

Sprachverständlichkeit unter Einfluss von Störgeräuschen im Öffentlichen Personen-Verkehr (ÖPV)

Grundlegende Gedanken
zu weiteren Forschungsaufgaben

Die wesentlichen Überlegungen
stammen bereits von 1998,
dann nochmals von 2007
und jetzt von 2023/24

Zusammenfassung
des bisherigen Standes

Stand 2024-06-04

Einleitung / Vorgeschichte

Bereits im Jahr 1996 hat der Verfasser damit begonnen, sich um die akustisch-baulichen Belange von Menschen mit Hörschädigungen zu kümmern. Im Laufe der Zeit wurde aber bekannt, dass nicht nur dieser Personenkreis (immerhin mehr als 16 % der Bevölkerung) Schwierigkeiten damit haben, Sprache zu verstehen. Eigentlich betrifft es – je nach Situation – alle Menschen. Das Sprachverstehen wird nämlich auch durch Störgeräusche und zu lange Nachhallzeit beeinträchtigt, ebenso durch Informationen in einer fremden oder zumindest nicht gut geläufigen Sprache für Menschen mit internationaler Herkunft, seien es Touristen oder Zugewanderte, und schließlich auch durch komplexe Nachrichten mit unbekanntem Wörtern und einem nicht bekannten Kontext. Wer kann von sich behaupten, in keiner dieser Situationen vor Versteh-Barrieren zu stehen? Die Sprachverständlichkeit bei Einwirkung von Störgeräuschen ist darüber hinaus insbesondere (wegen des 2-Sinne-Prinzips) auch ein wichtiges Thema der sehgeschädigten und blinden Menschen. Deshalb hat sich die „akustische Barrierefreiheit für Hörgeschädigte“ in den letzten Jahren gewandelt zu „akustische Barrierefreiheit für Menschen mit Versteh-Schwierigkeiten“.

Bereits kurz nach Beginn dieser Arbeit die sich zunächst auf Gebäude und Räume bezog, wurde häufig und eindringlich darauf hingewiesen, wie schwierig das Verstehen von Ansagen in Verkehrsmitteln des öffentlichen Personenverkehrs (ÖPV) ist. Deshalb wurde 1997/98 eine Liste begonnen, in welcher versucht wurde, alle Einflussgrößen und möglicherweise bestehende Abhilfemöglichkeiten zu erfassen und in einer sinnvollen Reihenfolge (von der Quelle/Sprecher:in bis zur Senke/Zuhörer:in) darzustellen.

Die Kette für die Übertragung von Sprachsignalen zu einem Hörer besteht prinzipiell aus folgenden Gliedern:

1. Spracherzeugung
2. Sprachaufnahme und Sprachspeicherung
3. Sprachübertragung in das Fahrzeug
4. Verstärkung (und ggfs. Frequenzgangbearbeitung) im Fahrzeug
5. Sprachabstrahlung von den Lautsprechern
6. akustisches Umfeld auf der Hörerseite (Raumakustik / Störgeräusche)
7. Hör- und Verstehfähigkeit der „Adressaten“

Diese Aufzählung wurde während der DAGA 1998 mit Prof. Hugo Fastl vom Institut für Mensch-Maschine-Kommunikation an der TU München, anlässlich einer Busfahrt von Zürich zum Firmensitz des Hörgeräte-Herstellers Phonak in Stäfa erörtert. Fastl entgegnete, diese Liste sei so umfangreich, das könne man in einem Forschungsvorhaben gar nicht bearbeiten.

Wie bereits erwähnt fand diese Erörterung in einem Bus statt. Auch hier war damals die Sprachverständlichkeit sicher nicht optimal, zumal auch auf benachbarten Plätzen Unterhaltungen stattfanden. Damals wurde verstanden, diese Liste sei zu umfangreich um sie in einem FORSCHUNGSVORHABEN zu bearbeiten. Möglicherweise hat Fastl aber gesagt, sie sei zu umfangreich, um sie in EINEM Forschungsvorhaben zu bearbeiten. Verstanden wurde die erste Aussage und so hat diese Liste neun Jahre lang geruht, bis sie 2007 für die vom damaligen BMVBS beauftragte Untersuchung „Barrierefreiheit im öffentlichen Raum für Seh- und Hörgeschädigte“ überarbeitet und etwas ergänzt wurde. Auch das hatte aber zunächst keine weiteren Folgen.

Die Zusammenstellung im ANHANG kann wie ein Inhaltsverzeichnis der zu bearbeitenden Teilaspekte betrachtet werden. Auch einige „Antworten“ zu den Fragestellungen sind dort bereits eingetragen. Sie sind aber bisher nicht mehr als (durchaus begründete) Vermutungen „aus dem Bauch heraus“, die noch wissenschaftlich abgesichert werden müssen.

Bei der Beurteilung der Qualität einer Sprachübertragungsanlage nach DIN EN IEC 60268-16:2021-10, Elektroakustische Geräte, Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex (Speech-Transmission-Index, STI) werden typischerweise nur die Abstrahlung des Messsignals und die Beeinflussung durch die Raumakustik untersucht. Dazu wird ein synthetisches „sprachmoduliertes“ Rauschen in den Verstärker eingespeist und das vom Lautsprecher abgestrahlte Signal am Hörerort gemessen. Das direkte STI-Verfahren wendet Prüfsignale an, die ähnliche spektrale und temporale Eigenschaften haben, wie sie in der natürlichen Sprache zu finden sind. STI-Prüfsignale bestehen aus einer Reihe von Rausch-Frequenzbändern, deren Intensität moduliert wird. Das heute weitgehend übliche STI-PA-Verfahren bezieht sich ausschließlich auf die männliche Stimme.

Die STI-Messung erfolgt ohne gleichzeitige Störgeräusche. Weil letztere aber die Sprachverständlichkeit maßgeblich beeinträchtigen können, werden sie anschließend rechnerisch berücksichtigt.

Die Spracherzeugung, Sprachaufnahme und Sprachspeicherung, Sprachübertragung in das Fahrzeug und auch die Hör- und Verstehfähigkeit der „Adressaten“ bleiben bei solchen Messungen völlig unberücksichtigt. Auch hier sind aber ganz maßgebliche Einflüsse möglich.

Die Norm zur Messung und Bewertung der Sprachverständlichkeit DIN EN IEC 60268-16:2021 unterscheidet zwischen „komplexen Nachrichten mit unbekanntem Wörtern“ ($STI_{soll} \geq 0,64$) bis herab zu „einfachen Nachrichten mit bekannten Wörtern“ ($STI_{soll} \geq 0,44$). Bei öffentlichen Verkehrsmitteln darf man keinesfalls davon ausgehen, dass allen Fahrgästen die Stationsnamen bekannt und geläufig sind (auswärtige Fahrgäste) und außerdem muss auch bei „Sonderansagen“ mit unbekanntem Texten die Information der Fahrgäste sichergestellt sein (z. B. bei Gefahr für Leib und Leben). Deshalb sollte in den Fahrzeugen der $STI_{soll} \geq 0,64$ – auch bei Anwesenheit von Störgeräuschen – nicht unterschritten werden.

