

Förderpreis 2017

Vergleich des Sprachverstehens bei verschiedenen drahtlosen Übertragungs- anlagen (FM-Anlagen)

Bachelor-Abschlussarbeit

Verfasser: Christina Fitschen

Prüfer: Dr. Hendrik Husstedt

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

Datum der Abgabe: 02.09.2016

E UHA

Europäische Union der
Hörakustiker e.V.

Herausgeber: Europäische Union der Hörakustiker 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
Internet: 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 2017

Zusammenfassung

Drahtlose Übertragungsanlagen können in verschiedenen Alltagssituationen zu einer Verbesserung der Sprachverständlichkeit beitragen. Insbesondere bei Umgebungslärm, größeren Distanzen zum Sprecher oder einer halligen Umgebung werden die Vorteile deutlich. Die Hörgerätetechnologie stößt in diesen schwierigen akustischen Situationen häufig an ihre Leistungsgrenze, sodass eine drahtlose Übertragungsanlage eine sinnvolle Ergänzung darstellt.

Obwohl die Vorteile drahtloser Übertragungsanlagen generell bekannt sind, ist es sinnvoll, dem Anwender, dessen Angehörigen und dem Kostenträger den Nutzen gegenüber der alleinigen Verwendung von Hörgeräten aufzuzeigen. Bisher fehlt eine genormte und einheitliche Messmethode, die eine sowohl realitätsnahe als auch praxistaugliche Evaluierung von drahtlosen Übertragungsanlagen zulässt.

Das Deutsche Hörgeräte Institut hat eine Messmethode entwickelt, die realitätsnah, aber auch in der Praxis beim Hörakustiker, HNO-Arzt oder in der Klinik einsetzbar ist. Der Messaufbau simuliert mit einem herkömmlichen Sprachaudiometer die für drahtlose Übertragungsanlagen typische Vortrags- oder Klassenraumsituation und schafft dabei eine Annäherung an die reale Situation.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit werden fünf verschiedene drahtlose Übertragungsanlagen mittels der vom Deutschen Hörgeräte Institut entwickelten Messmethode anhand von Probandenmessungen miteinander verglichen. Die Übertragungsanlagen unterscheiden sich hinsichtlich der Hersteller, der Richtcharakteristik des Anlagenmikrofons und der Technik zur Übermittlung des Signals. Es wird objektiv sowie subjektiv geprüft, ob durch die verschiedenen Eigenschaften der Anlagen Unterschiede im Sprachverstehen der Probanden resultieren. Dabei werden zwei Messdurchgänge durchgeführt, bei denen der Pegel des Störgeräusches verändert wird.

Insgesamt zeigen alle Übertragungsanlagen einen deutlichen Gewinn gegenüber der alleinigen Verwendung von Hörgeräten. Weder die objektive noch die durch die Probanden durchgeführte subjektive Evaluierung zeigen Unterschiede hinsichtlich der verschiedenen Richtcharakteristiken der Übertragungsanlagen auf. Dagegen haben die Übertragungsanlagen mit digitaler Technik in allen Messdurchgängen ein signifikant besseres Ergebnis erzielt als die analoge Anlage.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	i
Zusammenfassung	ii
Inhaltsverzeichnis	iii
1. Einleitung	1
2. Grundlagen	3
2.1 Funktionsweise einer drahtlosen Übertragungsanlage	3
2.2 Vorteile einer drahtlosen Übertragungsanlage	3
2.2.1 Minimierung des Nachhalls	4
2.2.2 Reduzierung der negativen Effekte von Umgebungslärm	6
2.3 Überprüfung der Übertragungscharakteristik von drahtlosen Übertragungsanlagen mithilfe der Messbox	6
2.4 Evaluierung drahtloser Übertragungsanlagen	7
2.5 Messmethode des DHI zur Evaluierung von drahtlosen Übertragungsanlagen	8
2.5.1 Messaufbau	9
2.5.2 Messsignal	9
2.5.3 Messablauf	10
2.5.4 Bisherige Studie zur Messmethode des DHI	10
3. Methodik	12
3.1 Ziele der Messungen	12
3.2 Messgeräte	12
3.3 Probanden	13
3.4 Messaufbau	14
3.5 Messsignal	15
3.6 Vorbereitende Maßnahmen	15
4. Durchführung	17
4.1 Vergleich verschiedener drahtloser Übertragungsanlagen bei einem Störsignal von 60 dB	17
4.2 Test-Retest	18
4.3 Vergleich verschiedener drahtloser Übertragungsanlagen bei einem Störsignal von 65 dB	18
4.4 Subjektive Evaluierung der drahtlosen Übertragungsanlagen	19
5. Ergebnisse	21
6. Fazit und Ausblick	30
7. Danksagung	32
8. Verzeichnisse	33
8.1 Abkürzungsverzeichnis	33
8.2 Abbildungsverzeichnis	34
8.3 Tabellenverzeichnis	35
8.4 Literaturverzeichnis	36

1. Einleitung

Drahtlose Übertragungsanlagen können in verschiedenen Alltagssituationen zu einer Verbesserung der Sprachverständlichkeit beitragen. Insbesondere bei Umgebungslärm, größeren Distanzen zum Sprecher oder einer halligen Umgebung werden die Vorteile deutlich. Das Sprachsignal wird in unmittelbarer Nähe zum Sprecher aufgenommen, dementsprechend mit hohem Signalrauschabstand (SNR) erfasst und mit einem beliebigen Pegel an den Zuhörer übermittelt. Dadurch tragen Übertragungsanlagen, vor allem bei Menschen mit eingeschränktem Hörvermögen, zu einer Verbesserung des Sprachverstehen und einer Verringerung der Höranstrengung bei (Valente et al., 2008).

Die Hörgerätetechnologie bietet in schwierigen akustischen Situationen häufig kein befriedigendes Ergebnis, da sie bei Nachhall, Umgebungslärm und größerer Distanz zum Sprecher auch heute noch an ihre Leistungsgrenze stößt (Metz, 2014). Eine drahtlose Übertragungsanlage stellt hierbei eine sinnvolle Ergänzung dar.

Um den Nutzen einer drahtlosen Übertragungsanlage objektiv und individuell dem Anwender, dessen Angehörigen und dem Kostenträger aufzuzeigen, ist eine messtechnische Evaluierung notwendig. Zudem besteht dadurch die Möglichkeit, verschiedene Anlagen miteinander zu vergleichen. Wichtig dabei ist, dass die Messmethode einheitlich standardisiert ist, um vergleichbare und reproduzierbare Messergebnisse zu erhalten (Husstedt, 2015). Bisher fehlt eine Messmethode, die eine sowohl realitätsnahe als auch praxistaugliche Evaluierung von drahtlosen Übertragungsanlagen zulässt.

Das Deutsche Hörgeräte Institut (DHI) hat eine Messmethode entwickelt, die möglichst realitätsnah, aber auch in der Praxis beim Hörakustiker, HNO-Arzt oder in der Klinik einsetzbar ist (Husstedt, 2015). Zudem ist die Methode mit einem geringen Kosten- und Zeitaufwand durchführbar. Der Messaufbau simuliert mit einem herkömmlichen Sprachaudiometer die für drahtlose Übertragungsanlagen typische Vortrags- oder Klassenraum-situation und schafft dabei eine Annäherung an die reale Situation (Husstedt et al., 2015).

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit werden fünf verschiedene drahtlose Übertragungsanlagen mittels der vom DHI entwickelten Messmethode anhand von Probandenmessungen miteinander verglichen. Die Übertragungsanlagen unterscheiden sich hinsichtlich des Herstellers, der Richtcharakteristik des Anlagenmikrofons und der Technik zur Übermittlung des Signals. Es wird sowohl objektiv als auch subjektiv geprüft, ob durch die verschiedenen Eigenschaften der Anlagen Unterschiede in den Messergebnissen resultieren.

Dabei werden zwei Messdurchgänge durchgeführt, bei denen der Pegel des Störgeräusches variiert wird. Des Weiteren wird der Messdurchlauf mit dem niedrigeren Störschallpegel mit denselben Probanden zu einem späteren Zeitpunkt ein zweites Mal durchgeführt. Dabei wird die Test-Retest-Genauigkeit ermittelt (Hedderich et al., 2016). Während

der Messung mit dem erhöhten Störschallpegel wird zusätzlich die subjektive Empfindung der Probanden bzgl. der verschiedenen Übertragungsanlagen mittels eines Fragebogens erfasst.

2. Grundlagen

2.1 Funktionsweise einer drahtlosen Übertragungsanlage

Die Grundkonfiguration einer drahtlosen Übertragungsanlage besteht aus einem Sender und einem Empfänger. Es gibt verschiedene Möglichkeiten für die Sender-Ausführung. Das Nutzsignal kann situationsbedingt ein Audiosignal aus dem TV, MP3-Player, Telefon oder ein Sprecher sein. Ein weitverbreitetes Anwendungsgebiet stellt der Unterricht in Schulen dar, wovon schwerhörige Schüler stark profitieren. Dabei trägt die Lehrkraft den Sender mit einem Mikrofon am Körper. Das Mikrofon nimmt das Nutzsignal, in diesem Fall das Sprachsignal des Lehrers, auf, und der Sender sendet die Signale über elektromagnetische Wellen aus. Für die Übertragung wird oft die Technik der Frequenzmodulation (FM) eingesetzt, weshalb solche Anlagen in der Praxis oft als „FM-Anlagen“ bezeichnet werden (Husstedt, 2015).

Für die Aufnahme und Umsetzung der akustischen Signale kommt ein Empfänger zum Einsatz. Hierbei trägt der Schwerhörige den Empfänger am Körper. Je nach Gerätekonfiguration kann das Signal auf unterschiedliche Art und Weise zum Zuhörerohr geleitet werden. Beispielsweise über einen Kopfhörer oder eine Induktionsschleife mit Einkopplung in die Hörgeräte (HG). Eine weitere Möglichkeit ist, wie in Abb. 2.1 schematisch dargestellt, ein Audioschuh - eine Verbindungsvorrichtung -, mit dem der Empfänger auf ein individuelles HG aufgesteckt wird. Voraussetzung hierfür ist, dass das Hörgerät einen Direkt-Audio-Input (DAI) besitzt.

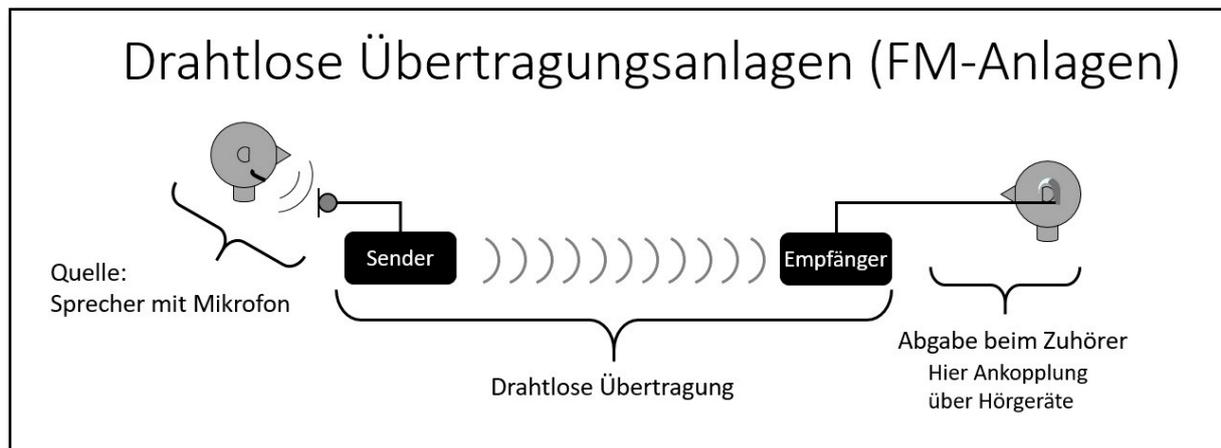


Abb. 2.1: Schematische Darstellung der Funktionsweise einer drahtlosen Übertragungsanlage (Husstedt, 2016)

2.2 Vorteile einer drahtlosen Übertragungsanlage

Moderne digitale HG verfügen zwar über Funktionen wie eine Störschallunterdrückung und eine Hervorhebung von Sprachsignalen, dennoch ist es für Hörgeschädigte in akustischen Problemsituationen oft schwierig, Sprache zu verstehen (Seifert, 2016). Besonders

Nebengeräusche, längere Entfernungen zum Sprecher, eine schlechte Raumakustik, welche oftmals durch eine hohe Nachhallzeit bedingt ist, und ein häufiger Standortwechsel des Sprechers erschweren das Sprachverstehen erheblich. Die genannten Faktoren können durch die Verwendung einer drahtlosen Übertragungsanlage reduziert werden (Valente et al., 2008).

2.2.1 Minimierung des Nachhalls

Eine drahtlose Übertragungsanlage hat die positive Auswirkung, den Einfluss von Nachhall zu reduzieren. Sprache, die in einem Raum gesprochen wird, gelangt als Direktschall sowie als Schallreflexion zum Hörer. Direktschall ist dabei der Schall, der auf direktem Weg vom Sender zum Empfänger übermittelt wird. Das Signal wird, abhängig von der akustischen Beschaffenheit eines Raumes, reflektiert und trifft unterschiedlich verzögert beim Hörer ein. Bei den Schallreflexionen wird zwischen frühen und späten Reflexionen unterschieden. Als frühe Reflexionen werden diejenigen Anteile eines Schallsignals bezeichnet, die durch Schallreflexionen gekennzeichnet sind, die innerhalb von 50 ms nach dem Direktschall am Gehör eintreffen (siehe Abb. 2.2) (Veit, 2005). Sie können die Lautstärke des Signals erhöhen und somit zum Sprachverstehen beitragen. Alle später eintreffenden Reflexionen werden dem diffusen Nachhall zugeordnet.

