

# Förderpreis 2016

## Untersuchung einer Messmethode zur Evaluierung von drahtlosen Übertragungsanlagen

### Bachelor-Abschlussarbeit

Verfasser: Julia Steinhauer

Erstprüfer: Herr Dr. Hendrik Husstedt

Zweitprüfer: Herr Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Tchorz

Datum der Abgabe: 07.12.2015

# **E UHA**

Europäische Union der  
Hörgeräteakustiker e.V.

Herausgeber: Europäische Union der Hörgeräteakustiker e.V.  
Neubrunnenstraße 3, 55116 Mainz, Deutschland  
Tel. +49 (0)6131 28 30-0  
Fax +49 (0)6131 28 30-30  
E-Mail: [info@euha.org](mailto:info@euha.org)  
Internet: [www.euha.org](http://www.euha.org)

Alle hier vorhandenen Daten, Texte und Grafiken sind urheberrechtlich geschützt. Eine Verwertung über den eigenen privaten Bereich hinaus ist grundsätzlich genehmigungspflichtig.

© EUHA 2016

## Zusammenfassung

Das Sprachverstehen im Störgeräusch und in halliger Umgebung stellt vor allem für Personen mit Schallempfindungshörverlust eine Schwierigkeit dar. Häufig bietet die Hörgerätetechnologie keine befriedigende Lösung, denn auch mit modernen Hörsystemen ist ein Gesprächspartner in bestimmten akustischen Situationen nur schwer zu verstehen. Abhilfe schaffen können hier drahtlose Signalübertragungsanlagen, indem sie die Distanz zwischen Sprecher und Zuhörer überbrücken. Somit werden Nachhalleinflüsse minimiert, und der SNR wird erhöht.

Es ist sinnvoll, den Nutzen einer Übertragungsanlage individuell für jeden Hörbeeinträchtigten messtechnisch nachweisen zu können, um dem Schwerhörigen, dessen Angehörigen und seinem Kostenträger den Erfolg der Anlage aufzuzeigen.

Bis heute existiert keine Norm, die festlegt, wie der Nutzen einer Übertragungsanlage gegenüber herkömmlichen Hörgeräten nachzuweisen ist. Es gibt diverse Entwürfe zur Evaluierung, jedoch sind diese nicht realitätsnah oder so komplex, dass sie nicht bei jedem Akustiker, Audiologen oder HNO-Arzt durchführbar sind.

Hier lag der Ansatzpunkt für die vorliegende Bachelorarbeit: Das Deutsche Hörgeräte Institut hat eine Messmethode entwickelt, die in allen Messkabinen durchführbar ist. Es wird eine Vortragsituation simuliert, bei der sich der Zuhörer in 4 m Entfernung zum Redner befindet.

In der vorliegenden Arbeit wird mit Hilfe von Probandenmessungen und einer statistischen Auswertung die Praktikabilität und die Test-Retest-Genauigkeit der Messmethode aufgezeigt. Hierzu wird in zwei Messdurchläufen untersucht, welchen Einfluss korreliertes bzw. unkorreliertes Rauschen auf die Messergebnisse hat. Zudem werden die Sprachverständlichkeitsmessungen bei zwei verschiedenen Hörprogrammen verglichen. Hierzu werden Omnidirektionalität und aktive Richtwirkung gegenübergestellt.

Die Ergebnisse bestätigen, dass die untersuchte Messmethode mit geringem Kosten- und Zeitaufwand praktikabel ist. Die Simulation der Vortragsituation erfolgt nicht nur durch entsprechende Pegel und Winkel von Nutz- und Störschall, sondern auch durch die Richtcharakteristik der Hörgeräte. Auch zeigen die Resultate der Sprachverständlichkeitsmessungen eine hohe Test-Retest-Genauigkeit auf.

# Inhaltsverzeichnis

Impressum	i
Zusammenfassung	ii
Inhaltsverzeichnis	iii
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Grundlagen</b>	<b>4</b>
2.1 Drahtlose Übertragungsanlagen	4
2.1.1 Funktionsweise [37]	4
2.1.2 Vorteile	5
2.1.3 Sprachverstehen in Abhängigkeit von der Distanz zur Schallquelle [19]	8
2.2 Methoden zur messtechnischen Evaluierung drahtloser Übertragungsanlagen	10
2.2.1 Messmethode der ASHA [5, S. 160-162]	10
2.2.2 Objektive Messmethode nach Thibodeau [36]	11
2.2.3 Subjektive Messmethode nach Thibodeau [36]	11
2.2.4 Messmethode einer Dissertationsstudie nach Wiehe [38]	13
2.2.5 Messmethode einiger Kliniken	14
2.2.6 Messmethode des DHI [20]	15
<b>3. Material und Methodik</b>	<b>18</b>
3.1 Messgeräte	18
3.2 Messaufbau und -signale	18
3.3 Probanden	19
3.4 Ziele der Messungen	19
3.5 Vorbereitende Maßnahmen	20
3.6 Durchführung der Messungen	23
3.6.1 Korreliertes / unkorreliertes Rauschen (Test-Retest)	23
3.6.2 Omnidirektional / Richtwirkung	24
<b>4. Ergebnisse</b>	<b>26</b>
4.1 Vergleich von korreliertem und unkorreliertem Rauschen	26
4.2 Test-Retest-Genauigkeit	29
4.3 Vergleich von Omnidirektionalität und aktiver Richtwirkung	32
<b>5. Fazit und Ausblick</b>	<b>34</b>
<b>6. Verzeichnisse</b>	<b>36</b>
6.1 Abkürzungsverzeichnis	36
6.2 Abbildungsverzeichnis	37
6.3 Tabellenverzeichnis	38
6.4 Literaturverzeichnis	39

## 1. Einleitung

Das Verstehen im Störgeräusch und in halliger Umgebung stellt vor allem für Personen mit Schallempfindungshörverlust (SE-HV) eine Schwierigkeit dar. Der Mensch benötigt einen gewissen Signal-Rausch-Abstand (SNR), um das Nutzsignal vom Störgeräusch zu trennen. Aufgrund reduzierter Zeit- und Frequenzauflösung wird bei einer Innenohrschwerhörigkeit für das gleiche Sprachverstehen ein höherer SNR benötigt [21]. Auch ist eine geringe Nachhallzeit nötig, damit Hörbeeinträchtigte verstehen können. Während Normalhörende bei einer Nachhallzeit von einer Sekunde verstehen, benötigen Schallempfindungsschwerhörige, Kinder, Personen mit Auditiver Verarbeitungs- und Wahrnehmungsstörung (AVWS) und ältere Menschen mit normalem Gehör eine Nachhallzeit von  $\leq 0,5$  Sekunden [25].

Häufig bietet die Hörgerätetechnologie keine befriedigende Lösung, denn auch mit modernen Hörsystemen ist ein Gesprächspartner in bestimmten akustischen Situationen schwer zu verstehen [25]. Hörgeräte können bei Nachhall, Distanz und geräuschvoller Umgebung an die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit stoßen [17].

Abhilfe schaffen kann hier die Hörassistententechnologie (HAT), welche Vorteile gegenüber der alleinigen Verwendung von Hörgeräten bietet. Sie gehört zu dem weitreichenden Feld der Geräte, die dazu entwickelt wurden, die Aufnahme von akustischen Informationen zu erleichtern, beispielsweise durch Verstärkung, Vibration und/oder visuelle Reize [37].

Eine Form der HAT sind drahtlose Übertragungsanlagen. Hierbei wird ein Signal, z. B. das Gesprochene eines Vortragenden, drahtlos zum Zuhörer übertragen. Das Zuhörerohr empfängt das Signal mit Hilfe von Kopfhörern oder Hörgeräten.

Drahtlose Übertragungsanlagen erhöhen den SNR und minimieren den Einfluss von Nachhall. Sie überbrücken die Distanz zwischen Sprecher und Zuhörer und erleichtern es Hörbeeinträchtigten, einen Redner zu verstehen. Die Übertragungsanlagen haben somit eine positive Wirkung auf Sprachverständlichkeit und Höranstrengung [37].

Es ist sinnvoll, den Nutzen einer drahtlosen Übertragungsanlage individuell für jeden Hörbeeinträchtigten messtechnisch nachweisen zu können, um dem Schwerhörigen, dessen Angehörigen und seinem Kostenträger den Erfolg der Anlage aufzuzeigen. Eine einheitliche, standardisierte Messanordnung bietet die Möglichkeit, verschiedene Übertragungssysteme objektiv zu vergleichen und reproduzierbare Messungen durchzuführen. Ein praktisch realisierbarer Messaufbau sollte bestenfalls mit einem geringen Kosten- und Zeitaufwand von jedem Akustiker, Audiologen und HNO-Arzt verwendet werden können.

Bis heute existiert keine Norm, die festlegt, wie der Nutzen einer drahtlosen Übertragungsanlage gegenüber herkömmlichen Hörgeräten nachzuweisen ist.

Die American Speech-Language-Hearing Association (ASHA) hat 1999 eine Richtlinie verfasst, die Empfehlungen bezüglich der Einstellung und Kontrolle von FM-Systemen liefert [5]. Zudem gibt es diverse Entwürfe zur Evaluierung von drahtlosen Übertragungsanlagen. Zum Beispiel wird der Nutzen in einer realen Situation wie einem Museumsbesuch gemessen [36]. Auch wird der Erfolg einer Übertragungsanlage via simulierender Testsituation nachgewiesen, beispielsweise mit vier Störschallquellen in den Ecken einer Messkabine, während die Nutzschaallquelle  $0^\circ$  frontal zum Schwerhörigen angebracht ist [36], oder mittels einer Messanordnung, bei der Sprach- und Störsignale den Schwerhörigen aus  $45^\circ$  erreichen, während sich das Mikrofon der Übertragungsanlage im Nebenraum befindet [5, II-161].

Die bisherigen Entwürfe zur Evaluierung von drahtlosen Signalübertragungsanlagen sind so komplex, dass sie nicht bei jedem Akustiker, Audiologen oder HNO-Arzt durchführbar sind. Messungen in Alltagssituationen, zwei Messkabinen, ein Deckenlautsprecher oder ein Messaufbau mit einer Vielzahl von Lautsprechern sind selten umsetzbar. Auch sind einige verwendete Messverfahren nicht realitätsnah, wenn zum Beispiel während der Messung das Störsignal am Schwerhörigen lauter ist als am Mikrofon der Übertragungsanlage.

Das Deutsche Hörgeräte Institut (DHI) hat eine Messmethode entwickelt, die die oben genannte Anforderung erfüllt. Mit einem geringen Kosten- und Zeitaufwand ist die Messmethode in allen Messkabinen durchführbar.

Hierbei erreicht das Nutzschaallsignal den Zuhörer frontal aus  $0^\circ$ , während sich zwei Störschallquellen in  $45^\circ$  links und rechts der Nutzschaallquelle befinden. Das Mikrofon der drahtlosen Übertragungsanlage ist frontal vor dem Nutzschaalllautsprecher positioniert. Als Nutzschaallsignal wird ein beliebiger Sprachtest verwendet. Das Störgeräusch ist frei wählbar. Der Messaufbau simuliert eine Vortragssituation, bei der sich der Zuhörer in 4 m Entfernung zum Redner befindet, und schafft eine Annäherung an die reale Situation in einem Klassenraum [19].

Ziel der Bachelorarbeit ist, die Praktikabilität der vom DHI erstellten Messmethode aufzuzeigen. Es wird ermittelt, ob die Methode mit einem 2-kanaligen Audiometer umsetzbar ist oder ob mindestens ein 3-kanaliges Audiometer benötigt wird. Hierzu wird der Einfluss von korreliertem und unkorreliertem Rauschen auf die Sprachverständlichkeitsmessung untersucht. Der Fokus wird hierbei auf drahtlose Übertragungsanlagen in Kombination mit Hörgeräten gelegt. Des Weiteren wird der gesamte Messdurchlauf mit denselben Testpersonen zu einem späteren Zeitpunkt ein zweites Mal durchgeführt, um die Test-Retest-Genauigkeit zu bestimmen.

Bei dem Messaufbau wird die Distanz zwischen Sprecher und Zuhörer durch entsprechendes Anpassen des Nutzschaallpegels simuliert. Die Entfernung von der Nutzschaallquelle zum Probanden ist geringer als der Abstand zwischen Redner und Zuhörer in der realen

Situation. Es stellt sich die Frage, ob die Hörgeräte-Richtmikrofontechnik der Probanden bei der vom DHI erstellten Messmethode einen größeren Nutzen liefert als es in der realen Vortragssituation der Fall wäre. Auch dieser Aspekt wird im Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit untersucht.

## 2. Grundlagen

### 2.1 Drahtlose Übertragungsanlagen

#### 2.1.1 Funktionsweise [37]

Drahtlose Signalübertragungsanlagen können in vier Bereiche unterteilt werden: Audioquelle, Transmitter, Empfänger und Art der Kopplung (siehe Abb. 2.1).

Die Audioquelle des HAT-Systems in Form einer drahtlosen Übertragungsanlage ist das Nutzsignal, das an den/die Zuhörer gesendet wird. Produkt- bzw. situationsabhängig kann die Audioquelle beispielsweise TV, MP3-Player, Telefon oder ein Sprecher sein. Ist die Audioquelle eine Person, benötigt die Übertragungsanlage ein Mikrofon.

Ein Transmitter sendet das Signal der Audioquelle zu einem Empfänger. Dies geschieht bei heutigen Geräten über elektromagnetische Wellen, deren Art von Übertragungsanlage zu Übertragungsanlage variiert. Beispielsweise senden Infrarotsysteme via Lichtwellen, während FM-Systeme über frequenz-modulierte Funkwellen übertragen. Mittlerweile ist die Technologie so fortgeschritten, dass einige drahtlose Übertragungsanlagen – im Gegensatz zur oben genannten analogen Technik – adaptiv digital arbeiten. Hierbei werden die Audiosignale digital codiert und in kurze Bits ( $160 \mu\text{s}$ ) unterteilt, die mehrfach in unterschiedlichen Kanälen im Bereich von 2,400 GHz bis 2,480 GHz an den Empfänger gesendet werden [26].

Der Empfänger nimmt das vom Transmitter gesendete Signal auf und leitet es an den Zuhörer. Transmitter und Empfänger müssen hierbei kompatibel sein. Der Empfänger kann beispielsweise vom Zuhörer am Körper getragen werden oder in den Hörgeräten des Zuhörers integriert sein.

Die Verbindungsmethode beschreibt, wie ein Signal vom Empfänger zum Zuhörerohr geleitet wird. Dies kann z. B. mit Hilfe von Lautsprechern, Kopfhörern, Induktionsschleife oder Direct Audio Input (DAI) und Hörgeräten geschehen.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird der Fokus auf folgende Funktionsweise gelegt: Die Audioquelle ist ein Sprecher mit Mikrofon. Als Transmitter dient ein adaptiv digital arbei-

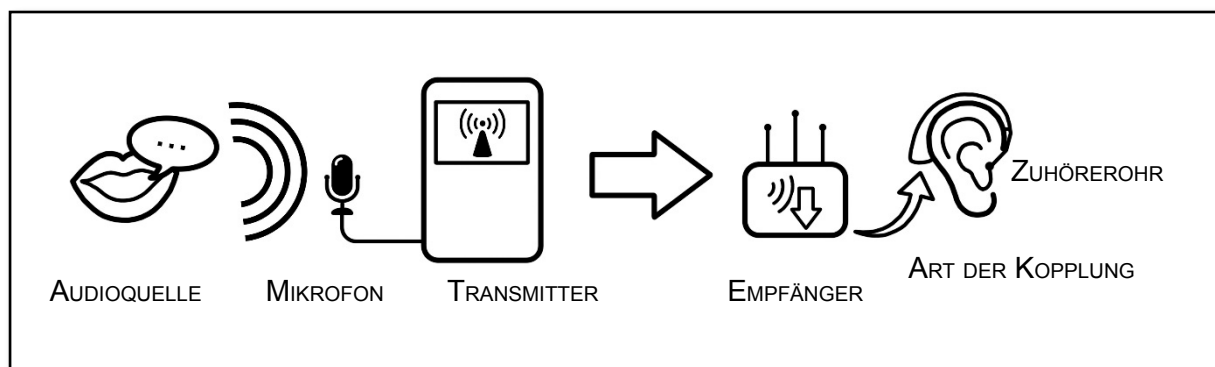


Abb. 2.1: Schematische Darstellung der Komponenten einer drahtlosen Signalübertragungsanlage



tender Sender. Zwei Empfänger werden via DAI und Aufsteckadapter („Audioschuh“) mit einem Paar Hörgeräte verbunden, die der Zuhörer trägt.

### 2.1.2 Vorteile

Drahtlose Signalübertragungsanlagen bieten in bestimmten akustischen Situationen – z. B. bei Nachhall, Distanz und geräuschvoller Umgebung – Vorteile gegenüber der alleinigen Verwendung von Hörgeräten. Sie wurden entwickelt, um Schall so direkt wie möglich an einen Schwerhörigen zu übertragen [37].