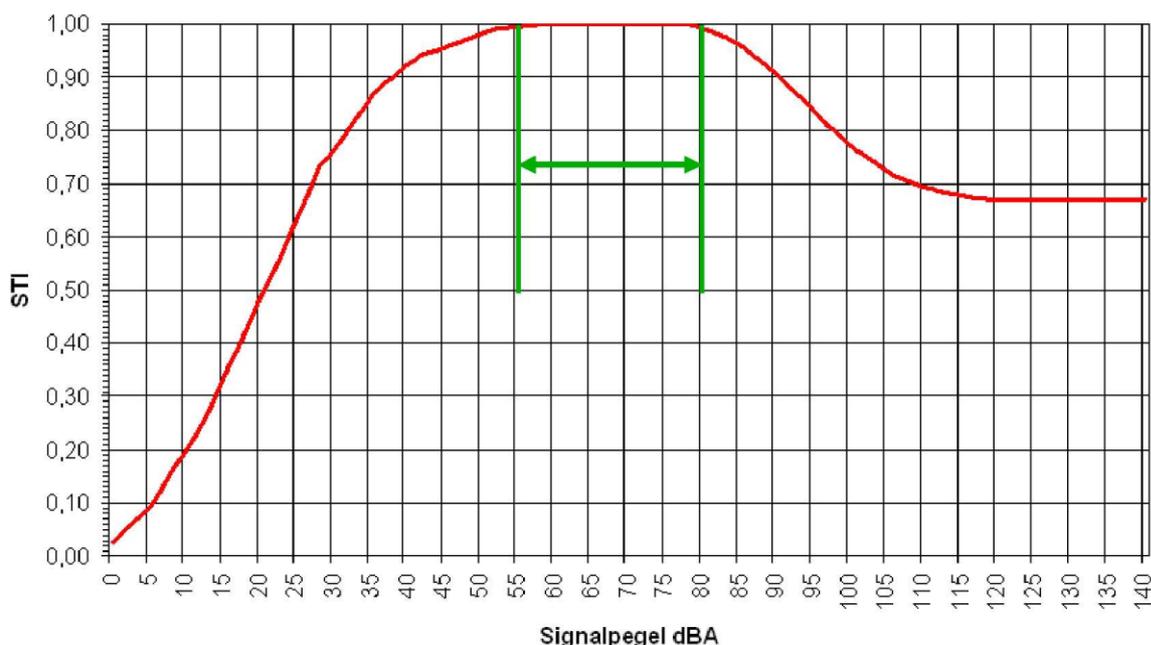


Abbildung 1: Abhängigkeit des maximal erreichbaren Sprachübertragungsindex STI vom Sprachschallpegel

Ausführliche Untersuchungen belegen, dass die Sprachverständlichkeit nicht generell mit der „Lautstärke“ (dem Schallpegel) ansteigt. Entsprechend der Grafik in **Abbildung 1** kann ein $STI=1,0$ nur im Pegelbereich

zwischen etwa 55 dB(A) und 80 dB(A) erreicht werden. Bei niedrigeren Pegeln kann nicht die gesamte Dynamik der Sprache für die Erkennung genutzt werden und bei höheren Pegeln entstehen durch die Nichtlinearität des Gehörs Artefakte, welche die Verständlichkeit beeinträchtigen. Dieser Zusammenhang gilt nur, wenn keine Störgeräusche vorliegen.

Die Mittelwerte der bisher aufgenommenen Sprachansagen lauten:

- DT4, Sprachansage Stationen (Sprecherin) ca. 71 dB(A)
- DT4, Sprachansage Leitstelle ca. 69 dB(A)

In S-Bahnen und Bussen konnten bisher keine Ansagen gemessen werden. Die einzelnen Ansagen sind dafür zu kurz.

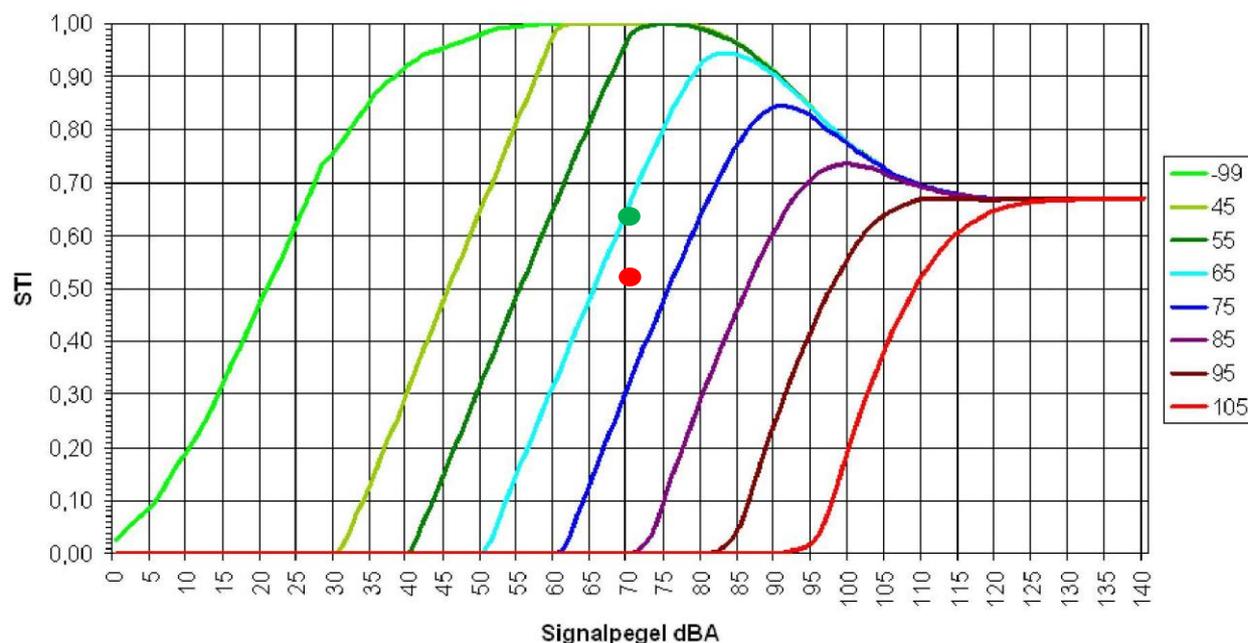


Abbildung 2: Abhängigkeit des maximal erreichbaren Sprachübertragungsindex STI vom Sprachschallpegel bei Störgeräuschen

In der **Abbildung 2** ist dargestellt, welcher STI unter verschiedenen Störgeräuschpegeln und Sprachsignalpegeln bestenfalls erreicht werden kann, wenn die gesamte elektroakustische Übertragungskette mangelfrei ist. Danach ist das vom menschlichen Gehör vorgegebene Optimum nach **Abbildung 1** nur dann erreichbar, wenn der Sprachsignalpegel um mindestens 15 dB lauter ist als der gleichzeitig vorhandene Störgeräuschpegel, der Signal-Rausch-Abstand also $SNR \geq 15$ dB ist (SNR: signal to noise ratio).

Erst 2023 wurde im Normenausschuss von DIN 18040 Barrierefreies Bauen erörtert, ob der in der Normfassung von 2010 festgelegte Signal-Rausch-Abstand von $SNR \geq 10$ dB ausreichend ist, oder ob ein höherer Wert gefordert werden muss. In diesem Zusammenhang wurde ein Mitarbeiter der Kasseler Verkehrsgesellschaft (KVG) auf diese alte Zusammenstellung aufmerksam und war daran interessiert, diese Untersuchungen zu unterstützen. Äußerer Anlass ist, dass sich bei der KVG derzeit die Fahrgast-Beschwerden über eine schlechte Sprachverständlichkeit häufen, nachdem in den neu beschafften Bussen die Lautsprecher hinter Abdeckungen ohne Schalllöcher eingebaut sind.

Bisher gibt es nur eine ideelle Unterstützung der KVG, aber noch keine weiteren Verkehrsunternehmen, welche sich offiziell für diese Fragestellung interessieren und möglicherweise auch an einer Finanzierung der Forschungen mitwirken. Ebenso sind bisher noch keine Forschungsinstitute zur Bearbeitung von Teilprojekten beteiligt.