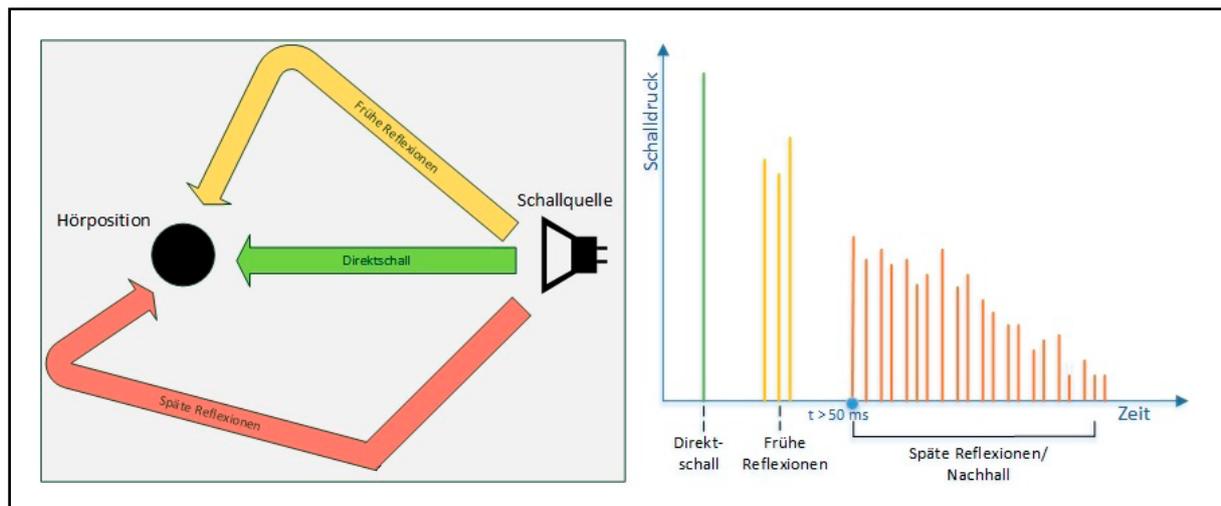


Abb. 2.2: Schematische Darstellung von Direktschall (grün), frühen Reflexionen (gelb) und späten Reflexionen (rot)

Bei größerer Distanz zum Sprecher reduziert sich die direkte Schallenergie, und die reflektierte Schallenergie überwiegt. Als Hallradius r_H wird der Abstand bezeichnet, bei dem das direkte Schallfeld in das diffuse Schallfeld übergeht (siehe Abb. 2.3) (Veit, 2005). Der Hallradius kann mittels der Nachhallzeit T näherungsweise berechnet werden. Die Nachhallzeit ist die Zeit, in der nach Beenden der Schallabstrahlung in einem Raum der Schalldruck auf $1/1000$ des Ausgangswertes gesunken ist. Dies entspricht einer Abnahme von 60 dB (Möser, 2009).

Die Nachhallzeit berechnet sich in geschlossenen Räumen näherungsweise nach Wallace Sabine (Möser, 2009) mit

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

T: Nachhallzeit [s]

V: Raumvolumen [m³]

A: Äquivalente Absorptionsfläche [m²]

Der Hallradius (Möser, 2009) ergibt sich durch

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

r_H: Hallradius

V: Raumvolumen [m³]

T: Nachhallzeit [s]

Mit einer drahtlosen Übertragungsanlage wird die Distanz zwischen Sprecher und Zuhörer überbrückt. Das Mikrofon der drahtlosen Übertragungsanlage befindet sich in einem geringen Abstand zum Mund des Sprechers; dadurch beträgt die Sprecherentfernung zum Hörgeschädigten nicht mehr als 20 cm. Befindet sich der Zuhörer außerhalb des Hallradius, wird das Sprachverstehen dennoch nicht durch den Nachhall beeinflusst.

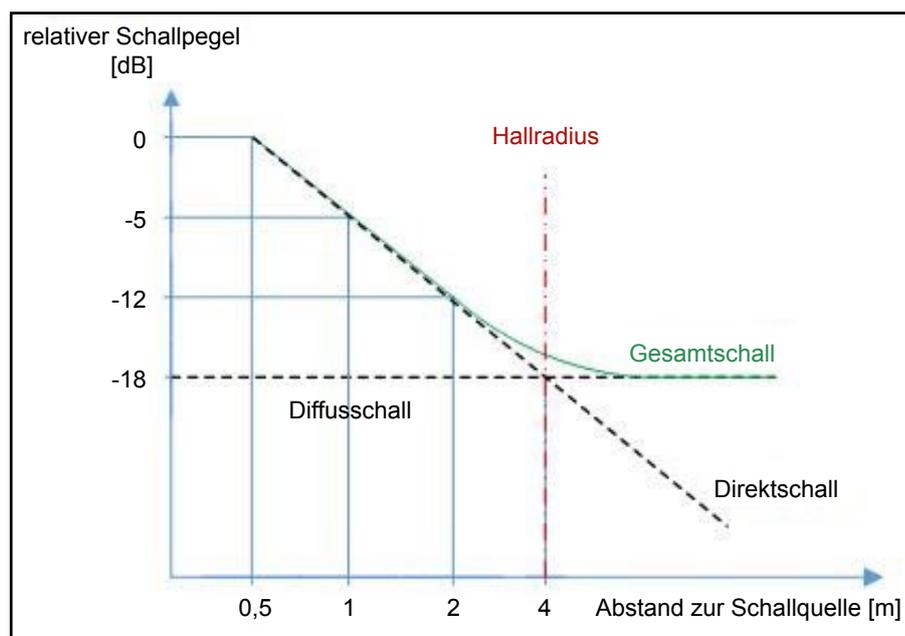


Abb. 2.3: Pegelverlauf von Direkt- und Diffus-schall in Abhängigkeit vom Abstand zur Schallquelle. Der Hallradius ist in Rot dargestellt.

2.2.2 Reduzierung der negativen Effekte von Umgebungslärm

Unser Sprachverstehen hängt erheblich von dem Verhältnis zwischen Signal (Sprache) und Rauschen (Umgebungslärm) ab. Je höher der Pegel des Nutzsignals gegenüber dem Störsignal ist, desto besser ist das Sprachverständnis. Dieses Verhältnis wird als Signal-Rausch-Abstand (engl.: signal-to-noise ratio, SNR) bezeichnet und ist ein Maß für die Qualität eines Nutzsignals. Personen mit eingeschränktem Hörvermögen benötigen einen um bis zu 15 dB höheren SNR als Normalhörende in einer vergleichbaren Situation (Killion, 1997). Eine optimale Hörgeräteversorgung kann den SNR durch technische Features wie ein Richtmikrofon und eine adaptiv arbeitende Störgeräuschunterdrückung verbessern, jedoch ist die Wirkung oft nicht ausreichend. Mit einer drahtlosen Übertragungsanlage wird das Sprachsignal in unmittelbarer Nähe zum Sprecher aufgenommen und kann daher mit einem hohen SNR erfasst und mit einem beliebigen Pegel an den Zuhörer abgegeben werden (Husstedt, 2015).

Zusätzlich führen Nebengeräusche zu einer erhöhten Höranstrengung, von der vor allem hörgeschädigte Menschen betroffen sind. Dieses kann Auswirkungen auf die Leistungs- und Konzentrationsfähigkeit haben. Durch eine drahtlose Übertragungsanlage wird die Höranstrengung reduziert, wodurch sich der Hörkomfort im Störgeräusch verbessert (Valente et al., 2008).

2.3 Überprüfung der Übertragungscharakteristik von drahtlosen Übertragungsanlagen mithilfe der Messbox

Bei Verwendung einer drahtlosen Übertragungsanlage sollten die Hörgerätemikrofone im FM-Programm aktiv sein, damit zusätzlich zum Sprecher auch die unmittelbare Umgebung wahrnehmbar ist. Dabei ist wichtig, dass die Lautstärke der Übertragungsanlage im Hörgerät relativ zur Lautstärke des Hörgerätemikrofons sinnvoll eingestellt ist. Im Rahmen der sogenannten „Transparenzmessung“ kann eine Einstellung und Überprüfung der Lautstärke der Übertragungsanlage erfolgen. Dieses Vorgehen orientiert sich stark an der von der American Speech-Language-Hearing Association herausgebrachten Empfehlung „Guidelines for Fitting and Monitoring FM Systems“ (ASHA, 2002). Durch diese Maßnahme ist das Sprachsignal, das auf direktem Weg - ohne Übertragungsanlage - ankommt, ca. 10 dB leiser als das per Übertragungsanlage gesendete Signal, sodass dessen Einfluss zu vernachlässigen ist (Steinhauer, 2015). Ohne diese Verstärkungsanpassung kann die Lautstärke der Hörgerätemikrofone zu hoch sein, wodurch die Umgebungsgeräusche übermäßig verstärkt werden und der Nutzen der Übertragungsanlage zu gering wäre. Darüber hinaus ist die Transparenzmessung unabdingbar, um eine vergleichbare und reproduzierbare Einstellung der Übertragungsanlage sicherzustellen.

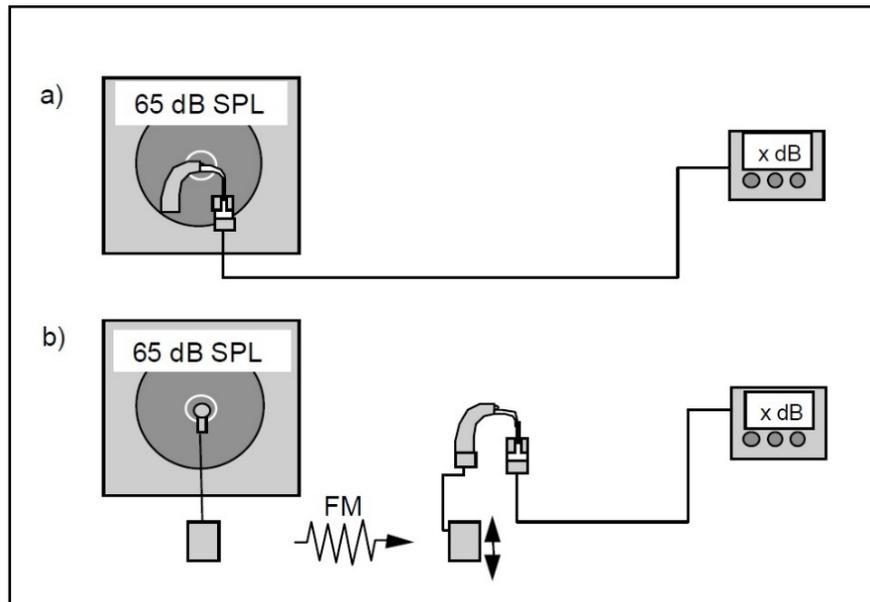


Abb. 2.4: Lautstärkeanpassung der drahtlosen Übertragungsanlage an die Hörgeräteeinstellung via Messbox in Anlehnung an die Guidelines for Fitting and Monitoring FM Systems (ASHA, 2002)

In Abb. 2.4 ist die Vorgehensweise der Transparenzmessung aufgezeigt. Nach abgeschlossener Hörgeräteanpassung wird mithilfe der Messbox mit einem 2-ccm-Kuppler der Ausgangsschalldruckpegel der HG nacheinander gemessen. Als Signal wird, anders als der in den „Guidelines for Fitting and Monitoring FM Systems“ vorgeschlagene 1-kHz-Sinuston, das „International Speech Test Signal“ (ISTS) gewählt, da moderne Hörsysteme einen reinen Sinuston als Rückkopplungs- bzw. Störsignal deuten könnten (Husstedt, 2015). Der Eingangspegel L_E beträgt 65 dB. Daraufhin wird die drahtlose Übertragungsanlage mit den HG verbunden. Das Mikrofon der Übertragungsanlage wird vor dem Referenzmikrofon mithilfe von Typenreiniger positioniert. Das HG bleibt am Kuppler befestigt, wird aber außerhalb der Messbox platziert. Nun wird die Verstärkung der Übertragungsanlage so lange verändert, bis die Ausgangskurve der des Hörgerätes entspricht (ASHA, 2002).

Während der gesamten Messung mit der Messbox ist es wichtig, dass das Mikrofon der drahtlosen Übertragungsanlage in den Verifikationsmodus gebracht wird. Dadurch hat die Richtcharakteristik keinen Einfluss auf die Ergebnisse.

2.4 Evaluierung drahtloser Übertragungsanlagen

Um den Nutzen einer drahtlosen Übertragungsanlage aufzuzeigen, ist es sinnvoll den Hörgeschädigten, dessen Angehörigen und dem Kostenträger den Erfolg messtechnisch nachzuweisen. Außerdem sollte die Möglichkeit bestehen, verschiedene drahtlose Übertragungsanlagen objektiv miteinander vergleichen zu können sowie reproduzierbare Messergebnisse zu erhalten, wie es auch bei Hörgeräten während einer Hörgeräteanpassung gebräuchlich ist. Wichtig dabei ist, dass die Messmethode praxistauglich und realitätsnah sowie mit einem geringen Kosten- und Zeitaufwand verbunden ist (Husstedt, 2015).

Bislang liegt noch keine Messmethode zur Evaluierung von drahtlosen Übertragungsanlagen vor, die genormt und somit einheitlich und standardisiert ist. Einige Entwürfe und Empfehlungen existieren, welche den Erfolg von Übertragungsanlagen nachweisen sollen. Diese Messmethoden sind jedoch für viele Hörakustiker und HNO-Ärzte mit einem zu hohen Kosten- und Zeitaufwand verbunden, wodurch sie in der Praxis oft nicht umgesetzt werden können. Die „Objektive Messmethode nach Thibodeau“ beispielsweise simuliert die Situation in Klassenräumen (Thibodeau, 2014). In den Ecken werden vier Störschalllautsprecher aufgestellt, während ein Nutzschalllautsprecher frontal zum Hörgeschädigten platziert wird. Es ist also eine Vielzahl von Lautsprechern nötig, um diesen Messaufbau umzusetzen. Für die „Messmethode der ASHA“ werden zwei Messräume verlangt, da sich das Mikrofon der drahtlosen Übertragungsanlage im Nebenraum befindet (ASHA, 2002). In vielen Hörakustik-Fachgeschäften steht nur eine einzige Anpasskabine zur Verfügung. Die Messmethode ist demnach nicht für jeden Hörakustiker durchführbar und somit nicht praxistauglich. Ein wichtiges Kriterium für die realitätsnahe Evaluierung von drahtlosen Übertragungsanlagen ist, dass das Störsignal während der Messung an der Position des Hörgeschädigten nicht lauter ist als am Mikrofon der Übertragungsanlage (Husstedt, 2015). Dies wird bei einigen Messanordnungen nicht berücksichtigt, wodurch die Ergebnisse nicht realitätsgetreu sind.

