Personen verdeckt oder im schlimmsten Fall vollständig abgeschattet wird. Insofern ist die Positionierung des Signalgebers durchaus eine wichtige Frage. So könnte eine Positionierung des Signalgebers oberhalb der Tür diesen potenziellen Verdeckungseffekt vollständig vermeiden, jedoch zulasten einer ggf. schwierigeren Auffindung des Tasters innerhalb oder an der Tür führen. Ferner steht die Forderung nach einem möglichst hohen Schalldruckpegel selbstredend in Widerspruch zu den Ansprüchen des Immissionsschutzes.

Weiterhin ist in keiner Weise naheliegend und spezifiziert, in welcher Entfernung zur Zugtüre das Türfindesignal sicher gehört werden soll. Gemäß den Auskünften des Bundesamtes für Verkehr BAV wurde bei der seinerzeitigen Implementierung von Türfindesignalen im Schweizer Bundesrecht angenommen, **dass eine Hörbarkeit in einer Entfernung von etwa 3-6 m von der Zugtüre ausreichend und zielführend sei**. Diese Vorgabe ist seinerzeit auch mit der Schweizer nationalen Sehbehindertenvertretung diskutiert und abgestimmt worden und dient zunächst auch als Grundlage der weiteren Betrachtungen.

3.2 Anforderungen der Hersteller

Die derzeitige Version der TSI PRM Anlage G fordert den optionalen Einbau des Signalgebers für Türfindesignale in unmittelbarer Nähe des Tasters (siehe auch Abschnitt 3.4.1). Wie bereits erläutert,

war das ursprüngliche Ansinnen, mit Hilfe dieses Signals nicht nur die Tür, sondern auch den Türtaster direkt zu finden. Dies bedeutet jedoch, dass zur bestmöglichen Ausnutzung der akustischen Führung die beste Implementation der direkte Einbau des Signalgebers in den Türtaster selber ist. Da es sich bei der Implementation von Signalgebern in die Türtaster um eine technische Zusatzausrüstung handelt, sollte die Einheit von Türtaster und Signalgeber möglichst klein und kostengünstig ausfallen. Je höher die zu realisierenden Schalldruckpegel jedoch sind, desto größer und leistungstärker müsste der Signalgeber ausfallen. Hinzu kommen noch Anforderungen an den Staub- und Wasserschutz, da der Signalgeber der Witterung vollständig ausgesetzt ist. Andererseits kann das Gehäuse des Tasters nicht vollständig dicht sein, da so die akustische Abstrahlfähigkeit des Signalgebers erheblich gemindert würde. Zudem verursacht eine Implementierung des Signalgebers in den Türtaster höhere Kosten beim Aufbau, der Abnahme und der Wartung. Insofern wäre es auch der Wunsch der Hersteller für die Signalgeber, die Türfindesignale durch einen Signalgeber oberhalb der Tür abzustrahlen. So wäre ggf. auch eine Kombination mit den Signalgebern für die Türöffnungs- und Türschließsignale möglich. Inwieweit eine solche Positionierung möglich und sinnvoll ist, wird auch im Rahmen dieser Studie diskutiert.

3.3 Sonstige Anforderungen

3.3.1 Schallimmissionsschutz

Mit dem Begriff Schallimmission wird die Einwirkung von Schall auf einen Ort beschrieben. Unter dem Begriff Schallimmissionsschutz wird meist der Schutz von Personen vor unzumutbarer Schalleinwirkung verstanden, die nicht unmittelbar am Geschehen der Schallemission partizipieren. Im Falle von Schallemissionen von Bahnhöfen und Bahnsteigen betrifft dies insbesondere die Anwohner, die am Geschehen des Bahnhofs nicht teilhaben. So werden die Anwohner durch den Betrieb von Bahnhöfen durch folgende Emissionstypen belastet:

1. Schienenverkehr ein- und ausfahrender Züge
2. Durchsagen auf den Bahnsteigen
3. Warn- und Sicherheitssignale der Züge und Zugtüren

In Deutschland ist der Schallimmissionsschutz in der 16. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (16. BImSchV) und hier im Zusammenhang mit der Berechnung des Beurteilungspegels für Schienenfahrzeuge (Schall 03) [12] geregelt. Ausführlichere Hinweise finden sich in den Erläuterungen zur Schall 03 [13]. Dort heißt es:

zu 2. Begriffe, Festlegungen

zu 2.1.7 Schienenweg

Durch die Definition des Schienenweges als Gleisanlagen mit Unter- und Oberbau einschließlich einer Oberleitung, auf denen durch Fahrvorgänge Schallemissionen hervorgerufen werden, wird der Geltungsbereich der Schall 03 gegenüber der Schall 03 [1990] und Akustik 04 eingeschränkt. Das bedeutet, dass Geräusche, die nicht durch Fahrvorgänge auf Schienenwegen emittiert werden, z.B. LKW- Fahrten in Containeranlagen, Containerkränen und Lautsprecherdurchsagen, nach TA Lärm [11] zu berechnen und zu beurteilen sind. Dies gilt auch für Aggregat- und Antriebsgeräusche von Fahrzeugen, die in Zugabstellanlagen/Zugbildungsanlagen oder an Endhaltestellen abgestellt werden.

Weiter ist zu finden:

zu 4.3 Geschwindigkeiten

Im Bereich von Bahnhöfen werden bei der Berechnung der Schallimmissionen die Streckengeschwindigkeiten, mindestens jedoch eine Geschwindigkeit von 70 km/h berücksichtigt. Die tatsächliche Geschwindigkeit der Züge in Bahnhofsbereichen liegt meist weit unter diesen Geschwindigkeiten. Durch die daraus resultierende Überbewertung der Schallimmissionen werden die Geräusche aus den Aggregat- und Antriebsgeräuschen stehender Züge, aus den Geräuschen ein- und aussteigender Fahrgäste (Unterhaltung, Türenschiagen) und Transportkarren zur Versorgung der Züge berücksichtigt. Darin nicht enthalten sind Lautsprecherdurchsagen. Diese Geräusche sowie die Aggregat- und Antriebsgeräusche von Fahrzeugen, die in Zugabstellanlagen oder an Endhaltestellen abgestellt werden, sind nach den Vorgaben der TA Lärm [11] zu ermitteln und zu beurteilen.

Wie aus den beiden Auszügen zu entnehmen ist, werden die wichtigsten vorkommenden Geräusche an Bahnhöfen aufgeführt, nicht jedoch die Türsignale, obwohl diese ein erhebliches Immissionspotential und eine entsprechend belastigende Wirkung besitzen können. Die Emissionen von Türsignalen sind damit in Deutschland nicht geregelt oder zumindest kann eine Regelung nicht aus den derzeitigen Regelwerken abgeleitet werden.

Insofern findet sich die Frage nach den Schallemissionen von Türsignalen in Deutschland zumindest in einer Grauzone.

So ist es absolut verständlich, dass gerade in ländlichen Gebieten, in denen oft kleinere Bahnhöfe mit offenen Bahnsteigen zu finden sind, gehäuft Beschwerden der Anwohner gerade in der nächtlichen Zeit über Türsignale auftreten. Meist beziehen sich die Beschwerden auf die Türöffnungs- und Türschließsignale, da diese fast durchgehend in jedem Zug zu finden sind. **Es sei hier schon erwähnt, dass im Interesse des Immissionsschutzes bzw. der Anwohner Türsignale grundsätzlich adaptiv gestaltet werden sollten. Adaptiv bedeutet, dass der Schalldruckpegel der Signalgeber jeweils in Abhängigkeit des vorhandenen Hintergrundgeräusches angepasst wird.**

So könnten nachts auf einem ländlichen Bahnhof bei geringem Hintergrundgeräusch die Signale entsprechend leiser sein, in einer Bahnhofshalle mit hohem Personen- und Verkehrsaufkommen angepasst höher. Ein fester Pegel für Türsignale würde diese Variation nicht erlauben und führt unweigerlich entweder zur Fehlbarkeit bei hohen Hintergrundgeräuschen oder zur Belästigung bei niedrigen Hintergrundgeräuschen.

3.3.2 Reizüberflutung

Eine Signalisierung beruht grundsätzlich darauf, dass ein Sinnesreiz erzeugt wird, der sich von der Umgebung abhebt, also detektieren lässt und dem eine Bedeutung zuzuordnen ist. Dies gelingt unter anderem dann besonders gut, wenn mehrere Sinne an der Signalwahrnehmung beteiligt sind. Dies bedeutet, dass z.B. Lichtsignale nur dann wirksam sind, wenn sie aus der Standardumgebung hervortreten. Ebenso verhält es sich mit akustischen Signalen, die nur dann hervortreten bzw. bedeutsam sind, wenn sie ohrenfällig aus der Standardsituation heraustreten. Ebenfalls gut untersucht ist, dass bei zu häufiger und zu dichter Signalisierung von Ereignissen der Effekt der Reizüberflutung einsetzt und die Signalisierung nicht mehr die Aufmerksamkeit mit sich bringt, die sie ohne Reizüberflutung eigentlich haben könnte. Insofern ist manchmal weniger und gezieltere Signalisierung effektiver als eine universelle und allumfassende. Im Zusammenhang mit den Türfindesignalen bedeutet dies, den Pegel und die Wahrnehmbarkeit der Signale so zu gestalten, dass diese ihrer Aufgabe in einem begrenzten räumlichen Umfeld (3-6 m um die Tür) erfüllen, ohne allzu große zusätzliche Belastungen für den Bahnhof und die akustische Atmosphäre zu erzeugen.

3.4 Normen und Regelwerke

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, sind in der per 2023 revidierten TSI PRM erstmals Türfindesignale definiert, deren Festlegung beim Einsatz solcher Signale im interoperablen Eisenbahnbereich verbindlich sind. Im Umgang mit Türsignalen im Allgemeinen sind hier drei Normen und Regelwerke wichtig.

- a.) DIN EN 17285 Bahnanwendung – Akustik Messung akustischer Türsignale
- b.) DIN EN 14752 Bahnanwendung – Seiteneinstiegssysteme für Schienenfahrzeuge
- c.) TSI PRM Appendix G TSI PRM 2023 Technical Specifications for Interoperability: Persons with reduced Mobility

Nachfolgend sind die derzeitigen Regelungen über alle Türsignale, die in der TSI PRM 2023 enthalten sind, aufgeführt (blauer Rahmen), entnommen und werden im Weiteren diskutiert.

In Abschnitt 4.2.2.3.2. Außentüren aus [6] heißt es:

- (10) Die Schallquelle von Türsignalen muss sich in der Nähe der Bedienelemente der Tür befinden. Sofern keine Bedienelemente vorhanden sind, muss sich die Schallquelle von Türsignalen neben der Türöffnung befinden. Wird eine separate Schallquelle für das Türschließsignal verwendet, so kann es sich entweder in der Nähe des Bedienelements oder neben der Türöffnung befinden.
- Ist ein externes Türfindesignal vorhanden, so muss sich dessen Schallquelle in der Nähe des Bedienelements und die Schallquelle für das Türschließsignal neben der Türöffnung befinden.
- (15) Der Mittelpunkt von äußeren Vorrichtungen zum Öffnen der Außentür, die vom Bahnsteig aus bedient werden können, muss sich an allen Bahnsteigen, für die der Zug ausgelegt ist, in einer Höhe zwischen 800 mm und 1 200 mm über dem Bahnsteig befinden. Ist der Zug nur für eine einzige Bahnsteighöhe ausgelegt, so muss sich der Mittelpunkt der Öffnungsvorrichtung der Außentür in einer Höhe zwischen 800 mm und 1 100 mm über dem Bahnsteig befinden.

„Anlage G

Akustische Signale für Fahrgast-Außentüren

G.1. Begriffsbestimmungen

Für diese Anlage gelten folgende Begriffsbestimmungen:

f_{signal} = Frequenz des anregenden Tons

L_S = Schalldruckpegel, gemessen als $L_{AF\text{max}}$ der maximale Schallpegel mit „A“-Frequenzgewichtung und Zeitgewichtung „Fast“ („schnell“) während des Messzeitraums.

$L_{S\text{max}}$ = maximaler $L_{AF\text{max}}$

$L_{S\text{min}}$ = minimaler $L_{AF\text{max}}$

L_N = Umgebungsschallpegel, gemessen wie folgt:

a) Frequenzbereich: energetische Summe von drei Oktavbändern

$$L_N = \sum \left(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} + 10^{\frac{L_3}{10}} \right)$$

Dabei ist:

$L_1 = L_{\text{oct.500 Hz}}$

$L_2 = L_{\text{oct.1000 Hz}}$

$L_3 = L_{\text{oct.2000 Hz}}$

b) Schalldruckpegel gemessen als energieäquivalenter Pegel von 20 s (L_{Aeq20})

G.2.1. Türöffnungssignal

Merkmale	Langsam pulsierender (bis zu zwei Impulse pro Sekunde) Mehrklangton aus zwei aufeinanderfolgenden Tönen
Frequenzen	<ul style="list-style-type: none"> — $f_{signal1} = 2200 \text{ Hz} \pm 100 \text{ Hz}$ — $f_{signal2} = 1760 \text{ Hz} \pm 100 \text{ Hz}$
Schalldruckpegel	<ul style="list-style-type: none"> anpassungsfähige Warneinrichtung <ul style="list-style-type: none"> — $L_S \geq L_N + 5 \text{ dB}$ — $L_{Smax} = 70 \text{ dB} (+ 6/- 0)$ — nicht anpassungsfähige Warneinrichtung <ul style="list-style-type: none"> — $L_S = 70 \text{ dB} (+ 6/- 0)$

G.2.2. Türschließsignal

Merkmale	— Schnell pulsierender Ton (sechs bis zehn Impulse pro Sekunde)
Frequenz	— $f_{signal} = 1900 \text{ Hz} \pm 100 \text{ Hz}$
Schalldruckpegel	<ul style="list-style-type: none"> anpassungsfähige Warneinrichtung <ul style="list-style-type: none"> — $L_S \geq L_N + 5 \text{ dB}$ — $L_{Smax} = 70 \text{ dB} (+ 6/- 0)$ — nicht anpassungsfähige Warneinrichtung <ul style="list-style-type: none"> — $L_S = 70 \text{ dB} (+ 6/- 0)$

G.3. Türfindesignale

Das Türfindesignal kann ein Einzelton-Signal (gemäß Abschnitt G.3.1) oder ein Doppelton-Signal (gemäß Abschnitt G.3.2) sein. Beide Signalarten müssen in allen Mitgliedstaaten gleichermaßen akzeptiert werden.

G.3.1. Einzelton-Signal

Merkmale	Tonintervall (Rechteck), kein Ein- und Ausblenden — Signalimpulsdauer = $5 \text{ ms} \pm 1 \text{ ms}$ „an“ (reiner Tonimpuls) — Signalzeitmuster von 3 bis 5 Impulsen pro Sekunde
Frequenz	— $f_{\text{signal}} = 630 \text{ Hz} \pm 50 \text{ Hz}$
Schalldruckpegel	anpassungsfähige Warneinrichtung — $L_S \geq L_N + 5 \text{ dB}$ — $L_{S\text{min}} = 45 \text{ dB (+/- 2)}$ — $L_{S\text{max}} = 65 \text{ dB (+/- 2)}$ nicht anpassungsfähige Warneinrichtung — $L_S = 60 \text{ dB}$

G.3.2. Doppelton-Signal

Merkmale	Tonintervall (Signaldefinition) — 100 ms Schalldruckpegel einblenden — 100 ms Schall erster Ton $550 \text{ Hz} \pm 50 \text{ Hz}$ — 100 ms Schalldruckpegel ausblenden — 200 ms aus — 100 ms Schalldruckpegel einblenden — 100 ms Schall zweiter Ton $750 \text{ Hz} \pm 50 \text{ Hz}$ — 100 ms Schalldruckpegel ausblenden — 900 ms aus — Signalwiederholzeit = 1 700 ms
Frequenz	$f_{\text{signal1}} = 550 \text{ Hz} \pm 50 \text{ Hz}$ $f_{\text{signal2}} = 750 \text{ Hz} \pm 50 \text{ Hz}$
Schalldruckpegel	anpassungsfähige Warneinrichtung — $L_S \geq L_N + 5 \text{ dB}$ — $L_{S\text{min}} = 50 \text{ dB (+/- 2 dB)}$ — $L_{S\text{max}} = 70 \text{ dB (+/- 2 dB)}$ nicht anpassungsfähige Warneinrichtung — $L_S = 70 \text{ dB}$

G.4. Messpunkte

Die Mikrofonposition für die Messung akustischer Türsignale muss den Spezifikationen nach Anlage A Index 20 genügen. Die Spezifikation ist ebenfalls für die Position des Mikrofons des Türfindesignals anzuwenden, wenngleich das Türfindesignal in der Spezifikation unberücksichtigt bleibt.

Die Messungen für den Konformitätsnachweis müssen an drei verschiedenen Türen im Zug durchgeführt werden. Für den Schließversuch muss die Tür vollständig geöffnet und für den Öffnungsversuch vollständig geschlossen sein.“

3.4.1 Tasterposition gemäß 4.2.2.3.2 „ Außentüren“ der TSI PRM

Gemäß dieses Abschnittes ist das Vorhandensein eines Türfindesignals eine Option und nicht verpflichtend. Der Text im rot gekennzeichneten Bereich fordert jedoch, dass der Signalgeber des Türfindesignals sich immer in Tasternähe befinden muss. Dieser Forderung liegt die Idee zugrunde, dass es bei dem Türfindesignal im eigentlichen Sinne um ein Tür**taster**findesignal handelt und eine sichere Auffindung nur dann gegeben erscheint, wenn diese sich in unmittelbarer räumlicher Nähe zueinander befinden. Wie bereits erwähnt, wird auch dieser Abschnitt kontrovers diskutiert, da nicht klar ist, ob es dieser räumlichen Nähe wirklich zwingend bedarf, oder ob nicht ein Signalgeber oberhalb der Tür zum Auffinden des Tasters ebenfalls ausreichend ist.

Dies ist eine Fragestellung, die im weiteren Verlauf der Studie noch ausgiebig diskutiert wird.

3.4.2 G. 1. Begriffsbestimmung

Grundsätzlich ist bei der Begriffsbestimmung und der Kennzeichnung von Schalldruckpegeln auf die Verwendung der Indices zu achten. Indices können sowohl gebraucht werden um die Schallquelle zu charakterisieren (S= Signal, N = Noise) oder auch die Art und Weise der Schallpegelerfassung („F“= „fast“, „S“= „slow“). Da in diesem Abschnitt mit L_S immer der Pegel des Signalgebers, also das Nutzsignal gemeint ist, wird bereits hier vorgeschlagen, folgende Präzisierung in der Definition der Anlage G zu treffen.

L_S = Schalldruckpegel des Signalgebers, gemessen als L_{pAFmax} (maximaler mit der Zeitkonstante „Fast“ gemessener „A“-bewerteter Schalldruckpegel)

Dementsprechend sollten auch die weiteren Definitionen wie folgt präzisiert werden:

L_{Smax} = maximaler Signalpegel L_{pS} (gemessen als L_{AFmax})

L_{Smin} = minimaler Signalpegel L_S (gemessen als L_{AFmax})

L_N = Schalldruckpegel des Hintergrundgeräusches, gemessen wie folgt:

Im Weiteren wird die Festlegung getroffen, dass das Hintergrundgeräusch als energetische Summe aus drei Oktaven zu bilden ist. Diese Festlegung soll der Tatsache Rechnung tragen, dass die rele-

vanten Türsignale im Wesentlichen nur in diesem Frequenzbereich durch entsprechende Störgeräusche maskierbar sind, also von diesen verdeckt werden können. Dieser Sachverhalt wird in einem späteren Abschnitt noch eingehender diskutiert. Weiterhin kritisch hingegen ist, dass hier das Hintergrundgeräusch als energetischer Mittelungspegel L_{eq} über 20s gemessen wird. Dies ist eine Zeit, die zumindest bei der Messung von Hintergrundgeräuschen im Betrieb des Fahrzeuges nicht zur Verfügung steht. Hier sind weitergehende Überlegungen anzustellen, in welcher Form das Störsignal erfasst werden soll.

An dieser Stelle wird deutlich, dass sich eine weitere Problematik ergibt, die ebenfalls einer weiteren Präzisierung bedarf. Im strengen Sinne ist hier deutlich zu unterscheiden zwischen

- a.) einer Signaldefinition
- b.) einer Vorschrift, wie z.B. die Störsignale beim Betrieb erfasst und verarbeitet werden
- c.) einer Messvorschrift, wie die Typzulassung am Fahrzeug erfolgen soll.

Die TSI PRM Anlage G enthält hier zum einen keine hinreichend gute Unterscheidung, zum anderen gibt es keine begleitende Vorschrift, wie letztlich die Türen hinsichtlich ihrer Eignung durch Messungen am Fahrzeug zu prüfen sind. **Diese müssten nicht in die TSI PRM, sondern in die DIN EN 17285 „Messung akustischer Türsignale“ [3] sowie in die EN 16584-2 „Bahnanwendungen - Gestaltung für die Nutzung durch PRM - Allgemeine Anforderungen - Teil 2: Informationen“ eingebracht werden.**

3.4.3 G. 2. Türöffnungs- und Türschließsignale

Die Definition der Türöffnungs- und Türschließsignale entsprechen im Wesentlichen den Definitionen der DIN EN 14752 „Seiteneinstiegssysteme für Schienenfahrzeuge“ und sind augenscheinlich von dort übernommen. Aus akustischer Sicht ist anzumerken, dass bei der Frequenzfestlegung die Signalform offen bleibt. So kann es sich hier gleichermaßen um ein Sinussignal wie ein Rechtecksignal handeln. Während bei einem Sinussignal nur eine Frequenz auftritt, besitzt das Rechtecksignal zusätzliche ungeradzahlige Oberwellen. Dies hat eine gewisse Auswirkung auf die Hörbarkeit des Signals und auf den zugehörigen Maskierungseffekt.

Ein wesentlicher Unterschied der Festlegungen in der TSI PRM Anlage G zur DIN EN 14752 liegt in der Erfassung des Störgeräusches. Während in der TSI PRM Anlage G das Hintergrundgeräusch in drei Oktaven (500 Hz, 1000 Hz und 2000 Hz) erfasst wird, was einem realen Frequenzbereich von 350 Hz bis 2800 Hz entspricht, legt die DIN EN 14752 einen Frequenzbereich von 500 Hz bis 5000 Hz fest und ist somit etwas höher. Auch dieser Unterschied wird in späteren Abschnitten diskutiert.