Auf eigene Initiative erfolgten bisher umfangreiche Schallpegelmessungen in Fahrzeugen des Hamburger Verkehrsverbundes (HVV), um die Spannweite der Störgeräusche sowohl hinsichtlich der Pegel als auch der Frequenzbereiche zu erfassen. Dabei konnten verschiedentlich auch Ansagen in den Fahrzeugen aufgenommen werden. Alle Ergebnisse sind bisher zufällige Messungen während normaler Fahrten mit Fahrgästen, keine gezielten Sonderfahrten.

Zu den Sprachaufnahmen im Bereich der Hamburger Hochbahn AG (HHA) wurden etliche Auskünfte erteilt, die Sprecherkabine besichtigt und Fragen zur Sprachsignal-Aufnahme, -Speicherung und Übertragung in die Fahrzeuge erörtert.

Falls sich die Gesamt-Bearbeitung weitere 25 Jahre hinziehen sollte, besteht die Gefahr, dass die bisherigen Erkenntnisse in der Zwischenzeit wieder verloren gehen. Deshalb werden im Folgenden die bisher gewonnenen Ergebnisse beschrieben und einer ersten Bewertung unterzogen.

Schallmessungen

Mit (bisher vorwiegend ideeller) Unterstützung durch die Hamburger Hochbahn AG (HHA) im Hamburger Verkehrs-Verbund (HVV) und die Kasseler Verkehrsgesellschaft (KVG) wurde damit begonnen, die Störgeräusche in den Fahrzeugen, im Wesentlichen Fahrgeräusche, zu erfassen. Die Messungen, bisher an fünf Tagen, begannen mit dem Erwerb einer Tageskarte für den Bereich AB (Großraum Hamburg) und wurden dann in den unterschiedlichen Fahrzeugtypen mit einem stetigen Wechsel der Verkehrsmittel (U-Bahnen DT4 und DT5, S-Bahnen 474 und 490, Busse mit Diesel- und Elektroantrieb) durchgeführt. AKN und Hafenfähren wurden bisher noch nicht erfasst.

Das U-Bahn-Netz umfasst derzeit 106,4 km mit 93 Stationen mit 88 Streckenabschnitten. Die mittlere Fahrstrecke zwischen den Stationen beträgt demnach etwa 1,20 km. Das S-Bahn-Netz ist 144,4 km lang und enthält 70 Stationen mit 64 Streckenabschnitten. Im Mittel errechnen sich Fahrstrecken von 2,25 km. Im innerstädtischen Bereich sind die Abstände deutlich kürzer als auf den Außenstrecken. Zur Länge des Bus-Linien-Netzes und zur Anzahl der Haltestellen waren bisher keine Angaben erhältlich. „Gefühlt“ beträgt der Abstand der Haltestellen nur zwischen 500 bis 700 m, sodass die Zeitspannen für Schallmessungen sehr kurz ausfallen.

Die Fahrzeuge wurden rein zufällig danach ausgewählt, welches als nächstes (in eine grob vorgeplante Richtung) abfährt. Dazu wurden möglichst lange Strecken ausgesucht, um auch in den städtischen Randbereichen bei längeren Fahrstrecken und mit wenig Publikum messen zu können. Weil keinerlei Weisungsbefugnis gegenüber den Fahrern bestand, bilden alle Messergebnisse ausschließlich zufällige Situationen ab.

Während man bei den Busfahrten deutlich merken konnte, das einige Fahrer unter Zeitdruck fahren (Anfahren und Beschleunigen mit „kick down“), war hiervon in den Schnellbahnen nichts Gleichartiges zu bemerken. Insbesondere auf den Außenstrecken (Blankenese-Wedel, Volksdorf-Großhansdorf) wurde eher verhalten gefahren.

Zur Vereinfachung des Messvorgangs wurde nach den ersten probeweise durchgeführten Messungen ein Protokollblatt angefertigt, in welches außer

dem Mess-Datum und dem Zeitpunkt zu Beginn der Fahrt mit einem bestimmten Fahrzeug auch die Liniennummer und, der Fahrzeugtyp und (so weit erkennbar) die Fahrzeugnummer eingetragen wurden.

Zu jeder einzelnen Messung wurde dann durch Ankreuzen in der Liste festgehalten, ob die Fenster des Fahrzeugs offen oder geschlossen waren, ob während der Fahrt auf offener Strecke oder im Tunnel gemessen wurde und ob ein Anfahr-, Roll- oder Bremsvorgang erfasst wurde. Zusätzlich wurden der am Messgerät abgelesene Mittelungspegel des Messzeitraumes und die Speicherplatznummer notiert. Auf dem Protokollblatt ist ausreichend Platz für weitere Eintragungen zu „besonderen Ereignissen“ vorhanden. Hier sind z. B. die bisweilen mit er-



fassten Sprachansagen, Geräusche der Klimaanlage oder der Heizung, der Standplatz des Messgerätes in den Bussen (hinten, mittig, vorne) oder auch das Quietschen in engen Kurven zu nennen. Messungen, bei denen über Weichen gefahren wurde oder Zugbegegnungen stattfanden oder auch mit erfasste Martinshörner der Rettungsdienste bei den Busfahrten, wurden nicht gespeichert. Sie sind zwar hinsichtlich der Störwirkung durchaus auch von Interesse, aber hier wurde nach dem Verfahren „vom Einfachen zum Schwierigen“ vorgegangen und deshalb versucht, vorrangig Standardsituationen zu erfassen. Aus dem gleichen Grund wurden auch Messergebnisse mit besonders lautem Verhalten des Publikums (seltener Unterhaltungen, meist Telefonate mit dem Mobiltelefon) nicht gespeichert. In solchen Fällen wurde versucht, auf einen anderen Sitzplatz auszuweichen.

Bisher wurden mehr als 250 einzelne Messungen durchgeführt. Einen Ausschnitt des in eine Excel-Datei übertragenen Protokolls zeigt die folgende Abbildung.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Datum	Uhrze	Fahrz-T	Fenst	Streck	Fahr	Pege	Speich	Bemerkui	Bereich
155	2023-09-25	11:35	BUS	ZU	OFF	ROL	74,2	033		mittig
156	2023-09-25	11:35	BUS	ZU	OFF	ROL	69,9	034		mittig
157	2023-09-25	11:35	BUS	ZU	OFF		60,5	035	Stand, Aggr.	mittig
158	2023-09-25	11:35	BUS	ZU	OFF	BRE	67,8	036		mittig
159	2023-09-25	13:00	BUS	ZU	OFF		58,8	037	Stand, Aggr.	vorne
160	2023-09-25	13:00	BUS	ZU	OFF	ANF	63,7	038		vorne
161	2023-09-25	13:00	BUS	ZU	OFF	ROL	63,6	039		vorne
162	2023-09-25	13:00	BUS	ZU	OFF	ROL	62,5	040		vorne
163	2023-09-25	13:00	BUS	ZU	OFF	BRE	62,2	041		vorne
164	2023-09-25	13:00	BUS	ZU	OFF	ANF	67,5	042		vorne
165	2023-09-25	13:00	BUS	ZU	OFF	ANF	66,0	043		vorne
166	2023-09-25	13:00	BUS	ZU	OFF		63,7	044	Stand, Aggr.	mittig
167	2023-09-25	13:00	BUS	ZU	OFF	ANF	66,1	045		mittig
168	2023-09-25	13:00	BUS	ZU	OFF	ROL	65,0	046		mittig
169	2023-09-25	13:00	BUS	ZU	OFF	BRE	62,5	047		mittig
170	2023-09-25	13:00	BUS	ZU	OFF	ROL	64,7	048		mittig
171	2023-09-25	13:00	BUS	ZU	OFF	ROL	65,0	049		hinten
172	2023-09-25	13:00	BUS	ZU	OFF	ANF	74,2	050		hinten
173	2023-09-25	13:00	BUS	ZU	OFF	ROL	69,6	051		hinten
174	2023-09-25	13:00	BUS	ZU	OFF	ANF	72,7	052		hinten

Demnächst sollen in den jeweiligen Zeilen dieser Tabelle in weiteren Spalten die Terzspektren der Messungen hinzugefügt werden. Die entsprechende Programmierung ist in Arbeit. Damit wird dann das Sortieren nach bestimmten Fahrzeugtypen und Messzuständen erheblich vereinfacht. Das derzeit vorhandene Programm ermöglicht nämlich nur die Bearbeitung von maximal 25 Spektren.