2.5 Messmethode des DHI zur Evaluierung von drahtlosen Übertragungsanlagen

Das DHI hat im Jahr 2015 einen Messaufbau zur Evaluierung von drahtlosen Übertragungsanlagen entwickelt. Im Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit werden verschiedene drahtlose Übertragungsanlagen mithilfe dieser Messmethode verglichen.

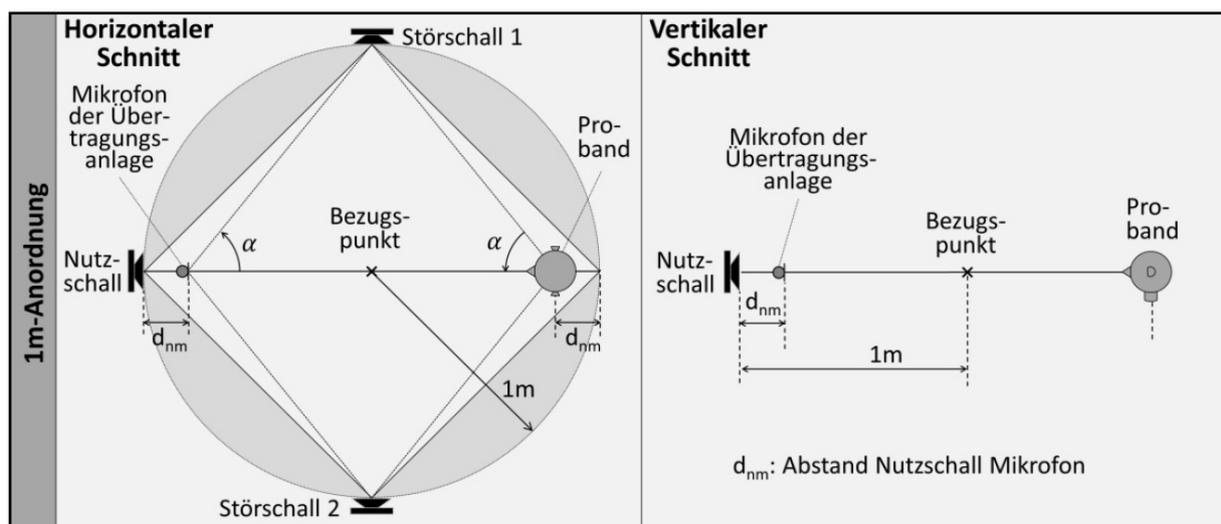


Abb. 2.5: Messanordnung der vom DHI entwickelten Methode zur Evaluierung von drahtlosen Übertragungsanlagen (Husstedt, 2015)

2.5.1 Messaufbau

Der Nutzschaillautsprecher befindet sich frontal (0° Horizontalebene) zum Probanden. Zwei Störschaillautsprecher sind mit einem Winkel von 45° rechts und links zur Nutzschaillquelle platziert. Die Entfernung beider Störschaillquellen zum Bezugspunkt beträgt 1 m. Das Mikrofon der drahtlosen Übertragungsanlage wird frontal vor dem Nutzschaillautsprecher angebracht. Bei um den Hals getragenen Mikrofonen wird ein Abstand von 20 cm und bei direkt vor dem Mund des Sprechers angebrachten Mikrofonen ein Abstand von 8 cm empfohlen (Husstedt, 2015).

Der Winkel α berechnet sich mit

$$\alpha = \arctan \left(\frac{d_{nm} + d_{mb}}{d_{mb}} \right). \quad (2.3)$$

d_{nm} = Distanz zwischen Nutzschaill und Mikrofon der drahtlosen Übertragungsanlage

d_{mb} = Distanz zwischen Mikrofon der drahtlosen Übertragungsanlage und dem Bezugspunkt

Für Mikrofone, die um den Hals getragen werden ($d_{nm} = 20$ cm), ergibt sich somit ein Winkel von $\alpha = 51,34^\circ$ und für direkt vor dem Mund getragene Mikrofone ($d_{nm} = 8$ cm) ein Winkel von $\alpha = 47,39^\circ$.

Bei dem Messaufbau des DHI wird eine Vortragssituation mit einem homogenen Hintergrundgeräusch simuliert. Damit es realitätsgetreu nachgebildet werden kann, sind Einfallrichtung und Pegel des Störgeräusches an der Position des Zuhörers und der Mikrofonposition der Übertragungsanlage gleich. Wäre das Störgeräusch beispielsweise am Ort des Probanden lauter, würde eine unrealistische Verbesserung durch die Übertragungsanlage ermittelt werden. Außerdem ist es wichtig, dass Pegel und Einfallrichtung des Störgeräusches an beiden Ohren des Zuhörers identisch sind, besonders bei Personen mit asymmetrischem Hörverlust (HV). Des Weiteren wird sichergestellt, dass die Richtcharakteristik der Mikrofontechnologie aktiv werden kann, weshalb das Sprachsignal nicht aus derselben Richtung kommt wie das Störsignal (Husstedt, 2015).

2.5.2 Messsignal

Während der Evaluierung der drahtlosen Übertragungsanlagen wird bei einem konstanten Geräuschpegel die Sprachverständlichkeit in Prozent ermittelt, weshalb ein dementsprechend angemessener Sprachtest ausgewählt werden sollte. Es wird der „Freiburger Sprachtest“ (DIN EN ISO 8253-3:2012) vorgeschlagen (Husstedt, 2015). Der Sprachpegel an der Position des Probanden wird bei der Messung ohne drahtlose Übertragungsanlage auf 58 dB eingestellt. Eine grundlegende Idee des Messaufbaus ist, dass der Abstand zum Sprecher durch Anpassung des Sprachpegels nachgebildet wird. Ein Sprachpegel von

58 dB am Probanden entspricht dem Pegel, den ein Zuhörer bei einem Abstand von 4 m zum Sprecher bei einem Vortragsraum mit einem Volumen von 300 m³ und einer Nachhallzeit von 0,6 s erfahren würde.

Während der Messung mit drahtloser Übertragungsanlage wird der Sprachpegel so eingestellt, dass der Pegel an der Position des Mikrofons der Übertragungsanlage der realen Situation entspricht. Der Sprachpegel in 1 m Entfernung muss dementsprechend auf 65 dB SPL eingestellt werden, was der Position des Bezugspunktes entspricht.

Über die beiden seitlich angeordneten Lautsprecher kann zeitgleich ein beliebiges Störgeräusch mit frei wählbarem Pegel dargeboten werden. Vorgeschlagen wird das „sprachsimulierende Rauschen“ nach DIN EN 60645-2 und ein Pegel von 60 dB SPL (Husstedt, 2015).

2.5.3 Messablauf

Während der Evaluierung wird die Sprachverständlichkeit mit und ohne drahtlose Übertragungsanlage ermittelt. Dabei ist wichtig, dass Sprach- und Störgeräuschpegel auf alle notwendigen Pegel eingestellt werden (siehe Kapitel 2.5.2). Zunächst wird die Messung ohne Übertragungsanlage durchgeführt. Dabei ist darauf zu achten, dass die Alltagssituation der Probanden bei dem Messdurchgang berücksichtigt wird. Tragen die Testpersonen Hörhilfen, sollen diese in üblicher Art und Weise, wie bei einer realen Vortragsituation, verwendet werden. Wird dies nicht beachtet, kann der zusätzliche Nutzen durch die Übertragungsanlage nicht realitätsgetreu aufgezeigt werden. Im Anschluss wird das Sprachverstehen mit drahtloser Übertragungsanlage ermittelt. Dabei ist wichtig, dass die Lautstärke der Übertragungsanlage im Hörgerät relativ zur Lautstärke des Hörgerätemikrofons eingestellt ist, wie es in Kapitel 2.3 beschrieben ist. Als gesamtes Messergebnis erhält man eine direkte Gegenüberstellung des Sprachverstehens mit und ohne drahtlose Übertragungsanlage (Husstedt, 2015).

2.5.4 Bisherige Studie zur Messmethode des DHI

Im Rahmen der Bachelorarbeit „Untersuchung einer Messmethode zur Evaluierung von drahtlosen Übertragungsanlagen“ wurde die Praktikabilität der Messmethode des DHI untersucht. Es wurde in zwei Messdurchläufen untersucht, welchen Einfluss korreliertes bzw. unkorreliertes Rauschen auf die Messergebnisse hat. Zusätzlich wurde untersucht, inwieweit Richtmikrofontechnik bei Hörgeräten die Messergebnisse beeinflussen.

Die Untersuchungen ergaben, dass der Vergleich zwischen korreliertem und unkorreliertem Rauschen keine signifikanten Unterschiede bei der Sprachverständlichkeit aufzeigt. Das für den Messaufbau verwendete Audiometer benötigt demnach lediglich zwei Kanäle, was durch die Mindestausstattung eines Sprachaudiometers gegeben ist.

Die Messanordnung stellt eine Vortragssituation nach, bei der sich der Zuhörer außerhalb des Hallradius befindet. Somit sollte die Richtmikrofontechnik der HG keinen positiven Einfluss auf die Sprachverständlichkeit haben. Die Ergebnisse der Messungen mit den verschiedenen Mikrofonmodi zeigen, dass keine signifikanten Unterschiede zu erkennen sind (Steinhauer, 2015).

3. Methodik

3.1 Ziele der Messungen

Im Rahmen dieser Studie werden fünf verschiedene drahtlose Übertragungsanlagen miteinander verglichen. Anhand von Probandenmessungen wird der Gewinn der Sprachverständlichkeit durch die jeweiligen Anlagen untersucht. Unter den drahtlosen Übertragungsanlagen befinden sich eine mit analoger Technik und vier adaptiv-digitale Anlagen. Von den digitalen Übertragungsanlagen arbeiten jeweils zwei mit richtungaler Richtwirkung und zwei mit Omnidirektionalität. Insgesamt sind drei unterschiedliche Hersteller unter den Übertragungsanlagen vertreten.

Anlagen	Technik	Richtcharakteristik	Hersteller
Anlage 1	digital	direktional	Hersteller A
Anlage 2	digital	omnidirektional	Hersteller B
Anlage 3	analog	omnidirektional	Hersteller C
Anlage 4	digital	omnidirektional	Hersteller A
Anlage 5	digital	direktional	Hersteller B

Tab. 1: Beschreibung der fünf verwendeten drahtlosen Übertragungsanlagen, die sich bzgl. der Verarbeitung, der Mikrofonmodi und/oder des Fabrikats unterscheiden

Die Evaluierung der verschiedenen drahtlosen Übertragungsanlagen wird mithilfe der Messmethode des DHI durchgeführt (siehe Kapitel 2.5). Der Störschallpegel wird während zweier Messdurchläufe variiert. Es wird untersucht, ob durch die schwierigeren Bedingungen, aufgrund des niedrigeren SNR, größere Unterschiede zwischen den verschiedenen Übertragungsanlagen resultieren.

Außerdem wird ein Vergleich zwischen den Ergebnissen der analogen und der digitalen Techniken gezogen. Zusätzlich wird untersucht, ob die unterschiedlichen Richtcharakteristiken der drahtlosen Übertragungsanlagen einen Einfluss auf die Sprachverständlichkeit haben.

3.2 Messgeräte

Für die Messungen werden die drahtlosen Übertragungsanlagen in Kombination mit zwei High-End-Hörsystemen verwendet. Der Hersteller der HG stimmt mit keinem der Hersteller der Übertragungsanlagen überein, damit keine eventuell vorhandenen Vorteile resultieren können.

Die jeweils kompatiblen Empfänger für die verschiedenen Übertragungsanlagen werden via Audioschuh und DAI mit den Hörsystemen verbunden.

Für die Messungen werden ein Computer mit dem Betriebssystem Windows 10 sowie ein ACAM 5-Audiometer der Firma Acousticon Hörsysteme GmbH verwendet.

Des Weiteren werden drei dB-99-Lautsprecher der Firma Acousticon Hörsysteme GmbH genutzt.

Damit auf einfache Weise, ohne Kalibrierung, der Pegel an verschiedenen Positionen bestimmt werden kann, werden ein UPV Audio Analyzer der Firma Rohde & Schwarz sowie ein Mikrofon inklusive Power Supply der Firma Brüel & Kjaer eingesetzt.

3.3 Probanden

Die Studie wird mit 20 schwerhörigen Probanden durchgeführt, darunter sechs Frauen und vierzehn Männer. Bei allen 20 Teilnehmern handelt es sich um einen symmetrischen Schallempfindungshörverlust (SE-HV) des Typs N3 (siehe Abb. 3.1) (DIN 60118-15). Der gemittelte HV der 20 Testpersonen ist in Abb. 3.2 dargestellt. Die durchschnittliche maximale Sprachverständlichkeit liegt auf dem rechten Ohr bei 96 % bei einem dB_{opt} von 89 dB. Auf der linken Seite liegt das gemittelte maximale Sprachverstehen bei 95 % bei einem dB_{opt} von 88 dB. Achtzehn der Probanden sind mit Hörgeräten versorgt. Die Hörgeräteerfahrung liegt mit einer Spanne von 0 bis 25 Jahren im Durchschnitt bei acht Jahren. Keine der Testpersonen hat bisher eine drahtlose Übertragungsanlage genutzt.

Das Alter der Probanden liegt mit einem Intervall von 63 bis 83 Jahren bei durchschnittlich 74 Jahren. Alle Testpersonen sprechen fließend deutsch.