Das zu übertragende Audiosignal wird nah der Schallquelle bzw. des Sprechers aufgenommen, sodass negative Effekte von Distanz und Umgebungslärm vermindert werden und der SNR am Zuhörerohr dementsprechend verbessert wird [32] [9] (siehe Abb. 2.2). Bestenfalls hat der Zuhörer – unabhängig von seiner Position im Raum – den Höreindruck, sich direkt vor dem Sprecher zu befinden [19]. Durch die Erhöhung des SNR haben drahtlose Signalübertragungsanlagen somit eine positive Wirkung auf die Sprachverständlichkeit. Untersuchungen haben ergeben, dass eine Verbesserung des SNR von 5 dB bis 20 dB erreicht wird [25] [35]. In Kap. 2.1.3 wird die Auswirkung einer Übertragungsanlage bezüglich der Sprachverständlichkeit – in Abhängigkeit von der Distanz zur Schallquelle – näher erläutert. Durch Erhöhung des SNR wird nicht nur die Sprachverständlichkeit erhöht, sondern auch die Höranstrengung reduziert [37]. Das Hören wird demnach angenehmer.

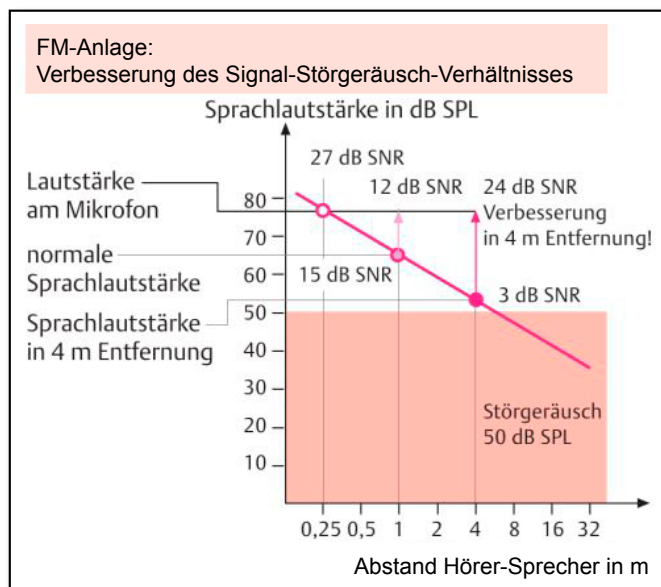


Abb. 2.2: Vereinfachte Darstellung der Verbesserung des SNR durch eine drahtlose Signalübertragungsanlage (im Freifeld). Die rote Linie beschreibt die Stimme eines Sprechers, die in 1 m Entfernung 65 dB beträgt. Der rosafarbene Bereich stellt ein gleichmäßiges Störgeräusch von 50 dB dar. Der SNR beträgt in 1 m Abstand zum Sprecher 15 dB, in 4 m Abstand nur noch 3 dB. Das Mikrofon der drahtlosen Übertragungsanlage entspricht einem Umhängemikrofon und befindet sich mit einer Distanz von 25 cm nah am Mund des Sprechers. An dieser Position besteht ein wesentlich günstigerer SNR von 27 dB. Mit Hilfe der drahtlosen Übertragungsanlage ist der SNR am Zuhörerohr dementsprechend ebenfalls 27 dB, was bei einer Entfernung von 4 m zum Sprecher einem SNR-Gewinn von 24 dB entspricht [35].

Eine drahtlose Übertragungsanlage hilft Schülern, effektiver zu hören und die Stimme des Lehrers vom Umgebungslärm zu unterscheiden. Die Schulkinder werden dabei unterstützt, auf die Anweisungen der Lehrkraft zu hören, darauf zu reagieren, sich zu beteiligen und dementsprechend bessere Leistungen zu erbringen. Schwerhörige Schüler lesen häufig von den Lippen ab, um den Lehrer zu verstehen. Mit Hilfe einer drahtlosen Übertragungsanlage können Kinder die Lehrkraft hören – unabhängig davon, in welche Richtung diese schaut. Wissenschaftliche Studien haben bewiesen, dass eine Verstärkung der Lehrerstimme die Leistungen und Aufmerksamkeit der Schüler erhöht [28] [29].

Ein weiterer Effekt drahtloser Übertragungsanlagen ist die Minimierung des Nachhalleinflusses. In einem Raum erreicht Sprache den Zuhörer als Direktschall und als Schallreflexion (siehe Abb. 2.3). Direktschall ist der Schall, der auf direktem Weg vom Sprecher zum Zuhörer übermittelt wird. Das Gesprochene wird je nach akustischer Beschaffenheit des Raums reflektiert, wobei zwischen frühen und späten Reflexionen unterschieden wird [24]. Die frühen Reflexionen können die Lautstärke des Signals erhöhen und somit zum Sprachverstehen beitragen [24]. Sie sind wenig verzögert ( $\leq 50$  ms) und treffen weitgehend getrennt ein, während die späten Reflexionen ( $> 50$  ms) in immer kürzeren Abständen folgen und den eigentlichen Nachhall ausmachen [18, S. 120 f.].

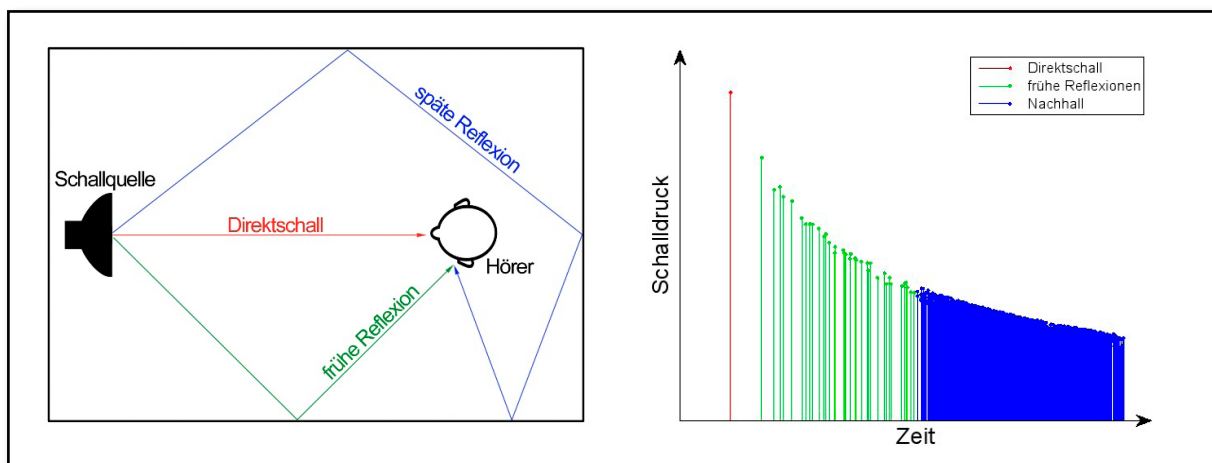


Abb. 2.3: Schematische Darstellungen von Direktschall (rot), frühen Reflexionen (grün) und späten Reflexionen bzw. Nachhall (blau)

Mit zunehmender Distanz zum Sprecher nimmt die direkte Schallenergie ab, und die reflektierte Schallenergie überwiegt [4] (siehe Abb. 2.4). Der Abstand, bei dem das direkte Schallfeld in das diffuse Schallfeld übergeht, wird als Hallradius  $r_H$  bezeichnet.

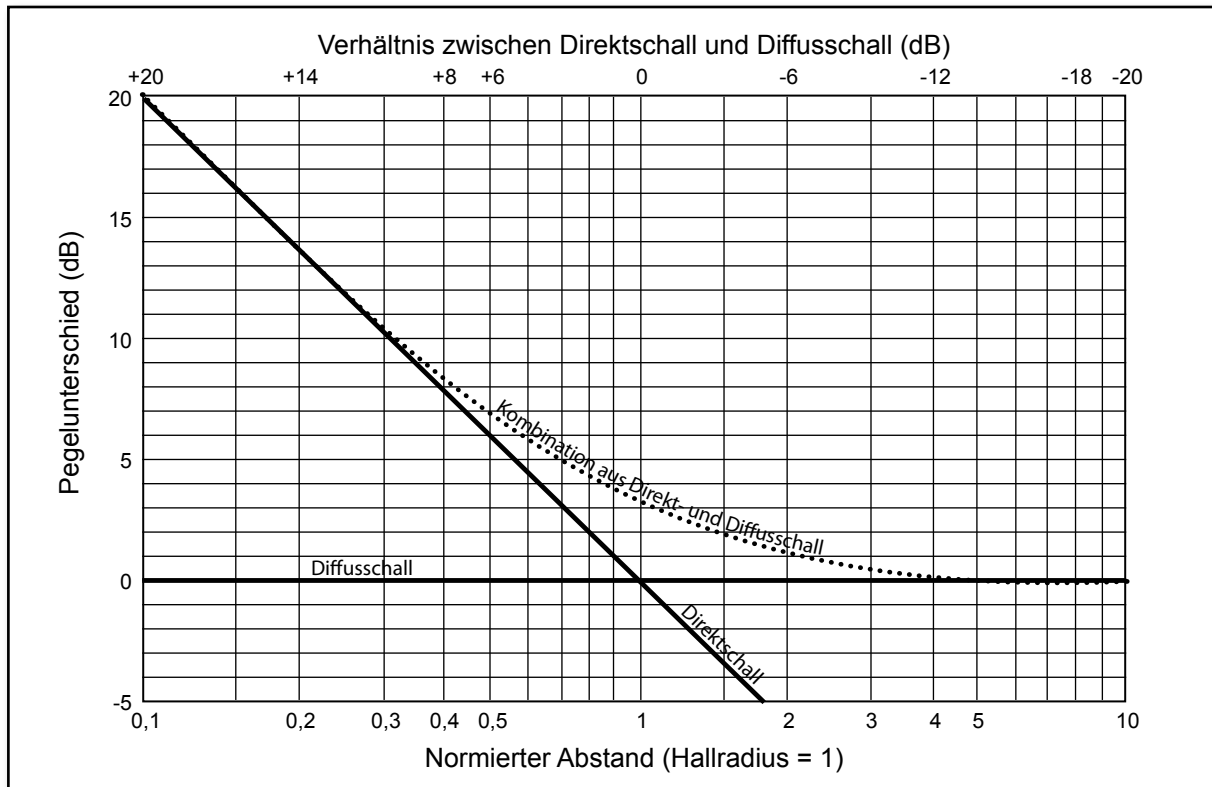


Abb. 2.4: Pegelunterschied von Direkt- und Diffusschall in Abhängigkeit vom Abstand zur Schallquelle [14]. Direktschall nimmt mit 6 dB pro Abstandsverdopplung ab, während Diffusschall konstant bleibt. Der Abstand zur Schallquelle, an dem Direkt- und Diffusschall gleich laut sind, wird Hallradius genannt (hier: 1).

Je größer die Nachhallzeit eines Raumes [27]

$$T = 0,163 \frac{V}{A} \quad (\text{nach Sabine}), \quad (2.1)$$

- T: Nachhallzeit in s
- V: Raumvolumen in m<sup>3</sup>
- A: Gesamtabsorptionsfläche in m<sup>2</sup>

desto kleiner ist der Hallradius [30]

$$r_H \approx 0,057 \sqrt{\frac{V}{T}}. \quad (2.2)$$

- r<sub>H</sub>: Hallradius in m
- V: Raumvolumen in m<sup>3</sup>
- T: Nachhallzeit in s

Der Einfluss des Nachhalls lässt sich umso mehr vernachlässigen, je geringer die Distanz zur Schallquelle bzw. zum Sprecher ist [6]. HAT in Form von drahtlosen Übertragungsanlagen überbrückt die Distanz zwischen Sprecher und Zuhörer. Der Schall wird nah am Sprecher als Direktschall aufgenommen und dem Zuhörer drahtlos übertragen. Auch wenn sich der Zuhörer außerhalb des Hallradius befindet, wird das Sprachverstehen nicht durch Nachhall beeinflusst. Das System ermöglicht demzufolge Mobilität für Sprecher und Zuhörer.

### 2.1.3 Sprachverstehen in Abhängigkeit von der Distanz zur Schallquelle [19]

Im Freifeld nimmt der Schalldruckpegel einer Schallquelle pro Abstandsverdopplung um 6 dB ab. Geht man davon aus, dass der Schallpegel bei 1 m Abstand zur Schallquelle 65 dB beträgt, ergibt sich der Schalldruck- bzw. Sprachpegel in Abhängigkeit von der Distanz  $r$  durch

$$L_F(r) = 10 \text{ dB} \log \left( k_1 \frac{1 \text{ m}^2}{r^2} \right), \text{ mit } k_1 = 10^{\frac{65 \text{ dB}}{10 \text{ dB}}} \quad (2.3)$$

Für einen geschlossenen Raum wird die Hopkins-Stryker-Formel [16] angewandt:

$$L_{ER}(r) = 10 \text{ dB} \log \left( k_2 \frac{T}{V} \frac{1 \text{ m}^3}{1 \text{ s}} \right), \text{ mit } k_2 = 10^{\frac{83,8 \text{ dB}}{10 \text{ dB}}}, \quad (2.4)$$

wobei  $V$  das Volumen und  $T$  die Nachhallzeit des Raums beschreibt.  $k_2$  hat den Wert  $10^{8,38}$ , wenn der Schalldruckpegel in 1 m Entfernung von der Schallquelle 65 dB beträgt und man von einem Bündelungsgrad der Schallquelle von 4 ausgeht [8].

Aus (2.3) und (2.4) ergibt sich der Schalldruckpegel in einem geschlossenen Raum in Abhängigkeit von der Distanz  $r$  zur Schallquelle:

$$L_R(r) = 10 \text{ dB} \log \left( k_1 \frac{1 \text{ m}^2}{r^2} + k_2 \frac{T}{V} \frac{1 \text{ m}^3}{1 \text{ s}} \right). \quad (2.5)$$

Ausgehend von einem Raumvolumen  $V = 220 \text{ m}^3$  und einer Nachhallzeit  $T = 0,7 \text{ s}$  ist ein Beispiel in Abb. 2.5 dargestellt.

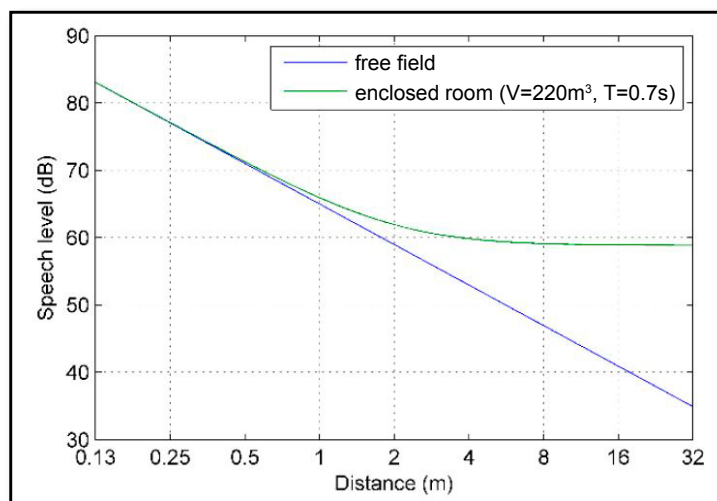


Abb. 2.5: Schalldruck- bzw. Sprachpegel in Abhängigkeit von der Distanz zur Schallquelle. Die blaue Funktion entspricht dem Pegel im Freifeld (free field), die grüne Funktion dem Pegel in einem geschlossenen Raum (enclosed room) mit einem Raumvolumen von  $220 \text{ m}^3$  und einer Nachhallzeit von  $0,7 \text{ s}$  [19, S. 4].

Führt man bei einem Probanden eine Sprachverständlichkeitsmessung durch, bei der das Störsignal konstant bleibt und der Sprachpegel variiert, erhält man einige Sprachverständlichkeitswerte. Wenn genug Werte vorliegen, erhält man eine Annäherung an die Psychometrische Funktion. Somit ist die Sprachverständlichkeit als Funktion des Sprachpegels darstellbar (siehe Abb. 2.6).

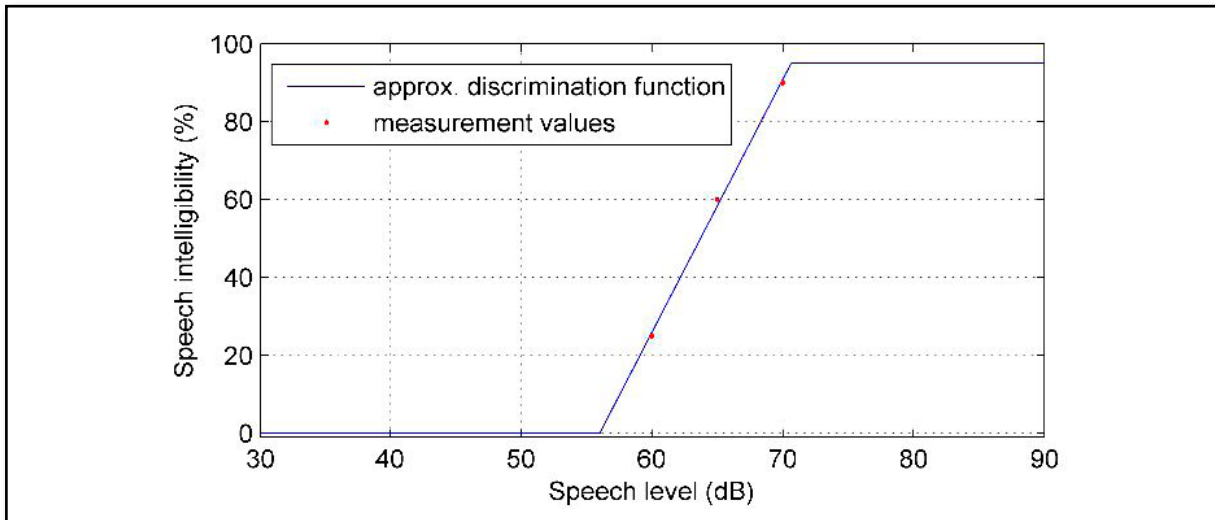


Abb. 2.6: Beispiel einer linearen Annäherung an die Psychometrische Funktion (approx. discrimination function) für einen HG-Träger als Probanden und einen Störgeräuschpegel von 60 dB. Drei Messpunkte (measurement values) sind in Rot dargestellt. Es sind die drei Bereiche kein Sprachverstehen, Steigen der Sprachverständlichkeit und maximales Sprachverstehen zu erkennen [19, S. 5].