Das Sortieren der Messergebnisse nach unterschiedlichen Fahrzeugtypen wird dann interessant, wenn sich die typischen Störgeräuschkennlinien deutlich unterscheiden sollten. Nach den bisher vorliegenden Erkenntnissen gibt es nicht nur Unterschiede der Innengeräusche von U-Bahnen einerseits und S-Bahnen andererseits, sondern auch zwischen Bussen mit Diesel- und Elektroantrieb. Zwar sind bei letzteren die Innenschallpegel als Gesamtwert ähnlich, aber die Spektren unterscheiden sich deutlich.

Ob diese Aussage zu den Bussen auf Dauer Bestand haben wird, müssen weitere Bus-Fahrten zeigen. Hier liegen derzeit noch deutlich weniger Messergebnisse vor als bei den Bahnen und bisher nur ein Bus mit E-Antrieb. Auch sind die Abstände zwischen den Stationen bisweilen so kurz, dass selbst eine Messung von nur 5 s Dauer für einen der Betriebszustände Anfahren, Rollen, Bremsen schwierig wird. Hilfreich wäre, wenn die Verkehrsunternehmen Messungen bei speziellen Fahrsituationen, z. B.

während des Fahrunterrichtes für neue Mitarbeiter, ermöglichen würden. Dann wären zumindest keine Störungen durch Publikum vorhanden.

Oben wurde bereits erwähnt, dass auf der AKN (Diesel-Triebwagen) bisher noch keine Messungen stattfanden. Dort sind die Abstände zwischen den Stationen relativ groß und man verlässt sehr schnell den Bereich des Hamburger Tarifgebietes AB. Damit wird der Aufwand für den Erwerb von Tageskarten noch einmal deutlich größer. Eine Mitwirkung/Unterstützung des HVV wäre hier ausgesprochen hilfreich. Gerade bei den AKN-Triebwagen mit Diesel-Antrieb könnte sich nämlich ein deutlicher Unterschied in der spektralen Geräuschverteilung (und vielleicht auch im Pegel) zu den elektrisch angetriebenen U- und S-Bahnen zeigen.

Wenn sich tatsächlich für verschiedene Verkehrsmittel deutlich Unterschiede in den Störgeräusch-Spektren herausstellen sollten, dann könnte es ggfs. auch sinnvoll sein, die Sprachverständlichkeit durch angepasste Sprach-Spektren zu optimieren. Andererseits wäre eine für alle Verkehrsmittel einheitliche (oder vereinheitlichte) Vorgehensweise sicher für eine breite Anwendung bei den verschiedenen Verkehrsunternehmen im Bundesgebiet sinnvoll.

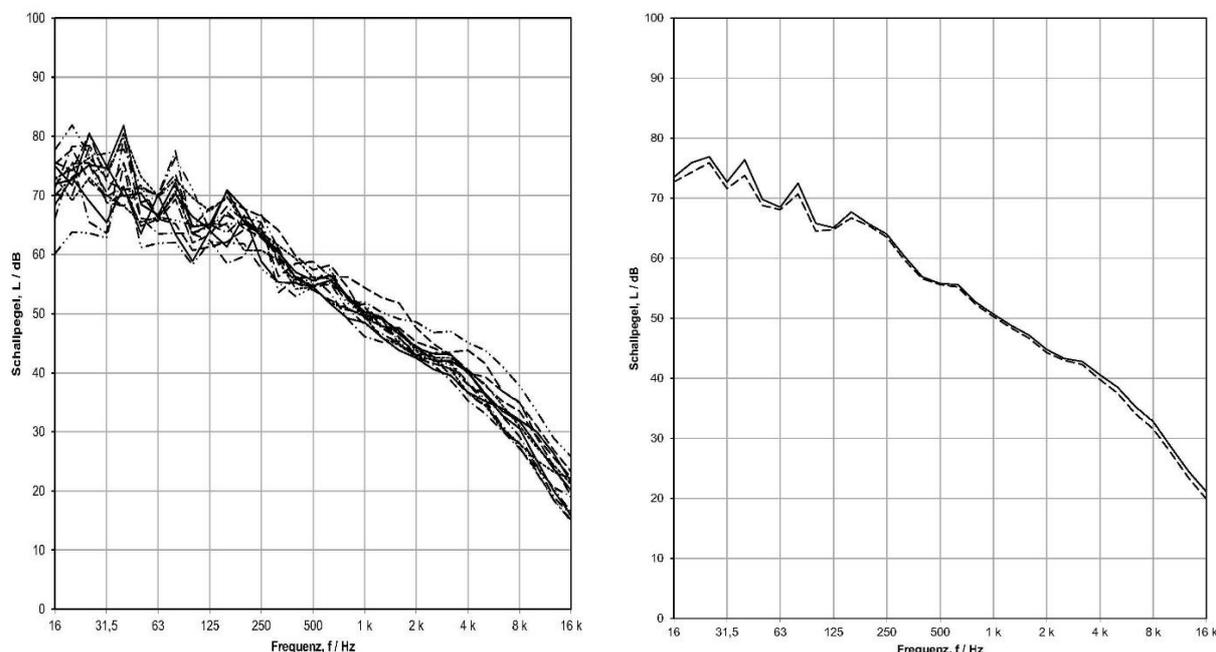
Erste Ergebnisse

Vorab ist darauf hinzuweisen, dass die Anzahl der Messergebnisse im Verhältnis zu den unterschiedlichen Fahrzeugarten und -typen sowie zu den unterschiedlichen Situationen noch immer viel zu gering ist, um statistisch abgesicherte Mittelwerte (oder gar Perzentil-Werte) anzugeben. Andererseits gibt es aber auch keine Fahrsituation, die genau diesen Werten entspricht.

Wenn man die Mehrzahl der Fahrgäste mit der Ansage-Qualität im Fahrzeug zufriedenstellen will, darf man also nicht „wissenschaftlich genau“ sein. Vielmehr reicht eine „für die Praxis hinreichende Genauigkeit“ aus. Dazu wurde nach Sichtung der ersten Messergebnisse entschieden, wie folgt vorzugehen:

1. Anders als z. B. beim Geräusch-Immissionsschutz üblich, erfolgt die Mittelwertbildung über die Messwerte nicht mit energetischer, sondern mit arithmetischer Mittelung. Sonst würden einzelne besonders laute Zufalls-Ergebnisse (einer vielleicht außergewöhnlichen Situation) den Mittelwert

überproportional nach oben ziehen. Für die ersten (noch wenigen) Messungen wurden die energetisch und arithmetisch gemittelten Messwerte verglichen. Die Unterschiede von 1 dB bis 2 dB werden mit zunehmender Anzahl der Messergebnisse noch kleiner.



Die linke Abbildung zeigt insgesamt 12 Messungen in U-Bahnen des Typs DT5; in der rechten sind der arithmetische und der energetische Mittelwert mit 63,5 dB(A) und 64,1 dB(A) dargestellt. Bei den anderen Fahrzeugen und Baureihen ist die Situation ähnlich.