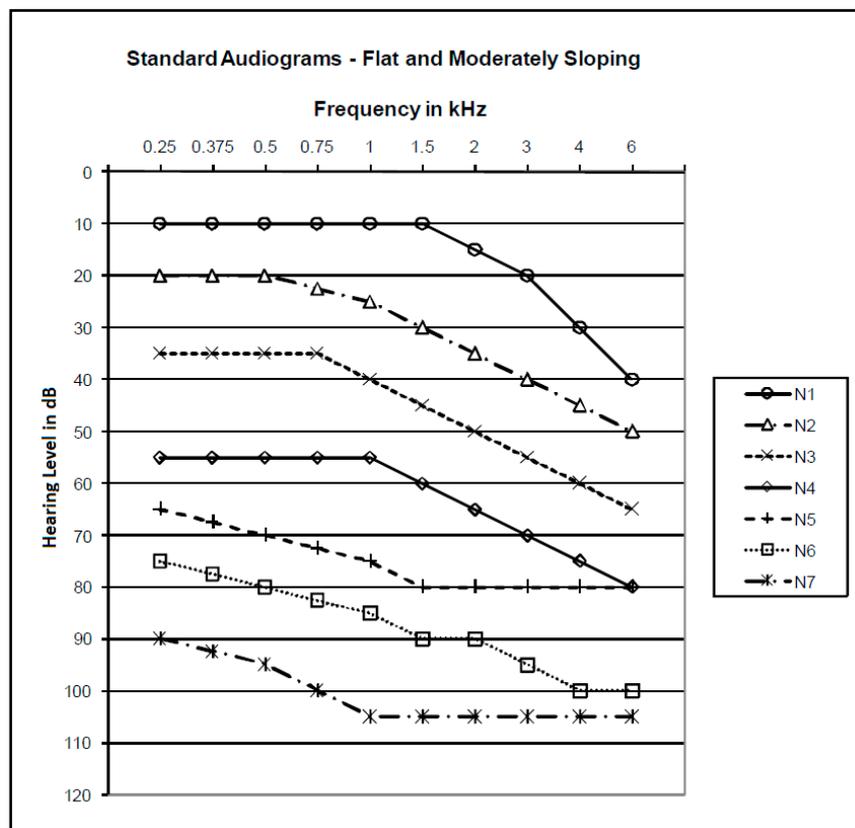


Abb. 3.1: Standardaudiogramme für verschiedene Grade von Hörverlusten (DIN 60118-15). Im Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit wird mit Probanden mit einem HV Typ N3 gearbeitet.

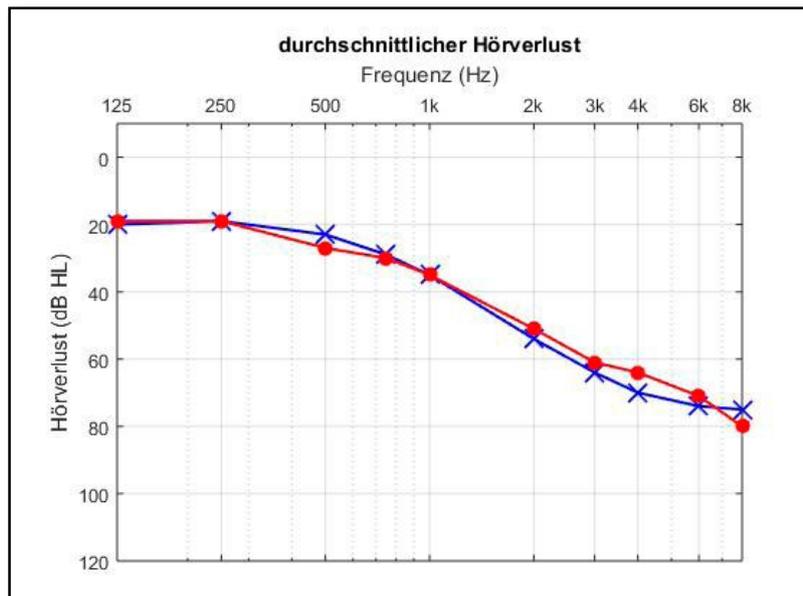


Abb. 3.2: Durchschnittlicher HV der 20 Probanden. Es handelt sich bei allen Testpersonen um einen symmetrischen SE-HV, weshalb die Knochenleitung (KL) nicht mit abgebildet ist. Das rechte Ohr ist in Rot und das linke Ohr in Blau dargestellt.

3.4 Messaufbau

Die Messanordnung ist in Kapitel 2.5 beschrieben. Das Mikrofon der drahtlosen Übertragungsanlage wird mit einem Abstand von 20 cm mithilfe von Typenreiniger an einem Mikrofonständer frontal zum Nuttschalllautsprecher positioniert. Damit die Messungen nicht durch die jeweils individuelle Sitzhaltung der Probanden beeinflusst werden, wird ein nicht verstellbarer Stuhl gewählt. Vor jeder Messung wird die Entfernung von den Ohren zum Nuttschalllautsprecher kontrolliert und gegebenenfalls angepasst.

Der Messaufbau befindet sich in einem Messraum, bei dem die Wände mit Schallabsorbieren ausgestattet sind und der Boden mit einem Teppich ausgelegt ist. Die Messkabine hat eine Fläche von $5,2 \text{ m} \times 4,22 \text{ m} = 21,9 \text{ m}^2$ und eine Höhe von $3,13 \text{ m}$. Daraus ergibt sich ein Volumen von $68,7 \text{ m}^3$.

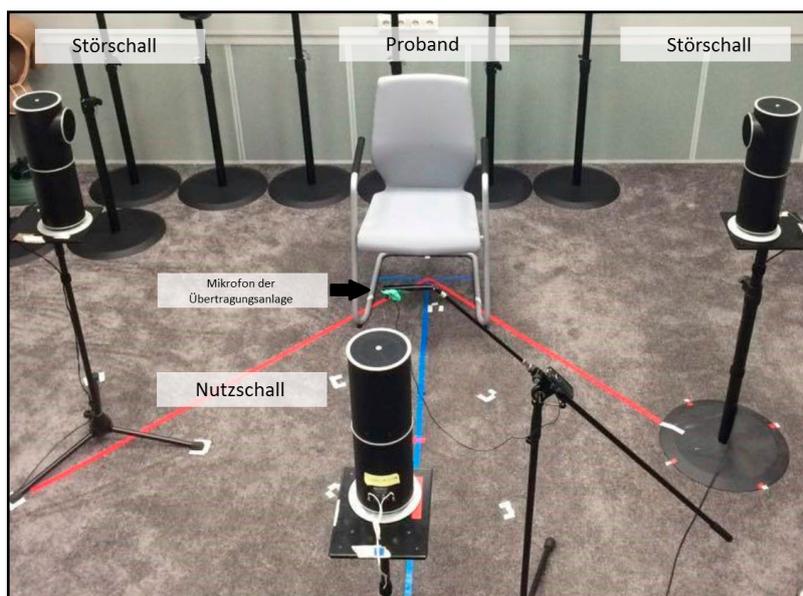


Abb. 3.3: Messaufbau in der Forschungskabine des DHI

3.5 Messsignal

Als Nutzsignal wird der Freiburger Sprachtest dargeboten, welcher aus 20 Wortgruppen besteht. Eine Wortgruppe setzt sich wiederum aus 20 einsilbigen Wörtern zusammen. Für die Messungen wird sowohl die Auswahl der Wortgruppen als auch die Reihenfolge der Einsilber innerhalb der Wortgruppe randomisiert.

Als Störgeräusch wird das gleiche sprachsimulierende Rauschen über die beiden seitlichen Lautsprecher wiedergegeben.

3.6 Vorbereitende Maßnahmen

Als vorbereitende Maßnahme vor den Probandenmessungen muss sichergestellt werden, dass an der Position der Testperson ein Sprachpegel von 58 dB und ein Rauschpegel von 60 dB vorliegt.

Für die Anpassung des Sprachpegels wird zunächst am Nutzschaalllautsprecher ein Rauschsignal mit einem Pegel von 70 dB abgespielt. Mithilfe eines UPV und eines Mikrofons inklusive Power Supply wird dann der exakte Pegel an der Position der Testperson ermittelt. Um mögliche Kopfbewegungen der Testpersonen während der Messungen zu berücksichtigen, wird an fünf Positionen gemessen (siehe Abb. 3.4). Die erfassten Werte werden gemittelt und ergeben den Pegel L_{M1} . Der am Audiometer einzustellende Pegel lässt sich daraufhin mit

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

berechnen. Für die Ermittlung des einzustellenden Störschallpegels wird über beide Störschalllautsprecher jeweils ein Rauschsignal mit einem Pegel von 70 dB ausgegeben. Es muss sichergestellt werden, dass an der Position des Probanden der gleiche Störschallpegel herrscht wie an der Stelle des Mikrofons der drahtlosen Übertragungsanlage. Daher wird der Pegel an der Position des Probanden sowie an der des Mikrofons gemessen. Wieder werden mögliche Kopfbewegungen berücksichtigt, indem an fünf Positionen gemessen wird (siehe Abb. 3.4). Diese Werte gemittelt ergeben den Pegel L_{M2} . Der am Audiometer einzustellende Wert lässt sich daraufhin mit

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

berechnen.

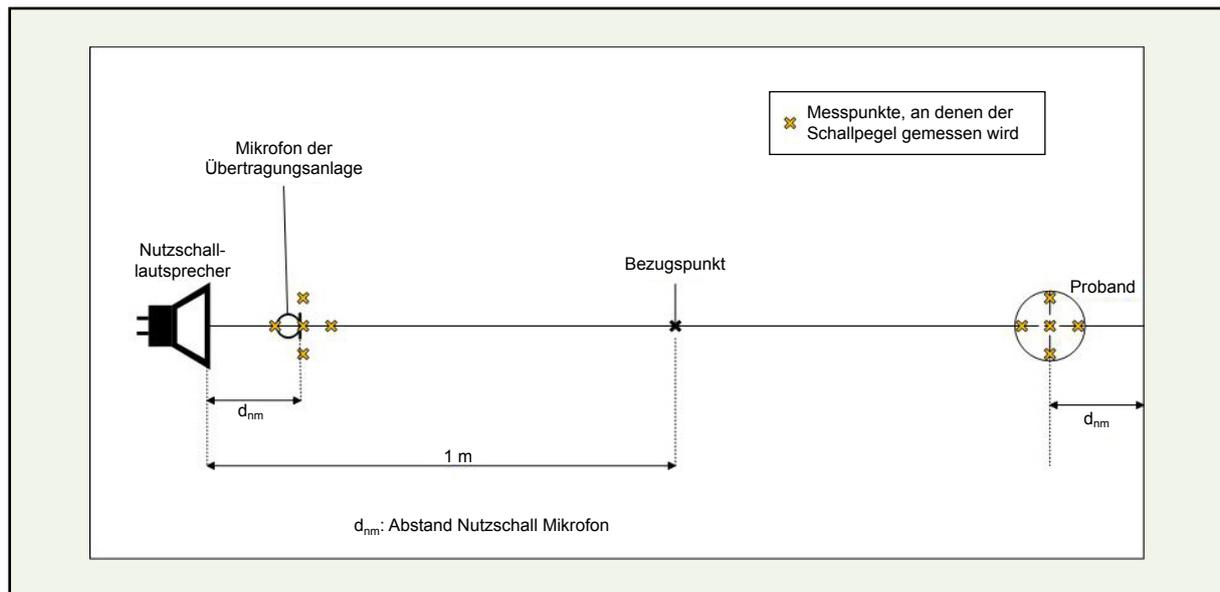


Abb. 3.4: Messaufbau mit Markierungen der Messpunkte, an denen der Schallpegel während der „Kalibrierung“ gemessen wird

Bevor die drahtlosen Übertragungsanlagen messtechnisch verglichen werden können, wird bei dem Probanden eine Audiometrie durchgeführt. Dabei werden die Luftleitung, die Unbehaglichkeitsschwelle sowie der dB_{opt} gemessen. Da alle 20 Versuchsteilnehmer einen SE-HV aufweisen, kann auf die Messung der KL verzichtet werden.

Mithilfe der ermittelten Daten können nun die HG auf den individuellen HV der Probanden eingestellt werden. Es wird die Anpassformel NAL-NL2 verwendet. Anhand der subjektiven Empfindungen der Testpersonen werden die HG so lange nachjustiert, bis eine zufriedenstellende Einstellung gegeben ist.

Eine weitere notwendige Vormaßnahme im Hinblick auf vergleichbare Messergebnisse ist die Transparenzmessung zur Anpassung der Lautstärke der Übertragungsanlage an die des Hörerätēmikrofons (siehe Kapitel 2.3).

Zur Anbindung an die Ohren werden maßangefertigte Otoplastiken verwendet.

Vor Beginn der Evaluierung der drahtlosen Übertragungsanlage muss sichergestellt werden, dass der Proband in der richtigen Position Platz nimmt, wie es in Kapitel 3.4 beschrieben wird. Außerdem soll die Testperson eine komfortable Sitzhaltung einnehmen, die während der gesamten Messung konstant bleibt. Die angepassten HG werden der Testperson eingesetzt. Daraufhin wird der Proband in den Messablauf eingewiesen, und die Messung beginnt.

4. Durchführung

4.1 Vergleich verschiedener drahtloser Übertragungsanlagen bei einem Störsignal von 60 dB

Es werden fünf verschiedene Übertragungsanlagen miteinander verglichen. Während der Messung werden den Probanden 18 Einsilber-Wortgruppen des Freiburger Sprachtests präsentiert. Je drahtloser Übertragungsanlage werden drei Wortgruppen dargeboten. Ein weiterer Durchgang mit drei Wortgruppen wird ohne Übertragungsanlage durchgeführt. Die Reihenfolge der Anlagen sowie die Auswahl der Wortgruppen wird randomisiert. Es wird je Proband jede Wortgruppe nur einmal präsentiert. In Tab. 2 ist ein Beispiel eines Messdurchgangs aufgeführt. Die fünf verschiedenen Übertragungsanlagen entsprechen den Konfigurationen 1 bis 5 (siehe Tab. 1, Anlage 1 bis 5 entspricht Konfiguration 1 bis 5), wohingegen Konfiguration 0 der Messung ohne Anlage zugeordnet ist. In der Ergebnisspalte wird die Anzahl der vom Probanden richtig verstandenen Wörter als Sprachverstehen in Prozent notiert.