Bedeutsam bei den Türöffnungs- und Schließsignalen ist die Definition der notwendigen Sendepiegel L_S im Vergleich zum Störgeräuschpegel L_N . Hier wird ein $S/N > +5$ dB gefordert. Der maximale Signalpegel L_{Smax} ist mit 70 dB festgelegt. Soweit erkennbar, ist die Forderung $S/N > +5$ dB gleichermaßen in der DIN EN 17285 enthalten. Zudem enthält die DIN EN 17285 im Anhang A eine vorgeschlagene Bewertung der tonalen Hervorhebung basierend auf der ISO 1886-2 [10] mit der Absicht, Tonsignale gegenüber Sprachausgaben eindeutig zu favorisieren.

3.4.4 G. 3. Türfindesignale

Die Definition zweier verschiedener Türfindesignale geht auf die Historie zurück. Definiert sind das bereits erwähnte impulshaltige „tok-tok“ Signal (in diesem Bericht Single Tone Signal genannt), das vorwiegend in Deutschland eingesetzt wird, und das sogenannte Dual Tone „wieep-wieep“ Signal (in diesem Bericht Dual Tone Signal), das in der Schweiz Anwendung findet. Beide Signale sind gleichermaßen anwendbar.

Grundsätzlich sind die Signaldefinitionen so gemacht, wie sie historisch in den Ländern auch implementiert wurden. Bei dem Impulssignal gibt es jedoch eine gewisse Freiheit bezüglich der Anzahl der Signalimpulse pro Sekunde, die zwischen 3 und 5 Impulsen pro Sekunde variiert werden können. Das Dual Tone Signal ist hingegen zeitlich weitgehend festgelegt und bietet wenig Toleranzen.

Nicht festgelegt ist hingegen, ob der Impuls des Single Tone Signals mithilfe eines Sinussignals, eines Rechtecksignals oder einer anderen Signalform generiert werden muss. Typischerweise liegt es wegen der einfacheren Konstruktion nahe, die Frequenz mithilfe eines Rechtecksignals aufzubauen. Abbildung 3.1 zeigt den Unterschied der Zeitsignale am Beispiel des Single Tone Signals für die Generierung mit Hilfe eines Rechteck- und eines Sinus-Signals. Zu betonen wäre, dass die Hörbarkeit von Impulsen auf Basis von Rechtecksignalen wegen des Vorhandenseins der ungeradzahligen Oberwellen besser gegeben ist, als bei Impulsen auf Basis von Sinussignalen.

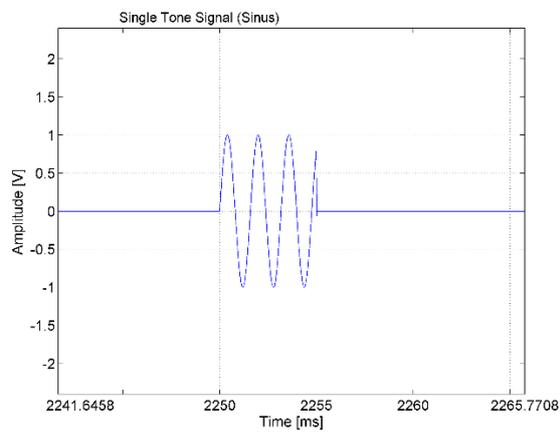
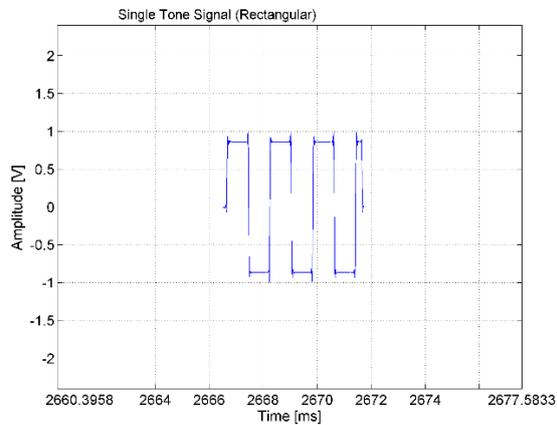


Abbildung 3.1a-b: Zeitausschnitt Single Tone Signal; a–Rechteck, b-Sinus

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen jeweils die Signalform der Türfindesignale sowie deren zugehörige Spektren.

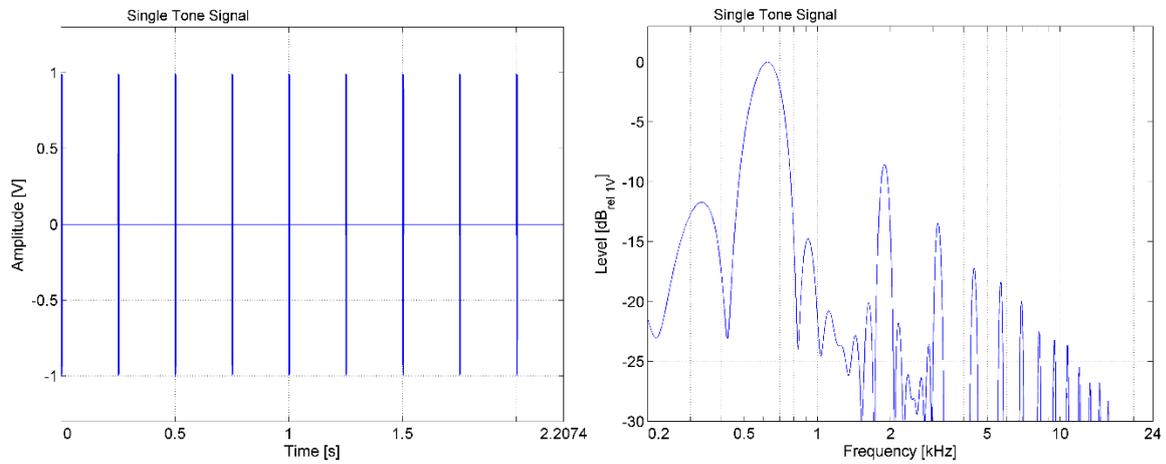


Abbildung 3.2 a-b: Zeitsignal und Spektrum des 4 Hz Single Tone Signals (mit Rechtecksignalen)

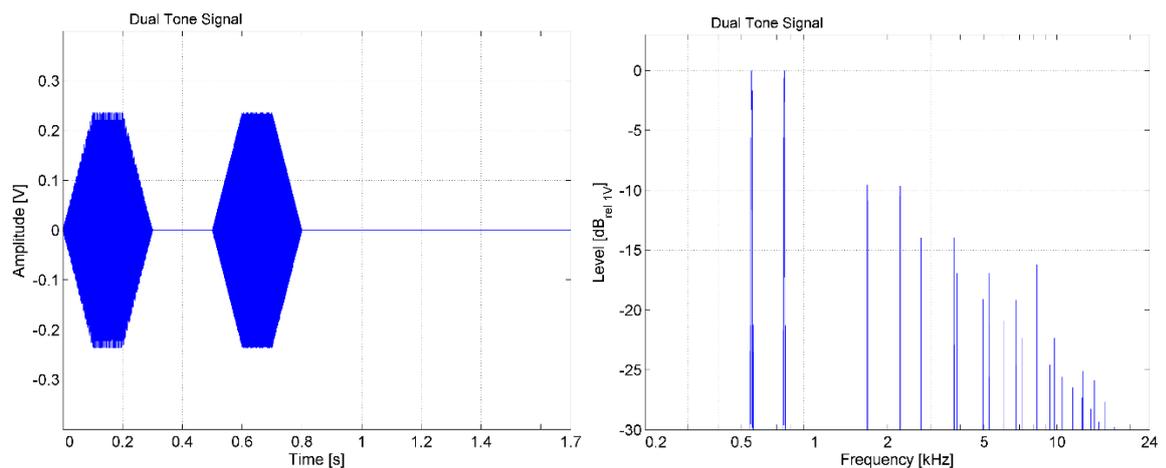


Abbildung 3.3 a-b: Zeitsignal und Spektrum des Dual Tone Signals (mit Rechtecksignal)

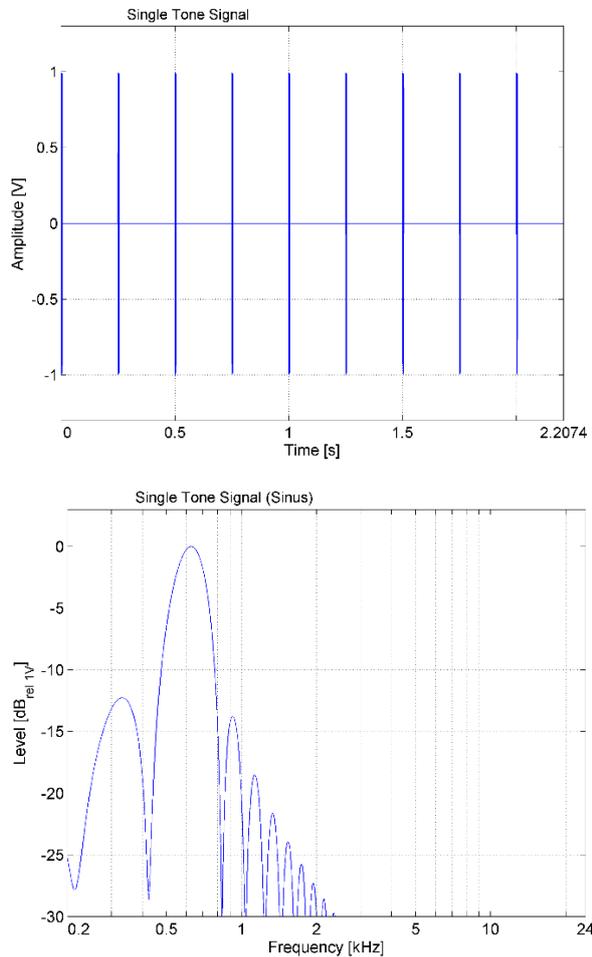


Abbildung 3.4 a-b: Zeitsignal und Spektrum des 4Hz Single Tone Signals (mit Sinussignal)

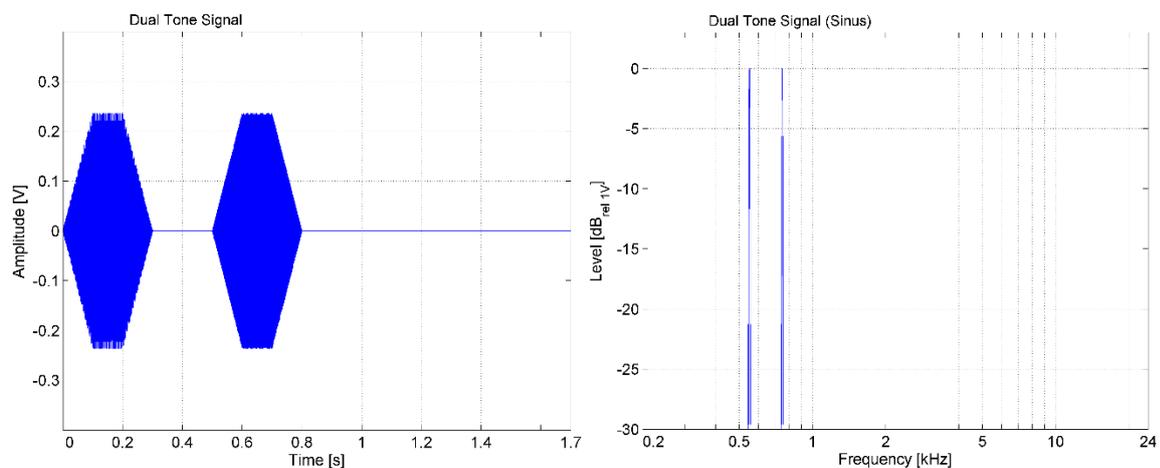


Abbildung 3.5 a-b: Zeitsignal und Spektrum des Dual Tone Signals (mit Sinussignal)

Wie den Abbildungen zu entnehmen ist, besitzen alle Signale ihre maßgebliche Energie in einem Frequenzbereich von 500-1000 Hz. Ferner ist zu erkennen, dass die Generierung der Signale mithilfe von Rechtecken zu entsprechenden Energien in den Oberwellen, den ungeradzahligen Vielfachen der Grundfrequenz, führt. Türfindesignale auf Rechteckbasis klingen dadurch „schärfer“, Türfindesignale auf Sinusbasis dagegen „weicher“ und angenehmer. Auch dieser Punkt wird später noch einmal beleuchtet. Ferner ist zu erkennen, dass die Beschränkung der Erfassung des Störgeräusches auf drei Oktaven (absoluter Frequenzbereich 350 Hz bis 2800 Hz) zunächst eindeutig passend zu den Nutzsignalenergien erscheint. Dies umso mehr, da in dem Frequenzbereich bis 2800 Hz auch die erste Oberwelle der Signale mit in den potenziellen Bereich der Störgeräuschmaskierung einbezogen wird. Inwieweit die Begrenzung der Störgeräuscherfassung auf drei Oktaven kritisch ist, wird auch in einem späteren Abschnitt noch erläutert.

Ein besonderes Augenmerk ist auf die Definition des notwendigen S/N (Verhältnis des Pegels des Signals zum Pegel des Störgeräuschs) der Türfindesignale zu legen. Dieser ist für alle Signale mit +5 dB analog zu der Vorgabe für Türöffnungs- und Türschließesignale festgelegt und steht von einigen Seiten unter Kritik. Weiterhin kritisch wird die Festlegung des Maximalpegels für Türfindesignale gesehen, die mit dem bisherigen Kenntnisstand unverständlicherweise für die beiden Signalarten unterschiedlich definiert wurden. So beträgt der maximale Pegel für das Single Tone Signal $L_{Smax} = 65$ dB, für das Dual Tone Signal $L_{Smax} = 70$ dB jeweils für den adaptiven Fall. Für die nicht adaptiv geregelten Türfindesignale beträgt der Unterschied mit $L_{S(Single)} = 60$ dB und $L_{S(Dual)} = 70$ dB sogar 10 dB.

Wichtig ist festzuhalten, dass die Pegel der Nutz- und Störsignale an einer Messposition in 1,5 m Entfernung im senkrechten Abstand vor der Mitte der Tür und in einer Höhe von 1,5 m zu ermitteln sind.

Diese Vorgaben scheinen weder konsequent noch kongruent. Die Prüfung und Präzisierung sowohl des notwendigen Signal-/Störabstand S/N als auch der Maximalpegel ist die Hauptaufgabe dieser Studie, da diese Vorgaben direkte Auswirkungen auf den eingangs beschriebenen Zielkonflikt haben, der fordert, die Signale gut verständlich zu halten, aber nur so laut wie notwendig abzustrahlen.

Es ist daher im Folgenden unter Berücksichtigung aller bisher aufgezeigten Randbedingungen sowie der noch im nächsten Abschnitt zusätzlich benannten Kriterien die Frage zu beantworten, welches S/N-Verhältnis wirklich notwendig ist, um die vorgegebenen Ziele eines Türfindesignales sicher zu erreichen und welche Maximalpegel sinnvoll für die Signale definiert werden sollten.

4 Bahnsteiggeräusche

Zunächst sei hier noch einmal die bereits in der Einleitung beschriebene Tatsache wiederholt, dass es sich bei den Hintergrundgeräuschen um Geräusche auf den Bahnsteigen handelt, die durch das Zusammenwirken **aller Schallquellen** im Einwirkungsbereich zustande kommen. Dies sind maßgeblich sprechende Personen, Ansagen über die Beschallungsanlage und ein- oder ausfahrende Züge auf anderen Gleisen. Selten bis gar nicht handelt es sich um Hintergrundgeräusche, die durch den Zug verursacht werden, an dem die Tür gefunden werden soll. Das Hintergrundgeräusch hat also in der Regel keine direkte Korrelation mit den Geräuschen des Zuges, an dem das Signal gefunden werden soll.

4.1 Pegelverteilung

Hintergrundgeräusche an Bahnhöfen schwanken etwa bei einfahrenden Zügen kurzfristig sehr stark, besitzen aber auch über den Tagesgang betrachtet gröbere zeitliche Schwankungen, die direkt mit dem Personen- und Verkehrsaufkommen zusammenhängen. Auch kann es deutliche Spitzen geben, die durch besondere Situationen hervorgerufen werden. Z.B. kann eine Gruppe von Fußballfans „mit Pauken und Trompeten“ durch den Bahnhof ziehen und so kurzfristig erhebliche Pegelanstiege verursachen, die dann als Hintergrundgeräusch L_N nicht selten im Pegelbereich von $L_{AFmax} = 95$ dB liegen.

Bei solchen Spitzenpegeln wird deutlich, dass Beschallungsanlagen auf Bahnsteigen (Hintergrund der Untersuchung) wie auch Türsignale nicht jedes denkbare Hintergrundgeräusch „übertönen“ und somit ausnahmslos immer hörbar sein können. Vielmehr geht es darum, im Rahmen einer Risikoanalyse eine sinnvolle Grenze zu definieren, bis zu welchem Hintergrundgeräuschpegel eine sichere Detektion der Signale noch möglich sein soll.

So muss betrachtet werden, welche Pegel typischerweise an Bahnsteigen auftreten und wie hoch die entsprechende Häufigkeit ist.

Bahnsteiggeräusche, deren Pegelverteilungen, zeitliche Verläufe sowie Frequenzspektren sind in der Vergangenheit daher ausgiebig untersucht worden und in die Richtlinie zur Beschallung von Bahnsteigen der Deutschen Bahn [9] aus dem Jahr 2021 eingeflossen. Die dort gemachten Untersuchungsergebnisse können direkt für diese Studie übernommen werden.

Für die Erstellung der Richtlinie wurden Langzeitmessungen (24-h-Pegelmessungen über mehrere Tage) an Bahnhöfen verschiedener Kategorien gemacht. Die Deutsche Bahn unterscheidet hierzu 7 Kategorien wie folgt:

Kategorie 1: wichtige große Fernbahnhöfe (z.B. Berlin Hbf)

Kategorie 2: Hauptbahnhöfe größerer Städte (z.B. Hbf Saarbrücken, Hbf Bremen)

Kategorie 3: Hauptbahnhöfe kleiner und mittlerer Städte (z.B. Hbf Aalen, Hbf Baden-Baden)

Kategorie 4: durch Regionalverkehr und Stadtverkehr gekennzeichnete Bahnhöfe
(z.B. Bf Starnberg, Bf Hannover Messe)

Kategorie 5: Bahnhöfe kleiner Städte

Kategorie 6: Bahnhöfe in dünn besiedelten Gebieten

Kategorie 7: Bahnhöfe in ländlichen Gegenden mit geringer Infrastruktur

Es wurden Dauermessungen an 6 Bahnhöfen der Kategorie 2,3,4 und 6 durchgeführt, dokumentiert und interpretiert. Die Kernaussagen werden nachfolgend wiedergegeben.

In der Richtlinie für die Beschallung von Bahnsteigen [9] heißt es auf Seite 44:

Aus zahlreichen Störgeräuschemessungen auf Bahnsteigen geht dabei folgendes hervor. Trägt man die Störgeräuschpegel, die erreicht werden, über ihrer jeweiligen Häufigkeit in einem Diagramm auf, so verläuft die Kurve ausgehend von 100%-Häufigkeit bei geringen Pegeln bis hin zu 10%-Häufigkeit bei höheren Pegeln gleichmäßig fallend. Unterhalb der 10%igen Pegelhäufigkeit steigen die dazugehörigen Störgeräuschpegel aber sprunghaft an. Dieser Bereich unterhalb eines Perzentilpegels von 10% kennzeichnet die bei der Messung aufgetretenen Pegelspitzen. Die Festlegung des für den Bahnsteig auf Grund der Messung geltenden Störgeräuschniveaus erfolgt direkt durch den A-bewerteten, 10%igen Perzentilpegel L_{AF10} , weil

- in 90% der Zeit das Störgeräuschniveau gleich oder geringer ist und somit die nur zu 10% der Zeit auftretenden Pegelspitzen den Kennwert nicht dominieren und
- eine sinnvolle Störgeräuschdefinition getroffen wird, die bei einer später zu planenden Beschallungsanlage noch hinreichend gute, aber auch realisierbare Beschallungspegel ermöglicht.

Am Beispiel der Messungen Bahnhof Aachen als Auszug aus [9] soll dies verdeutlicht werden. Die nachfolgenden Abbildungen (entnommen [9] und nummeriert) zeigen die Messergebnisse für zwei Messpunkte:

- Messpunkt 1: Bahnsteig Gl. 2-3 innerhalb der Gleishalle
- Messpunkt 2: Freibahnsteig Gl. 2-3 außerhalb der Gleishalle

Aufgeführt sind in Abbildung 4.1 und Abbildung 4.3:

- Messergebnisse des 24-h-Pegelverlaufes als 5s L_{Aeq}
- Gleitender 60 min Mittelungspegel $L_{Aeq 60'}$
- Gleitender 60 min 10% Perzentilwert $L_{AF10 60'}$

In Abbildung 4.2 und Abbildung 4.4

- Anteil der Zeit in % (x-Achse) innerhalb der betrachteten Zeitspanne, in der ein bestimmter Pegelwert SPL in dB(A) (y-Achse) nicht überschritten wird.