Mit Hilfe der Psychometrischen Funktion (Abb. 2.6) und der ermittelten Schalldruckpegel als Funktion des Abstands zur Schallquelle (Abb. 2.5) kann die Sprachverständlichkeit in Abhängigkeit von der Distanz zur Schallquelle visualisiert werden (siehe Abb. 2.7 und Abb. 2.8). Da das Sprachverstehen mit drahtloser Übertragungsanlage unabhängig von der Distanz zur Schallquelle ist, kann der Sprachverständlichkeitswert mit Übertragungsanlage als horizontale Linie in der Grafik (Abb. 2.8) dargestellt werden.

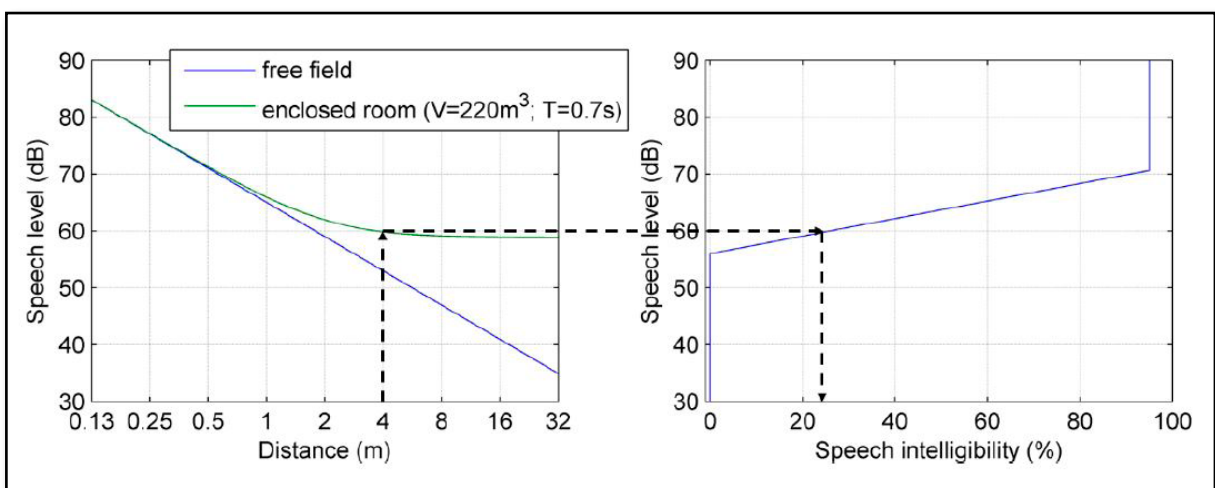


Abb. 2.7: Visualisierung der Relation zwischen Distanz zur Schallquelle und Sprachverständlichkeit [19, S. 5]

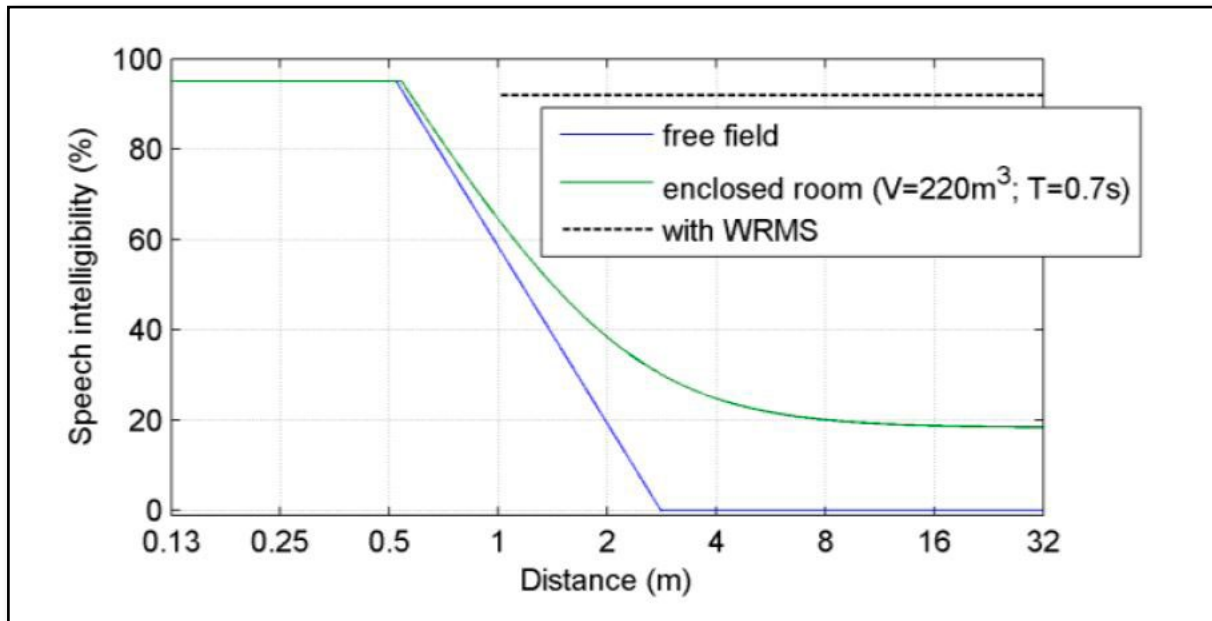


Abb. 2.8: Sprachverständlichkeit in Abhängigkeit von der Distanz zur Schallquelle bzw. zum Sprecher, mit und ohne drahtlose Übertragungsanlage/WRMS (wireless remote monitoring systems). Das Freifeld (free field) ist in Blau, der geschlossene Raum (enclosed room) in Grün dargestellt. Es wird in diesem Beispiel von einem Raumvolumen  $V = 220 \text{ m}^3$  und einer Nachhallzeit von  $T = 0,7 \text{ s}$  sowie einem HG-Träger als Probanden und einem Störgeräuschpegel von  $60 \text{ dB}$  ausgegangen [19, S. 5].

## 2.2 Methoden zur messtechnischen Evaluierung drahtloser Übertragungsanlagen

### 2.2.1 Messmethode der ASHA [5, S. 160-162]

Die folgende Messmethode zur Evaluierung von drahtlosen Signalübertragungsanlagen wird in den *Guidelines for Fitting and Monitoring FM Systems* der ASHA empfohlen. Der Messaufbau ist in Abb. 2.9 dargestellt.

Ein Nutzschaall- und ein Störschaalllautsprecher sind in einem Winkel von  $45^\circ$  links und rechts zum Probanden platziert. Das Mikrophon der drahtlosen Übertragungsanlage ist in gewöhnlicher Trageposition am Testleiter befestigt. Dieser befindet sich im Nebenraum. Als Störsignal wird sprachsimulierendes Rauschen verwendet. Das Nutzschaallsignal ist *monitored live voice*, d. h. vom Versuchsleiter vorgelesene Wörter eines Sprachtests, die über den Sprachsignallautsprecher übertragen werden. Der Sprachtest ist nicht vorgegeben, es ist jedoch auf Angemessenheit bzgl. Alter, Sprachentwicklung und Muttersprache des Probanden zu achten. Der Sprachpegel beträgt  $55 \text{ dB HL}$ , der Störschaallpegel  $50 \text{ dB HL}$ . Somit ergibt sich ein SNR von  $5 \text{ dB}$ , was ein typischer Wert in Grundschulklassen ist. Die Messungen finden in Ruhe und im Störgeräusch statt. Es wird mit den drei Einstellungen HG, HG+FM und FM gemessen. Für die Evaluierung der drahtlosen Übertragungsanlage können die ermittelten Sprachverständlichkeitswerte direkt miteinander verglichen werden.

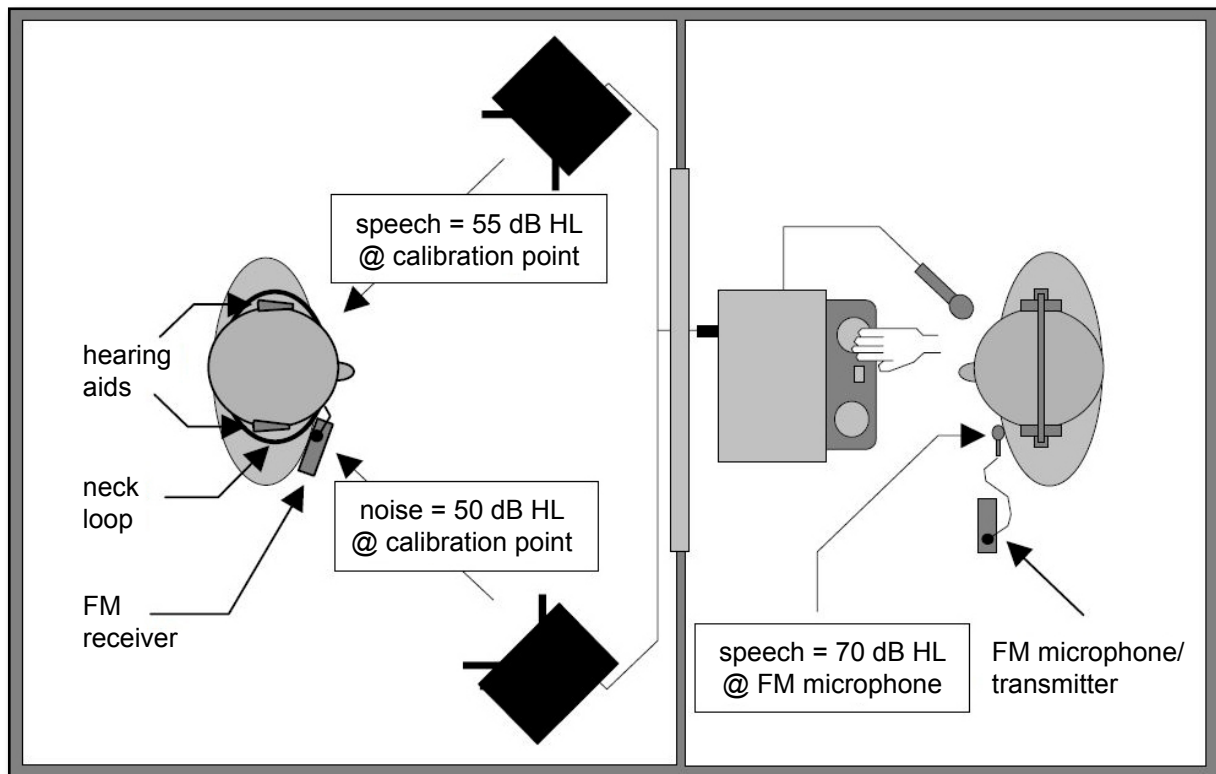


Abb. 2.9: Messaufbau zur Evaluierung von drahtlosen Übertragungssystemen nach den Guidelines for Fitting and Monitoring FM Systems der ASHA. Die Messung findet in zwei nebeneinander liegenden Räumen statt. Das Nutzsignal sind Wörter, die vom Testleiter vorgelesen werden und über den Sprachschalllautsprecher übertragen werden. Nutz- und Störquellen befinden sich in einem Winkel von 45° links und rechts des Probanden [5, II-161].

### 2.2.2 Objektive Messmethode nach Thibodeau [36]

Der Messaufbau dieser Methode ist in Abb. 2.10 dargestellt. Vier Störquellen befinden sich in den Ecken des Messraums. Ein Nutzschaallautsprecher ist mit einem Winkel von 0° und einem Abstand von 5,5 m frontal zum Probanden platziert.

Die Signalausgabe wird durch einen Testleiter reguliert. Als Nutzsignal dienen Sätze des *Hearing in Noise Test* (HINT), jedoch wird dieser nicht mit adaptivem Messverfahren, sondern festgelegten SNR-Werten durchgeführt. Das Störgeräusch ist typischer Lärm in einem Klassenraum, welches von Schafer und Thibodeau aufgenommen wurde [32]. Die Sätze werden sowohl in Ruhe als auch mit den Störgeräuschpegeln 50, 55, 60, 70, 75 und 80 dBA dargeboten. Der Sprachpegel beträgt während der gesamten Messung 84 dBA. Das Mikrophon der drahtlosen Übertragungssysteme ist 20 cm vor dem Nutzschaallautsprecher platziert.

### 2.2.3 Subjektive Messmethode nach Thibodeau [36]

Die im Folgenden beschriebene Methode zur Evaluierung von drahtlosen Übertragungssystemen ist ein subjektives Messverfahren, welches 2014 von L. Thibodeau durchgeführt wurde. Die Probanden werden in das Dallas World Aquarium eingeladen, um bei Vorträ-



gen zu vier Ausstellungen zuzuhören und dabei verschiedene drahtlose Übertragungsmethoden zu vergleichen.

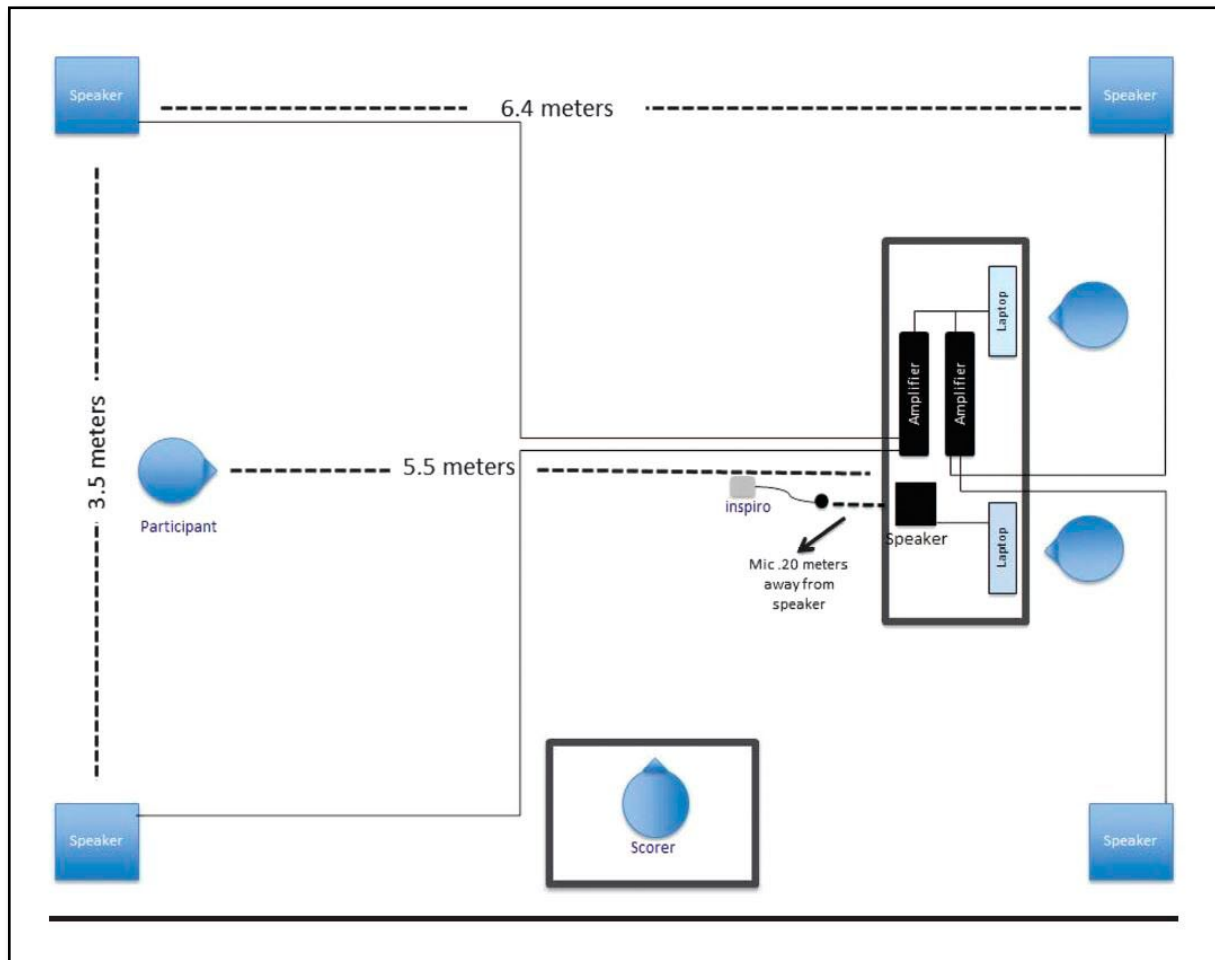


Abb. 2.10: Messaufbau zur objektiven Evaluierung drahtloser Übertragungsanlagen nach Thibodeau. Vier Störschallquellen befinden sich in den Ecken der Messkabine. Ein Nutzschalllautsprecher ist in einem Abstand von 5,5 m frontal zum Probanden platziert. Das Mikrofon der drahtlosen Übertragungsanlage ist 20 cm von der Nutzschallquelle entfernt [39, S. 205].

