

# Elektronischer Gehörschutz für Industrie 4.0

## *Lokalisation, Sprachverständlichkeit, Detektion von Signalen, Quellentrennung, Sprachsteuerung von Maschinen*

**Prof. Dr. Jan Rennies-Hochmuth**

Fraunhofer Institut für Digitale Medientechnologien IDMT  
Institutsteil Hör-, Sprach- und Audiotechnologien, Oldenburg

Carl von Ossietzky Universität Oldenburg  
Department für Medizinische Physik und Akustik

**Fachtagung Arbeitsplanung und Prävention**  
**„Digitale Systeme zur Gestaltung ergonomischer Arbeitsbedingungen“**  
**31. März – 01. April 2025**

# Elektronischer Gehörschutz für Industrie 4.0

## Wie kann digitalisierter Gehörschutz zur Ergonomie am Industriearbeitsplatz beitragen?

- Größere Akzeptanz und Tragezuverlässigkeit von Gehörschutz
- Reduktion von Stress durch anstrengende Sprachkommunikation
- Vermeidung unnötiger Laufwege oder anstrengender Positionswechsel
- Verbesserung der Effizienz von Arbeitsabläufen
- Automatische Erkennung gefährlicher Situationen durch ohrnahe Sensorik



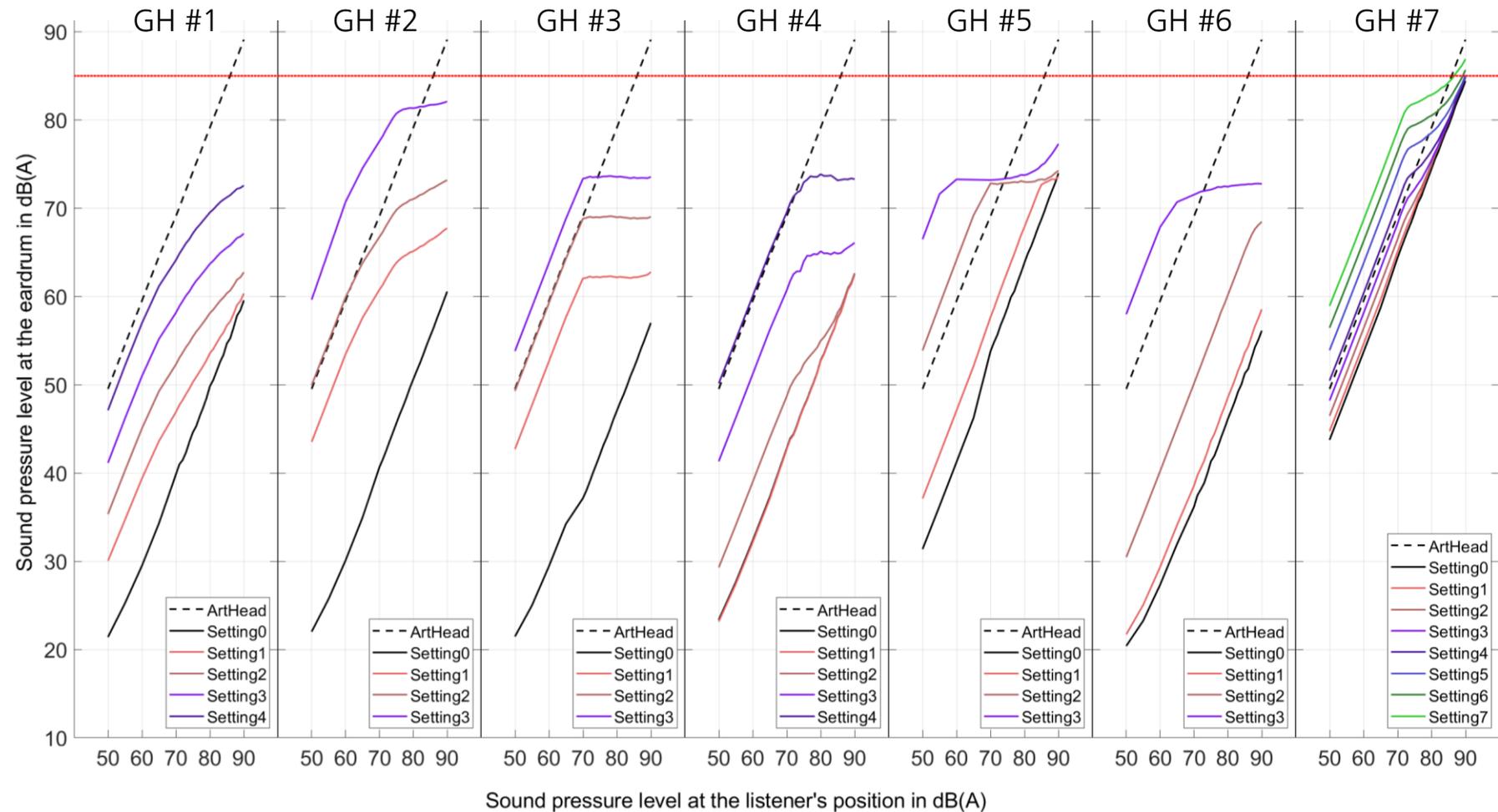
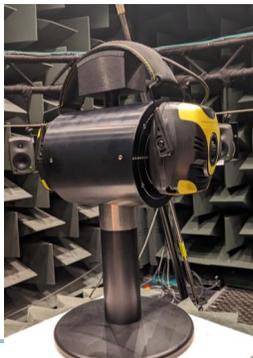
# Wie funktionieren aktuelle elektronischer Gehörschützer?