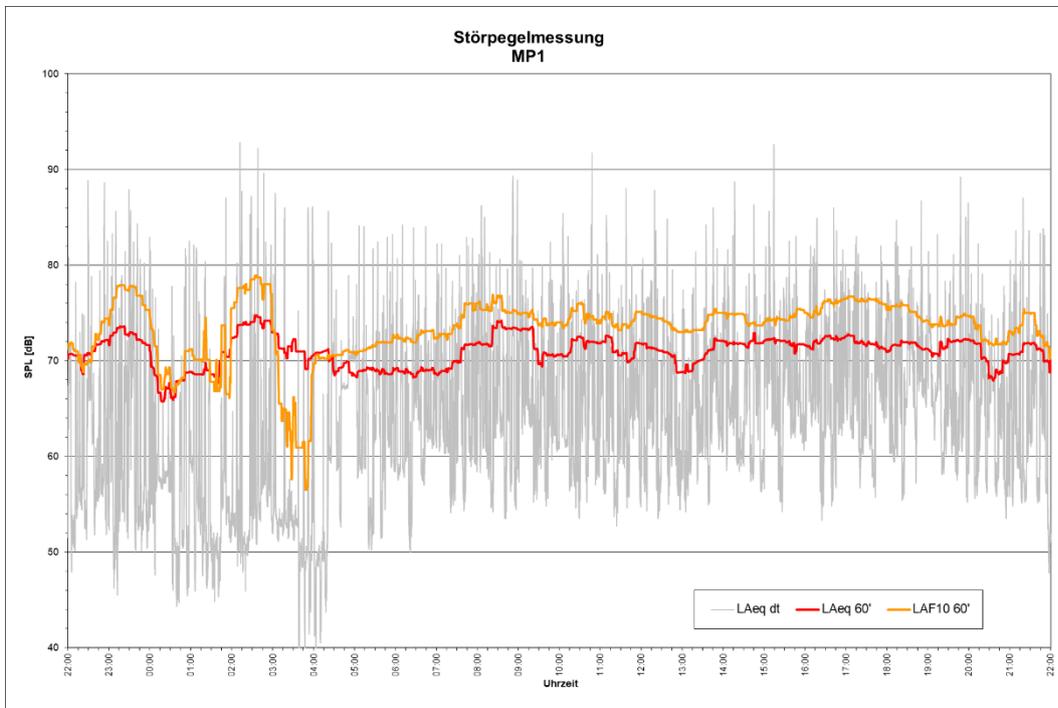


Abbildung 4.1 24 Stunden Störpegelmessung:
 Grau: 24-h-Pegelverlauf mit Einzelwerten als 5s L_{Aeq}
 Rot: Gleitender 60 min Mittelungspegel $L_{Aeq 60'}$
 Orange: Gleitender 60 min 10% Perzentilwert $L_{AF10 60'}$

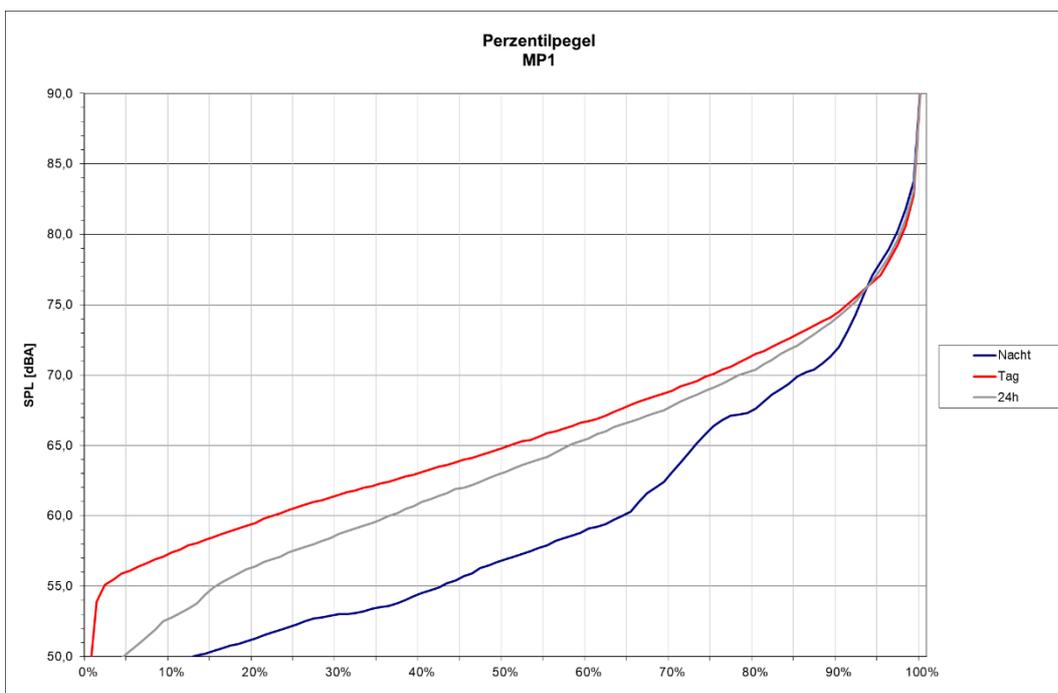


Abbildung 4.2 Anteil der Zeit in % (x-Achse) innerhalb der betrachteten Zeitspanne, in der ein bestimmter Pegelwert SPL in dB(A) (y-Achse) nicht überschritten wird.

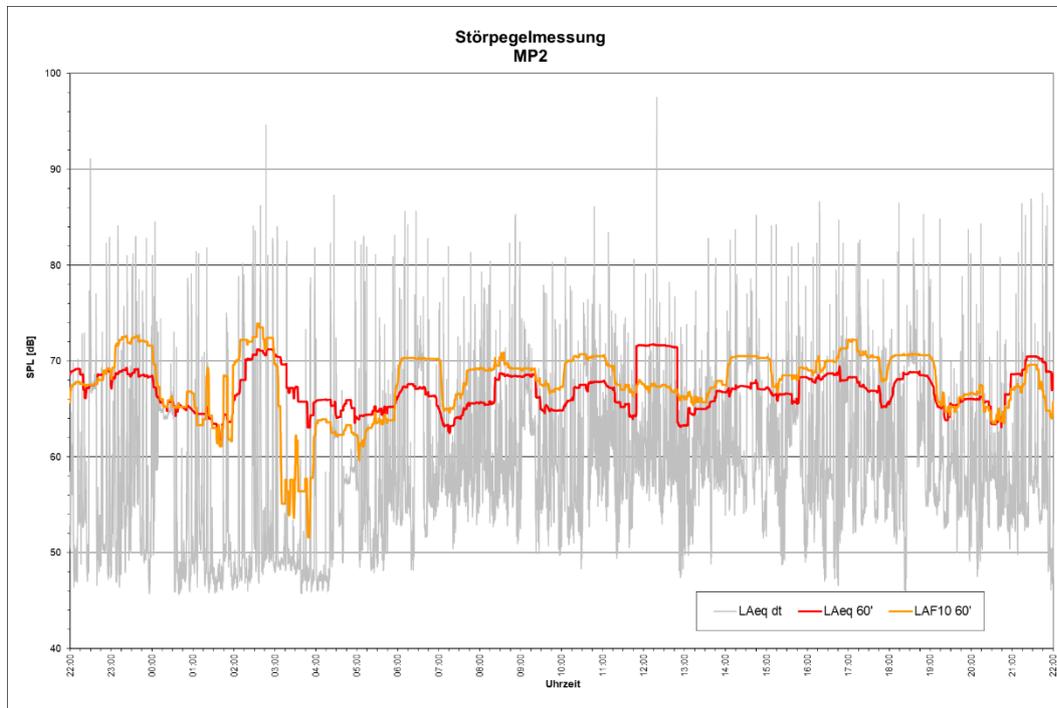


Abbildung 4.3 24 Stunden Störpegelmessung:
 Grau: 24-h-Pegelverlauf mit Einzelwerten als 5 s L_{Aeq}
 Rot: Gleitender 60 min Mittelungspegel $L_{Aeq 60'}$
 Orange: Gleitender 60 min 10% Perzentilwert $L_{AF10 60'}$

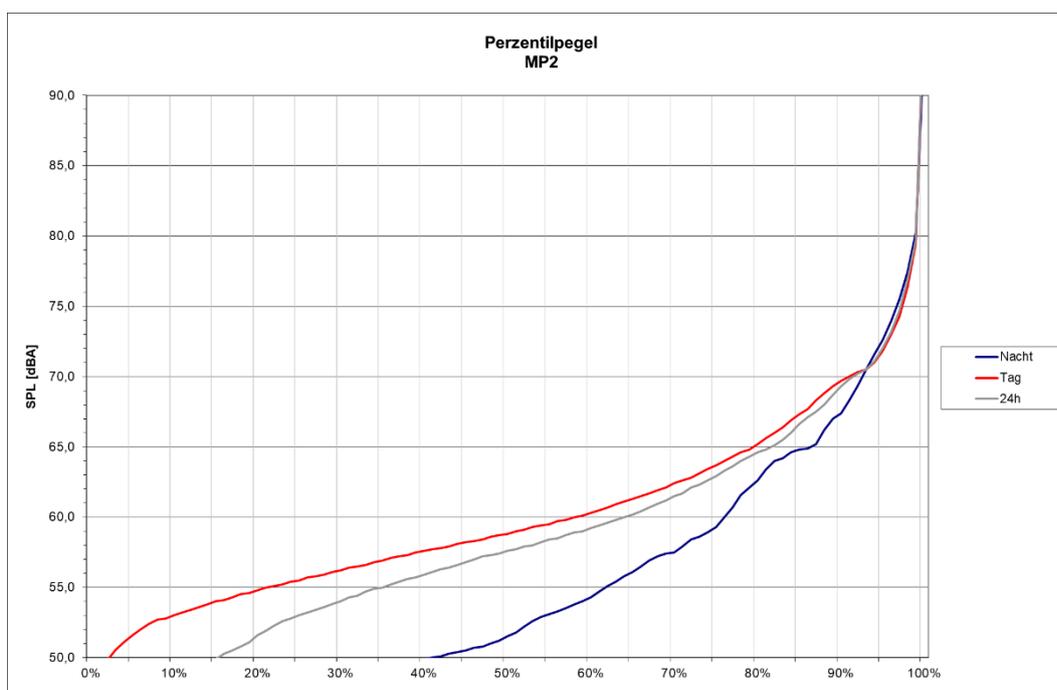


Abbildung 4.4 Anteil der Zeit in % (x-Achse) innerhalb der betrachteten Zeitspanne, in der ein bestimmter Pegelwert SPL in dB(A) (y-Achse) nicht überschritten wird.

Achtung(!): Bei der Darstellung in Abbildung 4.2 und Abbildung 4.4 entspricht der x-Wert einer Häufigkeit, zu denen der Pegel unterschritten oder erreicht wird. Der Perzentilpegel ist jedoch der Bereich, der in x-Prozent der Fälle erreicht oder überschritten wird. So ergibt sich der Perzentilpegel L_{AF10} hier aus den Abbildungen als der 90%-Wert der Darstellung in der Grafik.

Wie an diesem Beispiel zu erkennen ist, schwanken die Pegel wie beschrieben in kurzen Zeiträumen sowie global über den Tagesverlauf. Es treten im 24-h-Verlauf Pegelspitzen von $L_{AFmax} > 95$ dB auf.

Deutlich zu erkennen ist jedoch, dass die großen Pegelspitzen nur sehr selten, d.h. zu einem geringen Prozentsatz auftreten. Die zugehörigen Verteilungskurven verändern im Bereich um 90% (bis zu diesem Bereich treten 90% aller Pegel auf) ihren Verlauf und steigen danach deutlich stärker an. Dieses Verhalten lässt sich an allen Bahnhöfen und Messpunkten in den ermittelten Messkurven ziemlich genauso wiederfinden.

In Bezug auf die Risikoabwägung bei der Dimensionierung von Beschallungsanlagen wurde daher die 90%-Grenze als Störpegelniveau zu Grunde gelegt, für die die Anlage eine hinreichende Sprachverständlichkeit im Alarmierungsfall (Notfall) erbringen muss.

Eine analoge Schlussfolgerung lässt sich auch für Türsignale ableiten, wobei natürlich die Risikoabwägung für Türöffnungs- und Türschließsignale unterschiedlich ausfallen könnte.

Es wird daher hier zunächst empfohlen, den 90%-Wert der Summenhäufigkeit (welcher dem Perzentilpegel L_{AF10} entspricht) auch für Türsignale als Grundlage für die Störgeräuschbeurteilung anzusetzen.

Abbildung 4.5 zeigt die Zusammenfassung der Ergebnisse aus [9]. Wenngleich die Messergebnisse für den L_{AF10} über die lautesten 60 min schwanken, kann doch **mit guter Näherung abgeleitet werden, dass für Türsignale ein $L_{AF10} = 75$ dB eine hinreichend gute Grundlage zur Festlegung des Störgeräuschniveaus ist.**

Weiterhin wird empfohlen, nochmals zwischen **Türwarnsignalen** (Türöffnungs- und Türschließsignalen) und **Nicht-Warnsignalen** (Türfindesignalen) zu unterscheiden. Für Türfindesignale kann das Risiko der Unhörbarkeit durchaus geringer angesetzt werden. **Hier könnte z.B. ein Wert für das Hintergrundgeräusch L_N der Summenhäufigkeit von 80% zu Grunde gelegt werden. Aus den Grafiken lässt sich ableiten, dass der zugrundeliegende Perzentilpegel L_{AF20} mit $L_{AF20} \approx 70$ dB dann um ca. 5 dB niedriger ausfällt. Eine solche Definition des maximalen Hintergrundgeräuschniveaus ist ein guter und sinnvoller Kompromiss zwischen dem statistischen Auftreten von Pegeln bis zum Maximalwert (hier 80%) im Vergleich zum vorhandenen Risiko.**

Die Bedeutung einer möglichen Festlegung des maximalen Hintergrundgeräuschpegels $L_{Nmax} = L_{AF20} \approx 70$ dB auf die notwendigen maximalen Schalldruckpegel für Türfindesignale wird im Zusammenhang mit den später folgenden Hörversuchsergebnissen diskutiert.

Typ	Position		Tag (6:00 – 22:00)		Nacht (22:00 – 6:00)	
	MP	Lage	$L_{AF10,60'}$ dB(A)	$L_{AF10,all}$ dB(A)	$L_{AF10,60'}$ dB(A)	$L_{AF10,all}$ dB(A)
1) Kat II	1	Halle	76,9	74,5	78,9	72,0
	2	Frei	72,2	69,7	73,9	67,4
	3	Halle	79,8	75,5	80,7	73,0
	4	Halle	79,9	75,2	74,6	73,1
2) Kat V	1	Frei	72,2	67,7	69,5	62,9
	2	Frei	72,5	68,5	69,5	63,7
	3	Frei	72,3	68,2	69,4	65,6
	4	Frei	72,9	67,6	69,0	64,1
3) Kat VI <i>Werte als LAF5</i>	1	Dach	79,4	64,9	65,1	54,2
	2	Frei	69,4	60,1	62,4	52,0
	3	Frei	73,6	62,9	64,9	52,8
	4	Dach	83,7	66,0	61,4	53,4
4) Kat III	1	Dach	71,4	67,1	61,8	56,0
	2	Frei	71,9	67,2	62,3	56,8
	3	Frei	68,7	66,0	62,7	58,3
	4	Dach	72,8	68,7	67,0	57,7
5) Kat III	1	Dach	73,7	71,8	72,1	69,1
	2	Frei	70,2	68,7	68,5	66,3
	3	Frei	68,7	66,0	62,7	58,3
	4	Dach	72,8	68,7	67,0	57,7
6) Kat II	1	Dach	77,0	74,8	73,1	66,1
	2	Dach	77,3	74,7	72,2	57,7
	3	Frei	73,7	71,5	72,2	61,9
	4	Dach	73,9	71,4	71,2	59,4

Tabelle D.1 Messwerte der 24 Stunden Störpegelerfassung auf verschiedenen Bahnhöfen. Die Werte zeigen den 10% Perzentilpegel der gesamten Tages- oder Nachtperiode (all) und der jeweils lautesten Stunde (60') der Tages- oder Nachtperiode.

- 1) Mittlgrößer Bahnhof in Kurvenlage mit vielen Güterzugdurchfahrten (auch in der Nacht)
- 2) Kleiner Haltepunkt mit vielen langsamen Zugdurchfahrten, Güterzüge in der Nacht
- 3) Kleiner Haltepunkt mit Schnelldurchfahrten (*daher Auswertung des LAF5*)
- 4) Innerstädtisch, vier Gleise, viele Reisende
- 5) Innerstädtisch, vier Gleise, viele Reisende auch nachts
- 6) Mittlgrößer Bahnhof mit 5 Bahnsteiggleisen (Achtung: Baustelle tagsüber während Messungen!)

Abbildung 4.5: Auszug aus [9] als Zusammenfassung der Ergebnisse.

4.2 Frequenzspektren von Bahnsteiggeräuschen

Auch das Frequenzspektrum von Bahngeräuschen kann als Momentanwert stärker schwanken, wenn einzelne Ereignisse, etwa ein Bremsenquietschen oder eine Durchsage, den Hintergrundpegel dominieren. Grundsätzlich zeigt sich jedoch, dass die zeitlichen Mittelungsspektren relativ konstant und für die meisten Bahnhofssituationen sehr ähnlich sind. Abbildung 4.6 zeigt den auf 0 dB im Maximum normierten spektralen Verlauf der Hintergrundgeräusche für jeweils 60 min Mittelungszeit und gleitender Terzmittelung (1/3 Oktave) am Beispiel des Bahnhofs in Basel. Zusätzlich gestrichelt eingezeichnet ist der spektrale Verlauf von „rosa“ Rauschen.

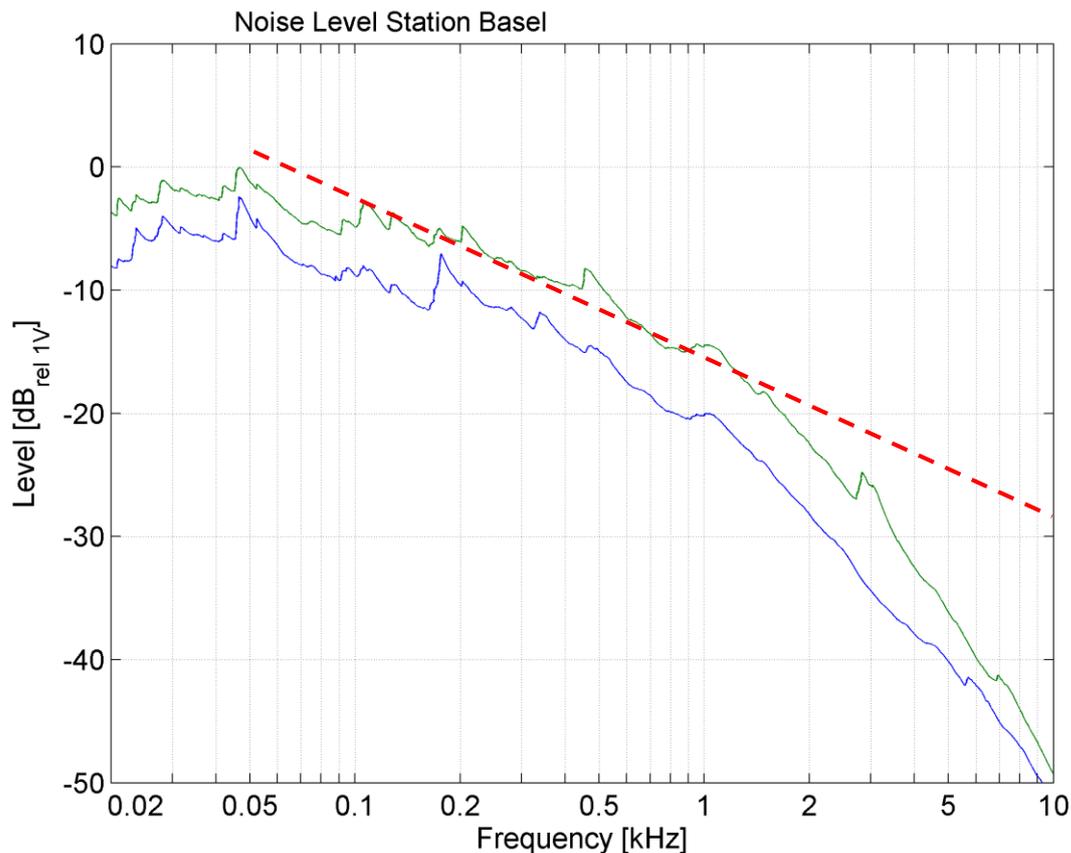


Abbildung 4.6: Mittleres Frequenzspektrum 60 min Bahnhof Basel, gleitend gemittelt 1/3 Oktave (blau = ruhige Stunde, grün = Hauptverkehrszeit, rot = „rosa“ Rauschen)

Wie in der Abbildung zu erkennen ist, besitzen die Hintergrundgeräusche von 100 Hz bis ca. 1,5 kHz etwa einen spektralen Verlauf wie rosa Rauschen, das definitionsgemäß einen spektralen Energiedichteabfall von 3 dB je Oktave bzw. 10 dB je Dekade aufweist. Ferner ist zu erkennen, dass das mittlere Spektrum nicht vom Absolutpegel abhängt. Diese prinzipielle spektrale Verteilung zeigt sich auch für die meisten anderen Bahnhöfe.

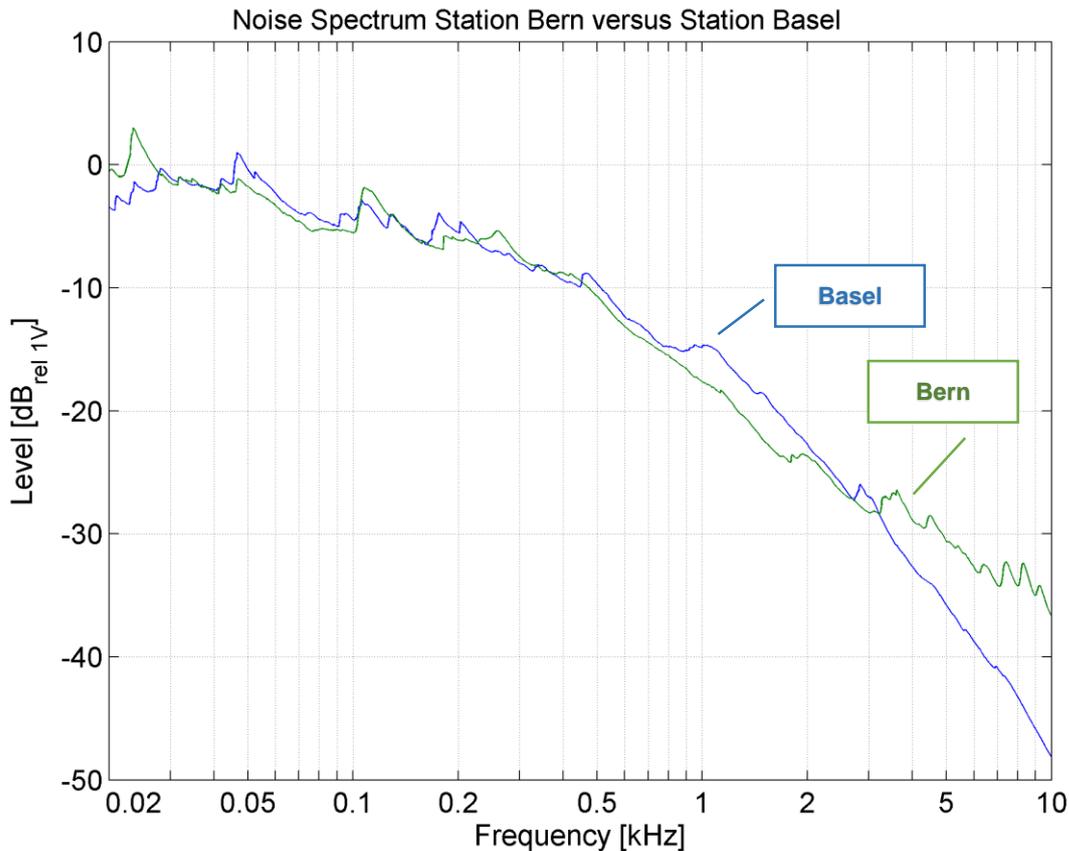


Abbildung 4.7: Mittleres Frequenzspektrum 60 min Bahnhof Basel versus Bahnhof Bern, gleitend gemittelt 1/3 Oktave (blau = Basel, grün = Bern)

Abweichungen findet man bei besonderen Bahnhöfen wie z.B. am Bahnhof Bern, der für seine besonderen akustischen Eigenschaften bekannt ist: Die Schienenwege im Bahnhof Bern sind gekrümmt, so dass bei Ein- und Ausfahrten der Züge ein starkes Kurvenquietschen oder Kurvenkreischen entsteht und demnach lautere mittel- und hochfrequente Hintergrundgeräusche erzeugt werden, als dies in anderen Bahnhöfen der Fall ist.