Das Nutzsignal dieser Messmethode ist das Gesprochene eines Vortragenden. Dieser trägt einen Transmitter mit Mikrofon und liest zu jeder der vier Ausstellungen eine Geschichte vor. Das Störsignal sind die üblichen Hintergrundgeräusche des Dallas World Aquariums. Während der von L. Thibodeau durchgeführten Messung lag der Störgeräuschpegel beispielsweise zwischen 70 dBA und 83 dBA. Es werden verschiedene Übertragungsmethoden miteinander verglichen, z. B. adaptiv digital, adaptiv FM und fix FM. Hierfür sendet eine drahtlose Transmittereinheit das Sprachsignal mittels einer der Übertragungsmethoden an kleine Empfängereinheiten, welche von den Probanden gehalten werden. Mit Hilfe von Y-Kabeln werden die Empfängereinheiten mit den entsprechenden Hörgeräte-DAI-Aufsteckadaptern der Probanden verbunden.

Die Testpersonen erhalten für jede Ausstellung ein Klemmbrett mit einem Bewertungsbogen (siehe Abb. 2.11). In jeder der vier Ausstellungen wird nach ein paar Sätzen die



Übertragungsmethode gewechselt. Nachdem mit allen Übertragungsmethoden gehört wurde, werden diese von den Probanden mit Hilfe des Bewertungsbogens beurteilt.

Name: \_\_\_\_\_ Dallas Aquarium World Location # \_\_\_\_\_ Box # \_\_\_\_\_

a) How easy was it to understand the speaker on Setting 1?

very easy	easy	ok	hard	very hard
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Please explain \_\_\_\_\_

b) How easy was it to understand the speaker on Setting 2?

very easy	easy	ok	hard	very hard
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Please explain \_\_\_\_\_

c) How easy was it to understand the speaker on Setting 3?

very easy	easy	ok	hard	very hard
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Please explain \_\_\_\_\_

d) After listening to all three settings, what setting do you prefer?

Setting "1" <input type="radio"/>	Setting "2" <input type="radio"/>	Setting "3" <input type="radio"/>	All the same <input type="radio"/>
-----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	------------------------------------

Why? \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Abb. 2.11: Bewertungsbogen der subjektiven Messmethode zur Evaluierung drahtloser Übertragungsanlagen nach Thibodeau. Mit Hilfe des Bewertungsbogens werden die verschiedenen Übertragungsmethoden von den Probanden beurteilt. In Punkt d) wählen die Probanden eine Übertragungsmethode als Favoriten. Die Testpersonen haben die Möglichkeit, ihre Bewertungen schriftlich zu begründen [36, S. 206].

#### 2.2.4 Messmethode einer Dissertationsstudie nach Wiehe [38]

Im Rahmen einer Dissertation wurde die im Folgenden beschriebene Messmethode zur Evaluierung von drahtlosen Übertragungsanlagen verwendet. Der Messaufbau ist in Abb. 2.12 skizziert.

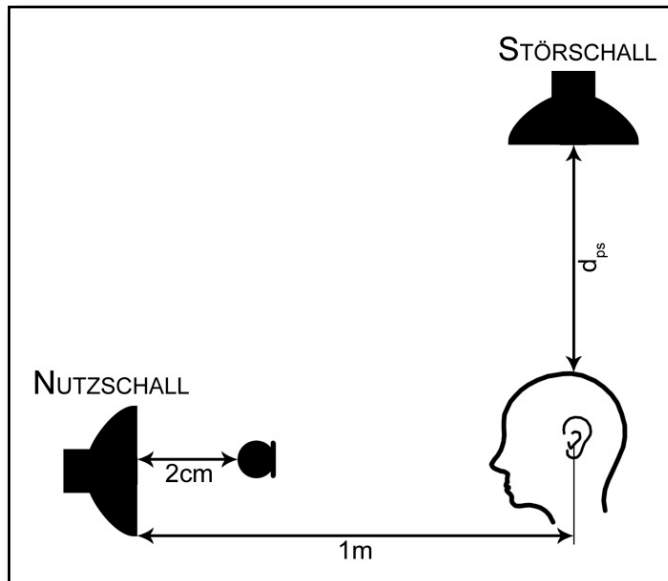


Abb. 2.12: Im Rahmen einer Dissertation verwendeter Messaufbau zur Evaluierung drahtloser Übertragungsanlagen. Eine Nutzschallquelle befindet sich frontal zum Probanden. Ein Störschalllautsprecher ist über dem Probanden an der Decke befestigt. Das Mikrofon der drahtlosen Übertragungsanlage wird in etwa 2 cm Abstand vor dem Nutzschalllautsprecher positioniert.

Eine Nutzschallquelle befindet sich in einem Winkel von  $0^\circ$  und einem Abstand von 1 m frontal zum Probanden. Der Störschalllautsprecher ist über dem Probanden an der Decke der schallisolierten Messkabine befestigt. Das Mikrofon der drahtlosen Übertragungsanlage wird in etwa 2 cm Abstand vor dem Nutzschalllautsprecher positioniert. Gegenüber der Testperson befindet sich der Arbeitsplatz des Testleiters, welcher die Signalausgabe reguliert.

Als Nutzsignal dient der Oldenburger Satztest (OLSA). Das Störgeräusch wurde mittels zufälliger und zeitversetzter 30-facher Überlagerung des Sprachmaterials erzeugt, wodurch ein Stimmengewirr entsteht, das als Rauschen wahrgenommen wird. Ziel des Störsignals ist die Simulation einer Cocktail-Party-Situation.

Es werden zwei Messdurchläufe durchgeführt. Der erste Messdurchlauf findet ohne, der zweite mit drahtloser Übertragungsanlage statt, sodass für jeden Probanden ein Wertepaar bzgl. der Sprachverständlichkeitsschwelle vorliegt, das einen unmittelbaren Vergleich ermöglicht. Die Sprachverständlichkeitsschwelle wird via adaptivem Messverfahren ermittelt. Stör- und Nutzpegel werden zu Beginn auf 65 dB eingestellt.

### 2.2.5 Messmethode einiger Kliniken

Aus praktischer Erfahrung ist bekannt, dass die folgende Messmethode in einigen deutschen HNO-Kliniken Anwendung findet. Der Messaufbau ist in Abb. 2.13 skizziert. Die Nutzschallquelle befindet sich in 1 m Abstand und einem Winkel von  $0^\circ$  frontal vor dem Probanden. Eine Störschallquelle ist in 1 m Abstand und einem Winkel von  $180^\circ$  hinter dem Probanden platziert. Das Mikrofon der drahtlosen Übertragungsanlage wird im Abstand  $d$  frontal vor der Nutzsignalquelle positioniert. Für die Distanz  $d$  ist kein fester Wert definiert, er wird subjektiv durch den Testleiter bestimmt.

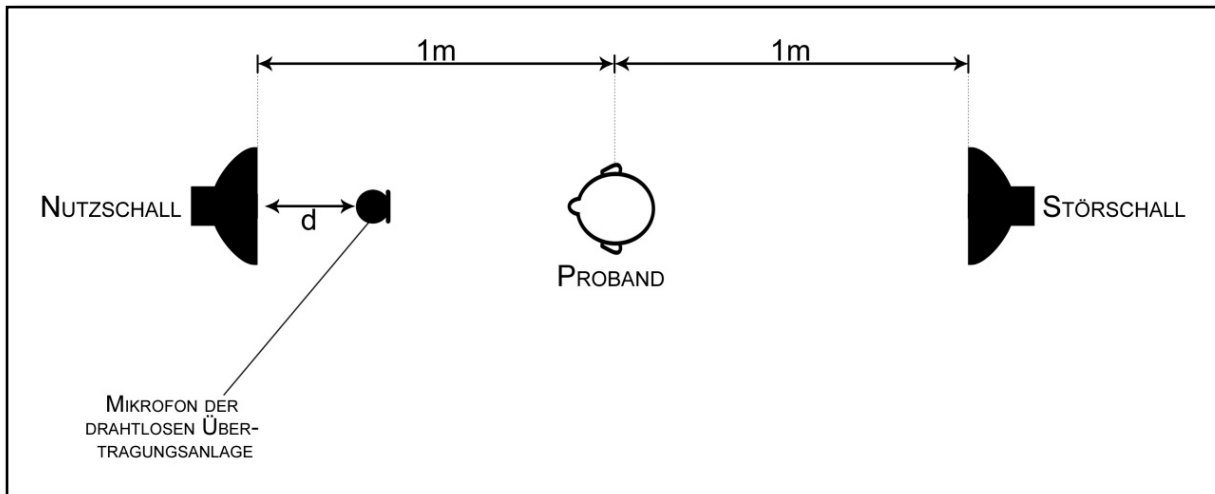


Abb. 2.13: Messaufbau der Methode zur Evaluierung drahtloser Übertragungsanlagen einiger Kliniken. Eine Nutzschaallquelle befindet sich frontal zum Probanden. Eine Störschaallquelle ist in einem Winkel von 180° hinter dem Probanden platziert. Das Mikrophon der drahtlosen Übertragungsanlage wird im Abstand  $d$  frontal vor dem Nutzschaalllautsprecher positioniert.

Mit Hilfe des OLSA wird die Sprachverständlichkeitsschwelle adaptiv ermittelt. Stör- und Nutzschaallpegel werden zu Beginn auf 65 dB eingestellt. Es werden zwei Messdurchläufe durchgeführt. Beim ersten Messdurchlauf ist das Mikrophon der drahtlosen Übertragungsanlage abgeschaltet, der Proband hört via Hörgeräte. Für den zweiten Messdurchlauf wird das Mikrophon der Übertragungsanlage dazugeschaltet. Um den Erfolg der drahtlosen Übertragungsanlage zu bewerten, werden die beiden SNR-Werte miteinander verglichen.

### 2.2.6 Messmethode des DHI [20]

Der im Folgenden beschriebene Messaufbau zur Evaluierung von drahtlosen Übertragungsanlagen wurde 2015 vom DHI entwickelt und ist in Abb. 2.14 dargestellt.

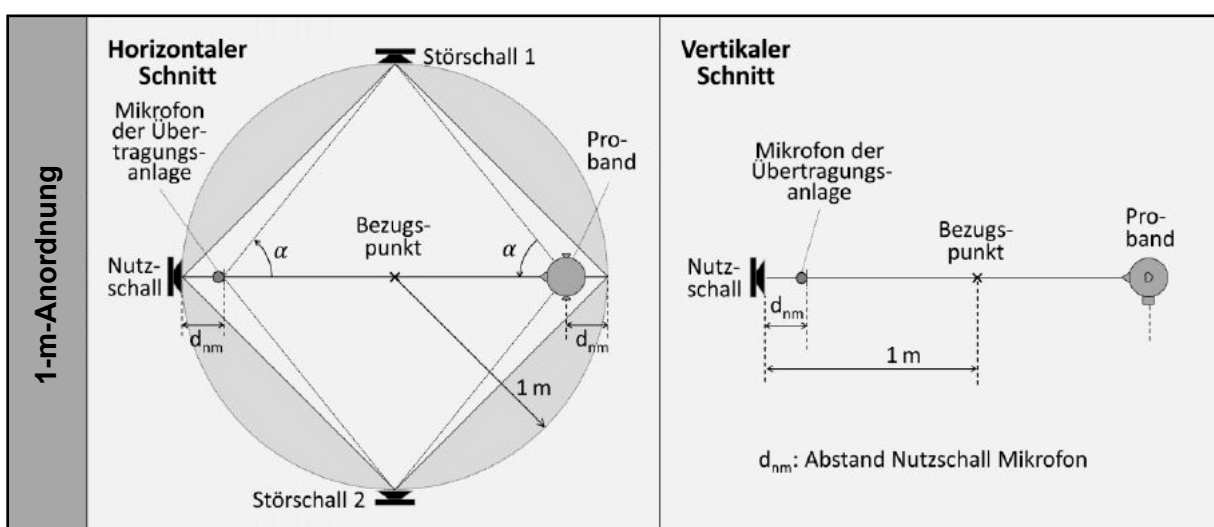


Abb. 2.14: Vom DHI entwickelter Messaufbau zur messtechnischen Evaluierung drahtloser Übertragungsanlagen. Eine Nutzschaallquelle ist frontal zum Probanden platziert. Zwei Störschaalllautsprecher befinden sich in einem Winkel von 45° links und rechts der Nutzschaallquelle. Das Mikrophon der drahtlosen Übertragungsanlage wird in einem Abstand  $d_{nm}$  vor dem Nutzschaalllautsprecher positioniert [20, S. 1].

Die Nutzschaallquelle befindet sich mit einem Winkel von  $0^\circ$  frontal zum Probanden. Zwei Störschaallquellen sind in 1 m Abstand zum Bezugspunkt und einem Winkel von  $45^\circ$  links und rechts der Nutzschaallquelle platziert. Der Winkel  $\alpha$  zwischen Störschaallquellen und Proband bzw. zwischen Störschaallquellen und Mikrofon der Übertragungsanlage lässt sich mit (2.6) berechnen [19, S. 3]:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{d_{nm} + d_{mb}}{d_{mb}}\right). \quad (2.6)$$

$d_{nm}$ : Distanz zwischen Nutzschaallquelle und Mikrofon der drahtlosen Übertragungsanlage

$d_{mb}$ : Distanz zwischen Mikrofon der drahtlosen Übertragungsanlage und Bezugspunkt

Das Mikrofon der drahtlosen Übertragungsanlage wird im Abstand  $d_{nm}$  frontal vor der Nutzschaallquelle angebracht. Für um den Hals getragene Mikrofone wird ein Abstand von  $d_{nm} = 16$  cm, für direkt vor dem Mund getragene Mikrofone ein Abstand  $d_{nm} = 8$  cm empfohlen. Mit den vorgeschlagenen  $d_{nm}$ -Werten ergeben sich mit (2.6) die Winkel  $\alpha_{16cm} = 49,97^\circ$  und  $\alpha_{8cm} = 47,39^\circ$ .

Das Störsignal ist frei wählbar; es wird ein sprachsimulierendes Rauschen vorgeschlagen. Der Störgeräuschpegel beträgt am Probanden 60 dB. Der Nutzschaall- bzw. Sprachpegel ist während der Messung ohne drahtlose Übertragungsanlage an der Position des Probanden auf 58 dB eingestellt. Ein Sprachpegel von 58 dB am Probanden entspricht dem Pegel, den ein Zuhörer bei einem Abstand von 4 m zum Sprecher bei einer Raumgröße von  $250 \text{ m}^3$  und einer Nachhallzeit von 0,6 s erfahren würde [20]. Für die Berechnung des Sprachpegels wird die Hopkins-Stryker-Formel herangezogen (siehe Kap. 2.1.3). Bei den Messungen mit Übertragungsanlage wird der Sprachpegel so eingestellt, dass er am Bezugspunkt 65 dB beträgt. Der Sprachtest ist nicht festgelegt und wird vom Testleiter gewählt.

Der Messaufbau simuliert somit eine Vortragssituation, bei der sich der Zuhörer in 4 m Abstand zum Vortragenden befindet [20]. Es wird hierbei von einem normal laut sprechenden Redner ausgegangen, der im Freifeld in 1 m Abstand einen Pegel von 65 dB abgibt. Es wird eine Annäherung an die reale Situation in einem Klassenraum geschaffen.

Wichtig ist hierbei, dass der Störpegel am Mikrofon der drahtlosen Übertragungsanlage genauso groß ist wie am Zuhörerohr, dass Richtung und Pegel der Schallquellen an beiden Ohren des Probanden gleich sind sowie dass Stör- und Sprachsignal nicht aus derselben Richtung dargeboten werden. Letzteres stellt sicher, dass die Richtcharakteristik der Mikrofontechnologie aktiv werden kann [19].

Für die Auswertung können die Ergebnisse der Messungen mit und ohne Übertragungsanlage direkt gegenübergestellt werden. Entscheidend für die Ergebnisse der Messungen

mit drahtloser Übertragungsanlage ist der Pegel am Mikrofon der Übertragungsanlage [20]. Da die Verstärkungseinstellung nach den *Guidelines for Fitting and Monitoring FM Systems* der ASHA erfolgt (siehe Kap. 3.5), ist das Sprachsignal, das auf direktem Weg – ohne Übertragungsanlage – beim Probanden ankommt, mindestens 10 dB leiser als das per FM übertragene Signal, sodass dessen Einfluss zu vernachlässigen ist [5, Appendix B].

### 3. Material und Methodik

#### 3.1 Messgeräte

Für die Messungen werden ein PC mit Betriebssystem Windows 7 sowie ein ACAM-Audiometer bzw. eine ACAM-Messbox (Version 5,11,16) der Firma Acousticon Hörsysteme GmbH genutzt [1]. Der verwendete Pegelmesser ist ein Hand-Pegelmesser des Herstellers Brüel & Kjær, Typ 2250 [7]. Als Nutz- bzw. Störsignalquelle werden drei dB-99-Lautsprecher der Firma Acousticon Hörsysteme GmbH eingesetzt [2].