- Design-Ziele:
  - Schutz vor lauten Geräuschen
  - “Hear-through“-Modus (oder sogar Verstärkung) von leisen und mittellauten Schallen
  - Soll verhindern, dass Gehörschützer abgenommen werden, um mit KollegInnen zu kommunizieren
- Typischerweise einstellbare Verstärkung
- Mit steigendem Lärmpegel setzt zunehmend Begrenzung des “Hear-through“ ein



# Wie funktionieren aktuelle elektronischer Gehörschützer?

- Sehr große Unterschiede im pegelabhängigen Verhalten
- Manche GH verstärken gegenüber offenen Ohren
- Sehr starke Kompression bei manchen GH

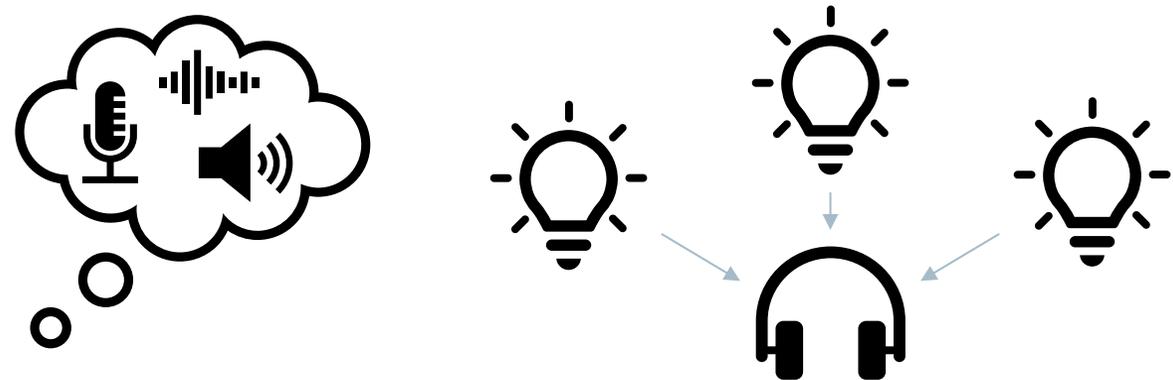


# Elektronischer Gehörschutz für Industrie 4.0

## 1. Zukünftige Entwicklungen zu Auswahl von Gehörschützern



## 2. Zukünftige Möglichkeiten für neue Funktionen und Mehrwerte

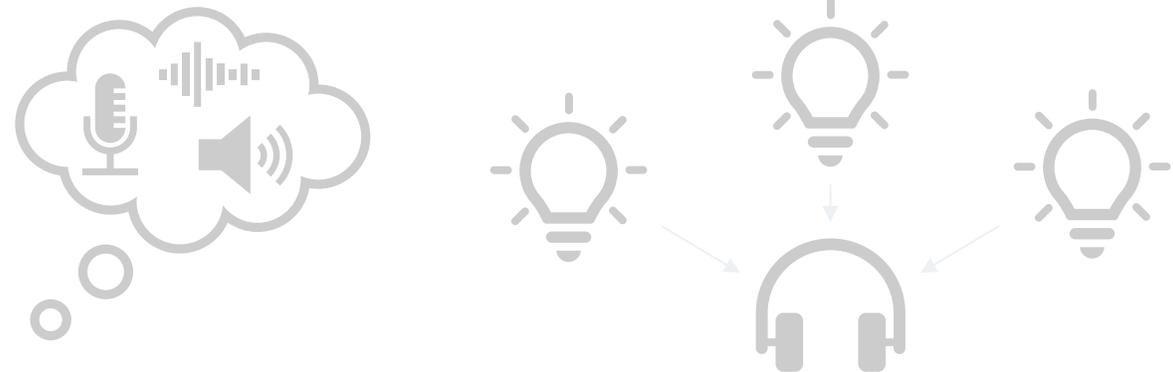


# Elektronischer Gehörschutz für Industrie 4.0

## 1. Zukünftige Entwicklungen zu Auswahl von Gehörschützern



## 2. Zukünftige Möglichkeiten für neue Funktionen und Mehrwerte



# Zukünftige Entwicklungen zu Auswahl von Gehörschützern

---

## Auswahlprozess heute:

- Fokus sehr stark auf primärer Schutzfunktion, d.h. auf den technischen Dämpfungswerten und Lärmarten
- Zusätzlich Empfehlungen basierend auf Erfahrungen
- Weitere Faktoren Kosten, Formfaktor, ggf. Kombination mit individuellem Hörverlust

## Bisher wenig beachtet

- Wie beeinflusst der Gehörschützer die auditorische Umgebungswahrnehmung?
  - Sprachverständlichkeit
  - Erkennung und Unterscheidung von wichtigen akustischen Ereignissen
  - Erkennen von Abstand und Richtung der Schallquellen

# Sprachverständlichkeit: Messmethoden

## Subjektive Messung: Hörversuche

- Präsentation von Sprachitems
- Versuchspersonen wiederholen das Gehörte
- Ermittlung von Erkennungsraten oder Schwellwerten