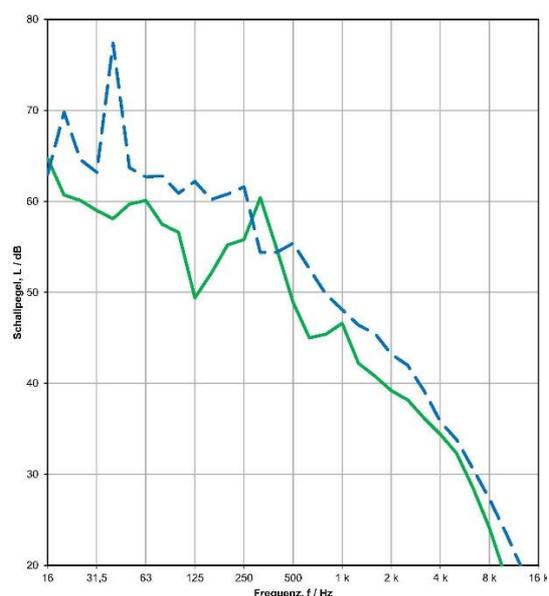
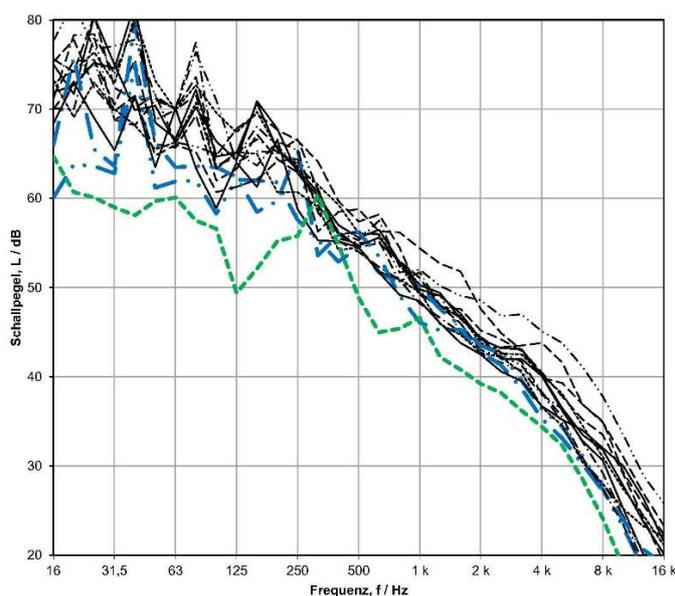
Zunächst wurde mit den über die Mess-Dauern (zwischen 5 s und 20 s) energetisch gemittelten Spektren ausgewertet. Hier gilt wieder das oben Gesagte. Deshalb sollen zukünftig die 1-s-Mittelwerte (also zwischen 5 und 20 Werten je Messung) verwendet werden. Das hat darüber hinaus den Vorteil, dass sich einerseits bei gleicher Anzahl der Messungen die Anzahl der Datensätze deutlich erhöht und andererseits die Schwankungsbreite der Schallpegel besser erfassen lässt. Hier muss man natürlich wiederum „im Hinterkopf behalten“, dass nicht die niedrigen, sondern die hohen Störgeräuschpegel die Sprachverständlichkeit beeinträchtigen. Hierzu wird durch einen Mitarbeiter der KVG das Auswerte-Programm derzeit erstellt.

Die ersten Messungen erfolgten fast ausschließlich in den U-Bahnen der beiden Baureihen DT4 und DT5. Dabei hat der größte Teil der Messungen in DT4-Zügen stattgefunden. Der Grund dafür ist, dass in den DT5-Zügen überall die Klimaanlage einen Grundgeräuschpegel hervorriefen, welcher

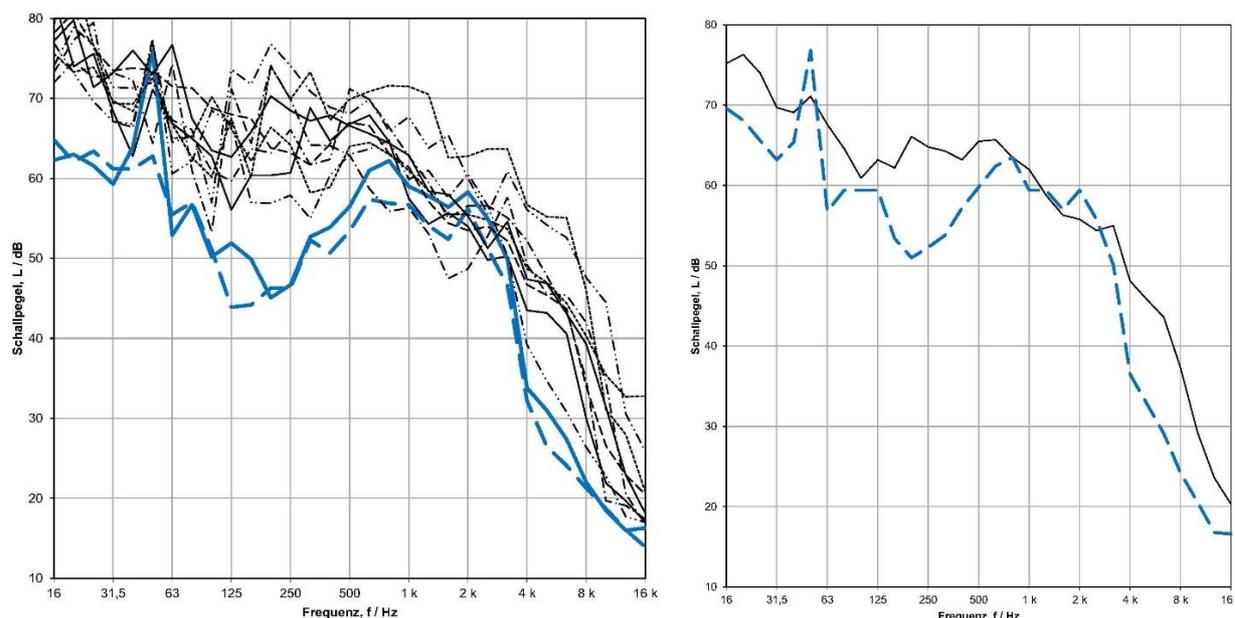
gezielte Messungen für die verschiedenen Fahrzustände nicht zuließ, sondern alle Pegel nivellierte. Eine einzige Messung fand an diesem Tag auf der Rückfahrt in einer S-Bahn der Baureihe 490 statt. Dort war – bei geringerem Publikums-Aufkommen – auch einmal die etwas leisere Klimaanlage der S-Bahnen zu messen.

Beim DT5 wurden an dem Tag nur wenige Messungen ausgeführt, weil in allen Zügen die Klimaanlage einen relativ hohen Grundgeräuschpegel bewirkten. Diese Messergebnisse habe ich alle in dem folgenden Diagramm links zusammengetragen. In zwei Fällen konnte war die Klimaanlage relativ gut allein zu messen. Diese beiden Kurven sind markiert. Es ist aber nicht sicher, dass die Messungen wirklich frei von anderen Geräuschen waren. Auch die einzige Messung, welche während der Rückfahrt in einer S-Bahn 490 von der Klimaanlage allein aufgenommen wurde, ist als grüne Kurve mit eingetragen; sicher ebenfalls nicht ganz frei von Störgeräuschen.