Abbildung 4.7 zeigt die spektrale Verteilung für den Bahnhof Bern, ebenfalls als energetisches Mittel über 60 min und gleitender Terzmittelung (1/3 Oktave), Abbildung 4.8 den gleichen Vergleich jedoch für die jeweils A-bewerteten Spektren. Es ist zu erkennen, dass die wesentlichen Unterschiede im Frequenzbereich oberhalb von 3 kHz liegen und hier 5-10 dB betragen. Bezogen auf den A-bewerteten Schalldruckpegel ergeben sich durch diesen hochfrequenten Anstieg Unterschiede des Gesamtpegels von gerade mal 1 dB. Da diese Unterschiede ohnehin sehr gering sind und der Frequenzbereich außerhalb des Maskierungsbereiches für die Türsignale liegt, sind diese Unterschiede hier nicht relevant.

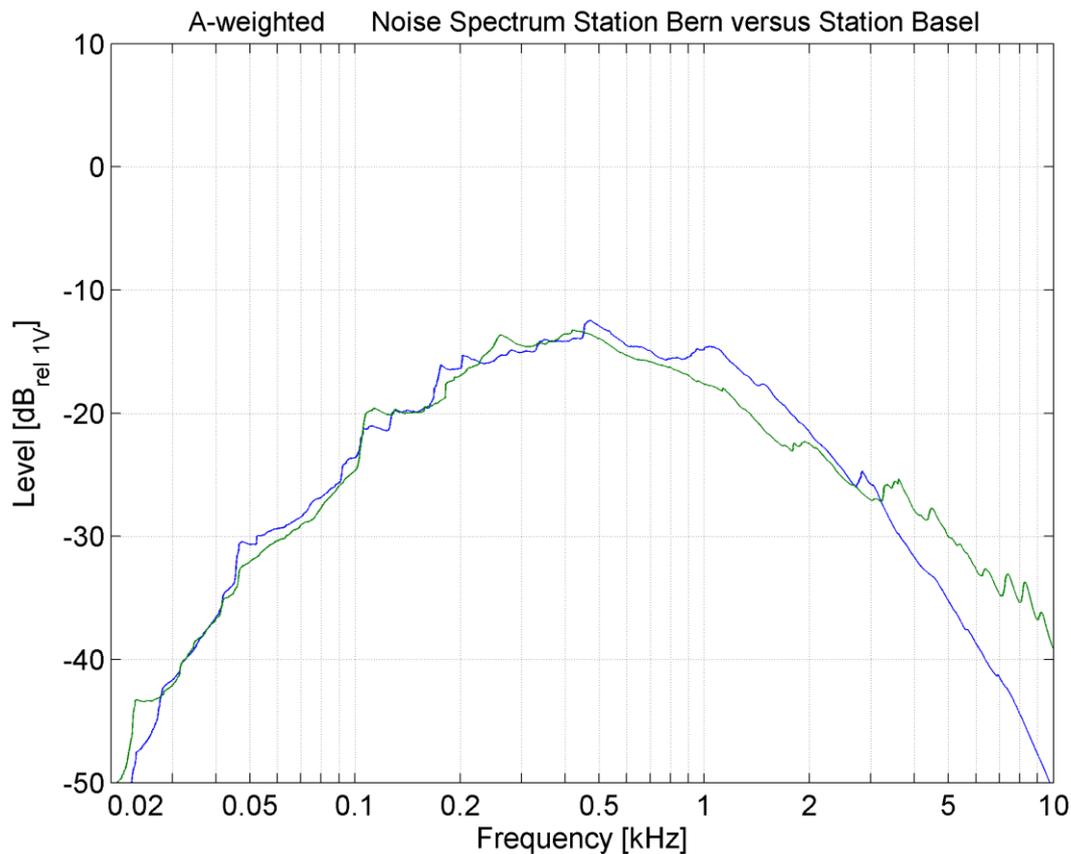


Abbildung 4.8: Mittleres **A-bewertetes** Frequenzspektrum 60 min Bahnhof Basel versus Bahnhof Bern, gleitend gemittelt 1/3 Oktave (blau = Basel, grün = Bern)

Im Folgenden wird noch einmal die Frage beleuchtet, wie der Störgeräuschpegel gemessen werden soll. In der TSI PRM Anlage G soll das Störgeräuschniveau als unbewerteter Pegel im Frequenzbereich der 3 Oktaven 500 Hz, 1 kHz und 2 kHz ermittelt werden. Es sei nochmal erwähnt, dass es sich bei den Frequenzangaben um Oktavmittenfrequenzen handelt. Der effektive Frequenzbereich, den diese drei Oktaven umfassen, reicht von 353 Hz bis 2,83 kHz. Abbildung 4.9 zeigt den Vergleich beider Spektren für den Bahnhof Basel, einmal als A-bewerteter Gesamtpegel und den Pegel als Summe über die drei unbewerteten Oktavpegel.

Der Unterschied zwischen dem A-bewerteten Schalldruckpegel des gesamten Signals und dem in Oktaven gewonnenen Pegel beträgt hier gerade mal 0,8 dB. Im Mittel können demnach beide Methoden gleichermaßen zur Erfassung der Störgeräuschsituation herangezogen werden, ohne dass hierfür die Werte für den Signalpegel angepasst werden müssten. Als Momentanpegel können die Abweichungen aber höher sein.

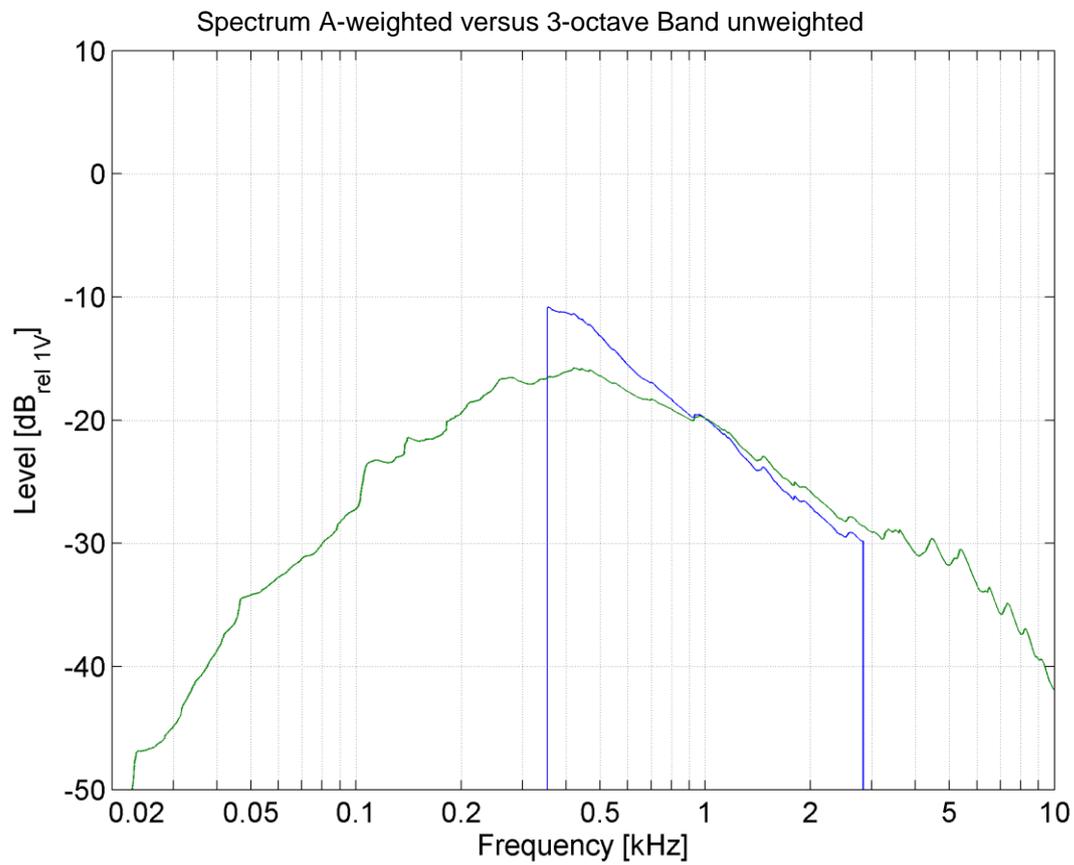


Abbildung 4.9: Vergleich des zeitlich mittleren Geräuschspektrums (60 min) Bahnhof Basel als A-bewertetes Spektrum (grün) mit der entsprechenden ungewichteten Oktavmittelung über drei Oktaven(blau)

5 Hörversuche

In den letzten Abschnitten sind bereits eine Reihe von Fragen zu den Türfindesignalen diskutiert worden. Noch nicht hinreichend geklärt, sind jedoch folgende wichtige Punkte:

- Welcher Signal-/Störabstand S/N muss realisiert werden, damit eine „angemessene“ Hörbarkeit der Türfindesignale gegeben ist?
- Welche Nachteile bzgl. der Ortung besitzt eine Positionierung des Signalgebers oberhalb der Tür gegenüber einer Positionierung in Tasternähe?
- Wie sind die Unterschiede bzgl. der Ortbarkeit zwischen dem Single Tone Signal und dem Dual Tone Signal?
- Welche Maximalpegel sollen für die Findesignale festgelegt werden?
- Welche Dynamik für adaptive Signale soll implementiert werden?
- Welche Signalpegel sollen für die statischen (nicht adaptiven) Türfindesignale definiert werden?

Diese Fragen lassen sich zwar aufgrund theoretischer Überlegungen im Labor erst einmal grob beantworten, letztlich aber nur durch geeignete Hörversuche hinreichend eindeutig klären. Daher wurde ein Hörversuchskonzept entwickelt, das in der Lage sein sollte, genau diese Fragen zielgerichtet beantworten zu können.

Im Vorfeld der Versuche wurde ausgiebig evaluiert, welche Kriterien ein solcher Hörversuch erfüllen muss, um eine entsprechende Aussagekraft zu haben. Dies insbesondere, da der Aufwand im Rahmen der Studie begrenzt und auf die wesentlichen Punkte konzentriert werden musste.

Gemäß dem Auftrag durch das BAV sollten typischerweise 10 sehbehinderte Versuchspersonen, optimaler Weise 5 aus Deutschland und 5 aus der Schweiz, zur Teilnahme an den Hörversuchen zum Auffinden von Türen und Türtastern mit Hilfe von Türfindesignalen gewonnen werden.

Um die obigen Fragen zu adressieren, mussten folgende Parameter im Hörversuch variiert werden:

- Variation des S/N-Verhältnisses in einem ausreichenden Maße
- Vergleich der beiden Türfindesignale - Single Tone und Dual Tone
- Vergleich eines tasternahen Signalgebers mit einem Signalgeber oberhalb der Tür

Folgende Randbedingungen sollten dabei Berücksichtigung finden:

- möglichst realistisches Szenario
- Evaluierung aller gewünschten Parameter
- genügend Zeit und Ruhe zur Durchführung der Versuche
- zumutbare Belastung für die Versuchspersonen

5.1 Versuchsdesign

Nach umfassender Recherche und Abwägung aller Möglichkeiten wurde folgendes Versuchsdesign gewählt:

- a.) Für den Versuch konnten insgesamt 9 sehbehinderte Versuchspersonen gewonnen werden, 5 aus Deutschland und 4 aus der Schweiz.
- b.) Der Versuch wurde im Bahnhof Leipzig auf Gleis 17 durchgeführt, das für die Hörversuche 3 Tage lang vollständig gesperrt wurde und somit ausschließlich für den Hörversuch zur Verfügung stand.
- c.) Als Testobjekt diente der Versuchszug advanced TrainLab (aTL) der Deutschen Bahn, der seitens der Deutschen Bahn eigens für den Einsatz als Versuchsfahrzeug umgebaut wurde und für Versuchszwecke aller Art eingesetzt wird.
- d.) Eine Tür des Zuges diente als Versuchstür. An diese Tür wurde ein kleines zusätzliches Gehäuse aufgebracht, das einen Taster sowie einen Lautsprecher zur Abstrahlung des Findesignals enthielt.
- e.) Die gleiche Anordnung wurde auch noch einmal oberhalb der Tür angebracht, wenngleich dort der Taster keine Relevanz besaß.
- f.) Mit Hilfe eines speziellen Lautsprecher-Setups wurde ein Bereich von ca. 35 m (17,5 m links und 17,5 m rechts) von der Tür auf dem Bahnsteig mit 4 verschiedenen diffusen, kontrollierten Hintergrundgeräuschen beschallt.
- g.) Das S/N-Verhältnis konnte gezielt durch Variation der Hintergrundgeräuschpegel sowie der Signalpegel gesteuert werden. Es wurden je 4 Hintergrundpegel mit jeweils 4 S/N-Verhältnissen untersucht.
- h.) Die 16 verschiedenen Situationen aus g.) sollten jeweils für die zwei Arten der Türfindesignale sowie für die zwei verschiedenen Positionen der Signalgeber durchgeführt werden, so dass insgesamt für jede Versuchsperson 64 Durchläufe durchgeführt werden sollten. Jede Versuchsperson hatte pseudorandomisiert 8 Versuchsblöcke mit jeweils 8 verschiedenen Situationen zu beurteilen.
- i.) Die Versuchspersonen sollten ausgehend von 4 verschiedenen Ausgangspunkten in der Bahnsteigmitte auf den Zug zugehen, an dem Zug entlanggehen und mit Hilfe des Türfindesignals die Tür finden. Die Versuchspersonen sollten ein Armzeichen geben, sobald sie in der Lage waren das Signal zu hören, dann weitergehen, den Taster finden und diesen entsprechend betätigen.

- j.) Alle Versuche wurden mithilfe von drei Kameras aus drei Perspektiven aufgezeichnet, so dass später eine Auswertung der Armzeichen sowie die Auffindesituation beurteilt werden konnte.
- k.) Die realen Hintergrundgeräuschpegel wurden während der Versuche mit Hilfe eines Mikrofons an der Türoberkante mitprotokolliert, so dass stets das reale beim Versuch herrschende S/N-Verhältnis dokumentiert wurde.
- l.) Der gesamte Versuch wurde computergesteuert. Für jeden Findvorgang wurden alle drei Kamerapositionen, die Störpegel, die Findezeit und die Versuchsparameter aufgezeichnet.
- m.) Nach jedem Findvorgang wurden die Versuchspersonen zu dieser Situation befragt und die Antworten aufgezeichnet.
- n.) Mit jeder Versuchsperson wurde ein ausführliches Interview über weitere begleitende Fragen durchgeführt.

5.2 Versuchspersonen

Die 9 Versuchspersonen wurden mit Hilfe der jeweiligen Verbände der Sehbehinderten der Schweiz und Deutschlands gewonnen. Eine Vorauswahl konnte wegen der geringen Anzahl freiwillig Teilnehmender nicht getroffen werden. Die Versuchspersonen haben vor dem Test folgende Angaben zu ihrer Person gemacht:

Tabelle 5.1 Angaben der Versuchspersonen zu ihrer Person

Alter	Geschlecht	Herkunftsland	Ursache für Sehbehinderung	Visus (L,R)	Grad der Behinderung	Weitere Behinderungen	Erkrankungen des Gehörs	Hörgerät
52	m	DE	genetisch bedingte, seltene RP-Erkrankung	(nicht messbar, nicht messbar)	100	/	/	/
51	m	CH	Retinitis pigmentosa RP	(ca. 1%, nicht messbar)	keine Angabe	/	/	/
71	m	DE	Dominant vererbliche Zapfen-Stäbchendystrophie	(2%, 1%)	100	/	Höreinschränkung	Ja
65	m	DE	Nystagmus, Sehnervatrophie, Hornhauteintrübung	(1%, 1%)	100	/	links gehörlos	/
56	m	CH	Netzhauterkrankung (RP)	nicht definiert	keine Angabe	/	Höreinschränkung	Ja
57	m	CH	genetisches Geburtsgebreehen	(0%, 2%)	40	/	/	/
25	m	CH	grauer und grüner Star	(0%, 0%)	keine Angabe	Laufen kann ich mit der Orthese, aber nur sehr langsam	/	/
61	w	DE	angeborene Netzhautvernarbungen durch Röteln-Erkrankung	(0%, 0,03%)	100	/	/	/
42	m	DE	Optikusatrophie in Folge Polytrauma	(<1%, vollblind)	100	Einschränkungen im Bewegungsapparat in Folge Polytrauma	/	/

Hierbei bezeichnet der Begriff „Visus“ im engeren Sinne die Sehschärfe, d.h. die Fähigkeit der Netzhaut, zwei Punkte als getrennt wahrzunehmen. Eine Sehschärfe von 100% entspricht einem Wert

von 1,0. Gewöhnlicherweise ist der Visus altersabhängig und liegt bei einem 20-jährigen Menschen bei rund 1,0 bis 1,6. Eine 80-jährige Person weist wiederum nur noch einen Visus von 0,6 bis 1,0 auf. Grund dafür ist, dass die Sehschärfe resp. der Visus mit steigendem Alter abnimmt.

5.3 Versuchsaufbau im Bahnhof Leipzig

Der Hbf Leipzig wird gemäß Wikipedia wie folgt beschrieben:

„Leipzig Hauptbahnhof ist der zentrale Personenbahnhof in Leipzig und gehört mit täglich rund 135.000 Reisenden und Besuchern[3] zu den 15 meistfrequentierten Fernbahnhöfen der Deutschen Bahn. Der Eisenbahnknoten und Kopfbahnhof mit 23 Bahnsteiggleisen, von denen 22 im Reiseverkehr genutzt werden,[1] gehört zu den 21 Bahnhöfen der höchsten Preisklasse von DB Station&Service. Er ist mit einer überdachten Grundfläche von 83.640 Quadratmetern der flächenmäßig größte Kopfbahnhof Europas. Die Fassade des Empfangsgebäudes zur Innenstadt ist 298 Meter breit.“

Der Gleisbereich in der Halle ist ca. 215m lang. Als Versuchsbahnsteig wurde von der Deutschen Bahn das Gleis 17 des Bahnhofs Leipzig für 3 volle Tage vom 1.-3. November zur Verfügung gestellt. Abbildung 5.1 zeigt den Grundriss und die Lage des Gleis 17 im Bahnhof Leipzig.