Es wird eine adaptiv digital arbeitende drahtlose Übertragungsanlage in Kombination mit zwei High-End-Hörgeräten eines Herstellers verwendet. Zwei mit dem Transmitter kompatible Empfänger sind via Aufsteckadapter und DAI mit den Hörgeräten verbunden.

#### 3.2 Messaufbau und -signale

Die Messungen finden in einer Messkabine des DHI in Lübeck statt. Mit Schallabsorbieren ausgekleidete Wände und ein Teppich liefern eine geeignete Raumakustik. Mit einer Grundfläche von  $5,2 \text{ m} \times 4,22 \text{ m} = 21,944 \text{ m}^2$  und einer Höhe von  $3,13 \text{ m}$  hat der Messraum ein Volumen von  $68,7 \text{ m}^3$ .

Der Messaufbau ist in Kapitel 2.2.6 beschrieben und in Abb. 3.1 abgebildet. Das Mikrofon der Übertragungsanlage wird mit Hilfe eines Mikrofonständers und Typenreiniger in einem Abstand  $d_{nm}$  frontal vor der Nutzschaquelle angebracht. Von der Testperson ist eine komfortable Sitzposition zu wählen, die während der gesamten Messung möglichst konstant zu halten ist. Das Nutzsignal ist eine zufällig selektierte Einsilber-Wortgruppe des Freiburger Sprachtests. Als Störsignal dient Weißes Rauschen, welches je nach Messung korreliert bzw. unkorreliert dargeboten wird.



Abb. 3.1: Im Rahmen der Studie verwendeter Messaufbau. Der Proband sitzt in komfortabler Sitzhaltung frontal zum Nutzschaallautsprecher und mit Blickkontakt zum Versuchsleiter.

### 3.3 Probanden

Die Messung wird mit 14 Testpersonen durchgeführt, welche langjährige Probanden der Akademie für Hörgeräte-Akustik sind. Unter den Probanden sind vier Frauen und zehn Männer. Das Alter der Testpersonen liegt mit einer Spanne von 63 bis 82 Jahren bei durchschnittlich 73,4 Jahren. Alle Probanden sprechen fließend deutsch.

Der gemittelte Hörverlust der Probandengruppe ist in Abb. 3.2 dargestellt. Es handelt sich hierbei um einen symmetrischen SE-HV. Mit einer Spanne von 80 % (links) bzw. 85 % (rechts) bis 100 % (beidseits) beträgt das durchschnittliche maximale Sprachverstehen der Probanden 97 %, bei einem gemittelten  $\text{dB}_{\text{opt}}$  von 82 dB.

Elf der Probanden sind HG-Träger, wovon fünf mit Hörsystemen des hier verwendeten Herstellers vertraut sind. Die HG-Erfahrung der Probandengruppe liegt mit einem Intervall von 0 bis 20 Jahren bei durchschnittlich sechs Jahren. Keine der Testpersonen hat Vorkenntnisse im Bereich drahtloser Übertragungsanlagen.

### 3.4 Ziele der Messungen

Um die Praktikabilität der vom DHI erstellten Messmethode aufzuzeigen, wird der Einfluss des Störsignals auf die Sprachverständlichkeitsmessung untersucht (Kap. 3.6.1). Hierbei werden korreliertes und unkorreliertes Rauschen gegenübergestellt, um zu ermitteln, ob die Messmethode mit einem 2-kanaligen Audiometer umsetzbar ist oder ob mindestens ein 3-kanaliges Audiometer benötigt wird.

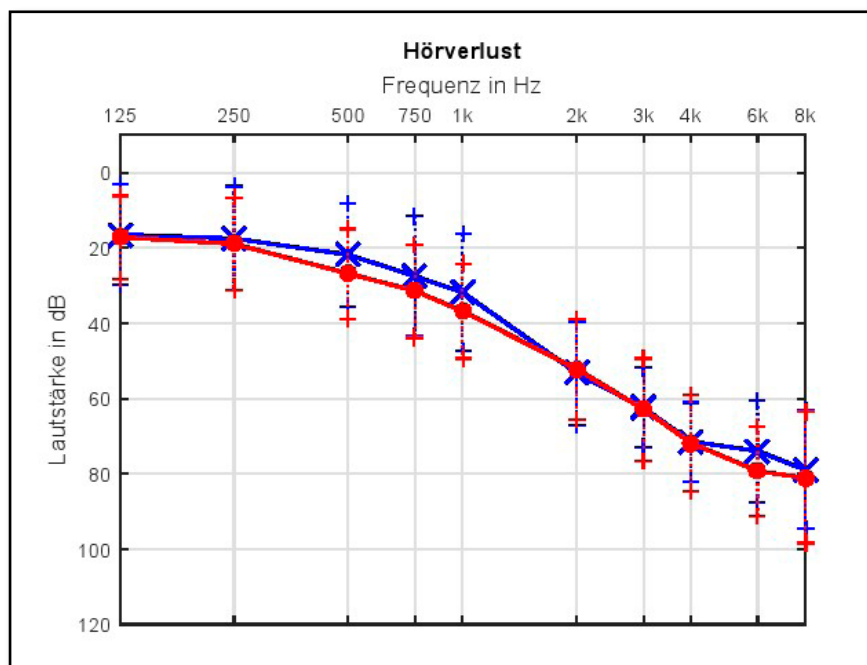


Abb. 3.2: Durchschnittlicher Hörverlust der 14 Probanden. Blau stellt das linke Ohr, rot das rechte Ohr dar. Da es sich um einen SE-HV handelt, ist die Knochenleitung nicht mit abgebildet. Die gepunkteten Linien entsprechen der Standardabweichung.

Um die Test-Retest-Genauigkeit der Messmethode bestimmen zu können, wird der gesamte Messdurchlauf mit denselben 14 Probanden zu einem späteren Zeitpunkt ein zweites Mal durchgeführt.



Im Diffusfeld verlieren Richtmikrofone ihren positiven Effekt. Die Richtcharakteristik zeigt außerhalb des Hallradius nur eine geringe oder gar keine Wirkung. Die Ausblendung von Störschall ist umso besser, je näher sich das Mikrofon an der Nutzschaquelle befindet. Mit zunehmender Entfernung von der Schallquelle wird die Richtwirkung der Hörgerätemikrofone dementsprechend geringer [11].

Der in der Messmethode simulierte Raum hat mit einem Raumvolumen von  $V = 250 \text{ m}^3$  und einer Nachhallzeit von  $T = 0,6 \text{ s}$  mit (2.2) einen Hallradius von  $r_H \approx 1,16 \text{ m}$ . Da sich der Zuhörer in der simulierten Vortragssituation in einem Abstand von  $4 \text{ m}$  zum Redner befindet, sitzt er außerhalb des Hallradius. Die Richtwirkung seiner Hörgeräte sollte demnach keinen Vorteil bringen.

Ob die vom DHI erstellte Messmethode diesen Aspekt berücksichtigt, wird in einem dritten Messdurchlauf (Kap. 4.3) mit den 14 Probanden überprüft.

### 3.5 Vorbereitende Maßnahmen

Während der Hauptmessung werden an der Position des Probanden ein Sprachpegel von  $58 \text{ dB}$  und ein Rauschpegel von  $60 \text{ dB}$  benötigt. Um diese Pegel ohne Kalibrierung einstellen zu können, werden als vorbereitende Maßnahme folgende Messungen durchgeführt [20]:

1. Am Sprachschalllautsprecher wird ein Rauschsignal mit einem Pegel von  $70 \text{ dB}$  ausgegeben und der Pegel  $L_{M1}$  an der geschätzten Position des Probanden gemessen. Um einen realistischen Abstand  $d_{nm}$  (siehe Abb. 2.14) zwischen Mikrofon der drahtlosen Übertragungsanlage und Störschalllautsprecher schätzen zu können, werden mit Hilfe von drei Kommilitonen Testmessungen durchgeführt. Mit einer Spanne von  $24 \text{ cm}$  bis  $26 \text{ cm}$  resultiert der durchschnittliche Wert  $d_{nm} = 25 \text{ cm}$ . Anders als in der Messmethode des DHI empfohlen [20], wird im Rahmen dieser Studie dementsprechend von einem Abstand  $d_{nm} = 25 \text{ cm}$  ausgegangen. Der am Audiometer einzustellende Wert lässt sich daraufhin mit (3.1) berechnen:

$$L_{E1} = 70 \text{ dB} - L_{M1} + 58 \text{ dB.} \quad (3.1)$$

2. An den Störschalllautsprechern wird ein Rauschsignal mit einem Pegel von  $70 \text{ dB}$  ausgegeben und der Pegel  $L_{M2}$  an der geschätzten Position des Probanden bzw. des Mikrofons der Übertragungsanlage gemessen. Es wird erneut von dem Wert  $d_{nm} = 25 \text{ cm}$  ausgegangen. Der Pegel  $L_{M2}$  sollte an beiden Positionen gleich groß sein. Der am Audiometer einzustellende Pegel lässt sich daraufhin mit (3.2) berechnen:

$$L_{E2} = 70 \text{ dB} - L_{M2} + 60 \text{ dB.} \quad (3.2)$$



Der Testleiter erklärt dem Probanden den gesamten Messablauf. Zunächst wird bei der Testperson ein Hörtest durchgeführt, bei dem Luftleitung, Knochenleitung, Unbehaglichkeitsgrenze und der  $dB_{opt}$  gemessen werden.

Mit Hilfe des gemessenen Hörtests und der Anpassformel NAL-NL2 werden zwei Hörgeräte mit DA1-Aufsteckadapter auf den Hörverlust des Probanden eingestellt. Ist der Proband ein HG-Träger, werden die Geräte mittels Messbox der üblichen HG-Einstellung angepasst, um die alltägliche Hörsystemsituation zu simulieren. Die verwendeten Oto-plastiken sind maßgefertigt. Eine kurze Feinjustierung – je nach Hörempfinden bzw. Feedback des Probanden – schließt den Prozess der HG-Einstellung ab.

Um Vergleich- und Reproduzierbarkeit bzgl. der Einstellung der Übertragungsanlage sicherzustellen, wird die Anlage mit Hilfe der Messbox eingestellt, wie es in den *Guidelines for Fitting and Monitoring FM Systems* von 1999 beschrieben ist [5, S. 157-160]. Hierfür wird via Messbox unter Verwendung eines 2-ccm Kupplers mit einem Eingangspegel von 65 dB SPL der Ausgangspegel des Hörgeräts gemessen. Anders als in den *Guidelines* beschrieben, wird jedoch ein ISTS-Sprachsignal anstelle eines 1 kHz Sinustons verwendet, da moderne Hörsysteme einen reinen Sinuston als Rückkopplungs- bzw. Störsignal deuten könnten [19]. Anschließend wird die drahtlose Übertragungsanlage mit dem HG verbunden. Das Mikrophon der Anlage wird am Referenzmikrofon der Messbox positioniert. Das HG bleibt weiterhin am Kuppler befestigt, jedoch außerhalb der Messbox (siehe Abb. 3.3).

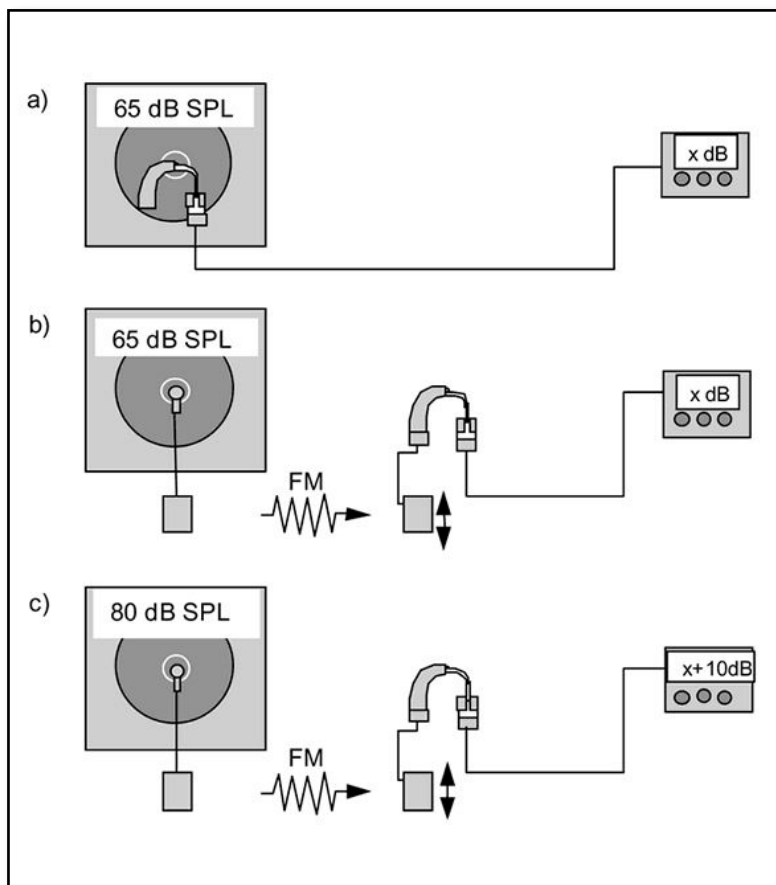


Abb. 3.3: Einstellung der drahtlosen Übertragungsanlage via Messbox nach den *Guidelines for Fitting and Monitoring FM Systems* der ASHA. Bei einem Eingangspegel von 65 dB SPL sollte die Ausgangskurve – unabhängig davon, ob über HG- oder Anlagenmikrofon gemessen wird – gleich sein. Steigt die Ausgangskurve um 10 dB an, wenn man den Eingangspegel auf 80 dB SPL erhöht, ist die Einstellung abgeschlossen [5, II-157].

Die Verstärkung der drahtlosen Übertragungsanlage wird so eingestellt, dass die Ausgangskurve bei einem 65 dB SPL ISTS-Eingangssignal in das Anlagenmikrofon der vorher gemessenen Ausgangskurve entspricht (siehe Abb. 3.4). Erhöht man den Eingangspegel auf 80 dB SPL, sollte man feststellen, dass sich die Ausgangskurve um 10 dB erhöht hat (siehe Abb. 3.4). In diesem Fall ist der Prozess der Verstärkungseinstellung abgeschlossen.

Sollte sich das Ausgangssignal um 15 dB erhöht haben, ist die Verstärkung der drahtlosen Übertragungsanlage um 5 dB zu reduzieren. Ist die Ausgangskurve um 5 dB gestiegen, wird die Verstärkung der Übertragungsanlage so erhöht, dass der Output um weitere 2 bis 3 dB auf insgesamt 7 bis 8 dB steigt. Falls das Ausgangssignal bei Veränderung des Eingangspegels von 65 dB SPL auf 80 dB SPL nicht ansteigt, ist die Verstärkung der drahtlosen Übertragungsanlage so einzustellen, dass ein Anstieg der Ausgangskurve um 5 dB erreicht wird.

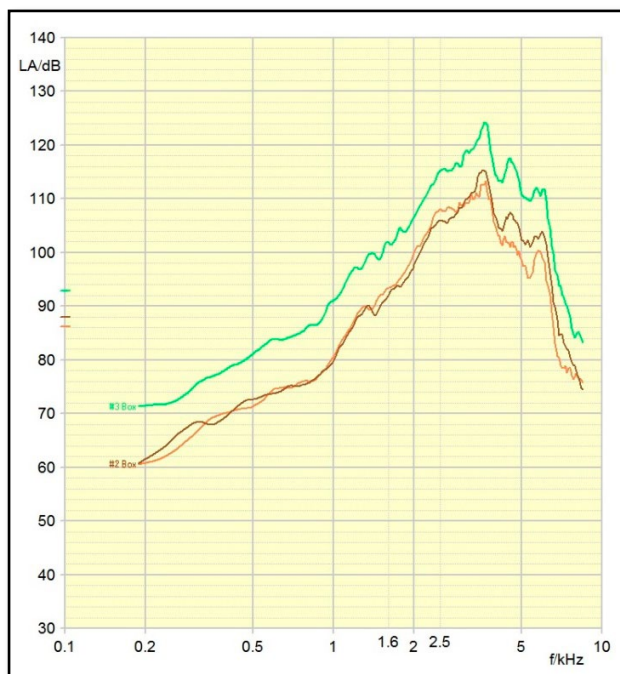


Abb. 3.4: Messkurven bei Einstellung der drahtlosen Übertragungsanlage via Messbox nach den Guidelines for Fitting and Monitoring FM Systems der ASHA [5]. Die orangefarbene Messkurve wurde mit einem High-End-Hörgerät bei einem 65 dB ISTS-Eingangssignal gemessen. Die braune Kurve beschreibt das Ausgangssignal, das mit einem 65 dB SPL ISTS-Input in das Mikrofon der drahtlosen Übertragungsanlage, welches an das Hörgerät gekoppelt ist, erreicht wird. Wie in den Guidelines beschrieben, sollten diese beiden Messkurven aufeinanderliegen. Die grüne Messkurve wurde ebenfalls über Übertragungsanlage gemessen, mit einem Eingangspegel von 80 dB SPL. Da die Ausgangskurve um 10 dB gestiegen ist, ist die Verstärkungseinstellung der drahtlosen Übertragungsanlage abgeschlossen.