Die beiden Klimaanlage-Messungen vom DT5 wurden gemittelt und der einen Zufalls-Messung vom 490 in der folgenden Abbildung rechts gegenübergestellt. Auch wenn hier natürlich noch überhaupt keine statistische Sicherheit vorliegt, kann man dennoch erkennen, dass die S-Bahn die Klimaanlage-Geräusche um 3 dB besser beherrscht. Bisher ist unbekannt, ob die Klimaanlage in beiden Baureihen auch in unterschiedlichen Leistungsstufen laufen können oder nur im Ein-Aus-Betrieb. Bei unterschiedlichen Luftmengen der Klimaanlage können natürlich durchaus auch unterschiedliche Schallpegel auftreten ...



In einigen Fällen waren in den U-Bahnen auch Sprachansagen aufzunehmen, welche natürlich immer mit den Fahrgeräuschen unterlegt sind. Die meisten dieser Ansagen kamen von einer sehr gut artikulierten Frauenstimme welche eine (nach meiner Meinung) hervorragende Sprachverständlichkeit aufweist. Hierzu wurde von der HHA mitgeteilt, es handele sich um eine professionelle Rundfunk-Sprecherin und diese Stationsansagen seien alle im Studio entstanden und bearbeitet worden.



In bisher nur zwei Fällen war auch eine Ansage aus der Leitstelle aufzunehmen, welche auf aktuelle Betriebseinschränkungen hinwies. Diese Ansage kam mehrfach immer mit demselben Wortlaut. Auch dort handelt es sich also um eine vorgefertigte Ansage. Der Klang dieser Stimme war völlig anders, nasal (wie aus einem Zahnputzbecher), leiser (gefühlte sogar deutlich leiser) und weit schlechter verständlich. Live-Sprachansagen aus den Fahrer-Kabinen wurden bisher noch gar nicht erfasst.

Die meisten Schallpegel der Sprachansagen lagen zwischen 69 und 73 dB(A). Es gab aber mit 64 dB(A) auch einen Ausreißer nach unten und mit knapp 79 dB(A) einen nach oben. Diese Ansagen werden immer mit einem einleitenden Gong angekündigt, welcher der Zeitpunkt war, die jeweilige Messung zu starten. Während der Ansagen war den Gesichtern der Passagiere nicht in einem einzigen Fall eine schreckhafte Reaktion zu sehen. Möglicherweise liegt das an dem vorbereitenden Gong. Sprach-Schallpegel noch über 75 dB(A) scheinen also durchaus zulässig zu sein. Bei verschiedentlichen Quietsch-Geräuschen bei Kurvenfahrten traten bis

zu 80 dB(A) auf. Auch hier gab es nur gelassene und keinesfalls schmerzverzerrte Gesichter zu sehen.

Für die Fahrten im DT4 ohne Besonderheiten liegt der Mittelwert bei 63 dB(A) mit einer Spannweite zwischen 59 dB(A) und 69 dB(A). Dagegen liegt der Mittelwerte der neun gemessenen Sprachansagen bei 74 dB(A). Das entspricht Signal-Rausch-Abständen von $SNR = 15$ dB bzw. $SNR = 5$ dB. Aber SNR ist eben nicht gleichzusetzen mit Sprachverständlichkeit; dazu gehört mehr.

Die Mittelwertspektren der neun professionellen Sprachansagen und der beiden aufgenommenen Ansagen aus der Leitstelle sind rechts einander gegenübergestellt. Im Mittelwert unterscheiden sie sich lediglich um 2 dB (71/69 dB(A)), „gefühlte“ war die Ansage aus der Leitstelle aber deutlich leiser. In dem schmalen Frequenzbereich der sechs Terzen von 800 Hz bis 2500 Hz sind die Pegel ähnlich. Unterhalb und oberhalb davon gibt es aber ganz gravierende Unterschiede. Bei 200 Hz und bei 6300 Hz ist die Übertragung aus der Leitstelle um etwa 15 dB leiser. Dadurch ergeben sich folgende Fragen:

- Wie sind der Raum und die Aufnahme-Technik in der Leitstelle beschaffen, in der die dortigen Aufnahmen produziert werden?
- Ist die Person, welche diese Ansagen spricht, darin geübt macht das regelmäßig?
- Für einen natürlichen Stimmklang ist eine gewisse Wärme notwendig. Deshalb sollte man bis herunter zu etwa 200 Hz die Sprach-Schallpegel nicht verringern. Warum wurde das hier gemacht?
- Für eine gute Sprachverständlichkeit sind die Zisch- und Explosivlaute der Konsonanten besonders wichtig. Der Übertragungsbereich sollte hier frühestens bei 10.000 Hz begrenzt werden. Wenn aber hier bereits ab etwa 3.000 Hz abgeschnitten wird, dann lässt das auf eine Signalübertragung über Telefonleitungen schließen, welche bei 3400 Hz „dicht machen“. Wird hier so vorgegangen?
- Alternativ wäre auch denkbar, dass das Speichermedium (möglicherweise wegen zu kleiner Bitrate) keinen höheren Frequenzbereich zulässt. Ist das hier möglicherweise der Fall? Insbesondere bei Fahrzeugen früherer Baujahre wäre das denkbar.

Die Hamburger Hochbahn hat dazu mitgeteilt, dass die kurzfristigen Ansa-
gen aus der Leitstelle über ein „Tetrapol-Funksystem“ übertragen werden,
welches tatsächlich den Telefon-Frequenzbereich von 300 bis 3400 Hz
verwendet.

Auffällig ist bei den Ansagen aus der Leitstelle ein sehr lautes „Netzbrum-
men“ bei 50 Hz. Dieses gibt möglicherweise den maximal auf digitalem
Wege übertragbaren Pegel vor. Bei einer Hochpass-Filterung mit etwa
200 Hz Grenzfrequenz würde dieses Brummen entfallen und man könnte
das mittelfrequente Nutzsignal lauter übertragen. Andererseits kann dieses
Brummen eigentlich nicht aus der Leitstelle stammen, weil von dort nur mit
der Bandbreite von 300 bis 3.400 Hz übertragen wird. Da auch diese Mes-
sungen Zufallsergebnisse sind, bestehen derzeit mehr Fragen als Antwor-
ten.

Glücklicherweise bestanden bei den meisten Messungen wenig oder keine
Schwierigkeiten mit Geräuschen des Publikums. Mit einem kleinen Orts-
wechsel innerhalb des Zuges ließ sich das beheben. Das änderte sich aber
in den Abendstunden. Dann fuhren viel mehr Fahrgäste mit internationaler
Herkunft nach Hause, welche offenbar länger arbeiten müssen. Mehrere
Frauen führten in der S-Bahn mit sehr harten Stimmen längere Telefonate.
Die waren sehr laut und durchdringend durch den ganzen jeweiligen Wa-
gen zu hören. Weil aber auf dem Rückweg die Messapparatur schon ein-
gepackt war, wurden die Pegel dieser „Sprache als Störgeräusch“ nicht ge-
messen.

(Exkurs zur Hörgerätetechnik:

Die Hörgeräte fast aller Hersteller sind mit Störgeräusch-Unterdrückungs-
Routinen ausgestattet. Die sollen dafür sorgen, dass Störgeräusche ge-
genüber dem Sprachsignal abgesenkt werden. Das funktioniert leidlich
gut, außer, wenn das Störgeräusch aus „Sprache am Nebentisch“ be-
steht.)