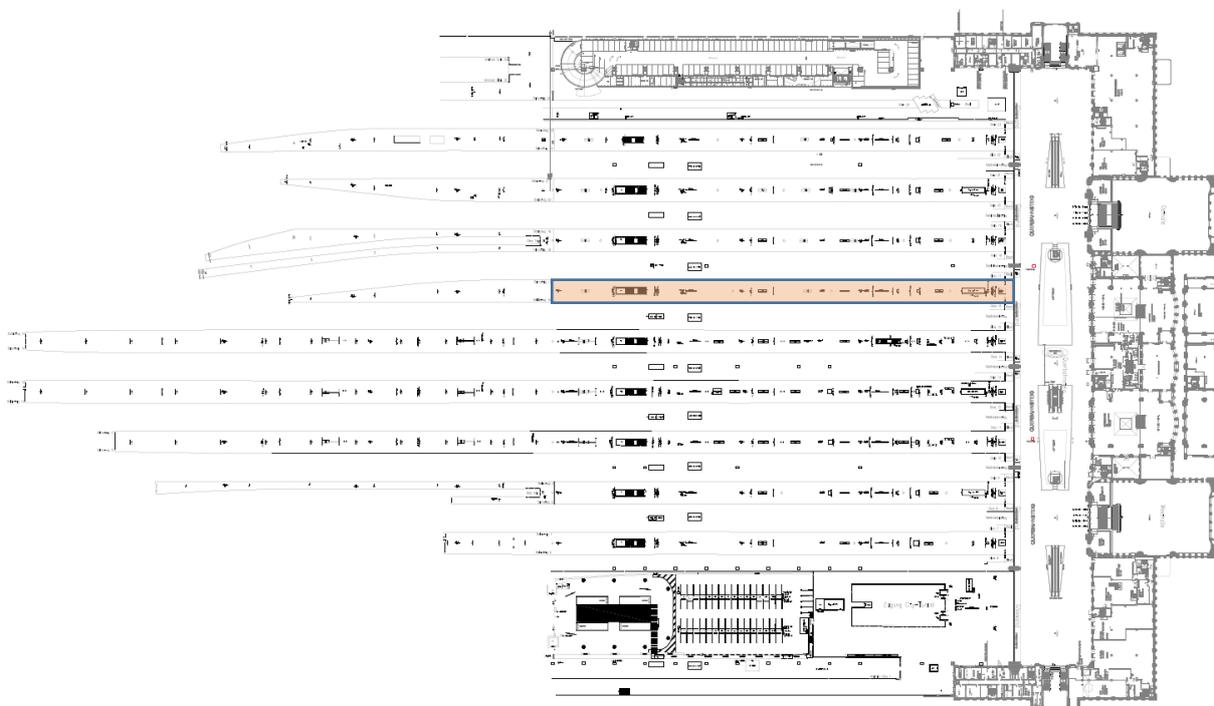


Abbildung 5.1: Grundriss des Bahnhofs Leipzig mit Kennzeichnung des Hallenbereichs von Gleis 17

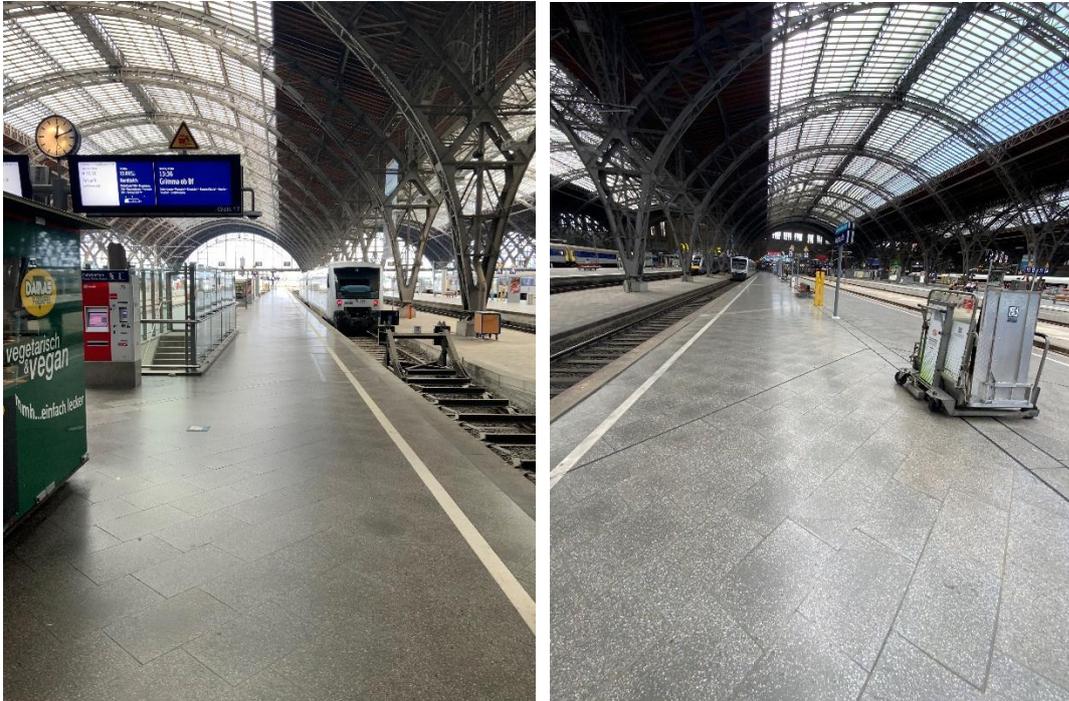


Abbildung 5.2 a-b: Ansicht Gleis 17 mit Blick a. vom Kopfbereich b. vom Hallenende

Der Bahnhof wurde ausgesucht, weil er zum einen eine große Halle besitzt, die eine natürliche Umgebung schafft, als Kopfbahnhof kurze Wege für die Sehbehinderten zu den Shops und Toilettenräumen aufweist sowie eine räumliche Nähe zum Standort des Versuchszuges advanced TrainLab in Halle besitzt.

Das zur Verfügung gestellte Gleis 17 verfügt über keine Blindenleitstreifen oder sonstige taktile Bahnsteigorientierungen. Lediglich ein weißer, etwa 50 cm von der Bahnsteigkante befindlicher Streifen dient zur optischen Orientierung, die von den Sehbehinderten nicht genutzt werden konnte. Für die Versuche musste daher für die Versuchspersonen die Bahnsteigkante zur Orientierung dienen. Der Bahnsteig weist eine Breite von Bahnsteigmitte bis zur Bahnsteigkante von 4,5 m auf. Diese gesamte Breite konnte für den Versuch genutzt werden.

5.4 Präparierung des Versuchszuges advanced TrainLab

Als Versuchszug diente der bereits erwähnte advanced TrainLab der Deutschen Bahn. Als advanced TrainLab (aTL) bezeichnet die Deutsche Bahn dabei zwei Triebzüge der Baureihe 605, die als Versuchsträger für Technologien dienen. Sie „sollen der gesamten Bahnbranche für Experimente zur Verfügung stehen und jenes Spektrum an Versuchen innovativer Technologien abbilden, das mit den regulären Zügen im Personen- oder Güterverkehr der DB nicht möglich ist.“

ICE TD (4-tlg.) BR 605 Gesamtübersicht



Abbildung 5.3: Übersicht über den Aufbau des advanced TrainLab

Abbildung 5.3 zeigt den schematischen Übersichtsplan des Versuchszuges, Abbildung 5.4 Teilausschnitte des Zuges im Hbf Leipzig.



Abbildung 5.4 a-b: Ansichten des advanced TrainLab der Deutschen Bahn im Hbf Leipzig

Der Zug besteht aus vier Wagen mit je ca. 25 m Länge und besitzt eine Gesamtlänge von 105m. Abbildung 5.5 zeigt die Anordnung des Zuges mit Kennzeichnung der Versuchstür.

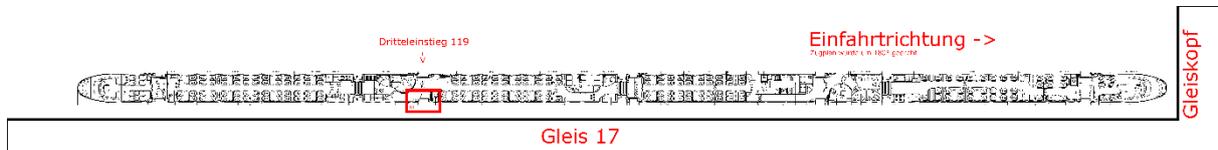


Abbildung 5.5: Anordnung des Versuchszuges am Gleis 17.

Demnach wurde als Versuchstür die Tür am Dritteinstieg 119 (vorletzter Wagen in Richtung Hal- lenausgang) gewählt, weil so zum einen genügend Abstand des Versuchsbereiches zum belebten Kopfbereich des Bahnhofs herrschte, aber auch noch zu beiden Seiten der Tür eine ausreichende Länge des Zuges zur Verfügung stand.



Abbildung 5.6 a-b: Ansicht der präparierten Versuchstür, (a. geöffnet, b. geschlossen)

Die Versuchstür wurde wie folgt präpariert:

- Anbringung eines Kästchens mit Schallsender und Türtaster im Türbereich in 1 m Höhe
- Anbringung eines zweiten baugleichen Kästchens oberhalb der Tür in 2,2 m Höhe
- Anbringung eines Messmikrofons als Grenzflächenmikrofon an der Tür (ca. 2 m Höhe) zur Erfassung des realen Störgeräuschniveaus als $L_{Aeq,5}$ (5s Mittelwert)



Abbildung 5.7: Lautsprecher und Türtaster der präparierten Versuchstür

Als Signalgeber kam ein Lautsprecher der Fa. Visaton zum Einsatz.



Abbildung 5.8: Ansicht des eingesetzten Lautsprechers (Visaton PL 7 RV) als Signalgeber

Der Lautsprecher Visaton PL 7 RV wurde als Signalgeber ausgewählt, weil er bei vgl. geringer Baugröße sicher die erforderlichen Versuchsschallpegel von bis zu $L_{AFmax} > 80$ dB in 1 m Entfernung erzeugen kann, zum anderen aber auch eine sehr breite Richtcharakteristik aufweist. Das Datenblatt ist im Anhang enthalten. Es ist anzumerken, dass es nicht beabsichtigt war, einen realen bereits im

Einsatz befindlichen Signalgeber zu verwenden, sondern einen der in der Lage ist, alle für den Versuch zu erzeugenden Pegel mit sehr guter Qualität wiederzugeben.

Wenngleich die zusätzlich auf die Tür aufgebrachte Sender- und Tasteranordnung nicht dem realen Fall eines in die Tür- und Wagenkonstruktion eingelassenen Tasters entspricht und aufgrund der Aufbauhöhe taktil leichter erfüllt werden konnte, war die Anordnung hinreichend, um sicher festzustellen, ob und wie der Bereich des Tasters mit Hilfe des Türfindesignals auffindbar war oder nicht. Der Taster selber sollte nach Auffinden des Tasters betätigt werden und diente zur Quittierung zum Abschluss eines jeden Findevorgangs.

Mit Hilfe dieser Anordnung konnte der Signalpegel am Referenzpunkt genau eingestellt und während des Versuches kontrolliert variiert werden. Als Referenzmesspunkt wurde analog zu den bisherigen Türmessnormen ein Messpunkt 1,5 m senkrecht zur Türmitte in 1,5 m Höhe gewählt.

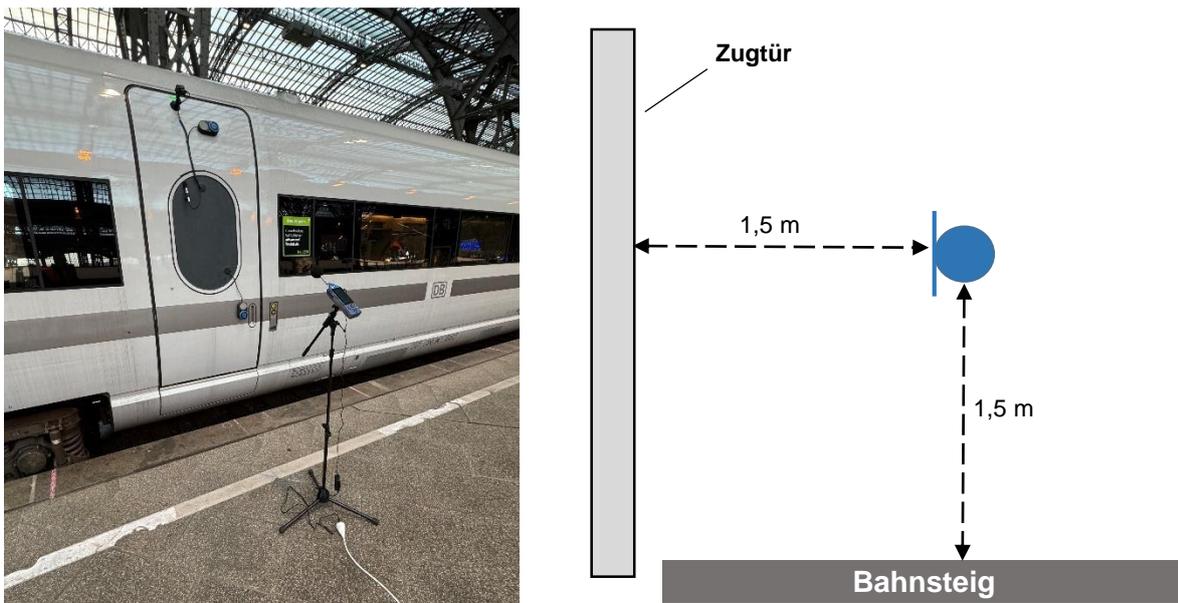


Abbildung 5.9 a-b: Messanordnung zur Pegelkalibrierung und schematische Skizze

5.5 Realisierung des kontrollierten Hintergrundgeräusches

Zur gezielten Variation des Hintergrundgeräusches musste eine Versuchsanordnung gewählt werden, die in der Lage war, folgende Parameter abzubilden:

- Herstellung eines weitgehend diffusen Schallfeldes innerhalb der Versuchszone
- geringe Pegelvariation innerhalb der Versuchszone ($< 1,5$ dB als $L_{Aeq,5}$)
- geringe Pegelvariation über der Versuchszeit ($< 1,5$ dB gemessen als $L_{Aeq,5}$)
- Erzeugung eines realistischen Bahnhofumfeldes
- Abbildung verschiedenartiger Hintergrundgeräusche mit unterschiedlichen Pegeln

Insbesondere die Forderung nach der Realisierung eines realistischen akustischen Bahnhofsumfeldes erforderte einen besonderen Aufwand. Mit einer einfachen Versuchsanordnung hätte in einfacher Weise Rauschen mit verschiedenen Pegeln über entsprechende Lautsprecher abgespielt werden können. Diese Art der Versuchsdurchführung erschien jedoch angesichts der gesteigerten Sensibilität von sehbehinderten Menschen für Audiosignale nicht geeignet. Daher wurden reale, aber vollständig kontrollierbare Szenarien generiert.

5.5.1 Aufnahmetechnik und Rohdaten

Zur Generierung von Basisgeräuschen wurden verschiedene Geräusche an verschiedenen Orten räumlich aufgezeichnet. Die Aufzeichnung und Wiedergabe der Signale erfolgte mit Hilfe des Ambisonics-Verfahrens. Ambisonics ist dabei ein Verfahren zur Aufnahme und Wiedergabe eines Klangfeldes. Im Unterschied zu den kanalorientierten Übertragungsverfahren ist für die Wiedergabe keine feste Anzahl von Lautsprechern vorgegeben. Die jeweiligen Signale werden nach mathematischen Vorgaben aus den übertragenen Werten für Schalldruck und Schallschnelle für jede einzelne Lautsprecherposition berechnet.

Zur Aufzeichnung der Signale wurden folgende Komponenten eingesetzt:

- **Zylia ZM-1 3rd Order Ambisonics Microphone Array**, 19 digitale MEMS Kapseln auf einer Kugelanordnung, 48 kHz 24 Bit Audioaufnahmen
- **Zylia ZR-1 Portable Recorder** zeichnet 19-kanalige Multichannel-WAVs auf



Abbildung 5.10: Aufnahmekugel Zylia ZM-1

Ein Vorteil des Verfahrens ist, dass auch die Elevationsebene nach mathematischen Beziehungen für jede beliebige Lautsprecherposition dekodiert werden kann. Dadurch wird schon mit vier Übertragungskanälen ein dreidimensionales Schallfeld erzeugt. In diesem Schallfeld ist keine Raumachse bevorzugt, alle Lautsprecher tragen ihren Anteil bei. Herkömmliche Raumklang-Verfahren sind selbst bei sechs Übertragungskanälen noch deutlich zweidimensional.

Mit steigender Zahl der dekodierten Lautsprecherkanäle gewinnt das Schallfeld an Stabilität. Es kann dann sogar von Zuhörern außerhalb der Lautsprecheranordnung wahrgenommen werden. Die Lautsprecher müssen nicht an fest vorgegebenen Positionen in einem regulären Rechteck positioniert werden; dies erlaubt eine bessere Anpassung an die praktischen Wiedergabebedingungen.

Mit zusätzlichen Übertragungskanälen kann die Stabilität der räumlichen Abbildung weiter gesteigert werden. Dabei bleibt das Verfahren immer abwärtskompatibel, d.h. es kann einfach auf die Dekodierung einzelner Kanäle verzichtet werden.

Bei der Verwendung mehrerer Wiedergabelautsprecher entsteht so ein sehr räumliches und natürliches Schallfeld.

Als Grundlage für die finale Signalgenerierung des Versuches dienten folgende Rohaufnahmen:

- Geräuschkulisse Bahnhof Bern
- Geräuschkulisse Bahnhof Basel
- Geräuschkulisse Bahnhof Düsseldorf
- Hallraumaufnahmen von Sprache
- Baustellengeräusche Bahnhof Bern
- Baustellengeräusche Straßenbaustelle

5.5.2 Wiedergabeeinrichtung

Zur Wiedergabe der Hintergrundgeräuschkulisse wurde ein Lautsprecherarrangement bestehend aus 8 Einzellautsprechern gewählt, das entlang der Bahnsteigmitte in einer Linie aufgestellt war. Die Lautsprecher wurden jeweils in einem Abstand von 5 m abwechselnd in 2 m Höhe und auf dem Boden positioniert.

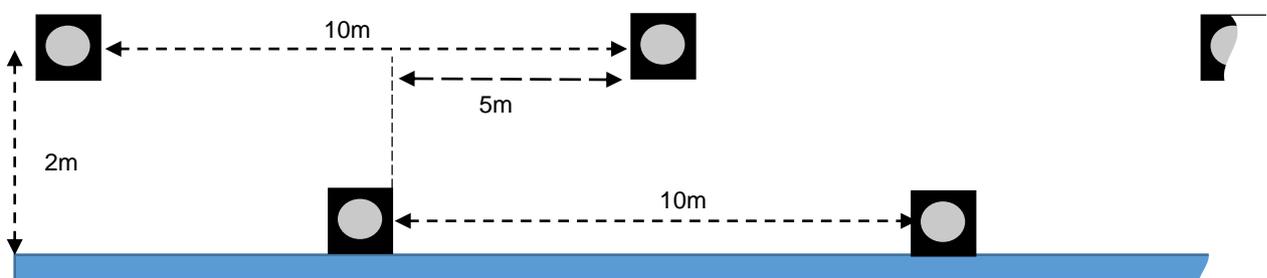


Abbildung 5.11: Prinzipskizze des LS-Aufbaus zur Hintergrundbeschallung

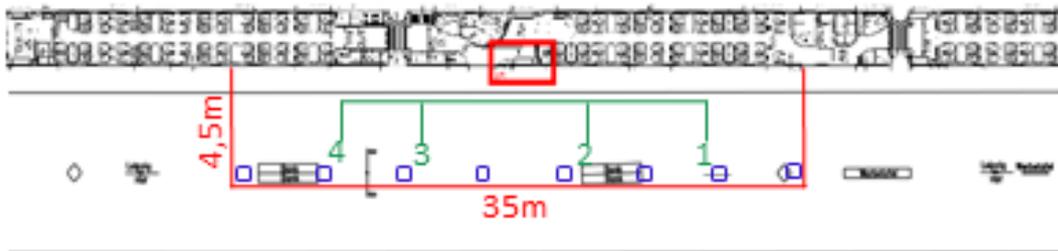


Abbildung 5.12: Kennzeichnung der Lautsprecherpositionen (blau), des Versuchsbereiches (rot) und der Laufpfade (grün)

Abbildung 5.11 zeigt die prinzipielle Anordnung, Abbildung 5.12 die 35 m breite Versuchszone, die sich aus der gewählten Lautsprecheranordnung ergibt. Ferner sind die Startpositionen eingezeichnet, an die die Versuchspersonen jeweils geführt wurden.

Alle Lautsprechersysteme besaßen hochwertige Treiber vom Typ Radian 5208C, die mit Hilfe eines Digitalcontrollers zur Herstellung eines linearen Frequenzganges digital entzerrt wurden. Die Wiedergabe erfolgte über eine achtkanalige Endstufe Electro Voice CP S8.5.

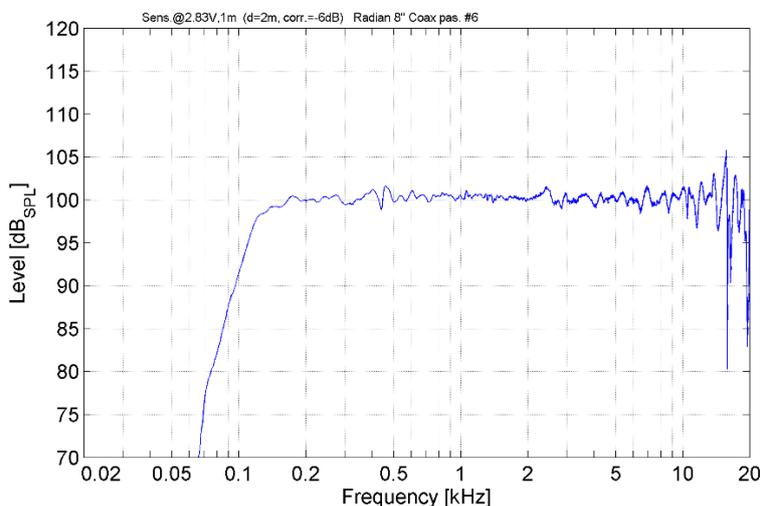


Abbildung 5.13: Frequenzgang des digital entzerrten Wiedergabelautsprechers

5.5.3 Generierung der Hintergrundgeräusche

Die Variation des Hintergrundgeräuschpegels sollte nicht nur durch Anheben oder Absenken des Pegels erfolgen, sondern auch durch die Änderung der Geräuschart. Somit können den verschiedenen Pegelstufen auch realistische Szenarien hinterlegt werden.

Für die Versuche wurden vier verschiedene realistische Hintergrundgeräuschkennszenarien mit entsprechend zugehörigen Geräuschniveaus generiert.

Tabelle 5.2: Szenarien der Hintergrundgeräusche

Nummer	Szenario	Beschreibung	Pegel L_{Aeq}
1	Hintergrundrauschen	Überlagerung von Geräuschaufnahmen im Bf Basel ohne jegliche Information oder Sprache.	60 dB
2	Sprache leise	Aufzeichnung in der Bahnhofshalle Hbf Düsseldorf, gering informationshaltig durch Personenverkehr	70 dB
3	Sprachdurchsagen laut	KI-generierte Sprachsignale, aufgezeichnet im Hallraum als Simulation von lauten informationshaltigen Durchsagen	75 dB
4	Baustelle	Überlagerung von Maschinen- und Arbeitslärm an Baustellen. Überlagerung von mehreren Aufzeichnungen aus Bern und Straßenbaustellen	78 dB

Da die Signale zeitlich nur wenig Schwankungen aufweisen sollten, wurden verschiedene Signale eines Typs so zusammengemischt, dass die zeitlichen Schwankungen des 5-sekündigen Mittelwertes $\Delta L_{Aeq,5} < 1,5$ dB betragen. Bei der Mischung blieben aber alle räumlichen Bezüge erhalten.

Zur Signalverarbeitung wurde das Programm Reaper mit der IEM Plugin-Suite genutzt. Der AIIRADecoder aus der Suite erlaubt die Berechnung eines Ambisonics-Decoders für ein individuelles Lautsprecher Layout in 3rd Order Ambisonics. Es wird angenommen, dass die obig beschriebene 8-kanalige Lautsprecheranordnung auf einer Halbkugel mit einem großen Radius liegt. Die 8 Lautsprecherpositionen werden entsprechend ihrer Reihenfolge in das Plugin eingetragen und über Azimut/Elevation angemessen positioniert. Die Kanäle der Aufnahme werden auf die 8-kanalige Positionierung umgerechnet. Ausgang des Plugins sind dann die so bearbeiteten 8-kanaligen Dateien.