Das Hörgerät sollte während der gesamten Messung bzw. Justierung so eingestellt sein, wie es der Schwerhörige üblicherweise trägt. Die Batterien der Hörgeräte sowie der Übertragungsanlage werden auf ausreichende Ladung überprüft und ggf. ausgetauscht. Bei der Messboxmessung mit Übertragungsanlage ist zu beachten, dass das Mikrofon entweder senkrecht befestigt oder auf Verifikationsmodus gestellt ist, sodass die Richtcharakteristik keinen Einfluss auf die Messergebnisse hat.

Der Proband setzt sich auf einen Stuhl, der wie in der Messanordnung beschrieben platziert ist. Er hat die Aufgabe, eine komfortable aufrechte Sitzposition einzunehmen, die während der gesamten Messung konstant bleiben sollte. Die voreingestellten Hörgeräte mit Maßtopplastik werden dem Probanden ans Ohr gesetzt. Die Hörgerätemikrofone sind auch im FM-Programm aktiv, wie es in einer realen Situation üblich ist [36]. Der Proband

wird darauf hingewiesen, dass er sich trotz Rauschsignal auf die Sprache konzentrieren soll. Er hat die Aufgabe, die dargebotenen Wörter zu wiederholen.

## 3.6 Durchführung der Messungen

### 3.6.1 Korreliertes / unkorreliertes Rauschen (Test-Retest)

Die Messung besteht aus 20 Messdurchläufen. Dem Probanden werden alle 20 Einsilber-Wortgruppen des Freiburger Sprachtests dargeboten. Hierbei werden vier verschiedene Kombinationen gemessen:

- a) mit **HG** bei **korreliertem** Störsignal
- b) mit **HG** bei **unkorreliertem** Störsignal
- c) mit **HG + Übertragungsanlage** bei **korreliertem** Störsignal
- d) mit **HG + Übertragungsanlage** bei **unkorreliertem** Störsignal

Um Lernverhalten auszuschließen, wird eine randomisierte Reihenfolge von Kombination und Wortgruppe durch eine Matlab-Funktion bestimmt. Eine Beispieltabelle ist in Tabelle 3.1 dargestellt. Die einzelnen Wörter innerhalb einer Wortgruppe werden ebenfalls in zufälliger Reihenfolge dargeboten. Pro Testperson wird jede Freiburger Wortgruppe nur einmal verwendet. Mit jeder der vier oben genannten Kombinationen wird fünfmal gemessen.

Der Störgeräuschpegel beträgt am Probanden während der gesamten 20 Messdurchläufe 60 dB. Der Sprachpegel variiert je nach Messdurchlauf. Bei den Kombinationen a) und b) wird der Nutzschallpegel am Probanden auf 58 dB eingestellt. Während der Messungen mit drahtloser Übertragungsanlage beträgt der Sprachpegel am Bezugspunkt 65 dB.

Sobald der Test startet, werden das Rauschen und das erste Einsilberwort gleichzeitig präsentiert. Es gibt keine Vorlaufzeit, in der lediglich Rauschen dargeboten wird. Der Testleiter notiert, wie viele der dargebotenen Wörter der Proband richtig versteht, und achtet auf eine aufrechte Sitzhaltung des Probanden. Nach Bedarf des Probanden bzw. spätestens nach zehn Wortgruppen findet eine Pause statt, in der die Testperson zur Ruhe kommen kann.

Um eine Test-Retest-Genauigkeit ermitteln zu können, wird der Messdurchlauf mit allen Probanden zweimal durchgeführt. Mit einer Spanne von 11 bis 24 Tagen liegt der Zeitraum zwischen erstem und zweitem Messdurchlauf bzw. zwischen Test und Retest bei durchschnittlich 18 Tagen.

Reihenfolge	Wortgruppe	mitFM	korreliert	Ergebnis
1	1	1	1	45
2	16	0	1	10
3	9	1	1	50
4	5	1	1	45
5	13	0	0	20
6	18	1	0	55
7	6	0	0	25
8	12	0	0	10
9	19	1	1	50
10	14	0	1	20
11	7	1	1	40
12	15	0	1	30
13	2	1	0	45
14	20	0	0	20
15	17	0	1	20
16	11	1	0	40
17	4	0	0	30
18	10	1	0	50
19	3	1	0	55
20	8	0	1	45

*Tabelle 3.1: Beispieltabelle mit randomisierter Reihenfolge von Kombination und Wortgruppe, erstellt durch eine Matlab-Funktion. Jede Einsilber-Wortgruppe des Freiburger Sprachtests wird nur einmal verwendet. Es entstehen vier Kombinationen: mit HG bei korreliertem Störsignal (a), mit HG bei unkorreliertem Störsignal (b), mit HG + Übertragungsanlage bei korreliertem Störsignal (c) und mit HG + Übertragungsanlage bei unkorreliertem Störsignal (d). Mit jeder Kombination wird fünfmal gemessen. In der Ergebnisspalte wird die Anzahl der vom Probanden richtig verstandenen Wörter als Sprachverstehen in Prozent notiert.*

### 3.6.2 Omnidirektional / Richtwirkung

Die Messung besteht erneut aus 20 Messdurchläufen. Dem Probanden werden alle 20 Einsilber-Wortgruppen des Freiburger Sprachtests dargeboten. Hierbei wird mit zwei verschiedenen HG-Einstellungen gemessen:

- a) Omnidirektionalität
- b) aktive Richtwirkung

Um Lernverhalten auszuschließen, wird eine randomisierte Reihenfolge von Wortgruppe und HG-Einstellung durch eine Matlab-Funktion bestimmt (siehe Tab. 3.2). Die einzelnen Wörter innerhalb einer Wortgruppe werden ebenfalls in zufälliger Reihenfolge dargeboten. Pro Testperson wird jede Freiburger Wortgruppe nur einmal verwendet. Mit jeder der oben genannten HG-Einstellung wird zehnmal gemessen.

Während der gesamten 20 Messdurchläufe beträgt der Störgeräuschpegel am Probanden 60 dB, während der Nutzschaallpegel auf 58 dB eingestellt ist.

Sobald der Test startet, werden das Rauschen und der erste Einsilber gleichzeitig präsentiert. Der Testleiter notiert, wie viele der dargebotenen Wörter der Proband richtig versteht. Nach Bedarf des Probanden bzw. spätestens nach zehn Wortgruppen findet eine Pause statt, in der die Testperson zur Ruhe kommen kann.

Reihenfolge	Wortgruppe	Richtwirkung	Ergebnis
1	2	0	40
2	3	0	25
3	14	0	25
4	19	1	35
5	20	1	35
6	10	1	25
7	16	1	20
8	13	0	20
9	6	0	30
10	12	1	10
11	5	1	30
12	17	1	25
13	4	1	45
14	11	1	15
15	8	0	25
16	7	1	10
17	18	0	15
18	1	0	15
19	15	0	20
20	9	0	25

*Tabelle 3.2: Beispieltabelle mit randomisierter Reihenfolge von Wortgruppe und Richtcharakteristik, erstellt durch eine Matlab-Funktion. Jede Einsilber-Wortgruppe des Freiburger Sprachtests wird nur einmal verwendet. Es wird zehnmal mit Omnidirektionalität (Richtwirkung = 0) und zehnmal mit aktiver Richtwirkung (Richtwirkung = 1) gemessen. In der Ergebnisspalte wird die Anzahl der vom Probanden richtig verstandenen Wörter als Sprachverstehen in Prozent notiert.*

## 4. Ergebnisse

Für die Auswertung der Studie wird für alle statistischen Tests das Signifikanzniveau auf  $\alpha = 0,05$  festgelegt. Für die Wahl der statistischen Tests ist es sinnvoll, die Ergebnisse auf Normalverteilung zu prüfen. Dies geschieht im Rahmen dieser Auswertung mit dem Shapiro-Wilk-Test [34].

### 4.1 Vergleich von korreliertem und unkorreliertem Rauschen

Um zu untersuchen, ob sich in dem hier verwendeten Messaufbau der Einfluss auf die Sprachverständlichkeit bei korreliertem und bei unkorreliertem Störgeräusch unterscheidet, werden die Messergebnisse der beiden Störgeräusche „Korreliertes Weißes Rauschen“ und „Unkorreliertes Weißes Rauschen“ gegenübergestellt.

Die Anzahl der vom Probanden richtig verstandenen Wörter wird pro Wortgruppe als Sprachverständlichkeit in Prozent angegeben. Die Messergebnisse aus Test und Retest der 14 Probanden sind in Abb. 4.1 mittels vier Box-Whisker-Plots nach Tukey [15] dargestellt.

Mit einem Median von 27,5 % (korreliert) bzw. 25 % (unkorreliert) und einem Interquartilsabstand (IQR) von 20 % bis 35 % (korreliert) bzw. 15 % bis 35 % (unkorreliert) liegen die Messwerte der Sprachmessungen ohne drahtlose Übertragungsanlage nah beieinander. Beide haben eine Spannweite von 0 % bis 65 %, wobei der Maximalwert beim korrelierten Rauschen als Ausreißer definiert wird. Ein Ausreißer liegt vor, wenn sich der Wert unterhalb vom unteren IQR-Grenzwert minus  $1,5 \cdot \text{IQR}$  bzw. oberhalb vom oberen IQR-Grenzwert plus  $1,5 \cdot \text{IQR}$  (hier: 57,5 %) befindet.

Die Ergebnisse der Messungen mit Übertragungsanlage zeigen sowohl beim korrelierten als auch beim unkorrelierten Rauschen einen IQR von 40 % bis 60 %. Die Mediane liegen bei 50 % (korreliert) und 47,5 % (unkorreliert). Die Messungen mit Anlage und korreliertem Rauschen zeigen mit Ergebnissen von 15 % bis 85 % die größte Spannweite.

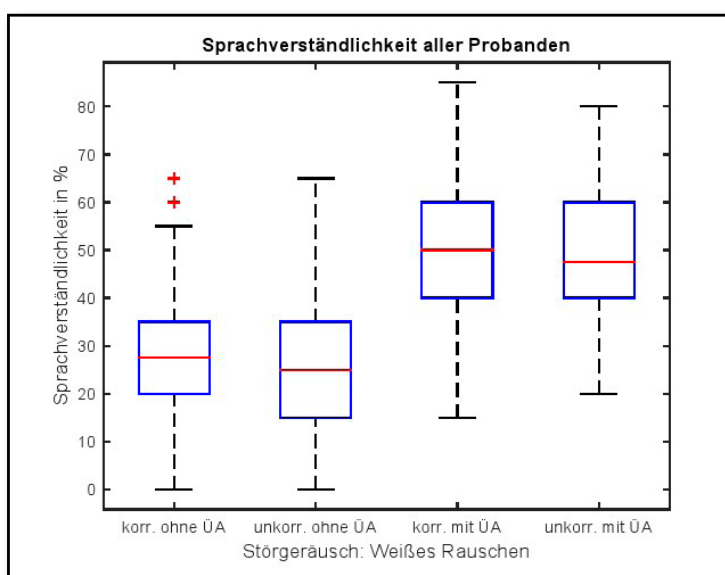


Abb. 4.1: Sprachverständlichkeitswerte aller Probanden (Test und Retest) in Abhängigkeit vom Störgeräusch. Von links nach rechts sind die Ergebnisse der Messkombinationen korreliertes Rauschen ohne Übertragungsanlage (korr. ohne ÜA), unkorreliertes Rauschen ohne Übertragungsanlage (unkorr. ohne ÜA), korreliertes Rauschen mit Übertragungsanlage (korr. mit ÜA) und unkorreliertes Rauschen mit Übertragungsanlage (unkorr. mit ÜA) mit Hilfe von vier Box-Whisker-Plots nach Tukey [15] abgebildet.



Um zu ermitteln, wie sich das Sprachverstehen durch eine drahtlose Übertragungsanlage abhängig von der Art des Störgeräuschs verbessert, werden die Gewinne bei korreliertem und unkorreliertem Rauschen berechnet. Hierzu wird das Sprachverstehen ohne Übertragungsanlage vom Sprachverstehen mit Übertragungsanlage subtrahiert:

$$G_{kor} = SpV_{kor, mit} - SpV_{kor, ohne} \tag{4.1}$$

- $G_{kor}$ : Verstehensgewinn bei korreliertem Weißen Rauschen (WR)
- $SpV_{kor, mit}$ : Sprachverstehen mit Übertragungsanlage bei korreliertem WR
- $SpV_{kor, ohne}$ : Sprachverstehen ohne Übertragungsanlage bei korreliertem WR

$$G_{unkor} = SpV_{unkor, mit} - SpV_{unkor, ohne} \tag{4.2}$$

- $G_{unkor}$ : Verstehensgewinn bei unkorreliertem Weißen Rauschen
- $SpV_{unkor, mit}$ : Sprachverstehen mit Übertragungsanlage bei unkorreliertem WR
- $SpV_{unkor, ohne}$ : Sprachverstehen ohne Übertragungsanlage bei unkorreliertem WR

Pro Testperson und Störgeräusch (korreliertes Rauschen/unkorreliertes Rauschen) liegt ein gemittelttes Gewinnergebnis vor, welches mit Hilfe der Testergebnisse der ersten beiden Messtermine berechnet wurde.

Bei Betrachtung der mittleren Verstehensgewinne aller Probanden in Abhängigkeit vom Störgeräusch (Abb. 4.2) wird deutlich, dass die Mediane mit 24,75 % (korreliert) und 24,5 % (unkorreliert) sehr nah beieinander liegen. Die Spannweite reicht beim korrelierten Rauschen von 14 % bis 37 %, beim unkorrelierten Rauschen von -1,5 % bis 35 %, wobei es sich hier beim Minimalwert um einen Ausreißer handelt, da der Wert unter 2,25 % liegt.

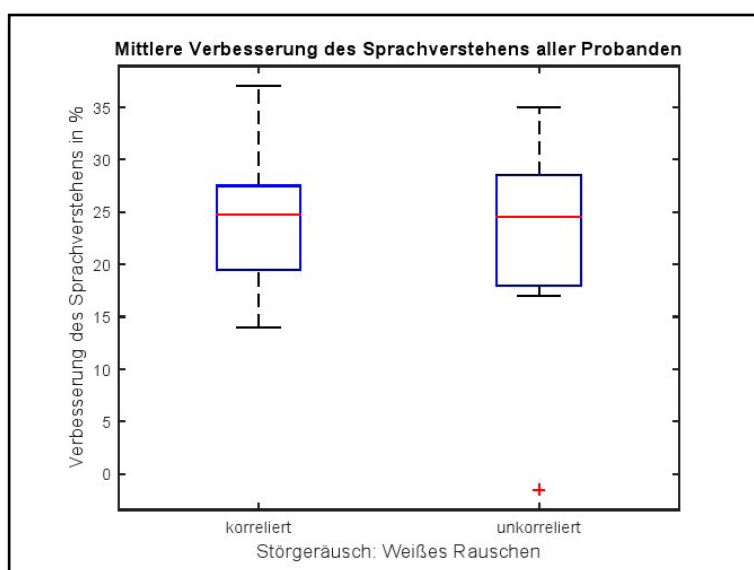


Abb. 4.2: Mittlerer Verstehensgewinn aller Probanden in Abhängigkeit vom Störgeräusch. Mit Hilfe von zwei Box-Whisker-Plots nach Tukey [15] werden die beiden Störsignale „Korreliertes Weißes Rauschen“ und „Unkorreliertes Weißes Rauschen“ bzgl. der Verbesserung der Sprachverständlichkeit gegenübergestellt.

In der vom DHI entwickelten Messmethode zur Evaluierung von drahtlosen Übertragungsanlagen (Kap. 2.2.6) wird empfohlen, unkorreliertes Rauschen zu verwenden, da bei korreliertem Rauschen Interferenzen der Schallwellen auftreten [19]. Sollten die Interferenzen des korrelierten Rauschens einen Einfluss auf die Sprachverständlichkeit haben, liegt die Vermutung nahe, dass es einen signifikanten Unterschied im Mittelwert und vor allem in der Varianz der Messergebnisse beider Störsignale gibt. Abhängig von der Sitzposition bzw. Kopfbewegung des Probanden, könnten die Messergebnisse beim korrelierten Rauschen schwanken.

Um die Sprachverständlichkeit und die Verbesserung der Sprachverständlichkeit aller Probanden bezüglich der Varianz und des Mittelwerts bzw. Medians bei korreliertem und unkorreliertem Rauschen zu vergleichen, werden aufgrund fehlender Normalverteilung der Messergebnisse nichtparametrische statistische Verfahren herangezogen. Mit Hilfe des Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtests [22] wird untersucht, ob ein signifikanter Unterschied im Median zweier Stichproben vorliegt. Mit einem Brown-Forsythe-Test [31] wird die Gegenüberstellung der beiden Störgeräusche fortgeführt. Hierbei wird geprüft, ob es einen signifikanten Unterschied in der Varianz gibt.

Bei der Betrachtung der p-Werte in Tabelle 4.1 wird deutlich, dass es – entgegengesetzt der Vermutung, die Interferenzen des korrelierten Rauschens hätten einen Einfluss auf die Sprachverständlichkeit – weder in der Varianz noch im Median einen signifikanten Unterschied gibt. Hieraus lässt sich schließen, dass die Messmethode schon mit einem 2-kanaligen Audiometer durchführbar ist.