Die Mittelwerte der bisher ausgeführten Störgeräuschmessungen lauten:

	Mittelwert	Maximalwert
• DT4, Fenster geschlossen	ca. 63 dB(A)	ca. 67 dB(A)
• DT5, Fenster geschlossen	ca. 64 dB(A)	ca. 65 dB(A)
• DT5, Klimaanlage bei stehendem Zug	ca. 61 dB(A)	
• S-Bahn 474	ca. 65 dB(A)	ca. 72 dB(A)
• S-Bahn 490	ca. 62 dB(A)	ca. 66 dB(A)
• Busse, Dieselantrieb, hinten	ca. 70 dB(A)	ca. 74 dB(A)
• Busse, Dieselantrieb, mittig	ca. 69 dB(A)	
• Busse, Dieselantrieb, vorne	ca. 64 dB(A)	ca. 66 dB(A)
• Bus, Elektroantrieb, hinten	ca. 71 dB(A)	
• Bus, Elektroantrieb, mittig	ca. 72 dB(A)	

In den Bahnen liegen die mittleren Störgeräuschpegel bei etwa 65 dB(A) und die mittleren Maximalpegel nicht wesentlich höher. In den Bussen sind die Mittelwerte um jeweils ca. 5 dB ungünstiger und die Maximalwerte sogar noch mehr. Die Aussagen zu den Bussen sind aber noch unsicher, weil bisher zu wenige „stichhaltige“ Messergebnisse vorliegen.

Wenn in den U-Bahnen die mittleren Störgeräuschpegel etwa 65 dB(A) betragen und die Ansagepegel 71 dB(A), dann kann man nach den in **Abbildung 2** dargestellten Zusammenhängen (unter ansonsten optimalen elektroakustischen Bedingungen) einen $STI = 0,63$ erwarten (grüner Punkt).

Wenn aber in den Bussen die mittleren Störgeräuschpegel schon bei etwa 70 dB(A) liegen, dann wird (bei gleichem Ansagepegel und wiederum optimalen elektroakustischen Bedingungen) nur noch etwa $STI = 0,52$ erreicht (roter Punkt), bei niedrigeren Ansagepegeln noch weniger.

Um Verbesserungsmaßnahmen (insbesondere in Bezug auf Busse) vorzubereiten, sind folgende ergänzenden Untersuchungen noch auszuführen:

- Messung der Fahrgeräusche für „Beschleunigen“ und „Rollen“ unter optimierten Bedingungen jeweils hinten, mittig und vorne in verschiedenen Bus-Typen (einteiliger Bus und Gelenkbus, Diesel- und Elektroantrieb, verschiedene Hersteller)
- Messung der Schallpegel automatischer Ansagen in stehenden Bussen (also ohne gleichzeitige Fahrgeräusche) jeweils hinten, mittig und vorne in verschiedenen Bus-Typen (einteiliger Bus und Gelenkbus, Diesel- und Elektroantrieb, verschiedene Hersteller)

- Messung der Schallpegel von Fahrer-Ansagen in stehenden Bussen (also ohne gleichzeitige Fahrgeräusche) jeweils hinten, mittig und vorne in verschiedenen Bus-Typen (einteiliger Bus und Gelenkbus, Diesel- und Elektroantrieb, verschiedene Hersteller) mit „elektronischem Sprecher“, z. B. TalkBox
- Mit der letztgenannten Messung ist – in Bezug auf das Fahrer-Mikrofon – auch sehr leicht eine STI-Messung durchführbar. Somit kann man auch die Übertragungsqualitäten in den verschiedenen Bustypen einem ersten Vergleich unterziehen.
- Theoretisch ist es auch möglich, für den Weg der gespeicherten Ansagen eine entsprechende Messung auszuführen. Dazu wäre aber eine Einspeisung des Messsignals direkt in den elektrischen Signalweg erforderlich.

Gleichartige Einflüsse wie hier beschrieben
gibt es natürlich auch in Bahnhöfen und auf Bahnsteigen.
Das bleibt aber wohl weiteren Generationen vorbehalten...

ANHANG

Die im Folgenden tabellarisch aufgelisteten Fragen wären dann bei einer intensiven Bearbeitung der Gesamt-Thematik zu bearbeiten:

1. SPRACHERZEUGUNG
Sprecherin oder Sprecher ?
Sprecherin: Sopran, Mezzo, Alt ? Sprecher: Tenor, Bariton, Bass ?
Welche Stimme hat den höheren Schallpegel?
Welche Stimme klingt bei gleichem Pegel „lauter“?
„Unterhaltungslautstärke“ oder „Befehlston“ ? (Eine höhere Sprechlautstärke bewirkt im Sprachsignal einen stärkeren Anteil hoher Frequenzen. → Lombardeffekt)
Welche Stimme klingt „vertrauenswürdiger“?
Welche Stimme klingt „angenehmer“?
Klingt eine laute Frauenstimme „keifig“? (Eine höhere Sprechlautstärke bewirkt im Sprachsignal einen stärkeren Anteil hoher Frequenzen.)
Wie kann man Sprecherin / Sprecher zum lauterem Sprechen animieren?
Gibt es Sprecherinnen / Sprecher mit „Sängerformant“?
Lohnt sich dafür ein „Sprecher-Casting“?

2. SPRACHAUFNAHME UND SPRACHSPEICHERUNG
Wie stellt man parallel Ansage und Textanzeige sicher? (Bei Standardansagen möglich, aber bei Sonder-Ansagen?)
Verwendet man aktuell gesprochene oder gespeicherte Ansagen?
Wie ist bei aktuell gesprochenen Ansagen das Umfeld? (Störgeräusche im Dienstabteil durch) - Studioraum oder Arbeitsraum ? - Nachhall oder Diffusschall ? - Betriebsgeräusche / Fahrgeräusche ? - Tätigkeiten anderer Personen ? - Unterhaltungen anderer Personen ?
Wie ist bei aktuell gesprochenen Ansagen die Sprecherqualität? - Spricht die Sprecherin / der Sprecher / hochdeutsch? - Spricht die Sprecherin / der Sprecher gut artikuliert? - Spricht die Sprecherin / der Sprecher laut genug?

<ul style="list-style-type: none"> - Spricht die Sprecherin / der Sprecher langsam genug? - Spricht die Sprecherin / der Sprecher nahe genug am Mikrofon? - Spricht die Sprecherin / der Sprecher zu nahe am Mikrofon (Nahbesprechungseffekt → Bassanhebung)? 	
Wie ist die Qualität von Mikrofon und Aufnahmekette?	
Wird der Text bei Bedarf wortgleich wiederholt?	
Ist (z.B. an Grenzbahnhöfen) eine mehrsprachige Ansage möglich?	
Gespeicherte Ansagen mit Textbausteinen (begrenzter Wortschatz aber gute Sprachqualität)	
Gespeicherte Ansagen vom „Vorlesesystem“ (unbegrenzter Wortschatz aber unterschiedliche Sprachqualität)	
Wie gut ist die Sprachqualität derzeitiger käuflicher Vorlese-Programme	
<ul style="list-style-type: none"> - Frequenzgang / Pegel / Deutlichkeit ? (1998 / 2007 / 2023)? 	
<p>Welchen Frequenzbereich kann man digital speichern? (Wie leistungsfähig ist das Speichermedium [Abtast-Theorem nach Shannon]?) Diese Frage war 1998 wichtig und wäre heute „eigentlich“ überholt, aber die Lebensdauer von Fahrzeugen im ÖPV ist teilweise sehr lang. Hier muss man sicher an eine Abwärtskompatibilität denken.</p>	
Welchen Frequenzbereich muss man speichern?	→ bis 10 kHz

3. SPRACHÜBERTRAGUNG

Welcher Frequenzbereich muss übertragen werden?	
<ul style="list-style-type: none"> - Hörbereich Guthörender - Sprachspektrum (männlich) - Sprachspektrum (weiblich) - UKW-Rundfunk (FM) - Messbereich DIN EN ISO 3381:2022-09 Bahnanwendungen - Akustik - Geräuschmessungen in spurgebundenen Fahrzeugen - MW-Rundfunk (AM) - Hörgeräte - Telefon Tetrapol-Funksystem 	<ul style="list-style-type: none"> ca. 25 ... 20000 Hz ca. 80 ... 10000 Hz ca. 160 ... 10000 Hz ca. 25 ... 15000 Hz ca. 25 ... 10000 Hz ca. 25 ... 4500 Hz ca. 100 ... 6000 Hz ca. 300 ... 3400 Hz
Verwendet man einen linearen oder „bearbeiteten“ Frequenzgang?	
<p>Mit welchem Übertragungsmedium wird das aufgenommene und gespeicherte Sprachsignal in die Fahrzeuge übertragen?</p> <p style="text-align: center;">→ MP3 W-LAN Tetrapol-Funksystem</p>	
Welchen Frequenzbereich verwendet das Übertragungsmedium?	