Vorteile der Nutzung dieses Verfahrens sind:

- kein „Kleben“ der Signale am Lautsprecher, akustisches Ablösen von der LS-Position
- extrem realistische Schallfelderzeugung
- Erhalt von räumlicher Auflösung und Richtungsbezügen

Sowohl in der Phase des Probehörens als auch beim Versuch selber zeichnete sich das so generierte Hintergrundschallfeld innerhalb des Versuchsbereiches durch extrem realistische Wiedergabeeigenschaften aus. Weder die Versuchsteilnehmer noch die weiteren beim Versuch anwesenden Personen konnten unterscheiden, ob es sich um ein natürliches oder ein durch die Lautsprecheranordnung generiertes Schallfeld handelte.

Die Hintergrundscenarien wurden jeweils in einer Länge von 10 Minuten generiert und je nach Versuch als Schleife wiederholend abgespielt.

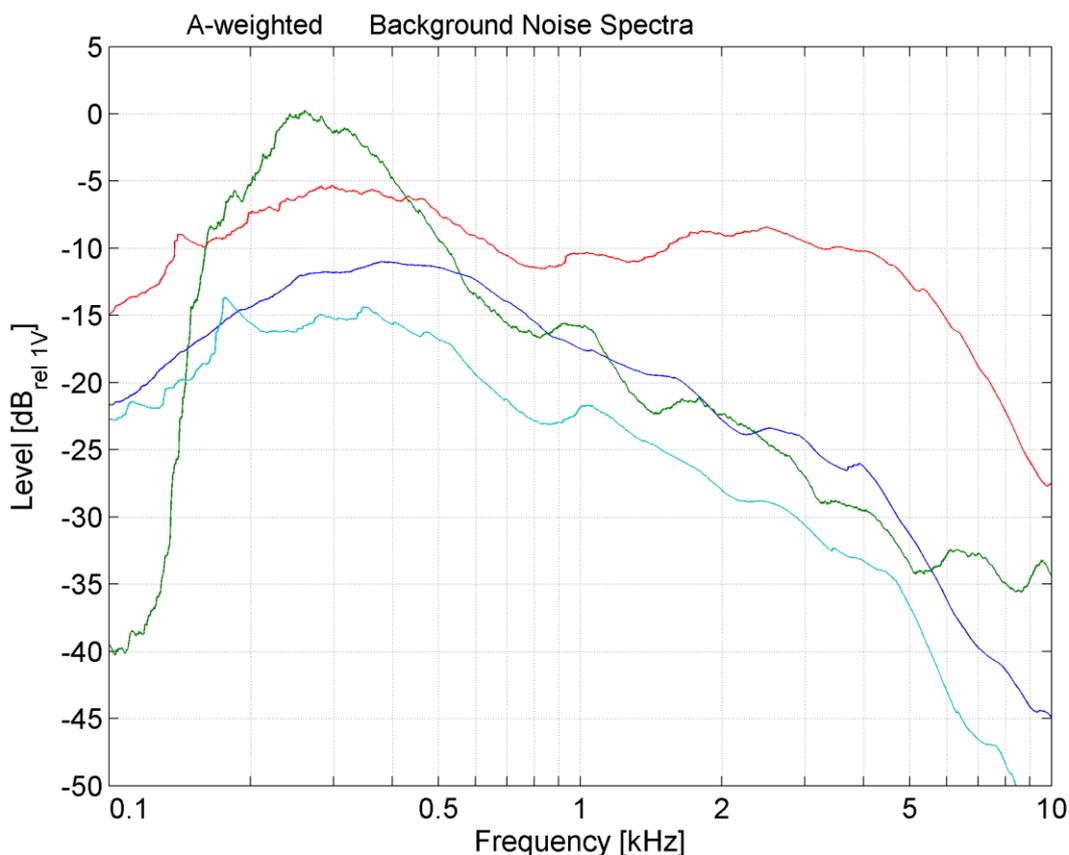


Abbildung 5.14: A-bewertete Spektren der 4 Hintergrundgeräuschszenarien, relative Darstellung im Maximum auf 0 dB normiert (türkis = 1, blau = 2, grün = 3, rot = 4)

Abbildung 5.14 zeigt die im Maximum auf 0 dB normierten, aber untereinander bzgl. des A-bewerteten Summen-Schalldruckpegels abgestuften Spektren der Hintergrundgeräuschszenarien. Zu erkennen ist, dass der Baustellenlärm (rot) deutlich mehr hochfrequente Anteile enthält und die lauten Sprachsignale (grün) eine Pegelüberhöhung zwischen 200 Hz und 400 Hz besitzen.

Wie in Abschnitt 2 ausgeführt, soll nach derzeitiger Festlegung in der TSI PRM Anlage G das Störgeräusch als Summe aus den drei Oktaven (500 Hz, 1 kHz und 2 kHz) gebildet werden. Wie weiter gezeigt, unterscheiden sich die unbewerteten Summenpegel über die drei Oktaven bei den üblichen Hintergrundspektren zahlenmäßig nicht wesentlich vom A-bewerteten Summenpegel. Da die hier generierten Spektren für Szenario 3 und 4 vom üblichen Spektrum abweichen, zeigt Tabelle 5.3 nochmals die Berechnungen der Pegelunterschiede für alle 4 Szenarien.

Tabelle 5.3 Pegeldifferenzen zwischen A-bewertetem Summenpegel und unbewerteter Summe aus drei Oktaven für die 4 Hintergrundgeräuschszenarien

Szenario	1	2	3	4
$L_{Aeq} - L_{Okt(500,1k,2k)}$	-0,3 dB	-0,6 dB	0,9 dB	2,8 dB

Aus der Tabelle geht hervor, dass die Abweichungen im Rahmen der hier gemachten Betrachtungen für die Szenarien 1-3 vernachlässigbar klein sind. Lediglich für das „ungewöhnliche“ Baustellenszenario treten etwas größere Abweichungen auf.

Insofern sei hier nochmals festzuhalten, dass im Grunde die Störgeräuscherfassung, die in der bisherigen Festlegung der TSI PRM Anlage G über 3 Oktaven erfolgt, für die meisten Bahnsteigszenarien in sehr guter Näherung auch als A-bewerteter Summenschalldruckpegel erfolgen kann.

Ein rein linearer Summenpegel sollte zur Kennzeichnung des Störgeräusches hingegen nicht herangezogen werden.

5.6 Festlegung der Szenarien und Einmessung der Anordnung

Im Rahmen von Vorversuchen, die mit den Projektbeteiligten als „Probanden“ durchgeführt wurden, wurde die gesamte Versuchsanordnung vor einer Gebäudefassade (als grobe Simulation einer Zugfront) aufgebaut und geprüft. Insbesondere wurden hierbei die Klangqualität der Hintergrundgeräusche, die zeitliche und räumliche Gleichmäßigkeit der Pegelverteilung, die Funktion des Signalgebers und weitere Parameter geprüft. Insbesondere wurde auch untersucht, innerhalb welchen Pegelbereiches das S/N-Verhältnis um den oberen und unteren Pegelbereich (sichere Detektion bzw. nahezu unhörbar) variiert werden muss. Dabei wurde von der bereits erläuterten Grundvoraussetzung ausgegangen, dass Türfindesignale in einem Bereich von 3-6 m um die Tür herum wahrnehmbar und lokalisierbar sein sollen.

Die Pegel von Nutzsignal und Hintergrundgeräusch wurden dabei wie folgt festgelegt und ermittelt:

1. Signalpegel des Türfindesignals; maximaler A-bewerteter „Fast“-Schalldruckpegel L_{AFmax}
2. Signalpegel des Hintergrundgeräusches; energieäquivalenter, A-bewerteter Dauerschallpegel L_{Aeq}
3. Die Messposition zur Ermittlung von Signal- und Hintergrundpegel ist jeweils die in Abbildung 6.9 gezeigte Referenzposition (1,5 m Türentfernung, 1,5 m Höhe).

Aus den Vorversuchen gingen folgende grundlegende Erkenntnisse zum Schallfeld hervor:

1. Die zeitliche Gleichmäßigkeit der simulierten Schallfelder war sehr hoch. Die Abweichungen von jeweils 5-sekündigen A-bewerteten Mittelungspegeln betrug $\Delta L_{Aeq,5} \leq 1,5$ dB.
2. Die räumliche Gleichmäßigkeit der simulierten Schallfelder war ebenfalls sehr hoch. Die Abweichungen von jeweils 5-sekündigen A-bewerteten Mittelungspegeln betrug im durch die Lautsprecher aufgespannten Versuchsbereich (Breite x Tiefe, 30m x 4m) ebenfalls $\Delta L_{Aeq,5} \leq 1,5$ dB.

Zudem erbrachten die Vorversuche folgende wichtige Erkenntnisse zum S/N-Verhältnis:

1. **Die Türsignale waren im Türbereich von 3m - 6m bei einem S/N = 0 dB immer sicher hörbar und ortbar.**
2. **Erst ab einem S/N < 9 dB wurde die Hörbarkeit signifikant schlecht und ein Auffinden war nur unter erhöhter Anstrengung möglich.**

Aus den Erkenntnissen der Vorversuche sowie den Parametern Signalart und Signalgeberhöhe wurde folgende Matrix der durchzuführenden Untersuchungen erstellt:

Tabelle 5.4 Matrix der 64 verschiedenen Hörversuchsparameter

Excitation 1m Height above Platform (Button)								
	Single Tone				Dual Tone			
S/N	1	2	3	4	1	2	3	4
0	x	x	x	x	x	x	x	x
-3	x	x	x	x	x	x	x	x
-6	x	x	x	x	x	x	x	x
-9	x	x	x	x	x	x	x	x

Excitation 2.6m Height above Platform (above the Door)								
	Single Tone				Dual Tone			
S/N	1	2	3	4	1	2	3	4
0	x	x	x	x	x	x	x	x
-3	x	x	x	x	x	x	x	x
-6	x	x	x	x	x	x	x	x
-9	x	x	x	x	x	x	x	x

Demnach gibt es 64 verschiedene Kombinationen, die jede der 9 Personen zu durchlaufen hatte.

Dies entspricht insgesamt 576 Versuchsdurchläufen. Für jeden Versuchsdurchlauf wurde eine Versuchszeit von ca. 70 Sekunden eingeplant, so dass eine Nettoversuchszeit von 11 Stunden zu bewerkstelligen war.

5.7 Steuerung und Versuchsdurchführung

Alle Versuchsszenarien wurden im Vorfeld der Hörversuche vorbereitet, indem eine Steuerungssoftware so programmiert wurde, dass die Versuche automatisch pseudorandomisiert abliefen. Die Versuche wurden in zwei Blöcke aufgeteilt, Block 1 mit 32 Szenarien enthielt nur Tests mit dem Signalgeber in Tasternähe, der andere Block entsprechend 32 Szenarien mit dem Signalgeber über der Tür.



Abbildung 5.15: Ansicht des Versuchskontroll- und Steuerplatzes

Jede Versuchsperson absolvierte 8 Blöcke mit je 8 Türfindevorgängen. Die Startposition wurde dabei ebenfalls pseudorandomisiert.

Abbildung 5.15 zeigt den Arbeitsplatz der Steuerzentrale. Dort wurde jedes Szenario per Software automatisch aufgerufen. Alle Findevorgänge wurden mit drei Kameras aus drei Perspektiven aufgenommen. Zusätzlich wurde der tatsächliche Hintergrundpegel mit aufgezeichnet, da durch den laufenden Betrieb des Bahnhofes lautere Störgeräusche entstehen konnten, als das eingespielte nominelle künstliche Störgeräusch. Die Auswertung erfolgte mithilfe des real gemessenen, nicht mit dem nominellen S/N-Verhältnis.

Die Versuchspersonen wurden von einer Begleitperson an die verschiedenen Startpositionen geführt mit dem Gesicht ausgerichtet auf den Zug. Den Personen wurde gesagt, in welche Richtung sie sich nach Auffinden der Bahnsteigkante bewegen sollten. Dies war notwendig, damit die Versuchspersonen nicht in die falsche Richtung hinaus aus der Versuchszone laufen. Die Versuchspersonen sollten ein Handzeichen geben, sobald sie das Findesignal wahrnehmen konnten, dann weitergehen und den Türtaster finden und betätigen. Die Betätigung des Tasters stoppte den Versuch mit einem Signal. Die Findezeit wurde ebenfalls aufgezeichnet.

Nach jedem Findevorgang wurden den Versuchspersonen 2 Fragen gestellt:

1. War der Moment (bezogen auf Ort und Zeit) der Wahrnehmung des Türfindesignals ausreichend?
2. War das Türfindesignal eine Hilfe beim Auffinden der Tür?

Die Antwortmöglichkeiten konnten in 4 Stufen gegeben werden:

- 4 = sehr gut
- 3 = gut
- 2 = weniger gut
- 1 = schlecht

Zusätzlich wurde mit jeder Versuchsperson noch ein ausführliches Interview geführt. Die wichtigsten Ergebnisse wurden ebenfalls nachfolgend zusammengefasst.

5.8 Versuchsauswertung

Die Versuchsauswertung erfolgte im Wesentlichen nach drei Kriterien:

- a.) Auswertung der beantworteten Fragen nach jedem Findevorgang in 4 Stufen
- b.) Neben den Antworten der nach jedem Findevorgang gestellten Fragen wurden auch die Videoaufzeichnungen gemäß zweier Kriterien analysiert.
 1. Wie gut war die Tür zu finden?
 2. Wie gut wurde der Türtaster gefunden?

Diese Auswertung wurde in 5 Stufen vorgenommen:

- 5 = sehr gut
- 4 = gut
- 3 = weniger gut
- 2 = schlecht
- 1 = gar nicht

Mithilfe der Handbewegung sowie auf dem Boden in der Nähe der Tür aufgebrachten Markierungen konnte die Entfernung der Wahrnehmung nachträglich ausgewertet werden.

5.9 Versuchsergebnisse

Von den nominell insgesamt 576 Durchläufen konnten 560 durchgeführt und ausgewertet werden. Die Auswertung erfolgte dabei als Punktwolkendiagramm mit Berechnung einer entsprechenden Trendlinie sowie deren Unsicherheit. Nachfolgend werden die wichtigsten Auswertediagramme dargestellt und diskutiert.

Zunächst werden die Auswertungen aus den Videoaufzeichnungen dargestellt. Dabei ist vorab zu sagen, dass die Diagramme auch S/N-Verhältnisse von bis zu -20 dB enthalten. Dies kam immer dann vor, wenn ein nominell geringes Hintergrundgeräusch durch laute Bahnhofgeräusche übertönt wurde. Da jedoch die realen S/N-Verhältnisse in die Auswertung eingingen ist dieser Sachverhalt im Wesentlichen mitberücksichtigt. Abbildung 5.16 zeigt die Auswertung für das Auffinden der Tür, Abbildung 5.17 für das Auffinden des Türtasters.

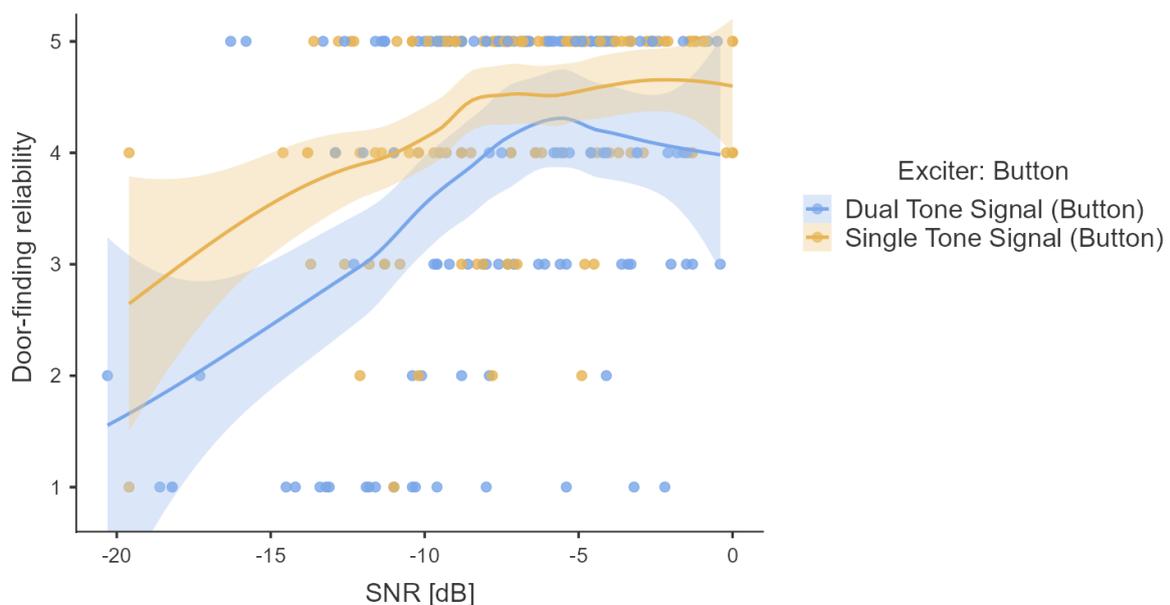


Abbildung 5.16: Auswertung „sicheres **Türfinden**“, Signalgeber Taster

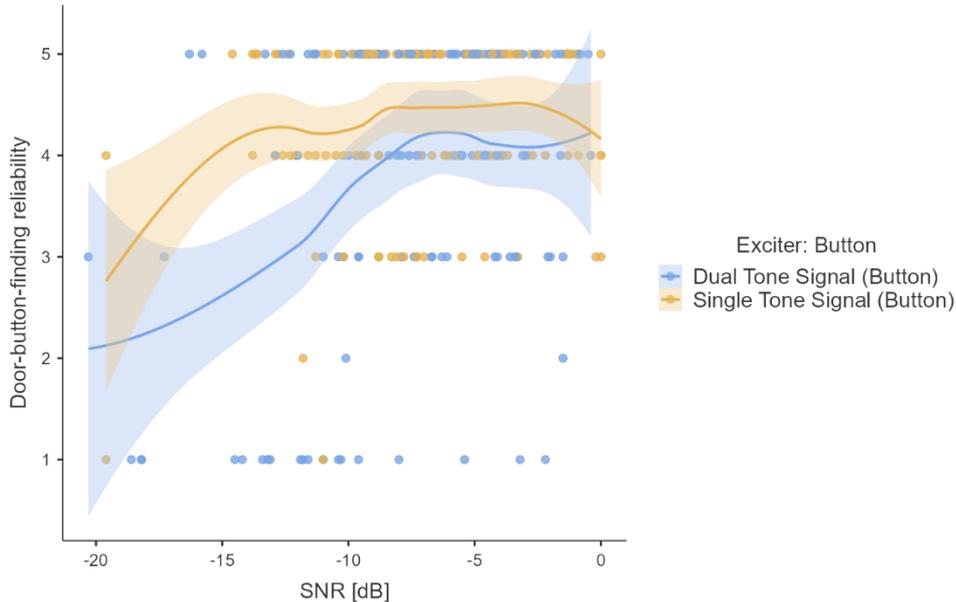


Abbildung 5.17: Auswertung „sicheres Tür**taster**finden“, Signalgeber Taster

Bereits aus den ersten Diagrammen werden folgende Aussagen deutlich:

- Ein sicheres **Auffinden der Tür** ist bei einem S/N-Verhältnis von 0 dB bis zu -7 dB ohne deutliche Unterschiede gut möglich.
- Auch das **Auffinden des Türtasters** ist bei einem S/N-Verhältnis von 0 dB bis zu -7 dB ohne deutliche Unterschiede gut möglich.
- Der Fehlerbalken für die Ergebnisse von S/N= 0 dB bis -7 dB ist vergleichsweise gering, so dass die Ergebnisse als aussagekräftig gewertet werden können.
- Das Dual Tone Signal schneidet durchschnittlich etwas schlechter ab als das Single Tone Signal.

Es sei nochmal darauf hingewiesen, dass durch den in Abschnitt 2 beschriebenen Effekt des bin-auralen Gewinns auch ein nominell negatives S/N-Verhältnis zu guter Hörbarkeit von Signalen in einer diffusen Störschallumgebung führt. Unklar war jedoch, wie genau sich dies bei den Türfindesignalen auswirkt.

Die nachfolgenden Auswertungen zeigen die gleichen Diagramme, aber bei Abstrahlung der Türfindesignale oberhalb der Tür.