- Vorteil: Sehr genaue und verlässliche Messung möglich
- Nachteil: Sehr zeit- und kostenintensiv



## Instrumentelle Messung: Modelle

- Akustische Messtechnik
- Audioaufnahmen
- Computerprogramme
- Berechnung von Kennzahlen
- Vorteile: beliebig reproduzierbar, schnell und günstig
- Nachteil: Wie verlässlich sind die Ergebnisse?

# Sprachverständlichkeit: Subjektive Messungen

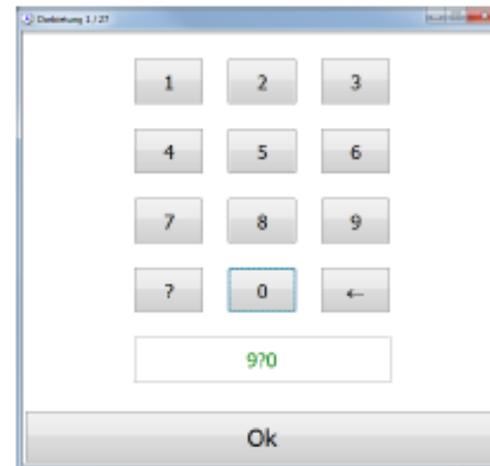
- **ICP-Test** (<1min pro Messpunkt)
  - Praxisnahes, aber limitiertes Sprachmaterial
  - Schnell, aber wie verlässlich?

	ohne HPD		mit HPD					
	Ja	Nein	1. Stufe		2. Stufe		3. Stufe	
	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein
Rote Farbe einfüllen.	<input type="checkbox"/>							
Nach rechts drehen.	<input type="checkbox"/>							
Ventil schließen.	<input type="checkbox"/>							
ACHTUNG: Stapler von links.	<input type="checkbox"/>							
Schalter drücken.	<input type="checkbox"/>							
Anlage sofort ausschalten.	<input type="checkbox"/>							
Hebebühne sofort stoppen.	<input type="checkbox"/>							
Bitte Halle sofort verlassen.	<input type="checkbox"/>							
Rechts anheben.	<input type="checkbox"/>							
Benötige 24'er Schraubenschlüssel.	<input type="checkbox"/>							

[1]

# Sprachverständlichkeit: Subjektive Messungen

- **ICP-Test** (<1 min pro Messpunkt)
  - Praxisnahes, aber limitiertes Sprachmaterial
  - Schnell, aber wie verlässlich?
- **Standardisierte Tests** mit hoher Wiederholbarkeit und Präzision (3-5 min pro Messpunkt)
  - Oldenburger Satztest
  - Digit Triplet Test



The image shows a software window titled 'Übung 1 / 20'. It contains a grid of words for a sentence completion test. The words are arranged in five columns and ten rows. An 'Ok' button is at the bottom.