4. SPRACHABSTRAHLUNG

Erforderliche Verstärker-Leistung
(Größe, Energieverbrauch, Frequenzgang, Kosten)

Anpassung an die Qualität des Lautsprechers

- Welche Leistung kann der Lautsprecher abstrahlen?
- Welchen Frequenzbereich kann der Lautsprecher abstrahlen?
- Kann man vor Ort den Frequenzgang anpassen?
- Kann man für eine Fahrzeug-Baureihe den Frequenzgang einheitlich anpassen?
- Kann man die Lautstärke dynamisch anpassen, abhängig von Drehzahl oder Störgeräusch?

Welche Lautsprecher kann man einbauen?

- Größe (Durchmesser und Bautiefe)
- Richtwirkung
- Frequenzgang des Lautsprechers / der ELA-Anlage
- elektrische Leistung des Lautsprechers
- wann beginnen Verzerrungen
- Wirkungsgrad des Lautsprechers und abgestrahlte Schalleistung vor der Vandalismus-Schutz-Abdeckung
- Ist diese Abdeckung schalldurchlässig?
- Kosten

5. AKUSTISCHES UMFELD AUF DER HÖRERSEITE

Darbietung im Freien (Bahnsteig), in Räumen (Bahnhofshalle), in Fahrzeugen?

Gedämpfter oder halliger Raum?

Frequenzgang der Nachhallzeit?

Störgeräusche durch

- Nachhall oder Diffusschall?
- Betriebs- und Fremdgeräusche?
- Fahrgeräusche (Fenster auf/zu, offene Strecke/Tunnel/Brücken/Kurvenquietschen, Weichen, Zugbegegnungen)?
- Tätigkeiten anderer Personen?
- Unterhaltungen anderer Personen?

Wie sind die typischen Langzeitspektren und die typischen Pegel der Störgeräusche beschaffen?

Wie ist das aktuelle Spektrum und der aktuelle Störgeräusch-Pegel während der Durchsage?

Unterscheiden sich „technische“ Störgeräusche in ihrer Wirkung auf die Verständlichkeit von dem Störgeräusch „Sprache“ (Unterhaltung von Fahrgästen / Handy-Telefonate)?

6. HÖR- UND VERSTEHFÄHIGKEIT DER „ADRESSATEN“	
Hörbereich Guthörender	ca. 25 ... 20000 Hz
Hörbereich Schwerhörender mit Hörgeräten	ca. 100 ... 6000 Hz
Hörbereich Schwerhörender ohne Hörgeräte	?????
Ist die Sprache vertraut (ausländische / auswärtige Reisende)?	
Welcher Schallpegel ist „zu laut“ (Immissionsschutz, unangenehm / lästig)?	
Welcher Schallpegel ist „laut genug“? (Welche SNR benötigt man für Guthörende, Schwerhörende, Fremdhörende?)	
Ist der notwendige SNR von der Störgeräuschart abhängig?	→ JA
Ist der notwendige SNR vom Sprachspektrum abhängig?	→ JA
Ist der notwendige SNR vom Störgeräuschspektrum abhängig?	→ JA
Ist der notwendige SNR vom Hörvermögen abhängig?	→ JA
Muss man den SNR für verschiedene Situationen unterschiedlich definieren oder kann man eine Vorgabe für alle Fahrzeugtypen und alle Hörer machen?	

7. ERFORDERLICHER SIGNAL-RAUSCH-ABSTAND ?	
Für 50 % Satzverständlichkeit (relativ große Redundanz) benötigen.	
Guthörende	ca. SNR = -5 dB
Schwerhörende	ca. SNR = 15 dB
Fremdhörende (ausländische / auswärtige Reisende)	ca. SNR = +5 dB
Der SNR wird nicht nur durch Störgeräusche von dritter Seite beeinflusst, sondern auch durch Nachhall in Bahnhofshallen!	
Bei kurzen Ansagen mit geringer Redundanz sinkt die Sprachverständlichkeit. Dann muss SNR größer sein.	
Im öffentlichen Bereich sollte mindestens erreicht werden:	SNR \geq +10 dB
Wie definiert man diesen Signal-Rausch-Abstand bei wechselnden sowohl Stör- als auch Nutz-Schallpegeln?	
Kann man Sollwerte für Frequenzgang, Pegel und SNR der Lautsprecher in die Lasten- und Pflichtenhefte neu zu beschaffender Fahrzeuge aufnehmen?	
Wie definiert man die dann einzuhaltenden Messbedingungen?	
Kann man den Verkehrsunternehmen „Kochrezepte“ für gut verständliche Sprache benennen? Was muss dazu alles beschrieben werden?	

ANFORDERUNGEN FÜR BARRIEREFREIE ANSAGEN

Zuerst Störgeräuschminderung durch Lärmvermeidung und Schallabsorption!

Gleichmäßige Beschallung aller Fahrgastbereiche

Bei lärmsensibler Umgebung
mindestens eine auf die zentralen Wartebereiche reduzierte Beschallung

Lautstärke der Durchsage ist dem Störgeräuschpegel dynamisch nachzuführen

Bei Überschreitung eines Störgeräuschgrenzwertes
Verschiebung oder Wiederholung der Durchsage

Außerordentliche Ansagen (Gleiswechsel, Verspätungen, Störungen etc.)
müssen überall im Umsteigebereich gehört werden können
(z. B. auch in der Unterführung)

Abrufmöglichkeit für die Wiederholung der letzten Lautsprecher-Durchsage

Optimale Lautstärke und Frequenzgang für Durchsagen
in jedem Fahrzeugabschnitt / Raum getrennt überprüfen bzw. einstellen

Auf welchen Störgeräuschpegel bezieht man diese Einstellung
(L_{max} , L_1 , L_5 , L_{10} , L_{50} , L_{eq})?

VORTEILE SYNTHETISCHER SPRACHE

Digital erzeugte Texte können parallel als wortgleiche Schrift auf einem Display
angezeigt werden (Zwei-Sinne-Prinzip).

Wiederholungen von Ansagen erfolgen wortgleich (Redundanz).

Die synthetische Sprache wird als Standardsprache ausgegeben
und ist nicht mundartlich gefärbt.

Das Frequenzspektrum der Stimme kann (und muss) elektronisch so einge-
stellt werden (Equalizing), dass es sich optimal aus dem Störgeräusch
heraushebt, ohne „laut“ zu sein (günstige Lautheit).

Die Lautstärke liegt ausreichend über dem Störgeräusch (hoher SNR).

Die Sprechgeschwindigkeit ist langsam mit gleichmäßigem Redefluss.

Die Sprache hat keine störenden Nebengeräusche,
sofern kein Quantisierungsrauschen durch Übersteuerung vorliegt.

Durch Umprogrammieren von Texten ist die Sprachausgabe leicht zu variieren.

Außer den Stockwerks- und Fahrtrichtungsansagen und -anzeigen
können zusätzlich spezielle Ziele (z.B. Bahnmissionsmission o. ä.) benannt werden.

Die Texte können auch mehrsprachig ausgegeben werden.