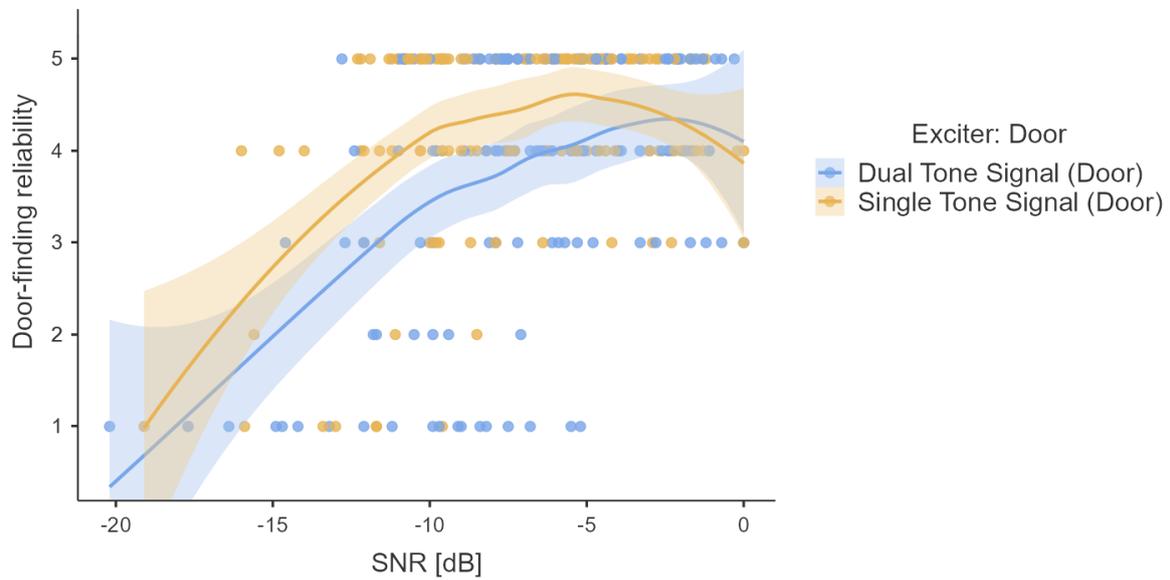


Abbildung 5.18: Auswertung „sicheres Türfinden“, Signalgeber „über Tür“

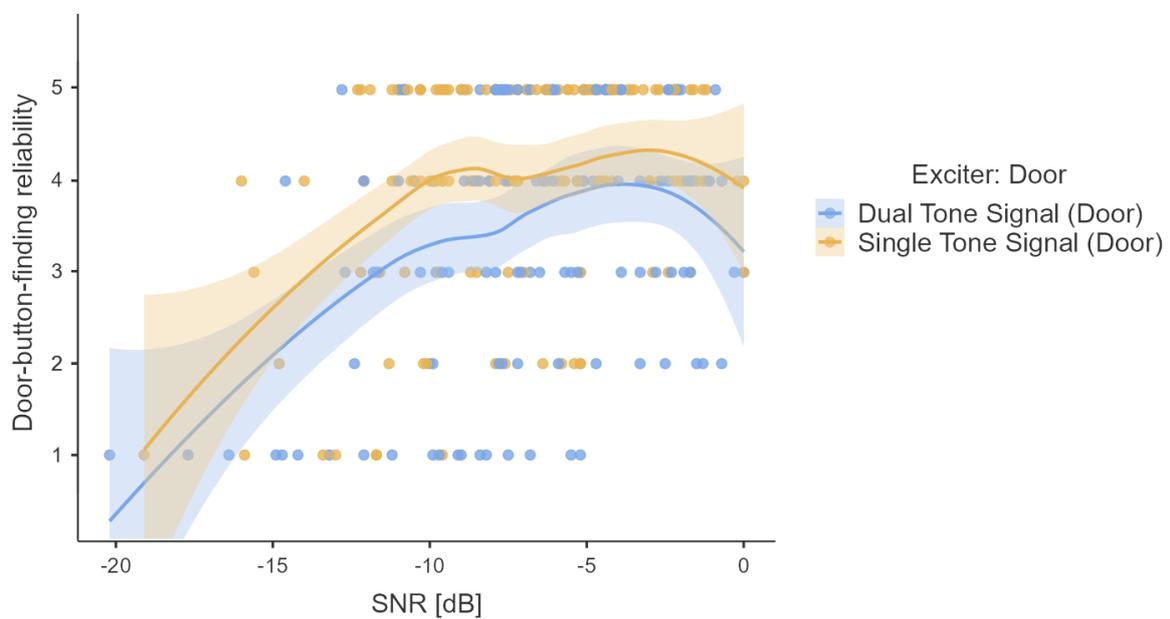


Abbildung 5.19: Auswertung „sicheres Türtasterfinden“, Signalgeber „über Tür“

Die Diagramme für den Signalgeber oberhalb der Tür zeigen ein sehr ähnliches Bild. Wider Erwarten wurden sowohl die Tür als auch der Türtaster in ähnlicher Weise und bei ähnlichen S/N-Verhältnissen aufgefunden. Die Videos zeigten, dass natürlich nach den ersten Versuchsdurchgängen eine gewisse Strategie der Probanden beim Auffinden des Tasters einsetzte. So wurde nach Lokalisation der Tür durch Wischbewegungen der hervorstehende Taster schnell(er) gefunden. Dies ist hier bei der Interpretation zu berücksichtigen.

Nachfolgend sind die Diagramme noch einmal anders zusammengestellt, sodass jeweils für dieselbe Signalart die Position im Taster der Position oberhalb der Tür gegenübergestellt wird.

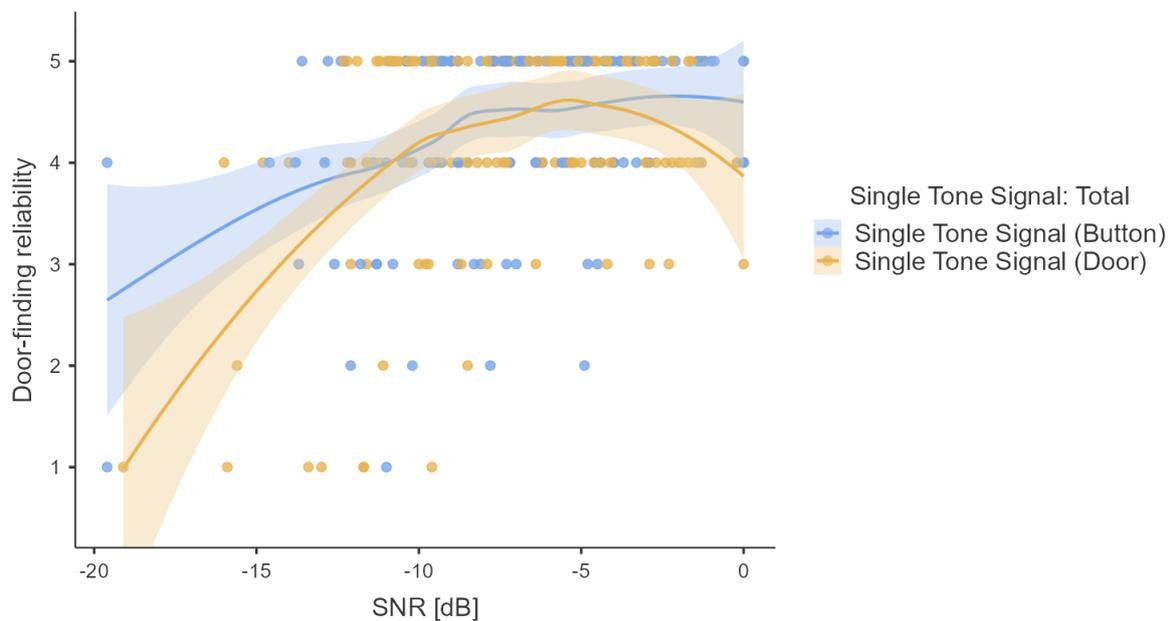


Abbildung 5.20: Auswertung „sicheres Türfinden“, Single Tone alle

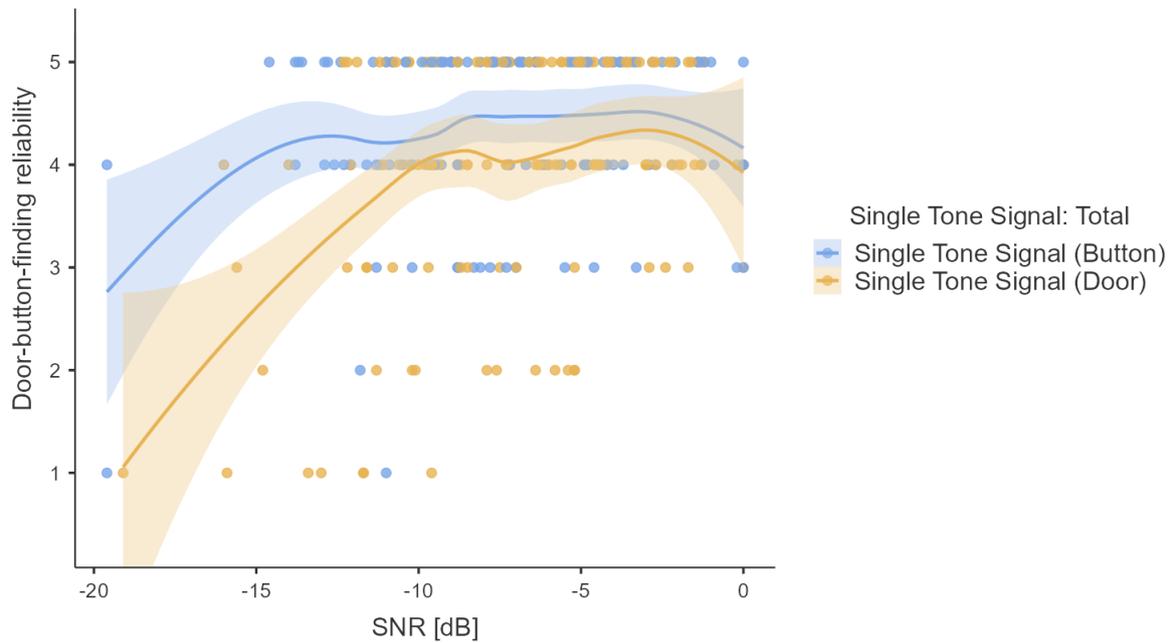


Abbildung 5.21: Auswertung „sicheres Türtasterfinden“, Single Tone alle

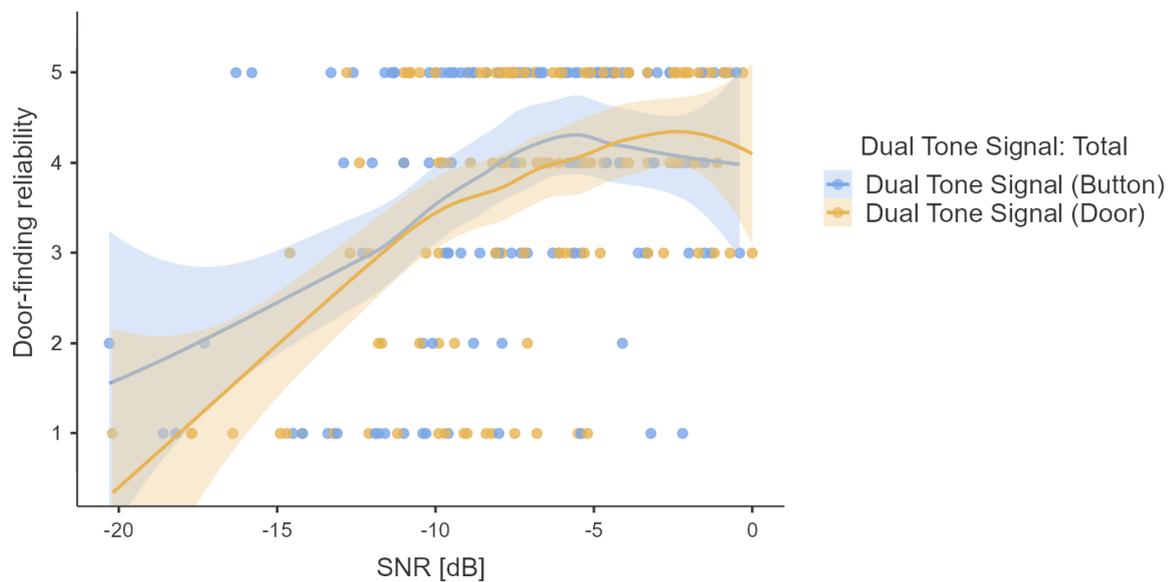


Abbildung 5.22: Auswertung „sicheres Türfinden“, Dual Tone alle

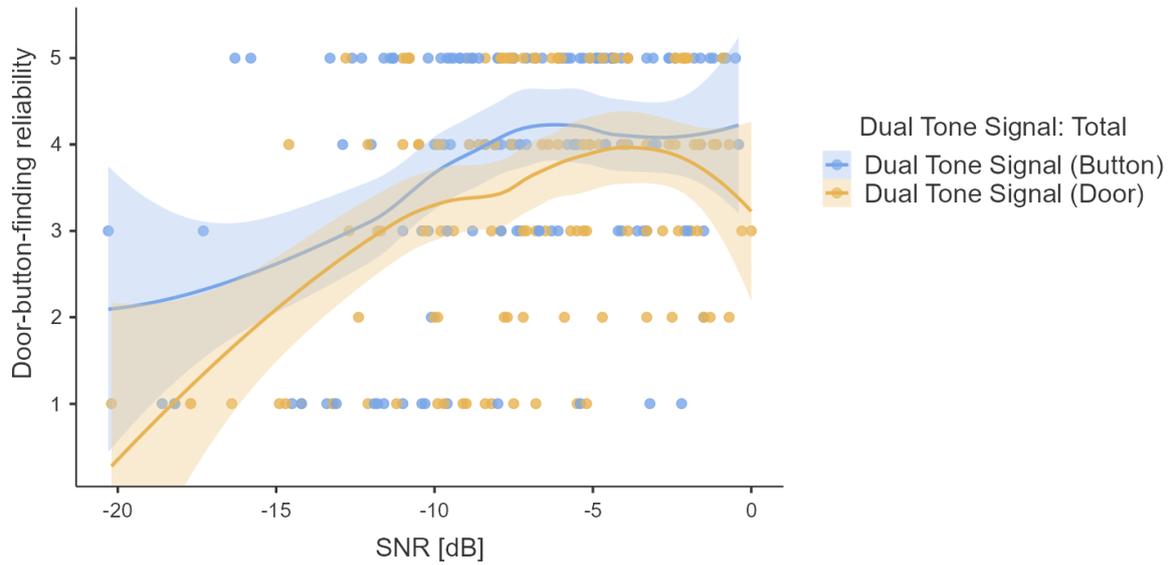


Abbildung 5.23: Auswertung „sicheres Türtasterfinden“, Dual Tone alle

Aus allen diesen Diagrammen bestätigen sich die in der ersten Interpretation gemachten Aussagen.

Nunmehr bleibt die Frage, in welcher Entfernung abhängig vom S/N-Verhältnis die Signale wahrnehmbar sind. Orientierung bildet dabei die 4,5-m-Marke, die als Mitte in dem Bereich von 3 m bis 6 m als wünschenswerte Wahrnehmbarkeitsschwelle angesehen wird. Die Auswertungen hierzu zeigen die folgenden Abbildungen.

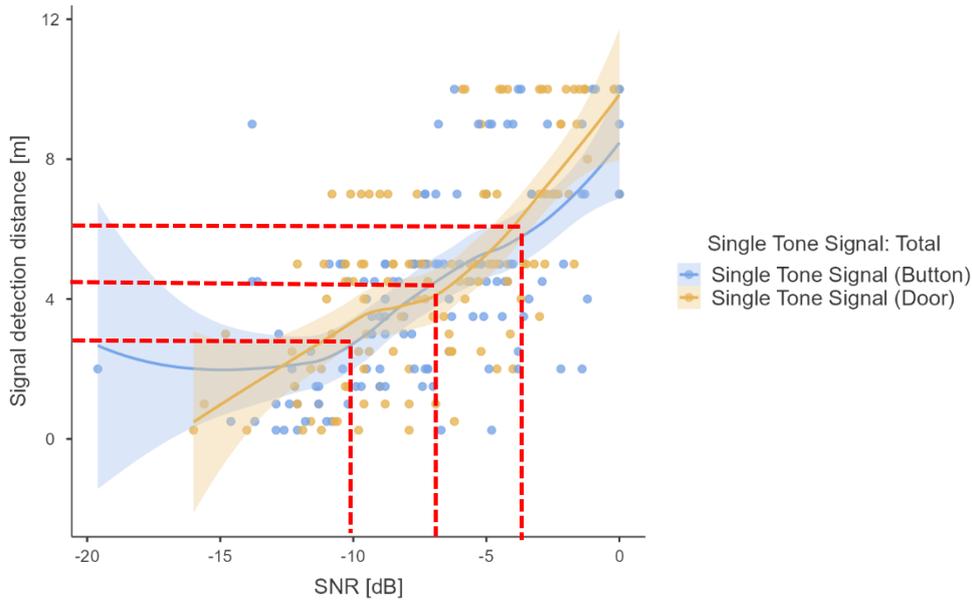


Abbildung 5.24: Auswertung „Detektion Entfernung“, **Single Tone** mit 3 m (S/N \approx -10 dB), 4,5 m (S/N \approx -7 dB) und 6 m-Linie (S/N \approx -4 dB) (rot)

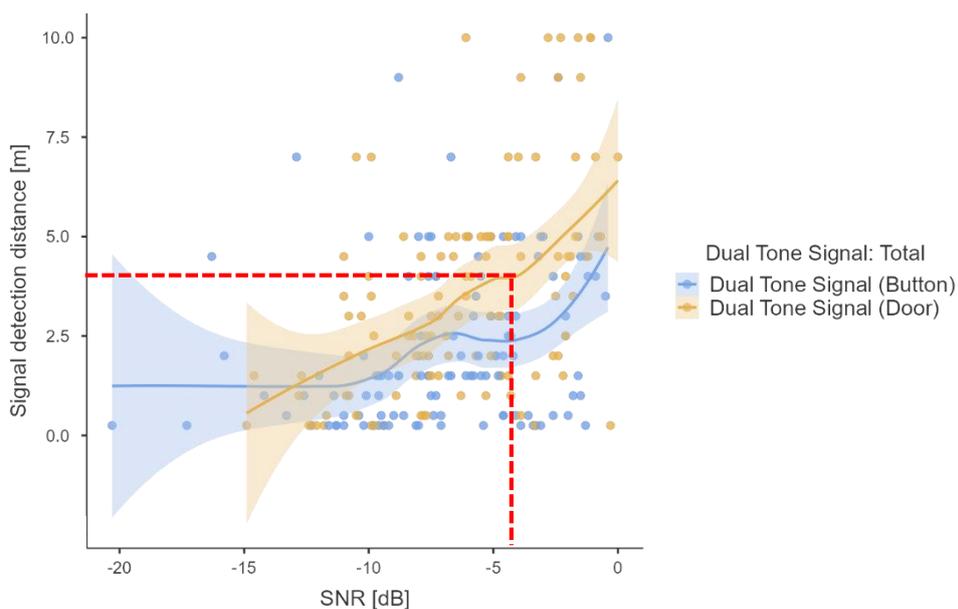


Abbildung 5.25: Auswertung „Detektion Entfernung“, **Dual Tone** mit 4,5 m Linie (rot)

Die Ergebnisse in den Grafiken können wie folgt interpretiert werden:

1. Das Single Tone Signal wird in einem S/N-Bereich von -4 dB bis -10 dB in einer entsprechenden Distanz von 6 m bis 3 m wahrgenommen. Die mittlere Wahrnehmungsdistanz von 4,5 m wird bei einem S/N-Verhältnis von ca. -7 dB erzielt.
2. Für das Single Tone Signal sind die Ergebnisse für Anregung aus dem Türtaster und über der Tür nahezu gleich.
3. Das Dual Tone Signal ist bei gleichen Pegelverhältnissen durchgängig schlechter wahrnehmbar als das Single Tone Signal.
4. Das Dual Tone Signal ist bei Abstrahlung über der Tür in einer größeren Distanz wahrnehmbar als bei Position am Taster (bei jeweils gleichem Pegel).

5.10 Weitere Versuchsergebnisse

In den Versuchspausen wurden verschiedene weitere Hörexperimente mit den sonstigen beim Versuch anwesenden Personen durchgeführt. Die sich schon durch die Probanden abzeichnenden Ergebnisse konnten durch alle Teilnehmer nachempfunden und bestätigt werden. Diese Evidenzversuche mit nicht behinderten Personen bestätigten insbesondere folgende Sachverhalte:

1. Die von den Versuchspersonen ermittelte Hörbarkeit in Abhängigkeit des S/N-Verhältnisses konnte bestätigt werden.
2. Das Dual Tone Signal ist weniger deutlich wahrnehmbar als das Single Tone Signal bei gleichem Pegel L_{AFmax} .
3. Die Position des Signalgebers oberhalb der Tür wurde ebenfalls als gut geeignet für die Auffindung der Tür beurteilt. Die Unterschiede zur Situation mit dem Signalgeber aus dem Türtaster wurden als vergleichsweise gering betrachtet.
4. Die Hörbarkeit der Signale liegt bei einem S/N-Verhältnis von -3 dB bis -6 dB etwa zwischen 10 m und 4 m.
5. Die Wahrnehmungsentfernung wurde insbesondere bei einem S/N-Verhältnis zwischen -3 dB und -6 dB als gut und hinreichend betrachtet.

Die Befragung der Versuchspersonen im Rahmen eines ausführlichen Interviews haben weitere wichtige Aspekte offengelegt:

- Türfindesignale mit Rechtecksignalen sind wegen ihrer größeren „Schärfe“ besser wahrnehmbar als solche basierend auf Sinussignalen.

- Ein Großteil der Sehbehinderten kann sich am Kontrast des Zuges orientieren, was aber nicht bei allen Zügen ausreichend gelingt. Weitgehend blinde Personen können diesen Kontrast auch nicht nutzen.
- Türfindesignale erleichtern und beschleunigen wegen der präziseren Lokalisation eindeutig den Zugeinstieg.
- Türfindesignale bewirken weniger Stress und mehr Selbstständigkeit beim Reisen.
- Türfindesignale aus dem Taster verhindern, dass die gesamte Tür abgetastet werden muss.
- Single Tone Signale werden allgemein als besser wahrnehmbar beurteilt als Dual Tone Signale.
- Dual Tone Signale werden aber als angenehmer und weniger Stress verursachend beurteilt.
- Single Tone Signale mit niedrigerer Taktfrequenz werden gegenüber denen mit höherer Taktfrequenz bevorzugt. Je geringer die Taktrate, desto geringer ist der ausgelöste Stress, da eine höhere Taktrate signalisiert: „Beeil dich, die Tür geht gleich zu.“
- Türen sollten in einer Entfernung von mind. 2 m, besser bis zu 6 m Entfernung hörbar sein.
- Optimalerweise sollte das Türfindesignal einen halben Türabstand weit reichen. So kann sicher immer ein Signal (nächste Tür rechts oder links) detektiert werden.
- Grundsätzlich wird die Aussendung eines Türfindesignals aus dem Taster bevorzugt, wenn gleich die Problematik der Abschirmung besteht. Ggf. ist das Problem der Abschirmung dann geringer, wenn sich Personen vor der Tür befinden, weil dann die Tür bereits „gefunden“ ist.
- Sofern das Türfindesignal von oberhalb der Türe kommt, muss eine zusätzliche senkrechte taktile Hilfe in die Tür eingebaut werden, da sich der Türtaster nicht immer direkt unter dem Signalgeber befindet.
- Wünschenswert wäre die Anbringung von Signalgebern an beiden Stellen. Dann würde der Türtaster in der unmittelbaren Nähe besser gefunden, für etwas weitere Entfernungen jedoch würde eine Abschirmung des tasternen Senders keine Auswirkungen haben.
- Ohne Türfindesignale ist ein Auffinden der Tür nur durch „Entlangstreichen“ am Wagenkasten oder durch Hilfe anderer möglich. Ansonsten ist ein Auffinden nicht möglich.
- Türfindesignale erleichtern nicht nur das Auffinden der Tür, sie nehmen vielmehr auch die Angst, die Tür nicht zu finden (und somit den Zug zu verpassen) und vermindern somit erheblich den Stress beim Reisen.

- Von den Probanden wird erwartet, dass mit Hilfe der Hörversuche ein guter Kompromiss zwischen der Hörbarkeit der Signale und dem Immissionsschutz gefunden wird.