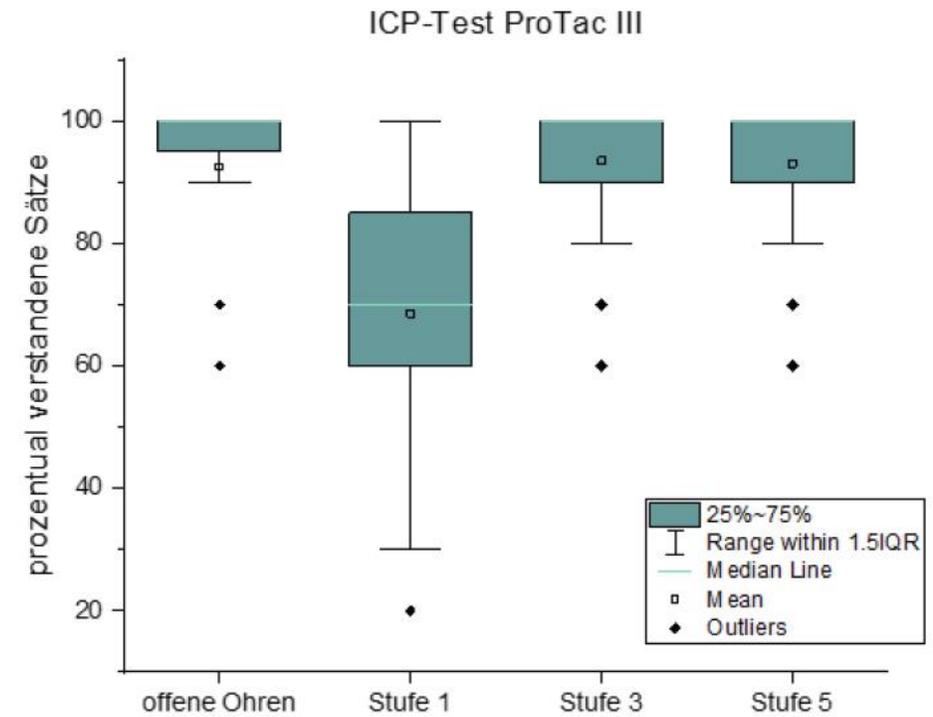
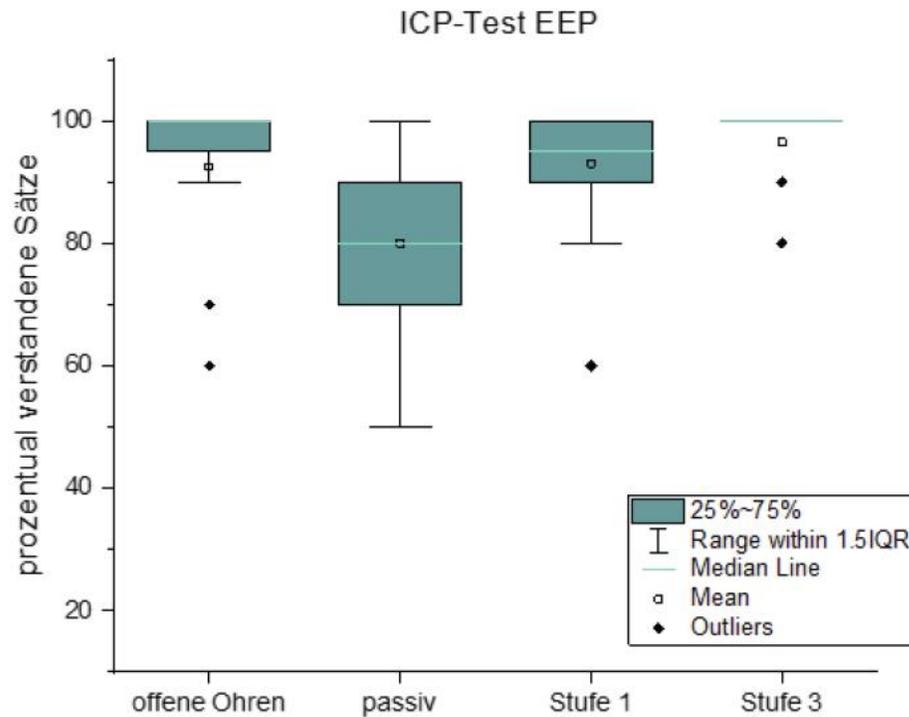
Britta	bekommt	zwei	alte	Autos
Doris	gewann	drei	große	Bilder
Kerstin	gibt	vier	grüne	Blumen
Nina	hat	fünf	kleine	Dosen
Peter	kauft	sieben	nasse	Messer
Stefan	malt	acht	rote	Ringe
Tanja	nahm	neun	schöne	Schuhe
Thomas	schenkt	elf	schwere	Sessel
Ulrich	sieht	zwölf	teure	Steine
Wolfgang	verleiht	achtzehn	weiße	Tassen