Reihenfolge	Wortgruppe	Konfiguration	Ergebnis (%)
1	19	3	85
2	10	3	80
3	17	3	75
4	9	1	80
5	6	1	90
6	16	1	85
7	1	5	85
8	2	5	85
9	11	5	90
10	15	4	85
11	3	4	85
12	14	4	85
13	12	0	5
14	7	0	10
15	20	0	15
16	13	2	80
17	18	2	85
18	4	2	90

Tab. 2: Beispieltabelle mit randomisierter Reihenfolge der Konfiguration sowie Auswahl der Wortgruppen. In der Ergebnisspalte wird die Anzahl der vom Probanden richtig verstandenen Wörter als Sprachverstehen in Prozent notiert.

In diesem Messdurchlauf beträgt der Störschallpegel 60 dB an der Position des Probanden bzw. an der des Mikrofons der drahtlosen Übertragungsanlage. Bei den Messungen mit Übertragungsanlage wird der Pegel des Nutzsignals am Bezugspunkt auf 65 dB eingestellt. Ohne Übertragungsanlage beträgt der Nutzschallpegel 58 dB an der Position der Testperson.

Bei Start der Messungen werden das Rauschen und die Einsilber gleichzeitig präsentiert. Es gibt keine Vorlaufzeit, in der lediglich Rauschen dargeboten wird. Der Proband spricht die verstandenen Wörter nach. Aufgabe des Versuchsleiters ist es, die Anzahl der Wörter

zu notieren, welche korrekt verstanden wurden. Außerdem wird die Sitzhaltung des Probanden überprüft. Nach jeder dritten Wortgruppe bzw. beim Wechsel der Übertragungsanlagen findet eine Pause statt. Damit wird sichergestellt, dass die Testperson in regelmäßigen Abständen zur Ruhe kommen kann und die Konzentration bis zum Ende der Messung aufrechterhalten wird. Zudem nutzt der Versuchsleiter die Pausen, um bei jeder Übertragungsanlage die individuelle Transparenzmessung durchzuführen (wie in Kapitel 2.3 beschrieben).

4.2 Test-Retest

Um die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Messergebnisse zu gewährleisten, wird ein Test-Retest-Verfahren durchgeführt. Die 20 Probanden werden zu einem späteren Zeitpunkt erneut eingeladen und die Messungen mit exakt gleichen Bedingungen wiederholt. Die Zeitspanne zwischen dem ersten und zweiten Messdurchlauf liegt bei 14 bis 21 Tagen.

4.3 Vergleich verschiedener drahtloser Übertragungsanlagen bei einem Störsignal von 65 dB

In einem weiteren Messdurchlauf werden die fünf Übertragungsanlagen erneut miteinander verglichen. Der Störgeräuschpegel beträgt nun 65 dB an der Position des Probanden. Da die Bedingungen für die Testperson erschwert wurden, wird die Messung ohne drahtlose Übertragungsanlage weggelassen, da davon auszugehen ist, dass die Einsilber nur sehr schwierig verstanden werden können. Der Messdurchgang besteht aus 15 Einsilber-Wortgruppen, deren Auswahl und Reihenfolge randomisiert wird. Je Testperson wird jede Freiburger Wortgruppe nur einmal dargeboten. In Tab. 3 ist ein Beispiel eines Messdurchgangs aufgeführt. Die fünf verschiedenen Übertragungsanlagen entsprechen den Konfigurationen 1 bis 5 (siehe Tab. 1, Anlage 1 bis 5 entspricht Konfiguration 1 bis 5).

Sobald die Messung startet, werden das Rauschen und das erste Wort des Freiburger Sprachtests gleichzeitig dargeboten. Der Versuchsleiter notiert, wie viele der dargebotenen Wörter durch den Probanden korrekt verstanden werden. Zusätzlich muss auf die richtige Sitzhaltung des Probanden geachtet werden. Nach jeder dritten Wortgruppe bzw. beim Wechsel der Übertragungsanlagen findet eine Pause statt, in der die Testperson zur Ruhe kommen kann. Zudem nutzt der Versuchsleiter die Pausen, um bei jeder Übertragungsanlage die individuelle Transparenzmessung durchzuführen (wie in Kapitel 2.3 beschrieben).

Reihenfolge	Wortgruppe	Konfiguration	Ergebnis (%)
1	7	5	95
2	18	5	90
3	14	5	100
4	20	2	80
5	5	2	90
6	3	2	95
7	6	4	95
8	15	4	100
9	11	4	100
10	12	1	95
11	2	1	100
12	17	1	90
13	4	3	85
14	8	3	85
15	19	3	95

Tab. 3: Beispieltabelle mit randomisierter Reihenfolge der Konfiguration sowie Auswahl der Wortgruppen. In der Ergebnisspalte wird die Anzahl der vom Probanden richtig verstandenen Wörter als Sprachverstehen in Prozent notiert.

4.4 Subjektive Evaluierung der drahtlosen Übertragungsanlagen

Um die subjektive Wahrnehmung der Probanden in Bezug auf die drahtlosen Übertragungsanlagen miteinfließen zu lassen, wird ein Fragebogen von den Testpersonen ausgefüllt. Dabei wird die Zufriedenheit mit der Sprachverständlichkeit und dem Klang abgefragt. Der Fragebogen wird direkt nach jeder Messung einer drahtlosen Übertragungsanlage bzw. während der Pause ausgehändigt. Die Bewertungsskala reicht von „sehr zufrieden“ bis zu „sehr unzufrieden“ über insgesamt fünf Bewertungsoptionen. In Abb. 4.1 ist der Fragebogen dargestellt.

1. Name:

2. Wie zufrieden sind Sie mit der FM-Anlage 1?

	sehr zufrieden	zufrieden	neutral	unzufrieden	sehr unzufrieden
Verständlichkeit der Sprache	<input type="radio"/>				
Klang	<input type="radio"/>				

3. Wie zufrieden sind Sie mit der FM-Anlage 2?

	sehr zufrieden	zufrieden	neutral	unzufrieden	sehr unzufrieden
Verständlichkeit der Sprache	<input type="radio"/>				
Klang	<input type="radio"/>				

4. Wie zufrieden sind Sie mit der FM-Anlage 3?

	sehr zufrieden	zufrieden	neutral	unzufrieden	sehr unzufrieden
Verständlichkeit der Sprache	<input type="radio"/>				
Klang	<input type="radio"/>				

5. Wie zufrieden sind Sie mit der FM-Anlage 4?

	sehr zufrieden	zufrieden	neutral	unzufrieden	sehr unzufrieden
Verständlichkeit der Sprache	<input type="radio"/>				
Klang	<input type="radio"/>				

6. Wie zufrieden sind Sie mit der FM-Anlage 5?

	sehr zufrieden	zufrieden	neutral	unzufrieden	sehr unzufrieden
Verständlichkeit der Sprache	<input type="radio"/>				
Klang	<input type="radio"/>				

Abb. 4.1: Fragebogen zur subjektiven Evaluierung bezüglich der Verständlichkeit der Sprache und des Klanges der verschiedenen Übertragungsanlagen. Die Skala reicht von „sehr zufrieden“ bis „sehr unzufrieden“.

5. Ergebnisse

Während der Auswertung werden die Messergebnisse der fünf verschiedenen drahtlosen Übertragungsanlagen gegenübergestellt. Es wird untersucht, ob die verschiedenen Konfigurationen, wie beispielsweise die Mikrofoncharakteristik, Einfluss auf die Sprachverständlichkeit haben. Zudem werden die Messergebnisse aus den Messdurchläufen mit unterschiedlichen Störgeräuschpegeln verglichen sowie die Test-Retest-Genauigkeit untersucht.

Für die statistische Auswertung wird das Signifikanzniveau auf $\alpha = 0,05$ festgelegt. Dabei kennzeichnet ausgehend vom p-Wert ein Stern (*) einen signifikanten Unterschied ($p < 0,05$), zwei Sterne (**) einen sehr signifikanten Unterschied ($p < 0,01$) und drei Sterne (***) einen höchst signifikanten Unterschied ($p < 0,001$) (Fahrmeir et al., 2010).

Zu Beginn werden die Messergebnisse auf Normalverteilung geprüft. Dazu wird der statistische Signifikanztest Shapiro-Wilk-Test herangezogen, da er eine hohe Güte aufweist und somit mit vergleichsweise kleinen Stichproben gute Ergebnisse erzielt (Hedderich et al., 2012).

Aufgrund fehlender Normalverteilung aller Messergebnisse muss mittels eines nichtparametrischen statistischen Verfahrens die zentrale Tendenz der Sprachverständlichkeit verglichen werden. Es wird dazu der Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest herangezogen, um zu prüfen, ob ein signifikanter Unterschied im Median zweier Stichproben vorliegt (Büning et al., 1994).

Mittels eines Test-Retest-Verfahrens wird die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Messergebnisse der Messung mit dem Störgeräuschpegel von 60 dB untersucht. Es werden die Korrelationskoeffizienten (nach Spearman) zwischen den Ergebnissen des ersten Messdurchlaufs (Test) und den Ergebnissen des zweiten Messdurchlaufs (Retest) aller Übertragungsanlagen untersucht (Hedderich et al., 2016). In Abb. 5.1 ist das Sprachverstehen beider Durchgänge grafisch dargestellt. Zur Veranschaulichung ist eine Regressionsgerade mit Steigung 1 abgebildet, welche der theoretisch idealen Korrelation entspricht, bei der die Messwerte im Test und Retest identisch sind.

Die Korrelation der Test-Retest-Ergebnisse der Probandenmessungen kann insgesamt als stark positiv bewertet werden. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Ergebnisse der Testwiederholungen sehr ähnlich ausfallen. Damit ist die Zuverlässigkeit der Messungen gegeben.

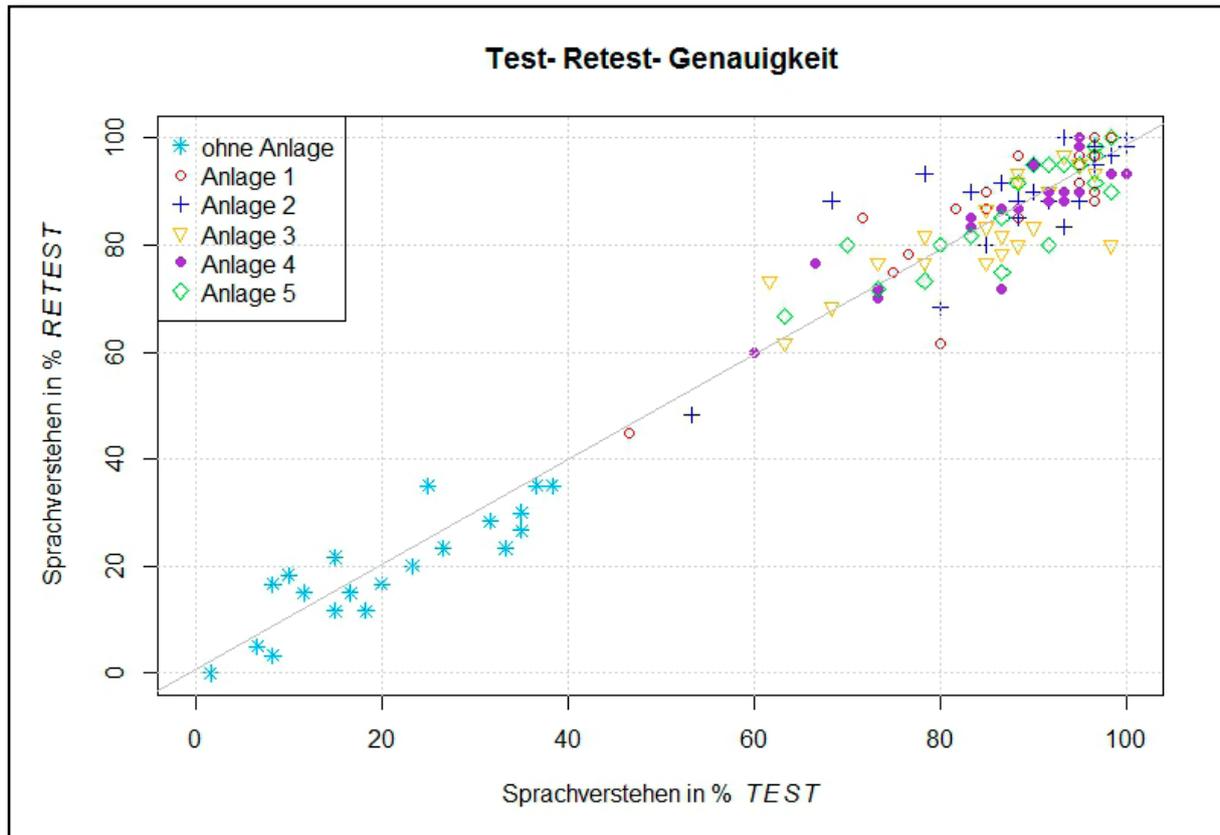


Abb. 5.1: Korrelationen zwischen den Ergebnissen des ersten Messdurchlaufs (Test) und des zweiten Messdurchlaufs (Retest). Ein einzelner Punkt entspricht dem gemittelten Messwert eines Probanden. Die Werte der verschiedenen Übertragungsanlagen bzw. die Werte ohne Anlage sind in unterschiedlichen Farben und Formen dargestellt.

In Abb. 5.2 sind die Messergebnisse der 20 Probanden aus Test und Retest bzw. aus den Messungen mit einem Störgeräuschpegel von 60 dB anhand von sechs Box-Whisker-Plots dargestellt (Toutenburg et al., 2009). Dabei werden die Ergebnisse der fünf drahtlosen Übertragungsanlagen aufgeführt sowie die der Messungen ohne Übertragungsanlage. Die Anzahl der vom Probanden richtig verstandenen Wörter pro Wortgruppe wird als Sprachverständlichkeit in Prozent angegeben.