Ein Grund für den fehlenden signifikanten Unterschied könnte sein, dass die Interferenzen schon in den vorbereitenden Maßnahmen (Kap. 3.5) beim Einstellen der Messpegel berücksichtigt werden. Es könnte des Weiteren darauf zurückzuführen sein, dass die Messungen mit erwachsenen Probanden, die ihre Sitzposition konstant gehalten haben, durchgeführt wurden. In weiterführenden Studien bleibt zu prüfen, ob die statistischen Tests ähnliche p-Werte aufweisen, wenn die Messungen mit schwerhörigen Kindern durchgeführt werden.

	Brown-Forsythe-Test	Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest
Sprachverstehen ohne Übertragungsanlage	p = 0,8354	p = 0,5713
Sprachverstehen mit Übertragungsanlage	p = 0,6602	p = 0,2968
Verbesserung der Sprachverständlichkeit	p = 0,4772	p = 0,7249

*Tabelle 4.1: Durch nichtparametrische statistische Tests ermittelte p-Werte beim Vergleich zwischen den Messergebnissen bei korreliertem und unkorreliertem Rauschen. Während beim Brown-Forsythe-Test untersucht wird, ob es einen signifikanten Unterschied in der Varianz gibt, ermittelt der Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest, ob ein signifikanter Unterschied im Median vorliegt.*



## 4.2 Test-Retest-Genauigkeit

Im Rahmen eines Retests werden pro Testperson und Störsignal erneut – wie in Kapitel 4.1 beschrieben – Werte für das Sprachverstehen mit und ohne Übertragungsanlage sowie für die mittlere Verbesserung der Sprachverständlichkeit ermittelt.

Um die Test-Retest-Genauigkeit zu bewerten, wird die Korrelation zwischen den Ergebnissen des ersten Messdurchlaufs (Test) und den Ergebnissen des zweiten Messdurchlaufs (Retest) untersucht. Abb. 4.3 stellt im Test-Retest-Vergleich das Sprachverstehen bei korreliertem Rauschen ohne Übertragungsanlage (a), bei unkorreliertem Rauschen ohne Übertragungsanlage (b), bei korreliertem Rauschen mit Übertragungsanlage (c), bei unkorreliertem Rauschen mit Übertragungsanlage (d) sowie die mittlere Verbesserung der Sprachverständlichkeit bei korreliertem (e) und unkorreliertem (f) Rauschen grafisch dar. Zur Veranschaulichung ist eine Gerade abgebildet, welche der theoretisch idealen Korrelation entspricht, bei der die Messwerte im Test und Retest identisch sind.

Tabelle 4.2 beinhaltet die entsprechenden Korrelationskoeffizienten nach Spearman. Es ist zu erkennen, dass das Sprachverstehen ohne Übertragungsanlage bei korreliertem Rauschen im Test-Retest-Vergleich den höchsten Korrelationskoeffizienten liefert ( $\rho = 0,8812$ ). In puncto Verbesserung der Sprachverständlichkeit liegen mit  $\rho = 0,4093$  (korreliert) und  $\rho = 0,2149$  (unkorreliert) deutlich geringere Korrelationskoeffizienten vor.

Die Korrelation der Test-Retest-Ergebnisse der vier Sprachverständlichkeitsmessungen (Abb. 4.3 a-d) kann man als stark positiv bewerten, während die errechneten Ergebnisse der Verbesserung der Sprachverständlichkeit (Abb. 4.3 e-f) im Test-Retest-Vergleich nur gering korrelieren [23] [33].

	korreliertes Rauschen	unkorreliertes Rauschen
Sprachverstehen ohne Übertragungsanlage	$\rho = 0,8812$	$\rho = 0,6891$
Sprachverstehen mit Übertragungsanlage	$\rho = 0,5132$	$\rho = 0,6902$
Verbesserung der Sprachverständlichkeit	$\rho = 0,4093$	$\rho = 0,2149$

Tabelle 4.2: Korrelationskoeffizienten der Test-Retest-Ergebnisse (nach Spearman)

Abb. 4.4 zeigt die Test-Retest-Abweichungen im Hinblick auf die durchschnittlichen Messwerte (Sprachverständlichkeit und Verbesserung der Sprachverständlichkeit) der 14 Probanden. Wie aufgrund des Korrelationskoeffizienten zu erwarten, sind die Test-Retest-Abweichungen bei der Sprachverständlichkeitsmessung ohne Übertragungsanlage bei korreliertem Rauschen (a) am geringsten. Auch zeigt der Test-Retest-Vergleich mit dem geringsten  $\rho$ -Wert (Verbesserung der Sprachverständlichkeit bei unkorreliertem Rauschen) im Histogramm die größte Streuung (Abb. 4.4 f).

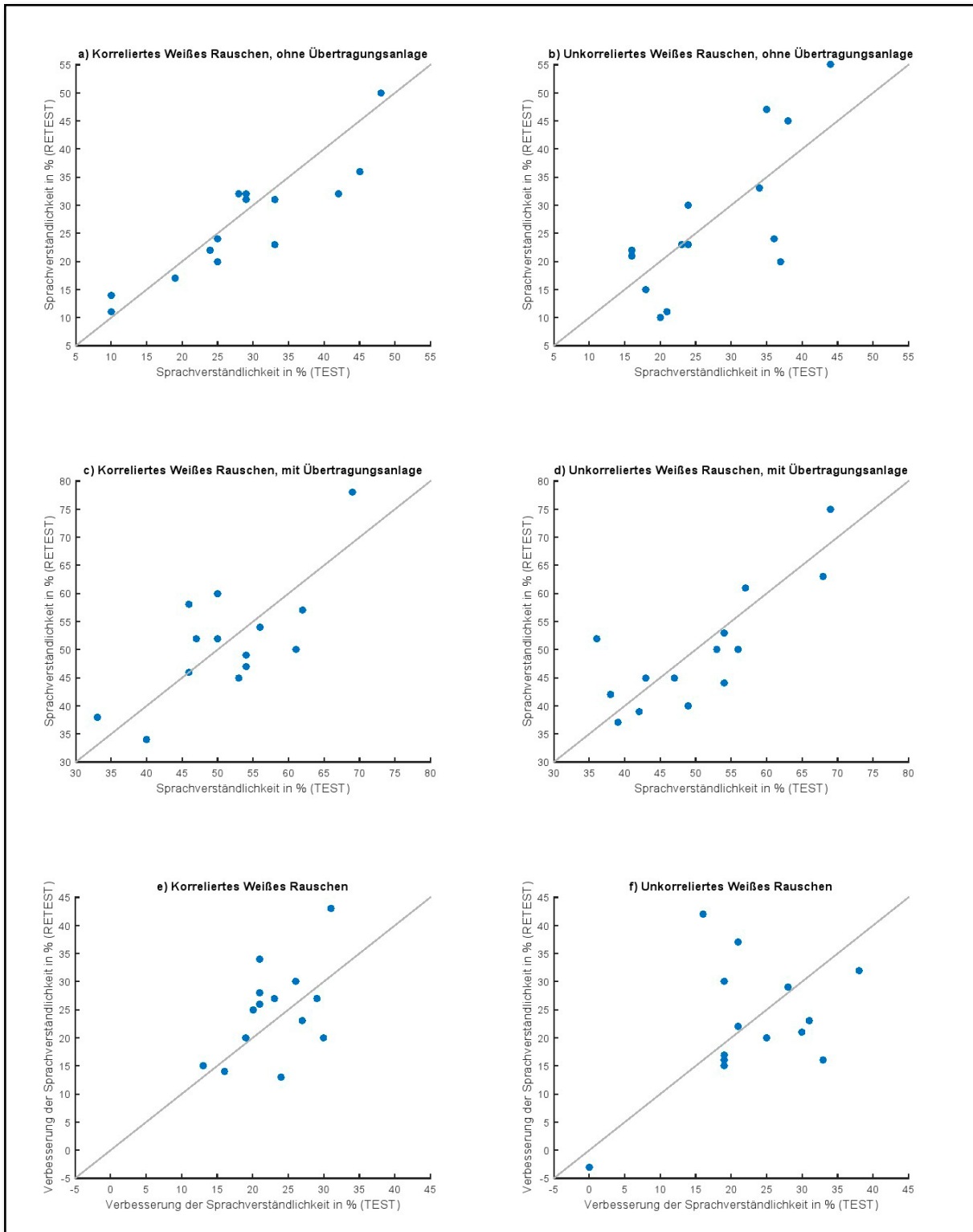


Abb. 4.3: Korrelationen zwischen den Ergebnissen des ersten Messdurchlaufs (Test) und des zweiten Messdurchlaufs (Retest). Ein einzelner blauer Punkt entspricht dem gemittelten Messwert eines Probanden. Zur Veranschaulichung stellt die graue Gerade die theoretische, ideale Korrelation dar, bei der die Messwerte in beiden Messdurchläufen identisch sind.

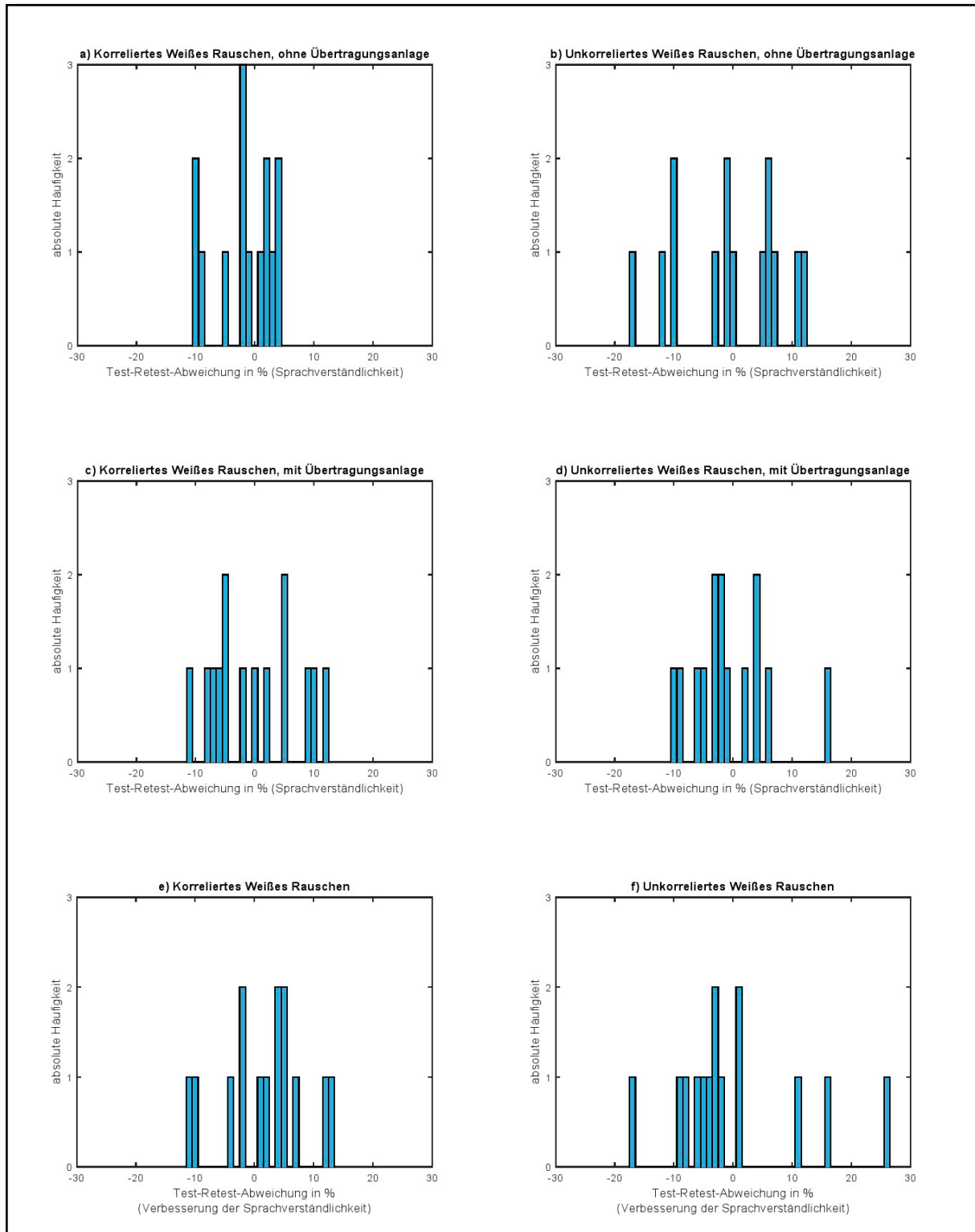


Abb. 4.4: Test-Retest-Abweichung im Hinblick auf die durchschnittlichen Messwerte (Sprachverständlichkeit und Verbesserung der Sprachverständlichkeit) der 14 Probanden.

### 4.3 Vergleich von Omnidirektionalität und aktiver Richtwirkung

Um zu untersuchen, ob die Richtcharakteristik der Hörsysteme beim hier verwendeten Messaufbau zur Evaluierung von drahtlosen Signalübertragungsanlagen einen Einfluss auf die Sprachverständlichkeit hat, werden die beiden Hörgeräteeinstellungen „Omnidirektionalität“ und „aktive Richtwirkung“ gegenübergestellt.

Die Anzahl der vom Probanden richtig verstandenen Wörter wird pro Wortgruppe als Sprachverständlichkeit in Prozent angegeben. Die Messergebnisse der 14 Probanden sind in Abb. 4.5 mit Hilfe von zwei Box-Whisker-Plots nach Tukey [15] dargestellt.

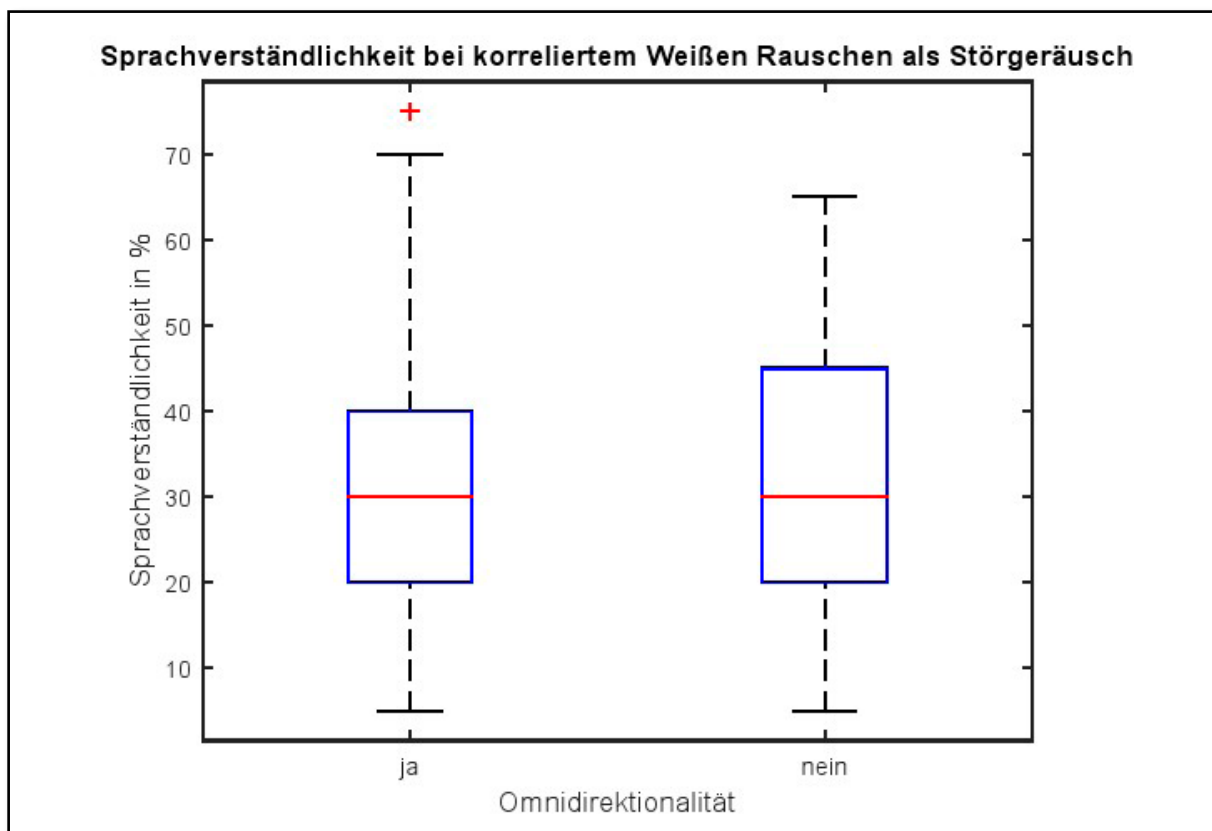


Abb. 4.5: Sprachverständlichkeit in Abhängigkeit der Richtcharakteristik, dargestellt mit Hilfe von zwei Box-Whisker-Plots nach Tukey [15]. Sowohl bei omnidirektional eingestellten Hörgeräten als auch bei aktiver Richtwirkung liegt der Median der Sprachverständlichkeitsmessungen bei 30 %. Der IQR reicht von 20 % bis 40 % (omnidirektional) bzw. von 20 % bis 45 % (aktive Richtwirkung). Mit Ergebnissen zwischen 5 % und 65 % ist die Spanne bei aktiver Richtwirkung etwas geringer als bei Omnidirektionalität. Hier liegt eine Ergebnisspanne von 5 % bis 75 % vor, wobei es sich bei dem Maximalwert um einen Ausreißer handelt.