6 Präzisierungsvorschläge für die TSI PRM Anlage G

Zur Präzisierung der Festlegungen zu Türfindesignalen in der TSI PRM Anlage G wurde unter Einbeziehung einer Begleitgruppe eine Studie im Auftrag des Bundesamtes für Verkehr der Schweizerischen Eidgenossenschaft, BAV durchgeführt. Die Begleitgruppe bestand aus folgenden Vertretern:

- Bundesamt für Verkehr der Schweizerischen Eidgenossenschaft, BAV (Auftraggeber)
- Schweizerische Bundesbahnen AG, SBB (Rail Production an Fleet Strategy)
- Deutsche Bahn AG, DB (Innovation, Gremienarbeit und Service Technik Schienenfz., FE.EF 33)
- Deutsche Bahn AG, DB (Kompetenzzentrum Akustik und Erschütterungen, TT.TVE 35)
- EAO AG (Hersteller von Signalgebern, Schweiz)
- TSL-ESCHA GmbH (Hersteller von Signalgebern Deutschland)
- TAC - Technische Akustik (Auftragnehmer)

Die Ergebnisse wurden in der Arbeitsgruppe eingehend diskutiert und hieraus die nachfolgend beschriebenen abgestimmten Empfehlungen erarbeitet. Die werden nachfolgend zusammenfassend dargestellt:

6.1 Begriffsbestimmung

Gemäß Abschnitt 3.4.2 sollten zunächst die Signaldefinitionen präzisiert werden:

L_S = Schalldruckpegel des Signalgebers, gemessen als L_{AFmax} (maximaler mit der Zeitkonstante „Fast“ gemessener „A“-bewerteter Schalldruckpegel)

L_{Smax} = maximaler Signalpegel L_S (gemessen als L_{AFmax})

L_{Smin} = minimaler Signalpegel L_S (gemessen als L_{AFmax})

L_N = Schalldruckpegel des Hintergrundgeräusches, gemessen wie folgt:

6.2 Messung des Störgeräusches

Die Störgeräuscherfassung ist als energetische Summe über 3 Oktaven durchzuführen. Alternativ wurde gezeigt, dass für die meisten Bahnsteiggeräusche auch ein breitbandiger, aber A-bewerteter Summenpegel nahezu gleiche Ergebnisse liefert. Aus technischer Sicht besitzt das Oktavverfahren einen gewissen Vorzug, weil hier für alle Hintergrundgeräuscharten zumindest weitgehend nur diejenigen Frequenzbereiche berücksichtigt werden, die auch zur Maskierung der Türsignale beitragen. In beiden Fällen muss die Signalverarbeitung der Mikrofone, die die Störgeräuschsituation erfassen, eine entsprechende Frequenzfilterung durchführen.

Eine wesentliche Verbesserung der Lesbarkeit und des Verständnisses der Anlage G ist dann gegeben, wenn zwischen der Signaldefinition, der Erfassung von Störgeräuschen beim Betrieb und der Erfassung von Störgeräuschen bei der Typprüfung oder Zulassung unterschieden wird.

6.2.1 Signaldefinition und Messung des Störgeräusches im Betrieb

Demnach können alternativ folgende Präzisierungen vorgenommen werden:

b.) Ähnlich wie bereits in TSI PRM Anlage G festgelegt:

L_N = Pegel des Umgebungsgeräusches (Noise)

L_N wird aus der energetischen Summe dreier Oktavbänder wie folgt gebildet:

$$L_N = 10 \cdot \log_{10} \sum \left(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} + 10^{\frac{L_3}{10}} \right)$$

$$L_1 = L_{oct,500Hz}$$

$$L_2 = L_{oct,1000Hz}$$

$$L_3 = L_{oct,2000Hz}$$

L_N wird zeitlich als energieäquivalenter Dauerschallpegel über einer Zeitdauer T ermittelt:

$$L_N = L_{eq,T}$$

Die Messung des Störgeräusches am Bahnsteig erfolgt unmittelbar vor der Aussendung des Türfindesignals und dann fortlaufend in den jeweiligen Signalpausen des Türfindesignals wie folgt:

Für das Single Tone Signal sind die Einzelmessungen in jeder Signalpause über eine Zeitdauer von min. 200 ms durchzuführen. Die Einzelmessungen für das Dual Tone Signal sind jeweils innerhalb einer Signalperiode in der langen Signalpause über eine Länge von mind. 800 ms durchzuführen.

Aus den Einzelmessungen ist ein sich über 5 s erstreckender, gleitender energetischer Mittelwert zu bilden. Für den gleitenden Mittelwert sind alle fortlaufenden Einzelmessungen zu mitteln, wobei alle Messungen, die jeweils zeitlich länger als 5 s zurückliegen aus der Berechnung entfernt werden.

Anmerkung: Bei der Erfassung des Hintergrundgeräusches mit einem Mikrofon an der Tür ist der dort auftretende Pegel aufgrund der Reflexion an der Grenzfläche 3 dB höher als am Referenzpunkt.

6.2.2 Messung des Störgeräusches am Fahrzeug

Es ist zu entscheiden, ob in der TSI PRM Anlage G auch Aussagen zu Messungen am Fahrzeug gemacht werden sollen. Es empfiehlt sich in jedem Fall, folgende Hinweise und Vorschläge zu berücksichtigen.

Bei der Messung am Fahrzeug muss ein künstliches Hintergrundgeräusch erzeugt werden. Hierzu eignet sich als Ersatzquelle der Einsatz von rosa Rauschen. Hier ist nun sicherzustellen, dass der Signalpegel am Referenzpunkt bestimmt wird, der Störgeräuschpegel wird aber an der Zugtür über das eingebaute Mikrofon ermittelt. Der an der Zugtür ermittelte Geräuschpegel muss parallel mit einem geeigneten Schallpegelmessgerät erfasst werden (Vergleichsmessung). Das Hintergrundgeräusch, das mithilfe eines rosa Rauschens erzeugt wird, wird so direkt an der Tür bestimmt. Der Ort der Schallquelle ist so zu wählen, dass der Pegelunterschied zwischen dem Referenzpunkt und dem Messpunkt an der Tür (unter Berücksichtigung der Grenzflächensituation) vernachlässigbar (typ. $\Delta L < 1\text{dB}$) ist.

Achtung: Bei der Erfassung des Hintergrundgeräusches mit einem Mikrofon an der Tür ist der dort auftretende Pegel aufgrund der Reflexion an der Grenzfläche 3 dB höher als am Referenzpunkt. Dies ist bei der Festlegung eines Messverfahrens für Messungen am Fahrzeug zu berücksichtigen.

Bei der Durchführung der Messung am Fahrzeug sollte die Mittelungszeit mindestens $T = 20\text{ s}$ betragen.

6.3 Festlegung der Signalpegel und des S/N Verhältnisses

- f.) Aus den Untersuchungen geht hervor, dass ein fester Signalpegel für die Türfindesignale in Bezug auf den zu erzielenden Kompromiss zwischen Hörbarkeit und übermäßiger Schallemission **keine adäquate Lösung** darstellt.

Es wird daher vorgeschlagen, Türfindesignale verpflichtend als adaptive Signale auszuführen.

- g.) Wegen der besseren Hörbarkeit sollte die Signalform verpflichtend rechteckförmig und nicht sinusförmig sein.
- h.) Aufgrund der Rückmeldung der Versuchspersonen sollte das Single Tone Signal mit einer möglichst niedrigen Taktrate abgestrahlt werden.

Daher sollte die Anzahl der Impulse von vormals 3 bis 5 je Sekunde auf 3 bis 4 je Sekunde verringert werden.

- i.) Als Kompromiss zwischen der Hörbarkeit in einer akzeptablen Entfernung und somit dem sicheren Auffinden der Tür und dem Schallimmissionsschutz ist für das **Single Tone Signal**

ein **S/N-Verhältnis von -6 dB** zu realisieren. Wegen der schlechteren Wahrnehmbarkeit des **Dual Tone Signals** gegenüber dem Single Tone Signal ist hier ein **S/N-Verhältnis von -3 dB** zu empfehlen.

Zudem ist es wichtig darauf zu achten, dass die Signale nicht in zu weiter Entfernung (typ. >6 m) hörbar sind, weil ansonsten Verwechslungen und Fehlortungen in Bezug auf Züge entstehen könnten, die auf dem gegenüberliegenden Bahnsteig stehen und ebenfalls Türfindesignale aussenden.

Bei einer ausschließlichen Realisierung von adaptiven Signalen sind auch die Belange des Immissionsschutzes sicher erfüllt, dass die durch die Türen emittierten Türfinde-Geräuschanteile ohnehin ab einer Entfernung >10 m sicher im Hintergrundgeräusch untergehen und somit die Nachbarschaft nicht mehr stören können.

- j.) Wie in Abschnitt 5 mit den Statistiken über Bahnsteiggeräusche gezeigt, wurde für sicherheitstechnische Belange bei der Festlegung von Pegeln für die Sicherheitsalarmierung über die Beschallungsanlage der L_{AF10} , der für die meisten Situationen ca. 75 dB beträgt, als Grundlage gewählt. Da es sich bei Türfindesignalen nicht um Sicherheitssignale im engeren Sinne handelt, wird empfohlen die Forderung abzuschwächen und den Perzentilpegel L_{AF20} , der typischerweise ca. 70 dB beträgt, heranzuziehen. Mit einem ausreichenden S/N-Verhältnis von -3 dB oder -6 dB ergäbe sich so ein Maximalpegel von ca. $L_{AFmax} = 67$ dB bzw. $L_{AFmax} = 64$ dB.

G. 3.1. Single Tone Signale

Merkmal	<p>Tonintervall (Rechteck), kein Ein- und Ausblenden</p> <p>Impulsart Rechteck (keine sinusförmigen Impulse)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Signalimpulsdauer = 5 ms ± 1ms „an“ (Tonimpuls) - Signalzeitdauer von 3 bis 4 Impulsen pro Sekunde
Grundfrequenz	<ul style="list-style-type: none"> - $f_{signal} = 630 \text{ Hz} \pm 50 \text{ Hz}$
Schalldruckpegel	<ul style="list-style-type: none"> - $L_S \geq L_N - 6 \text{ dB}$ - $L_{S \min} = 40 \text{ dB} \pm 2 \text{ dB}$ - $L_{S \max} = 67 \text{ dB} \pm 2 \text{ dB}$

G. 3.1. Dual Tone Signale

Merkmal	<i>mit Ergänzung Signalform „Rechteck“ (nicht sinusförmig)</i>
Frequenz	<i>ohne Änderung</i>
Schalldruckpegel	<ul style="list-style-type: none"> - $L_S \geq L_N - 3 \text{ dB}$ - $L_{S \min} = 45 \text{ dB} \pm 2 \text{ dB}$ - $L_{S \max} = 70 \text{ dB} \pm 2 \text{ dB}$

Der hier vorgeschlagene Dynamikumfang von 25 dB ist aus akustischer Sicht sachgerecht. Es ist jedoch mit den Herstellern der Signalgeber abzusprechen, inwieweit eine solche Dynamik in die Elektronik implementierbar ist.

Es ist wichtig anzumerken, dass bei Änderungen selbst bei herrschenden S/N-Verhältnissen $< 6 \text{ dB}$ (bis ca. -10 dB) die Tür immer noch sicher gefunden werden kann. Es verringert sich hier „lediglich“ die Entfernung zur Tür (ca. 3m), ab der das Signal dann gehört und somit als akustische Leitinformation dienen kann.

6.4 Zusätzliche Festlegungen

Eine weitere für die Gesamtbetrachtung wichtige Frage für die Festlegung der Signalpegel ist auch die Platzierung des Signalgebers. Wird dieser oben an der Tür angebracht, ist der Einbau größerer und leistungsstärkerer Schallsender viel einfacher möglich. Dies sollte ebenfalls Berücksichtigung finden.

Aus den Versuchen und den Befragungen der Sehbehinderten geht hervor, dass ein Signalgeber für Türfindesignale auch oberhalb der Tür angebracht werden kann. Gleiche oder ähnliche Sicherheit für das Auffinden des Tasters erscheint aber nur dann gegeben, wenn eine zusätzliche taktile Hilfe z.B. in Form einer Gummilippe (Blindentaststreifen) o.ä. angebracht wird. Beispiele hierfür sind in nachfolgenden Abbildungen zu sehen.



Abbildung 6.1 a-b: Ansicht einer Zugtür mit taktiler Hilfe (Blindentaststreifen)

Nicht zuletzt müssen auch die Inhalte des Abschnittes 4.2.2.3.2 „Außentüren“ der Durchführungsverordnung [6] wie folgt angepasst werden:

- (10) Die Schallquelle von Türsignalen muss sich entweder oberhalb der Tür in der Mitte der Türöffnung oder in der Nähe der Bedienelemente der Tür befinden.
- Sofern keine Bedienelemente vorhanden sind und die Schallquelle nicht oberhalb der Tür angebracht werden soll, muss sich die Schallquelle von Türsignalen neben der Türöffnung befinden.
- Wird eine separate Schallquelle für das Türschließsignal verwendet, so kann es sich entweder in der Nähe des Bedienelementes oder neben der Türöffnung befinden.
- Ist ein externes Türsignal vorhanden, so muss sich auch dessen Schallquelle entweder in der Nähe des Bedienelementes neben der Türöffnung oder oberhalb der Tür mittig zur Türöffnung befinden. Wird die Schallquelle oberhalb der Tür angebracht, ist eine zusätzliche taktile Hilfe (Blindentaststreifen) zum Auffinden des Türtasters in die Tür zu integrieren. Die taktile Hilfe muss sowohl oberhalb als auch unterhalb des Türtasters mit ausreichender Länge angebracht sein. Der Kontrast zum Hintergrund gem. EN 16584-1 ist dabei zu beachten.

Weiterhin ist zu prüfen, an welcher Stelle der TSI PRM folgende Ergänzung eingefügt wird.

Türsignale dürfen nicht gleichzeitig mit Türöffnungs- und Tür-Schließsignalen ausgesendet werden.

Grevenbroich, den 06.12.2023



Prof. Dr.-Ing. Alfred Schmitz



Prof. Dr.-Ing. Anselm Goertz



Nicolas Sünn, B.Eng.



Daniel Labuda

Normen, Richtlinien und verwendete Unterlagen

- [1] Appendix G TSI PRM 2023
Technical Specifications for Interoperability: Persons with reduced Mobility
- [2] DIN EN 14752:2022-03
Bahnanwendungen - Seiteneinstiegssysteme für Schienenfahrzeuge; Deutsche Fassung
EN 14752:2019+A1:2021
- [3] DIN EN 17285:2021-12
Bahnanwendung - Akustik - Messung akustischer Türsignale; Deutsche Fassung
EN 17285:2020
- [4] DIN EN 16584-2:2022-06 - Entwurf
Bahnanwendungen - Gestaltung für die Nutzung durch PRM - Allgemeine Anforderungen -
Teil 2: Informationen; Deutsche und Englische Fassung prEN 16584-2:2022
- [5] DIN EN 61672-1:2014-07
Elektroakustik - Schallpegelmesser - Teil 1: Anforderungen (IEC 61672-1:2013); Deutsche
Fassung EN 61672-1:2013
- [6] Durchführungsverordnung (EU) 2023/1694 der Kommission vom 10. August 2023, veröf-
fentlicht im Amtsblatt der europäischen Union am 08.09.2023
- [7] DIN ISO 226:2006-04
Akustik - Normalkurven gleicher Lautstärkepegel (ISO 226:2003)
- [8] Psychoacoustics – Facts and Models, Hugo Fastl; Eberhard Zwicker
Springer Verlag, 3th Edition
- [9] Beschallung auf Bahnsteigen
Leitfaden Akustik
DB-Station&Service AG, Version 1.0, 16.09.2021
- [10] ISO 1996-2:2017-07
Akustik - Beschreibung, Beurteilung und Messung von Umweltlärm -
Teil 2: Bestimmung des Umgebungslärmpegels
- [11] Abstände auf Perrons
Gefahrenbereiche- Sicherer Bereich
Forschungsbericht 2011, BAV Schweiz
- [12] Berechnung des Beurteilungspegels für Schienenfahrzeuge (Schall 03)
Deutscher Bundestag Drucksache 18/1280
- [13] Erläuterungsbericht zur Anlage 2 der 16.BImSchV
Berechnung des Beurteilungspegels für Schienenfahrzeuge (Schall 03)
Teil 1: Erläuterungsbericht
- [14] Laute Türsignale in Zügen verwirrende Blinde
Kassensturz Espresso, 24.04.2023

Anhang A.1 Datenblatt des Schallsenders Visaton PL 7 RV



PL 7 RV

Art. No. 4477 (NCS S 3000-N) – 4 Ω

Art. No. 4474 (NCS S 3000-N) – 8 Ω



Art. No. 4489



Technische Daten / Technical Data

Nennbelastbarkeit Rated power	10 W
Impedanz Impedance	4 Ω / 8 Ω
Übertragungsbereich (-10 dB) Frequency response (-10 dB)	400-5000 Hz
Mittlerer Schalldruckpegel Mean sound pressure level	88 dB (1 W/1 m)
Resonanzfrequenz Resonant	550 Hz
Einbauöffnung Cutout diameter	64,5 mm
max. Wandstärke max. thickness panel	7,5 mm
Kabelänge Length of cable	0,6 m
Gewicht netto Net weight	0,160 kg
Farben Colours	NCS S 3000-N (grau / grey)

7 cm (2,5") Einbaulautsprecher mit Gewinding am Kunststoffgehäuse zur einfachen Montage in einer kreisrunden Öffnung ohne zusätzliche Schrauben. Hoher Wirkungsgrad im sprachrelevanten Frequenzbereich. Inklusive 60 cm Kabel.

Anwendungsmöglichkeiten

- Armaturenbretter, Tür- oder andere Verkleidungen in Fahrzeugen

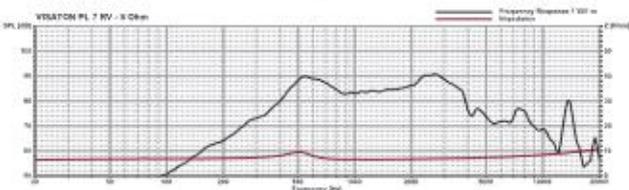
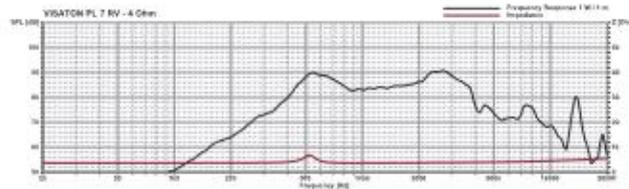
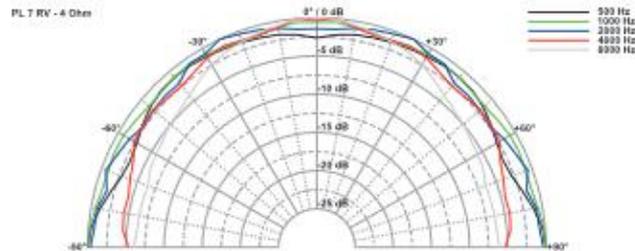
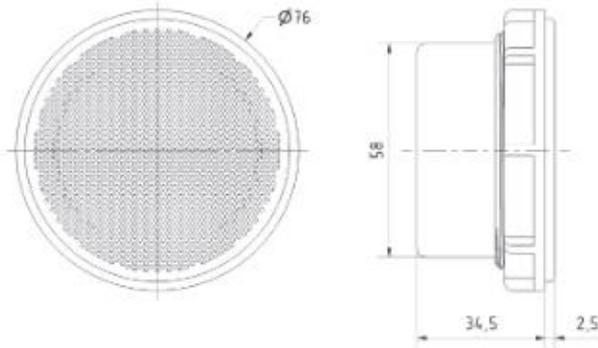
Zubehör: Distanzring DR PL 7 RV (NCS S 3000-N) (Art. No. 4489)

7 cm (2.5") flush-mounted speaker with a threaded mounting ring at the plastic housing for easy installation in round openings without additional screws. High efficiency at frequencies relevant for speech reproduction. Including 60 cm cable.

Typical applications

- Dashboards, door panels or other panels in vehicles

Accessories: Spacer ring DR PL 7 RV (NCS S 3000-N) (Art. No. 4489)



Anhang A.2 Datenblatt Radian 5208C

5208C 8" Coaxial driver



- designed for high SPL applications where precise 100° conical coverage in a very compact coaxial system is required
- ideal for high performance pro sound applications and surround systems in small cinema rooms for immersive digital audio formats
- Radian proprietary Aluminum alloy diaphragm with highest tensile strength to weight ratio and fatigue resistance
- dual magnet design with independent magnetic gaps eliminates flux modulation and dramatically reduces intermodulation distortion in HF range
- 500 W continuous program power
- maximum power, edge-wound ribbon copper clad aluminum voice coil on fiberglass former
- extended to 25kHz frequency range
- high transparency and resolution
- optional premium XO
- optional matching 70V transformers

SPECIFICATIONS GENERAL/LF

Nominal diameter	8"/205mm
Rated impedance	8 Ω
Power handling ¹	250 W
Continuous program power ²	500 W
Sensitivity ³	95 dB
Effective frequency range ⁴	60 Hz – 25 kHz
Coverage angle ⁵	100° conical
Recommended max. XO frequency	2.0 kHz
Minimum impedance	7.2 Ω
Cone material	Paper/Kevlar composite
Voice coil diameter	51 mm (2")
Voice coil winding	edge wound ribbon
Voice coil wire	copper clad Aluminum
Voice coil former	Fiberglass
Displacement limit for VC	14 mm
Voice coil winding height	11mm
Magnetic gap height	8 mm
Suspension	M-roll, Poly-cotton
Magnet	Ferrite ring
Frame	Cast Aluminum

Thiele-Small parameters

Fs	90 Hz
Sd	221.0 cm ²
Re	5.9 Ω
Qms	6.8
Qes	0.66
Qts	0.61
Vas	10.8 dm ³ (L)
Cms	0.155 mm/N
Mms	19.9 g
BL	10.1 N/A
Le	0.7 mH
Xmax ⁶	3.5 mm

SPECIFICATIONS HF

Nominal exit diameter	1"
Rated impedance	16 Ω (8 Ω optional)
Power handling ¹	40 W
Continuous program power ²	80 W
Sensitivity ³	105 dB
Effective frequency range ⁴	800 Hz – 25 kHz
Min. XO frequency (12 dB/oct.)	1.2kHz
Dome/surround material	Aluminum alloy/polymer
Voice coil diameter	44 mm (1.5")
Voice coil winding	edge wound ribbon
Voice coil wire	Aluminum
Magnet	Ferrite ring