Die digitalen Übertragungsanlagen (Anlage 1, Anlage 2, Anlage 4 und Anlage 5) zeigen sehr ähnliche Tendenzen. Mit einem Median von 89 % (Anlage 1 und Anlage 4), 90 % (Anlage 2) bzw. 91 % (Anlage 5) und einem Interquartilsabstand (IQR) von 88 % bis 96 % (Anlage 1), 89 % bis 96 % (Anlage 2), 88 % bis 94 % (Anlage 4) bzw. 80 % bis 95 % (Anlage 5) liegen die Messergebnisse sehr nah beieinander. Die analoge Übertragungsanlage (Anlage 3) schneidet etwas schlechter ab. Der Median wurde bei 85 % ermittelt, und der IQR reicht von 77 % bis 91 %. Die Maximalwerte der digitalen Übertragungsanlagen liegen alle bei 100 %, die analoge Anlage erreicht 98 %. Die Messungen mit Anlage 1 und Anlage 2 zeigen mit Ergebnissen von 45 % bis 100 % bzw. 48 % bis 100 % die größte Spannweite. Die Minimalwerte werden jedoch als Ausreißer definiert, d. h. die Werte liegen das 1,5-fache des Quartilabstandes unterhalb des IQR-Grenzwertes (Fahrmeir et al., 2010).

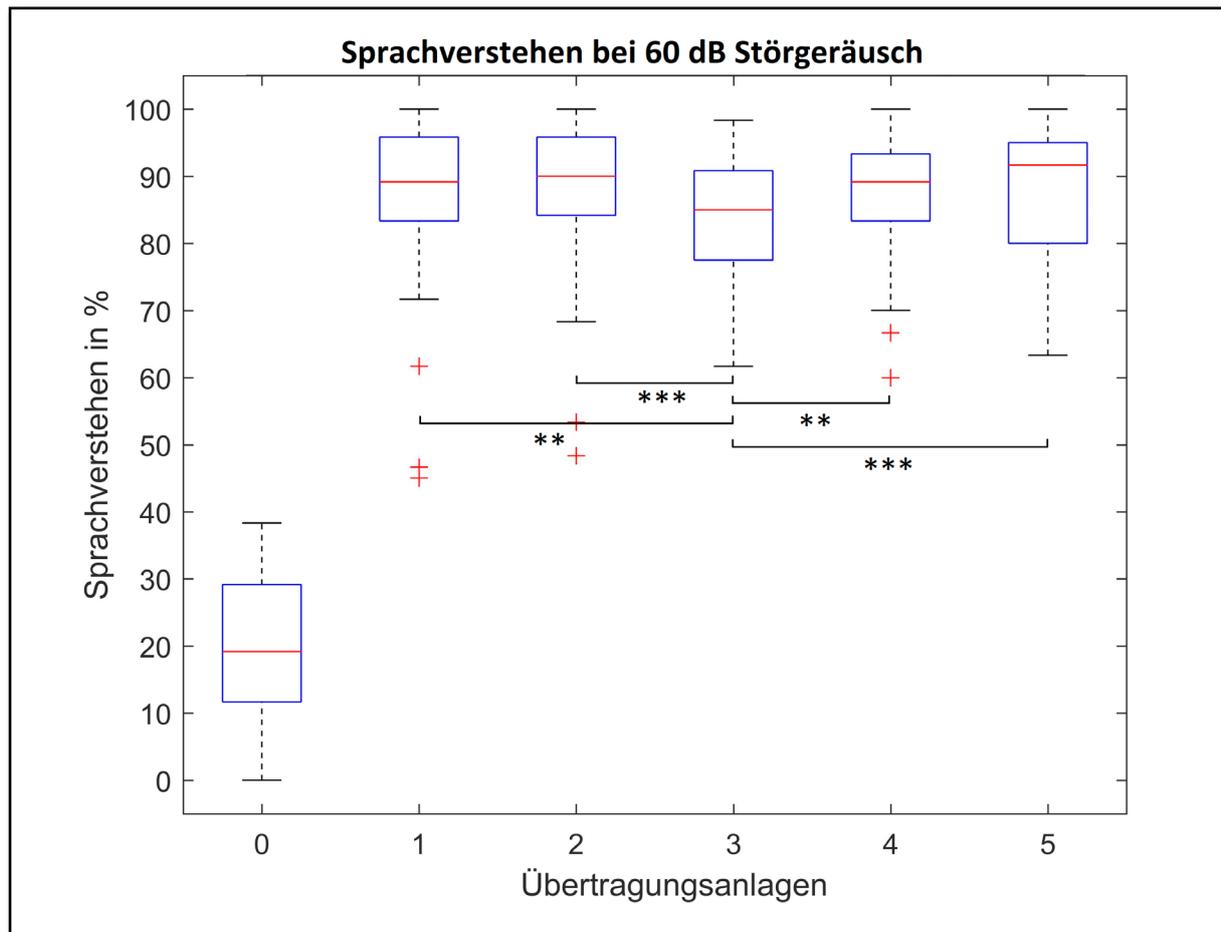


Abb. 5.2: Sprachverständlichkeitswerte aller Probanden (Störgeräusch: 60 dB, Test und Retest) in Abhängigkeit von den verschiedenen Übertragungsanlagen (1 bis 5) bzw. ohne Übertragungsanlage (0)

Die Messergebnisse ohne drahtlose Übertragungsanlage (Anlage 0) zeigen einen deutlichen Unterschied auf. Der Median liegt bei 19 %, und der IQR reicht von 12 % bis 29 %. Es wird eine Spannweite von 0 % bis 38 % ermittelt. Hierdurch wird deutlich, dass die drahtlosen Übertragungsanlagen eine erhebliche Verbesserung der Sprachverständlichkeit herbeiführen.

Bei der Gegenüberstellung der verschiedenen drahtlosen Übertragungsanlagen wird mithilfe des nichtparametrischen Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtests untersucht, ob es einen signifikanten Unterschied in der zentralen Tendenz bzw. im Median der Messergebnisse gibt (Hedderich et al., 2012).

Bei Betrachtung der p-Werte in Tab. 4 wird deutlich, dass nur die analoge Übertragungsanlage (Anlage 3) einen sehr (***) bzw. höchst (***) signifikanten Unterschied in den Medianen zu den digitalen Übertragungsanlagen (Anlage 1, Anlage 2, Anlage 4 und Anlage 5) aufweist.

Die Untersuchungen zeigen, dass keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der verschiedenen Richtcharakteristiken des Anlagenmikrofons zu erkennen sind.

Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest (Störgeräusch: 60 dB)				
	Anlage2	Anlage3	Anlage4	Anlage5
Anlage1	p= 0,2691	p= 0,0021 **	p= 0,3858	p= 0,6734
Anlage2		p= 0,0005 ***	p= 0,1446	p= 0,6468
Anlage3			p= 0,0014 **	p =0,0009 ***
Anlage4				p= 0,2781

Tab. 4: Durch den nichtparametrischen Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest ermittelte p-Werte. Es wird untersucht, ob es einen signifikanten Unterschied in dem Median der verschiedenen Übertragungsanlagen während der Messung mit dem Störgeräuschpegel von 60 dB (Test und Retest) gibt.

Bei dem zweiten Messdurchlauf wurden die Messungen ohne drahtlose Übertragungsanlage weggelassen, da mit einem Störgeräuschpegel von 65 dB gemessen wurde und es dem Probanden somit nur sehr schwer möglich gewesen wäre, die Einsilber zu verstehen. In Abb. 5.3 sind die Ergebnisse dieses Messdurchgangs anhand von Box-Whisker-Plots dargestellt (Toutenburg et al., 2009). Gegenübergestellt werden die vom Probanden richtig verstandene Anzahl an Wörtern pro Wortgruppe in Prozent mit den fünf verschiedenen Übertragungsanlagen.

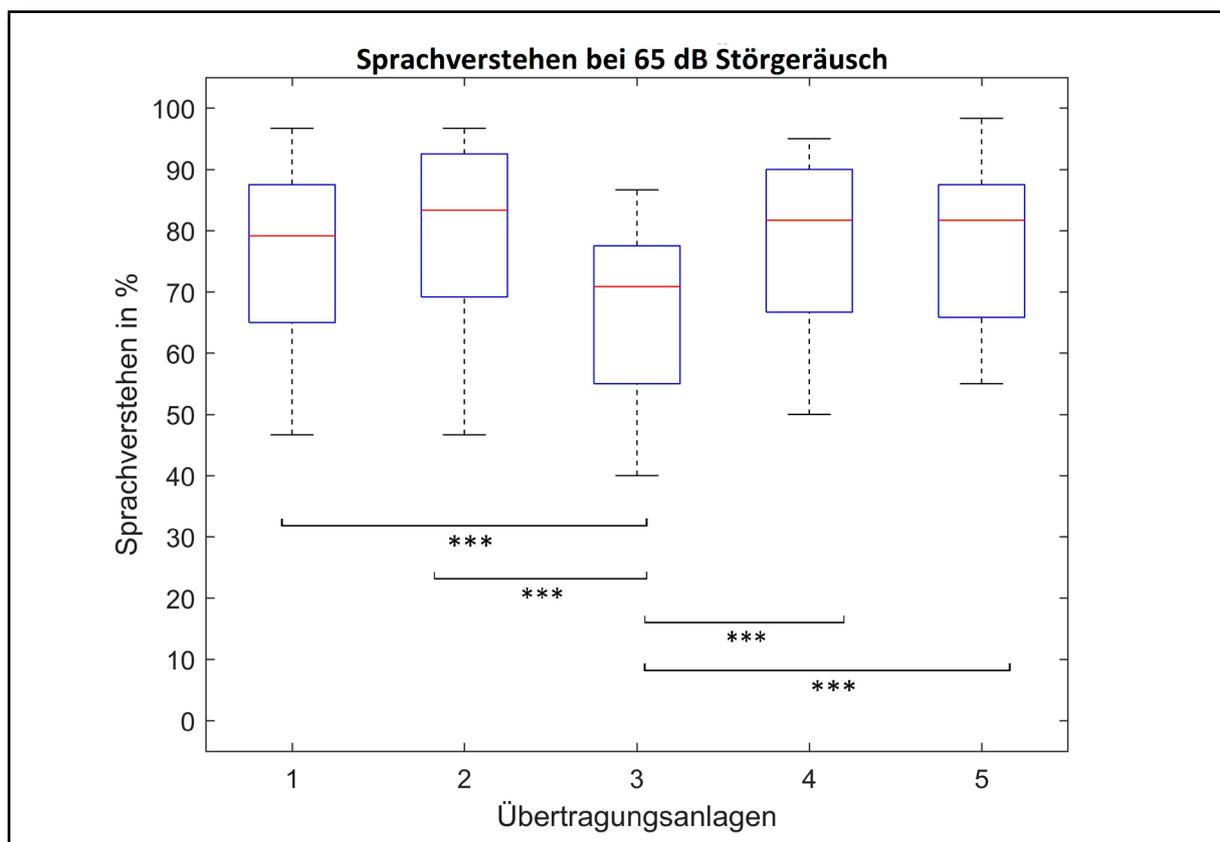


Abb. 5.3: Sprachverständlichkeitswerte aller Probanden (Störgeräusch: 65 dB) in Abhängigkeit von den verschiedenen Übertragungsanlagen. Anhand von Box-Whisker-Plots sind die Messergebnisse von Anlage 1 bis 5 von links nach rechts dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass die digitalen Übertragungsanlagen (Anlage 1, Anlage 2, Anlage 4 und Anlage 5), wie schon bei der vorangegangenen Messung, sehr ähnliche Messergebnisse aufzeigen. Mit einem Median von 84 % (Anlage 2), 82 % (Anlage 4 und Anlage 5) bzw. 79 % (Anlage 1) liegen die Werte nah beieinander. Festzustellen ist, dass die Messergebnisse der Sprachmessungen mit der analogen Übertragungsanlage (Anlage 3) etwas geringer ausfallen. Der Median liegt bei 71 %. Zudem liegen die Maximalwerte aller digitalen Anlagen zwischen 95 % und 100 %, bei Anlage 3 hingegen bei nur 87 %.

Bei der Gegenüberstellung der verschiedenen drahtlosen Übertragungsanlagen wird erneut mittels des nichtparametrischen Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtests untersucht, ob es einen signifikanten Unterschied im Median der Messergebnisse gibt (Hedderich et al., 2012).

Bei Betrachtung der p-Werte in Tab. 5 wird deutlich, dass die analoge Übertragungsanlage (Anlage 3) einen höchst (***) signifikanten Unterschied zu allen digitalen Übertragungsanlagen (Anlage 1, Anlage 2, Anlage 4 und Anlage 5) aufweist. Ein signifikanter Unterschied ist zusätzlich zwischen Anlage 1 und Anlage 2 zu erkennen.

Klare Tendenzen bezüglich der Messergebnisse der Übertragungsanlagen hinsichtlich der Mikrofoncharakteristik sind nicht zu erkennen.

Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest (Störgeräusch: 65 dB)				
	Anlage 2	Anlage 3	Anlage 4	Anlage 5
Anlage 1	p= 0,0287 *	p= 2,796 10 ⁻⁷ ***	p= 0,3394	p= 0,2343
Anlage 2		p= 1,894 10 ⁻⁷ ***	p= 0,1852	p= 0,7874
Anlage 3			p= 1,209 10 ⁻⁷ ***	p= 1,047 10 ⁻⁶ ***
Anlage 4				p= 0,5843

Tab. 5: Durch den nichtparametrischen Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest ermittelte p-Werte. Es wird untersucht, ob es einen signifikanten Unterschied in dem Median der verschiedenen Übertragungsanlagen während der Messung mit dem Störgeräuschpegel von 65 dB gibt.