Sowohl bei omnidirektional eingestellten Hörgeräten als auch bei aktiver Richtwirkung liegt der Median der Sprachverständlichkeitsmessungen bei 30 %. Der IQR reicht von 20 % bis 40 % (omnidirektional) bzw. von 20 % bis 45 % (aktive Richtwirkung). Mit Ergebnissen zwischen 5 % und 65 % ist die Spanne bei aktiver Richtwirkung etwas geringer als bei Omnidirektionalität. Hier liegt eine Ergebnisspanne von 5 % bis 75 % vor, wobei es sich bei dem Maximalwert um einen Ausreißer handelt, da er 70 % überschreitet.

Wie in Kapitel 3.4 beschrieben, verlieren Richtmikrofone im Diffusschall ihren positiven Effekt. Da sich der Zuhörer in der simulierten Vortragssituation außerhalb des Hallradius befindet, sollte die Richtcharakteristik demnach keine positive Wirkung zeigen. Ob die vom DHI erstellte Messmethode diesen Aspekt berücksichtigt, wird mit Hilfe der Messergebnisse aus Kapitel 3.6.2 und statistischen Tests überprüft.

Aufgrund fehlender Normalverteilung der Messergebnisse werden erneut nichtparametrische Testverfahren herangezogen. Aus den ermittelten Werten des Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtests [22] sowie des Brown-Forsythe-Tests [31] kann man schließen, dass kein signifikanter Unterschied im Median ( $p = 0,1749$ ) und in der Varianz ( $p = 0,7393$ ) der beiden Messreihen „Omnidirektionalität“ und „aktive Richtwirkung“ vorliegt.

Das Einschalten der Richtwirkung zeigt gegenüber der Omnidirektionalität keine Veränderung. Die Richtmikrofontechnik der Hörgeräte stellt bei den Sprachverständlichkeitsmessungen somit keinen Vorteil dar. Die Messmethode simuliert demnach nicht nur bezüglich Nutz- bzw. Störschallpegel und -winkel die oben genannte Vortragssituation, sondern auch hinsichtlich der Richtcharakteristik der Hörsysteme.

## 5. Fazit und Ausblick

Der vom DHI erstellte und hier untersuchte Messaufbau zur Evaluierung von drahtlosen Signalübertragungsanlagen simuliert eine Vortragsituation, bei der sich der Zuhörer in 4 m Entfernung zum Sprecher befindet. Wie die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, erfolgt die Simulation nicht nur durch die entsprechenden Pegel und Winkel von Nutz- und Störschall, sondern auch durch die Richtcharakteristik der Hörgeräte. In der nachgebildeten Vortragsituation befindet sich der Zuhörer außerhalb des Hallradius, sodass die Richtmikrofontechnik seiner Hörsysteme keinen positiven Effekt auf die Sprachverständlichkeit hat. Wie die Ergebnisse in Kapitel 4.3 zeigen, wird dieser Aspekt in dem untersuchten Messaufbau berücksichtigt.

Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist unter anderem, die Praktikabilität der Messmethode aufzuzeigen. Bei der Auswertung der Untersuchung, welchen Einfluss die Art des Störsignals auf die Sprachverständlichkeitsmessung hat, wird deutlich, dass der Vergleich zwischen korreliertem und unkorreliertem Rauschen keine signifikanten Unterschiede in dem ermittelten Sprachverstehen zeigt. Daraus lässt sich schließen, dass das für den Messaufbau verwendete Audiometer lediglich zwei Kanäle benötigt, was durch die Mindestausstattung eines Sprachaudiometers erfüllt ist [12].

Durch einen Retest wird bestätigt, dass die untersuchte Messmethode bezüglich der Sprachverständlichkeitsmessungen Stabilität zeigt. Die Test-Retest-Korrelation ist hierbei als stark positiv zu bewerten.

Die Korrelation der errechneten Test-Retest-Ergebnisse hinsichtlich der Verbesserung der Sprachverständlichkeit durch eine Übertragungsanlage ist als gering einzustufen. Es ist sinnvoll, die Messungen im Rahmen einer weiterführenden Studie mit einer größeren Probandenanzahl fortzusetzen, um so die Ergebnisse statistisch genauer abzusichern.

Der durchschnittliche Hörverlust der Probandengruppe dieser Studie zeigt eine mittelgradige Hochton-Schallempfindungsschwerhörigkeit, welche als Typ N3 einzustufen [13] und einem großen Anteil aller Schwerhörigen zuzuordnen ist [3] [10]. Eine mögliche Fragestellung für weitere empirische Untersuchungen ist, welche Messwerte resultieren, wenn die Probanden Kinder sind und/oder einen anderen Hörverlust aufzeigen.

Im Fokus dieser Arbeit stehen drahtlose Signalübertragungsanlagen in Kombination mit Hörgeräten und DAI-Aufsteckadaptern, wobei ein Modell eines Herstellers herangezogen wird. Im Rahmen weiterführender Studien ist es interessant zu untersuchen, welche Messwerte unter Verwendung diverser Übertragungsanlagen verschiedener Hersteller – sowie herstellerübergreifender Technik – resultieren.

Hinsichtlich der Zielsetzung dieser Bachelorarbeit kann zusammenfassend gesagt werden, dass die vom DHI erstellte Messmethode mit geringem Kosten- und Zeitaufwand praktikabel ist. Für den Messaufbau genügt schon eine herkömmliche Messkabine mit der

Mindestausstattung für Sprachaudiometer. Die Messmethode simuliert – sowohl durch entsprechende Pegel und Winkel von Nutz- und Störschall als auch durch die Richtcharakteristik der Hörgeräte – eine typische Vortragssituation. Auch zeigen die Ergebnisse der Sprachverständlichkeitsmessungen eine hohe Test-Retest-Genauigkeit auf.

Mit der hier untersuchten Messmethode ist es somit realisierbar, den Nutzen einer drahtlosen Signalübertragungsanlage individuell für jeden Hörbeeinträchtigten messtechnisch nachzuweisen, um dem Schwerhörigen, dessen Angehörigen und seinem Kostenträger den Erfolg der Anlage aufzeigen zu können. Die Messanordnung bietet zudem die Möglichkeit, verschiedene Übertragungssysteme objektiv zu vergleichen und reproduzierbare Messungen durchzuführen.

## 6. Verzeichnisse

### 6.1 Abkürzungsverzeichnis

ASHA	American Speech-Language-Hearing Association
AVWS	Auditive Verarbeitungs- und Wahrnehmungsstörung
DAI	Direct Audio Input
DHI	Deutsches Hörgeräte Institut
FM	Frequenzmodulation
HAT	Hörassistententechnologie
HG	Hörgerät
IQR	Interquartilsabstand (bzw. <i>interquartile range</i> )
OLSA	Oldenburger Satztest
SE-HV	Schallempfindungshörverlust
SNR	Signal-Rausch-Abstand (bzw. <i>signal-to-noise ratio</i> )
WR	Weißes Rauschen



## 6.2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Komponenten einer drahtlosen Signalübertragungsanlage	4
Abb. 2.2	Verbesserung des SNR durch eine drahtlose Übertragungsanlage	5
Abb. 2.3	Direktschall, frühe Reflexionen und späte Reflexionen	6
Abb. 2.4	Direkt- und Diffusschall in Abhängigkeit vom Abstand zur Schallquelle	7
Abb. 2.5	Schalldruckpegel in Abhängigkeit von der Distanz zur Schallquelle	8
Abb. 2.6	Beispiel einer linearen Annäherung an die Psychometrische Funktion	9
Abb. 2.7	Visualisierung der Relation zwischen Distanz und Verständlichkeit	9
Abb. 2.8	Sprachverständlichkeit in Abhängigkeit von der Distanz zur Schallquelle	10
Abb. 2.9	Messaufbau zur Evaluierung von drahtlosen Übertragungsanlagen nach der ASHA	11
Abb. 2.10	Messaufbau zur objektiven Evaluierung drahtloser Übertragungsanlagen nach Thibodeau	12
Abb. 2.11	Bewertungsbogen der subjektiven Messmethode zur Evaluierung drahtloser Übertragungsanlagen nach Thibodeau	13
Abb. 2.12	Im Rahmen einer Dissertation verwendeter Messaufbau zur Evaluierung drahtloser Übertragungsanlagen	14
Abb. 2.13	In Kliniken verwendeter Messaufbau zur Evaluierung drahtloser Übertragungsanlagen	15
Abb. 2.14	Messaufbau zur Evaluierung drahtloser Übertragungsanlagen (DHI)	15
Abb. 3.1	Im Rahmen der Studie verwendeter Messaufbau	18
Abb. 3.2	Durchschnittlicher Hörverlust der Probanden	19
Abb. 3.3	Einstellung der drahtlosen Übertragungsanlage via Messbox	21
Abb. 3.4	Messkurven bei Einstellung der drahtlosen Übertragungsanlage via Messbox	22
Abb. 4.1	Sprachverständlichkeit in Abhängigkeit vom Störgeräusch	26
Abb. 4.2	Verbesserung des Sprachverstehens in Abhängigkeit vom Störgeräusch	27
Abb. 4.3	Korrelation zwischen den Ergebnissen des Tests und des Retests	30
Abb. 4.4	Test-Retest-Abweichungen	31
Abb. 4.5	Sprachverständlichkeit in Abhängigkeit der Richtcharakteristik	32

### 6.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1	Mit Matlab erstellte Beispieldaten mit randomisierter Reihenfolge von Kombination und Wortgruppe	24
Tabelle 3.2	Mit Matlab erstellte Beispieldaten mit randomisierter Reihenfolge von Wortgruppe und Richtcharakteristik	25
Tabelle 4.1	Ermittelte p-Werte beim Vergleich zwischen korreliertem und unkorreliertem Rauschen	28
Tabelle 4.2	Korrelationskoeffizienten der Test-Retest-Ergebnisse (nach Spearman)	29

## 6.4 Literaturverzeichnis

- [1] acousticon GmbH. ACAM Handbuch Rev. 3756. [www.acousticon.eu/intern/acam5hilfe](http://www.acousticon.eu/intern/acam5hilfe), 2015. [Online; abgerufen am 30.09.2015].
- [2] acousticon GmbH. acousticon dB-99. [www.acousticon.eu/produkte/lautsprecher/dB-99](http://www.acousticon.eu/produkte/lautsprecher/dB-99), 2015. [Online; abgerufen am 30.09.2015].
- [3] American Hearing Research Foundation. Hearing loss. <http://american-hearing.org/disorders/hearing-loss/>. [Online; abgerufen am 02.12.2015].
- [4] Arweiler, I. *Einfluss von Störgeräuschen auf das Sprachverstehen bei Kindern mit Auditiven Verarbeitungs- und Wahrnehmungsstörungen unter Einsatz eines FM Systems*. Fachhochschule Lübeck, Diplomarbeit, 2004, S. 9.
- [5] ASHA Ad Hoc Committee on FM Systems. *Guidelines for Fitting and Monitoring FM Systems*. 2002.
- [6] Biesalski, P., Böhme, G., und Frank, F. *Phoniatrie und Pädaudiologie: Ein Überblick*. Georg Thieme Verlag: Stuttgart, 1973, S. 80.
- [7] Brüel & Kjær. Sound Level Meter - Type 2250. <http://www.bksv.com/Products/handheld-instruments/sound-level-meters/sound-level-meters/type-2250>, 2015. [Online; abgerufen am 30.09.2015].
- [8] Crandell, C., Smaldino, J., und Flexer, C. *Sound field amplification: Applications to speech perception and classroom acoustics*. Thomson Delmar Learning, 2005.
- [9] De Ceulaer, G., Bestel, J., und Mülder, H. Speech understanding in noise with the Roger Pen, Naida CI Q70 processor, and integrated Roger 17 receiver in a multi-talker network. *Otology - European Archives of Oto-Rhino-Laryngology* (2015).
- [10] Deutscher Schwerhörigenbund e. V. *Statistische Angaben zur Hörschädigung in Deutschland von 2005 bis 2011*. 2011.
- [11] Dickreiter, M., Dittel, V., Hoeg, W., und Wöhr, M. *Handbuch der Tonstudioteknik, Band 1*. K. G. Saur: München, 2008, S. 126.
- [12] DIN EN 60645-2:1997. Audiometer – Teil 2: Geräte für die Sprachaudiometrie, S. 12.
- [13] DIN IEC 60118-15:2010. Electroacoustics – hearing aids – part 15: Methods for characterising signal processing in hearing aids with a speech-like signal, S. 17.
- [14] Friesecke, A. *Die Audio-Enzyklopädie: Ein Nachschlagewerk für Tontechniker*. De Gruyter, 2014, S. 488.
- [15] Geßler, J. R. *Statistische Grafik*. Springer Basel AG, 1993, S. 97.
- [16] Hopkins, H., und Stryker, N. A proposed loudness-efficiency rating for loud-speakers and the determination of system power requirements for enclosures. *Proceedings of the IRE* (March 1948).
- [17] Hörgeräte Seifert. FM-Technologie. <http://www.hoergeraete-seifert.de/hilfsmittel/fm-anlagen/index.html>, 2015. [Online; abgerufen am 06.10.2015].
- [18] Huber, L., Kahlert, J., und Klatt, M. *Die akustisch gestaltete Schule – auf der Suche nach dem guten Ton*. Vandenhoeck & Ruprecht, 2002, S. 120 f.
- [19] Husstedt, H. *An easily applicable measurement setup for the evaluation of the individual benefit of wireless remote microphone technology*. Internes Dokument des DHI, 2015.

- [20] Husstedt, H. *Messablauf zur Evaluierung von drahtlosen Übertragungsanlagen*. Internes Dokument des DHI, 2015.
- [21] Husstedt, H. *Signalverarbeitung in Hörsystemen*. Fachhochschule Lübeck, Vorlesung: Technologie und Messtechnik von Hörsystemen, Wintersemester 2014/15, S. 62.
- [22] Kühlmeyer, M. *Statistische Auswertungsmethoden für Ingenieure*. Springer, 2001, S. 213.
- [23] Kronthaler, F. *Statistik angewandt*. Springer, 2014, S. 62.
- [24] Lazarus, H., Sust, C. A., Steckel, R., Kulka, M., und Kurtz, P. *Akustische Grundlagen sprachlicher Kommunikation*. Springer, 2007, S. 193.
- [25] Metz, M. J. *Sandlin's textbook of hearing aid amplification: Technical and clinical considerations*. Plural Publishing, 2014, Kap. 17.
- [26] Mülder, H. E., und Lützen, M. Neuer drahtloser Technologiestandard. *Hörakustik* (07/2013).
- [27] Neumann, J. *Lärmmeßpraxis am Arbeitsplatz und in der Nachbarschaft: Einführung in die Schallphysik und Schallmeßtechnik (Kontakt & Studium Band 4)*. expert verlag, 1979, S. 64.
- [28] Phonak. Kinder hören besser mit FM. [http://www.phonak.com/content/dam/phonak/b2b/C\\_M\\_tools/FM/de/Kinder-hoeren-besser-mit-FM.pdf](http://www.phonak.com/content/dam/phonak/b2b/C_M_tools/FM/de/Kinder-hoeren-besser-mit-FM.pdf), 2015. [Online; abgerufen am 06.10.2015].
- [29] Purdy, S. C., Smart, J. L., Baily, M., and Sharma, M. Do children with reading delay benefit from the use of personal FM systems in the classroom? *International Journal of Audiology* (2009).
- [30] Radtke, J. *Tontechnik Formelsammlung, Band 1: Grundlagen mit Beispielrechnungen und Schaubildern*. Jan Radtke, 2014, S. 26.
- [31] Sachs, L., und Hedderich, J. *Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R*. Springer, 2006, S. 369.
- [32] Scharfer, E., und Thibodeau, L. Speech recognition in noise in children with cochlear implants while listening in bilateral, bimodal, and FM-system arrangements. *American Journal of Audiology* (2006).
- [33] Schendera, C. *Regressionsanalyse mit SPSS*. De Gruyter Oldenbourg, 2014, S. 16.
- [34] Schlittgen, R. *Statistische Auswertungen mit R*. Oldenbourg, 2004, S. 77.
- [35] Strutz, J., und Mann, W. J. *Praxis der HNO-Heilkunde, Kopf- und Halschirurgie*. Thieme, 2009, S. 982.
- [36] Thibodeau, L. Comparison of speech recognition with adaptive digital and FM remote microphone hearing assistance technology by listeners who use hearing aids. *American Journal of Audiology* (2014).
- [37] Valente, M., Hosford-Dunn, H., und Roeser, R. J. *Audiology: Treatment*. Thieme, 2008, Kap. 17.
- [38] Wiehe, S. *Untersuchung zum Sprachverständnis im Störgeräusch mit dem Oldenburger Satztest (OLSA) mit und ohne FM-Anlage*. Philipps-Universität Marburg, Dissertation, 2010.