Bei der Gegenüberstellung der beiden Messungen mit verschiedenem Störgeräuschpegel ist zu erkennen, dass die Probanden bei der Messung mit dem Störgeräuschpegel von 65 dB - wie zu erwarten - eine geringere Sprachverständlichkeit erreicht haben als bei der vorangegangenen Messung und zusätzlich eine größere Spannweite der Messergebnisse aufweisen. In Abb. 5.4 sind die Ergebnisse der verschiedenen Messungen anhand von Box-Whisker-Plots dargestellt (Toutenburg et al., 2009).

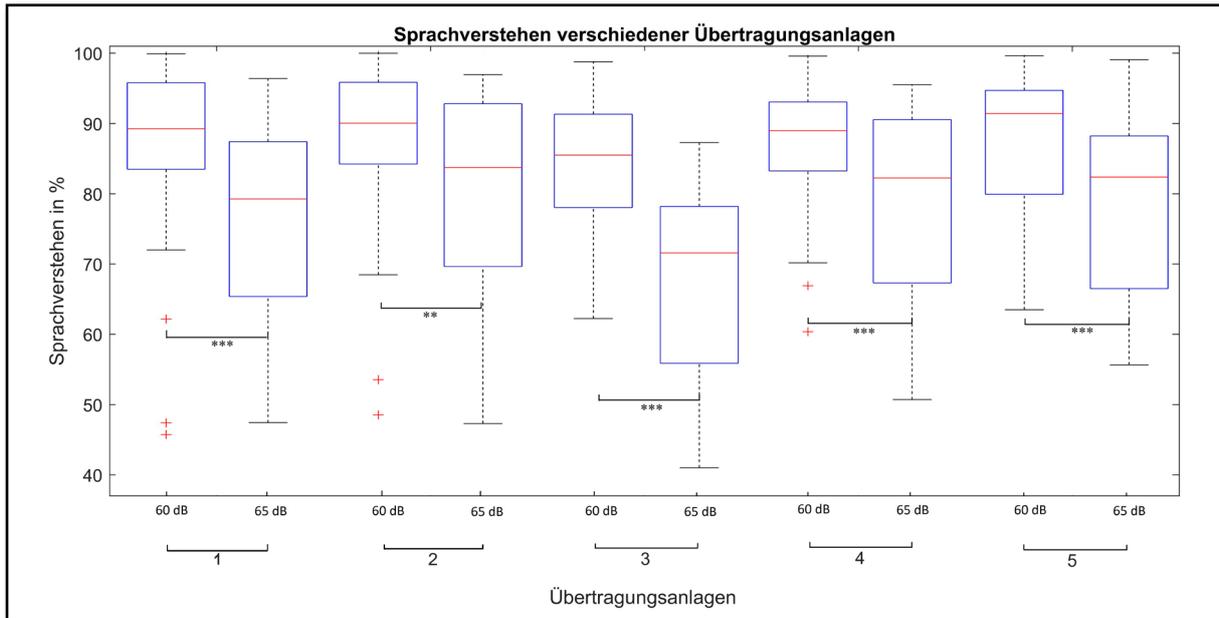


Abb. 5.4: Sprachverständlichkeitswerte aller Probanden beider Messvorgänge. Anhand von jeweils zwei Box-Whisker-Plots je Übertragungsanlage sind die Messergebnisse der beiden Messvorgänge (Störgeräuschpegel von 60 dB jeweils links und Störgeräuschpegel von 65 dB jeweils rechts) dargestellt.

Bei Betrachtung der p-Werte aus dem Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest in Tab. 6 ist festzustellen, dass sich die Messergebnisse der einzelnen Übertragungsanlagen aus den beiden Messdurchgängen sehr (**) bzw. höchst (***) signifikant unterscheiden. Besonders die analoge Anlage (Anlage 3) zeigt bei der Messung mit dem erhöhten Störgeräuschpegel deutlich schlechtere Messergebnisse. Jedoch ist trotz des niedrigeren SNR kein Unterschied der Anlagen mit verschiedenen Richtcharakteristiken zu erkennen.

Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest				
Anlage 1	Anlage 2	Anlage 3	Anlage 4	Anlage 5
p= 0,0001 ***	p= 0,0013 **	p= 1,657 10 ⁻⁹ ***	p= 0,0009 ***	p= 0,00008 ***

Tab. 6: Durch den nichtparametrischen Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest ermittelte p-Werte. Es wird untersucht, ob es einen signifikanten Unterschied in dem Median der Ergebnisse der beiden Messdurchgänge mit unterschiedlichen Störgeräuschpegeln gibt.

Anhand eines Fragebogens wird die subjektive Bewertung durch die 20 Probanden bei dem zweiten Messdurchgang (Störgeräuschpegel von 65 dB) mitberücksichtigt. Dabei haben die Testpersonen die fünf verschiedenen drahtlosen Übertragungsanlagen bezüglich des Sprachverstehens sowie des Klanges evaluiert. Es wurde dabei eine Ordinalskala gewählt (Fahrmeir et al., 2010). Die Bewertungsoptionen reichen von „sehr zufrieden“ (1) bis zu „sehr unzufrieden“ (5) über insgesamt fünf Bewertungsstufen.

In Abb. 5.5 und 5.6 sind die Ergebnisse der Fragebögen aller Probanden anhand von Box-Whisker-Plots dargestellt. Es ist zu erkennen, dass - wie schon bei der objektiven Evaluierung - die digitalen Übertragungsanlagen ähnliche Ergebnisse aufzeigen. In beiden Kategorien (Sprachverstehen, Klang) liegt der Median der Anlage 1, Anlage 2 und Anlage 5 bei „zufrieden“ (2). Anlage 4 weist mit einem Median zwischen Bewertungsstufe „sehr zufrieden“ (1) und „zufrieden“ (2) die beste Bewertung auf. Im Allgemeinen schneiden die digitalen Übertragungsanlagen zufriedenstellend ab. Lediglich Ausreißer lassen erkennen, dass Probanden mit dem Sprachverstehen und dem Klang der Anlagen vereinzelt nicht zufrieden waren. Sieht man sich die Beurteilung der analogen Übertragungsanlage (Anlage 3) an, ist eine weniger zufriedenstellende Tendenz erkennbar. Der Median liegt bei der Kategorie Sprachverstehen bei „neutral“ (3) und bei der Kategorie Klang bei „unzufrieden“ (4). Lediglich Ausreißer lassen erkennen, dass Probanden das Sprachverstehen vereinzelt mit „sehr zufrieden“ (1) oder „zufrieden“ (2) bewertet haben. Bei der Evaluierung des Klanges reicht die Bewertung von „zufrieden“ (2) bis „sehr unzufrieden“ (5). Die negativ ausfallende Bewertung hinsichtlich des Klanges lässt sich durch das konstante Hintergrundrauschen der analogen Übertragungsanlage erklären.

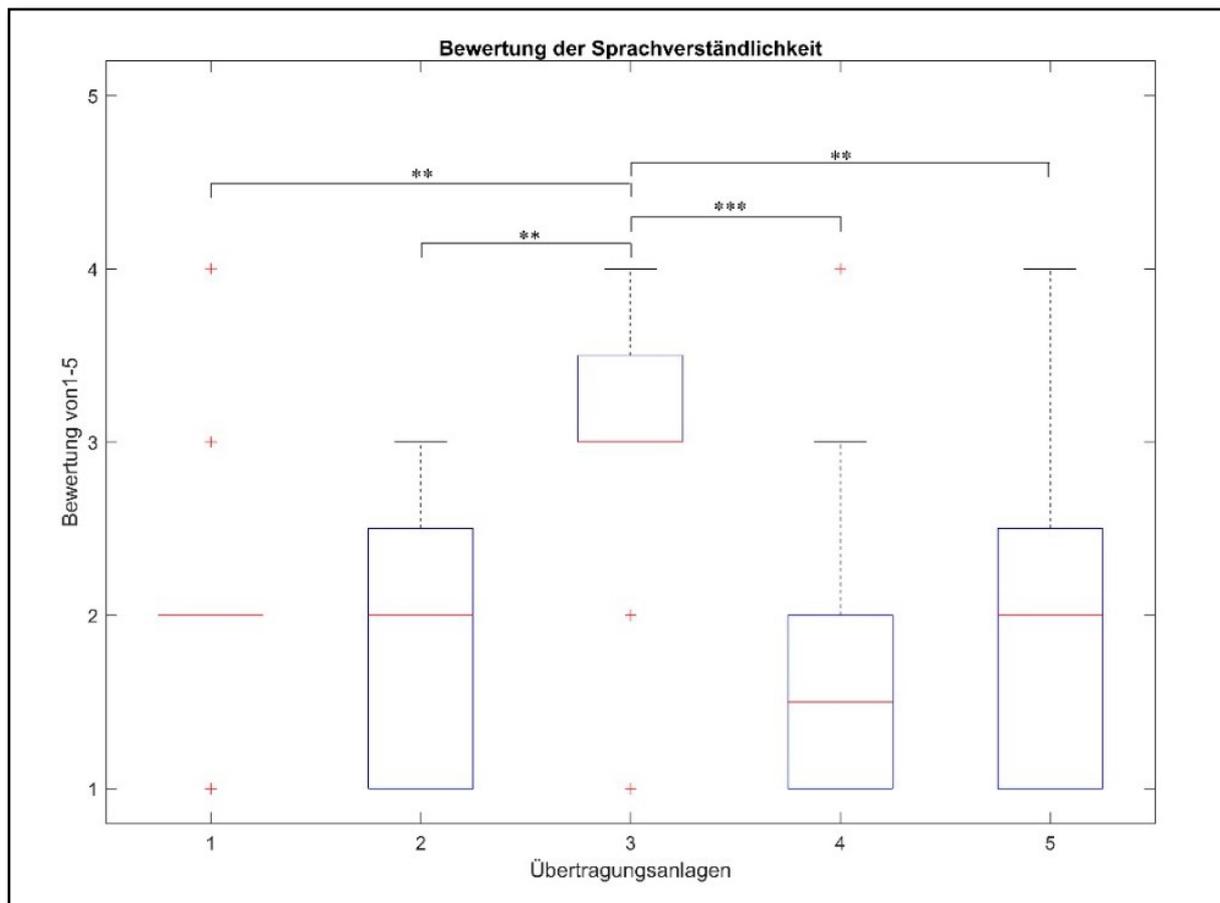


Abb. 5.5: Subjektive Bewertung der fünf verschiedenen Übertragungsanlagen bezüglich der Sprachverständlichkeit durch die Probanden mittels eines Fragebogens. Die Ergebnisse der Anlagen 1 bis 5 sind anhand von Box-Whisker-Plots dargestellt. Die Bewertung reicht über fünf Stufen: 1: „sehr zufrieden“; 2: „zufrieden“; 3: „neutral“; 4: „unzufrieden“; 5: „sehr unzufrieden“.

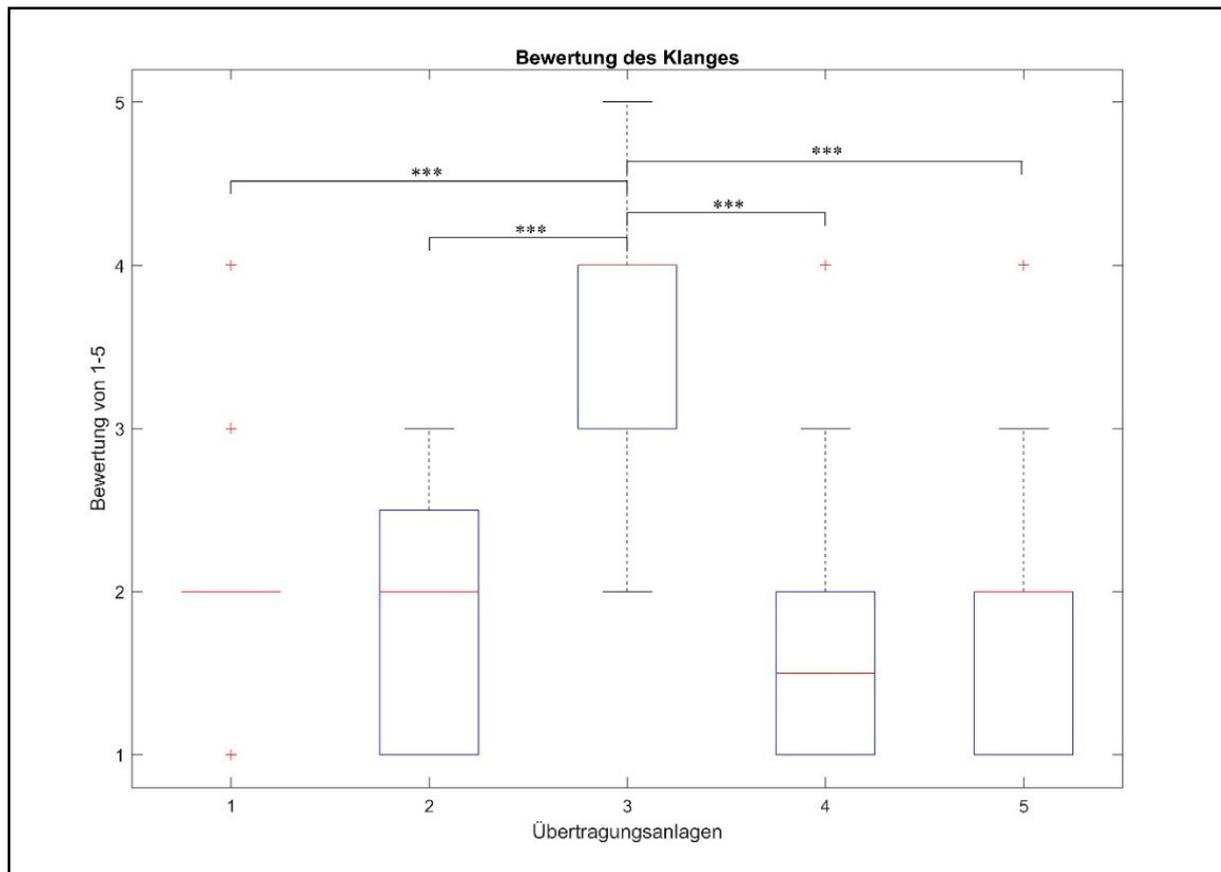


Abb. 5.6: Subjektive Bewertung der fünf verschiedenen Übertragungsanlagen bezüglich des Klanges durch die Probanden mittels eines Fragebogens. Die Ergebnisse der Anlagen 1 bis 5 sind anhand von Box-Whisker-Plots dargestellt. Die Bewertung reicht über fünf Stufen: 1: „sehr zufrieden“; 2: „zufrieden“; 3: „neutral“; 4: „unzufrieden“; 5: „sehr unzufrieden“.

Bei Betrachtung der p-Werte aus dem Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest in Tab. 7 und 8 ist festzustellen, dass sich die subjektive Bewertung der analogen Übertragungsanlage (Anlage 3) sehr (***) bzw. höchst (***) signifikant von den digitalen Übertragungsanlagen unterscheidet.

Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest (Sprachverstehen)				
	Anlage2	Anlage3	Anlage4	Anlage5
Anlage1	p= 0,1967	p= 0,007 **	p= 0,0707	p= 0,3343
Anlage2		p= 0,0025 **	p= 0,3657	p= 1
Anlage3			p= 0,0008 ***	p= 0,0016 **
Anlage4				p= 0,5879

Tab. 7: Durch den nichtparametrischen Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest ermittelte p-Werte. Es wird untersucht, ob es einen signifikanten Unterschied im Median der verschiedenen Übertragungsanlagen gibt. Es handelt sich dabei um die subjektive Beurteilung der Probanden bezüglich des Sprachverstehens.

Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest (Klang)				
	Anlage2	Anlage3	Anlage4	Anlage5
Anlage1	p= 0,4054	p= 0,0009 ***	p= 0,0707	p= 0,4386
Anlage2		p= 0,0005 ***	p= 0,1655	p= 0,8551
Anlage3			p= 0,0003 ***	p= 0,0003 ***
Anlage4				p= 0,509

Tab. 8: Durch den nichtparametrischen Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest ermittelte p -Werte. Es wird untersucht, ob es einen signifikanten Unterschied im Median der verschiedenen Übertragungsanlagen gibt. Es handelt sich dabei um die subjektive Beurteilung der Probanden bezüglich des Klanges.

6. Fazit und Ausblick

Ziel der Bachelorarbeit ist es, verschiedene drahtlose Übertragungsanlagen mit der vom DHI entwickelten Messmethode zu evaluieren und auf Unterschiede hinsichtlich der Übertragungstechniken und Richtcharakteristiken zu untersuchen.

Die Ergebnisse beider Messdurchgänge mit verschiedenem Störgeräuschpegel zeigen, dass alle Übertragungsanlagen zu einem deutlichen Gewinn des Sprachverstehens gegenüber der alleinigen Verwendung von Hörgeräten führen.

Die Untersuchungen zeigen, dass keine Unterschiede hinsichtlich der verschiedenen Richtcharakteristiken des Anlagenmikrofons zu erkennen sind. Weder bei der Messung mit dem Störgeräuschpegel von 60 dB (Test-Retest) noch bei der zweiten Messung mit erschwerten Bedingungen durch einen niedrigeren SNR. Die durch die Probanden durchgeführte subjektive Evaluierung der Übertragungsanlagen mit den verschiedenen Richtcharakteristiken ergibt ebenfalls keine signifikanten Unterschiede.

Dahingegen wird bei der Auswertung der Untersuchungen deutlich, welchen Einfluss der technische Fortschritt im Bereich Signalübertragung auf das Sprachverstehen und die Zufriedenheit der Anwender hat. Die Übertragungsanlagen mit digitaler Technik haben in allen Messdurchgängen ein signifikant besseres Ergebnis erzielt. Besonders der zweite Messvorgang mit niedrigerem SNR zeigt eine klare Tendenz dahingehend, dass es den Probanden schwerer fällt, mit der analogen Anlage Sprache richtig zu verstehen. Zudem führt ein Hintergrundrauschen bei der analogen Übertragungsanlage zu einer erhöhten Höranstrengung, weshalb die subjektive Bewertung durch die Probanden hinsichtlich des Klanges der Anlage nicht zufriedenstellend ausfällt.

Bei der Gegenüberstellung der Ergebnisse der beiden Messdurchgänge mit verschiedenem Störgeräuschpegel ist festzustellen, dass sich durch den niedrigeren SNR die Unterschiede der drahtlosen Übertragungsanlagen deutlicher abzeichnen. Alle Anlagen weisen einen sehr bzw. höchst signifikanten Unterschied zwischen den Ergebnissen der ersten und zweiten Messung auf. Im Rahmen weiterführender Studien ist es interessant zu untersuchen, welche Ergebnisse resultieren, wenn der Störgeräuschpegel weiter angehoben wird, beispielsweise bis 70 dB.

Das Ergebnis der Testwiederholung des ersten Messdurchgangs (Störgeräusch: 60 dB) bestätigt die Zuverlässigkeit der verwendeten Messmethode. Die Test-Retest-Korrelation hinsichtlich der Sprachverständlichkeitsmessungen ist als stark positiv zu bewerten. Dieser Aspekt bestätigt die Praktikabilität der vom DHI entwickelten Messmethode zur Evaluierung von drahtlosen Übertragungsanlagen.

Die ausgewählten Probanden weisen im Durchschnitt eine mittelgradige Hochton-Schallempfindungsschwerhörigkeit (Typ N3) auf. Dies ist der entsprechend den in DIN 60118-15 aufgeführten Kategorien am häufigsten auftretende Hörverlust. Dennoch wäre es für

weitere Untersuchungen auch interessant, andere Hörverluste oder Menschen ohne Hörverlust mitzubedenken.

7. Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die mich im Rahmen dieser Bachelorarbeit unterstützt und motiviert haben.

Ganz besonders möchte ich Herrn Dr. Hendrik Husstedt danken, der meine Arbeit durch seine fachliche und persönliche Unterstützung begleitet hat und mir die Bearbeitung dieses Themas erst ermöglichte.

Des Weiteren bedanke ich mich auch bei dem restlichen Team des Deutschen Hörgeräte Instituts und der Akademie für Hörgeräte-Akustik für die freundliche Betreuung und das angenehme Arbeitsklima.

Vielen Dank auch an Herrn Prof. Dr. Jürgen Tchorz für die Betreuung dieser Arbeit und während meines gesamten Studiums.

Ein ganz besonderer Dank gebührt meinen Eltern und Geschwistern, die mir das Studium überhaupt erst ermöglicht haben. Vielen Dank für die ständige Unterstützung, Motivation und Ermutigungen.

Danke an meine tollen Kommilitonen für eure Unterstützung und Zusammenarbeit während des gesamten Studiums. Es war eine schöne und unvergessene Studienzeit mit euch in Lübeck.

8. Verzeichnisse

8.1 Abkürzungsverzeichnis

ASHA: American Speech-Language-Hearing Association

DAI: Direct Audio Input

DHI: Deutsches Hörgeräte Institut

HG: Hörgerät

HV: Hörverlust

IQR: Interquartilsabstand

ISTS: International Speech Test Signal

KL: Knochenleitung

SE-HV: Schallempfindungshörverlust

SNR: Signal-Rausch-Abstand (signal-to-noise ratio)

8.2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1:	Schematische Darstellung der Funktionsweise einer drahtlosen Übertragungsanlage (Husstedt, 2016)	3
Abb. 2.2:	Schematische Darstellung von Direktschall (grün), frühen Reflexionen (gelb) und späten Reflexionen (rot)	4
Abb. 2.3:	Pegelverlauf von Direkt- und Diffusschall in Abhängigkeit vom Abstand zur Schallquelle	5
Abb. 2.4:	Lautstärkeanpassung der drahtlosen Übertragungsanlage an die Hörereinstellung via Messbox in Anlehnung an die Guidelines for Fitting and Monitoring FM Systems (ASHA, 2002)	7
Abb. 2.5:	Messanordnung der vom DHI entwickelten Methode zur Evaluierung von drahtlosen Übertragungsanlagen (Husstedt, 2015)	8
Abb. 3.1:	Standardaudiogramme für verschiedene Grade von Hörverlusten (DIN 60118-15)	13
Abb. 3.2:	Durchschnittlicher HV der 20 Probanden	14
Abb. 3.3:	Messaufbau in der Forschungskabine des DHI	14
Abb. 3.4:	Messaufbau mit Markierungen der Messpunkte, an denen der Schallpegel während der „Kalibrierung“ gemessen wird	16
Abb. 4.1:	Fragebogen zur subjektiven Evaluierung bezüglich der Verständlichkeit der Sprache und des Klanges der verschiedenen Übertragungsanlagen	20
Abb. 5.1:	Korrelationen zwischen den Ergebnissen des ersten Messdurchlaufs (Test) und des zweiten Messdurchlaufs (Retest)	22
Abb. 5.2:	Sprachverständlichkeitswerte aller Probanden (Störgeräusch: 60 dB, Test und Retest) in Abhängigkeit von den verschiedenen Übertragungsanlagen (1 bis 5) bzw. ohne Übertragungsanlage (0)	23
Abb. 5.3:	Sprachverständlichkeitswerte aller Probanden (Störgeräusch: 65 dB) in Abhängigkeit von den verschiedenen Übertragungsanlagen	24
Abb. 5.4:	Sprachverständlichkeitswerte aller Probanden beider Messvorgänge	26
Abb. 5.5:	Subjektive Bewertung der fünf verschiedenen Übertragungsanlagen bezüglich der Sprachverständlichkeit durch die Probanden mittels eines Fragebogens	27
Abb. 5.6:	Subjektive Bewertung der fünf verschiedenen Übertragungsanlagen bezüglich des Klanges durch die Probanden mittels eines Fragebogens	28

8.3 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Beschreibung der fünf verwendeten drahtlosen Übertragungsanlagen, die sich bzgl. der Verarbeitung, der Mikrofonmodi und/oder des Fabrikats unterscheiden	12
Tab. 2: Beispieltabelle mit randomisierter Reihenfolge der Konfiguration sowie Auswahl der Wortgruppen	17
Tab. 3: Beispieltabelle mit randomisierter Reihenfolge der Konfiguration sowie Auswahl der Wortgruppen	19
Tab. 4: Durch den nichtparametrischen Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest ermittelte p-Werte (Störgeräuschpegel: 60 dB)	24
Tab. 5: Durch den nichtparametrischen Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest ermittelte p-Werte (Störgeräuschpegel: 65 dB)	25
Tab. 6: Durch den nichtparametrischen Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest ermittelte p-Werte (unterschiedliche Störgeräuschpegel)	26
Tab. 7: Durch den nichtparametrischen Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest ermittelte p-Werte (subjektive Bewertung des Sprachverstehens)	28
Tab. 8: Durch den nichtparametrischen Wilcoxon-Vorzeichen-Rangtest ermittelte p-Werte (subjektive Bewertung des Klanges)	29

8.4 Literaturverzeichnis

- ASHA, AdHoc Committee on FM Systems. 2002.** *Guidelines for Fitting and Monitoring FM Systems.* 2002.
- Büning, Herbert, und Trenkler, Götz. 1994.** *Nichtparametrische statistische Methoden.* 2. Aufl. Walter de Gruyter, 1994.
- Fahrmeir, Ludwig, et al. 2010.** *Statistik – Der Weg zur Datenanalyse.* 7. Aufl. Springer Gabler, 2010.
- Hedderich, Jürgen, und Sachs, Lothar. 2016.** *Angewandte Statistik – Methodensammlung mit R.* 15. Aufl. Springer Spektrum, 2016.
- . **2012.** *Angewandte Statistik – Methodensammlung mit R.* 14. Aufl. Springer Gabler, 2012.
- Husstedt, Hendrik. 2015.** *An easily applicable measurement setup for the evaluation of the individual benefit of wireless remote microphone technology.* Internes Dokument des DHI, 2015.
- . **2015.** *Messablauf zur Evaluierung von drahtlosen Übertragungsanlagen.* Internes Dokument des DHI, 2015.
- . **2015.** *Praxistaugliche und realitätsnahe Messung des Sprachverstehens für drahtlose Übertragungsanlagen.* Hannover: 19. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Audiologie, 2015.
- . **2016.** *Drahtlose Übertragungsanlagen (FM-Anlagen).* EUHA-Regionalveranstaltung Nordhorn, 2016.
- Husstedt, Hendrik, und Steinhauer, Julia. 2015.** *Practicability study of a setup for the evaluation of wireless remote microphone technology.* 2015.
- Killion, Mead C. 1997.** *The SIN report: Circuits haven't solved the hearing-in-noise problem.* *Hear J* 50(10): 29, 1997.
- Metz, Michael J. 2014.** *Sandlin's textbook of hearing aid amplification: Technical and clinical considerations.* Plural Publishing, 2014.
- Möser, Michael. 2009.** *Technische Akustik.* 8. Aufl. Springer, 2009.
- Seifert, Hörgeräte. 2016.** *FM Technologie.* [Online] 22. 08 2016. <http://www.hoergeraete-seifert.de/hilfsmittel/fm-anlagen/index.html>.
- Steinhauer, Julia. 2015.** *Untersuchung einer Messmethode zur Evaluierung von drahtlosen Übertragungsanlagen.* Fachhochschule Lübeck, Bachelorarbeit, 2015.
- Thibodeau, Linda. 2014.** *Comparison of speech recognition with adaptive digital and FM remote microphone hearing assistance technology by listeners who use hearing aids.* *Am J Audiol*, 2014.
- Toutenburg, Helge, und Heumann, Christian. 2009.** *Deskriptive Statistik – Eine Einführung in Methoden und Anwendungen mit R und SPSS.* 7. Aufl. Springer Gabler, 2009.
- Valente, Michael, Hosford-Dunn, Holly, und Roeser, Ross J. 2008.** *Audiology: Treatment.* 2. Aufl. Thieme, 2008.
- Veit, Igor. 2005.** *Technische Akustik.* 6. Aufl. Vogel, 2005.