[1,2]

# Sprachverständlichkeit: Subjektive Messungen

## ICP-Test

- Messungen bei festem Störgeräuschpegel von 60 dB(A)

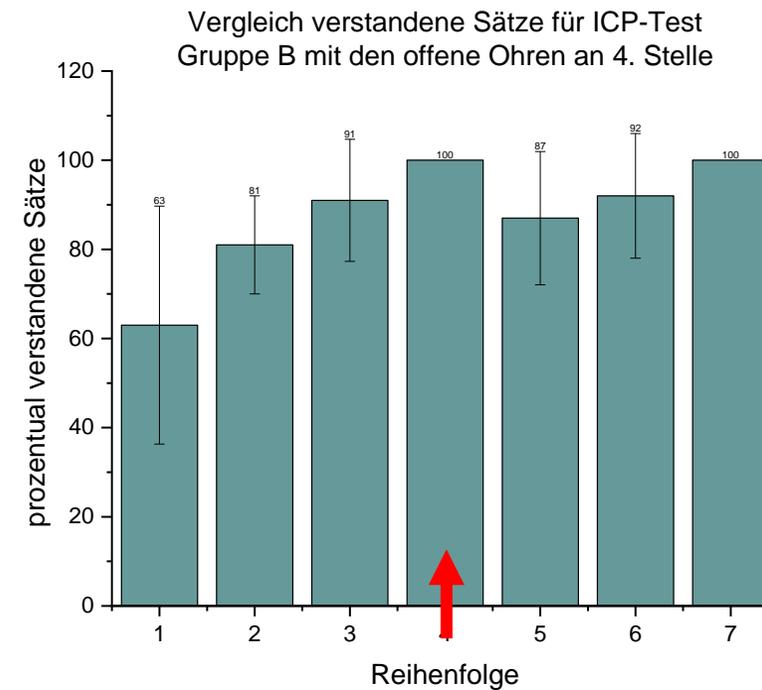
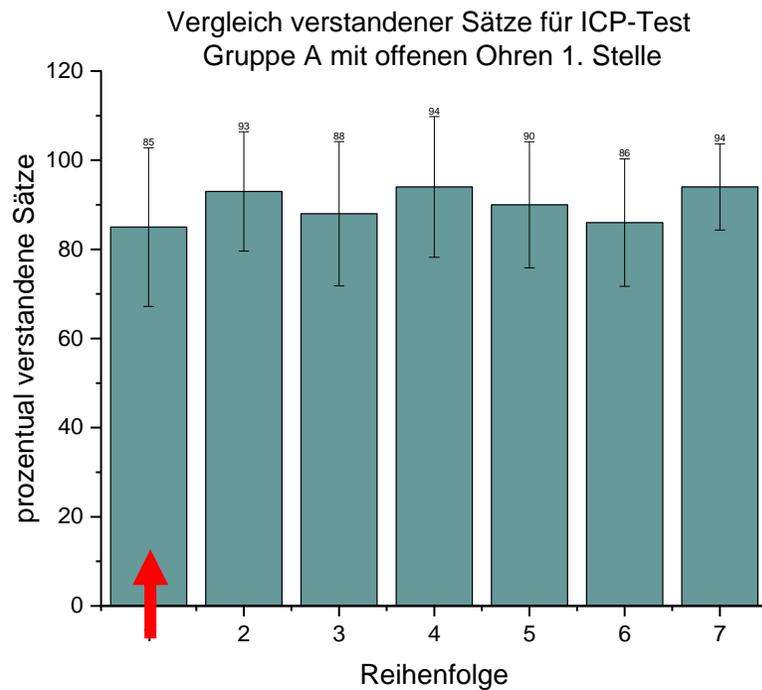


[1]

# Sprachverständlichkeit: Subjektive Messungen

## ■ ICP-Test

- Die Reihenfolge der Messbedingungen beeinflusst die Ergebnisse sehr stark

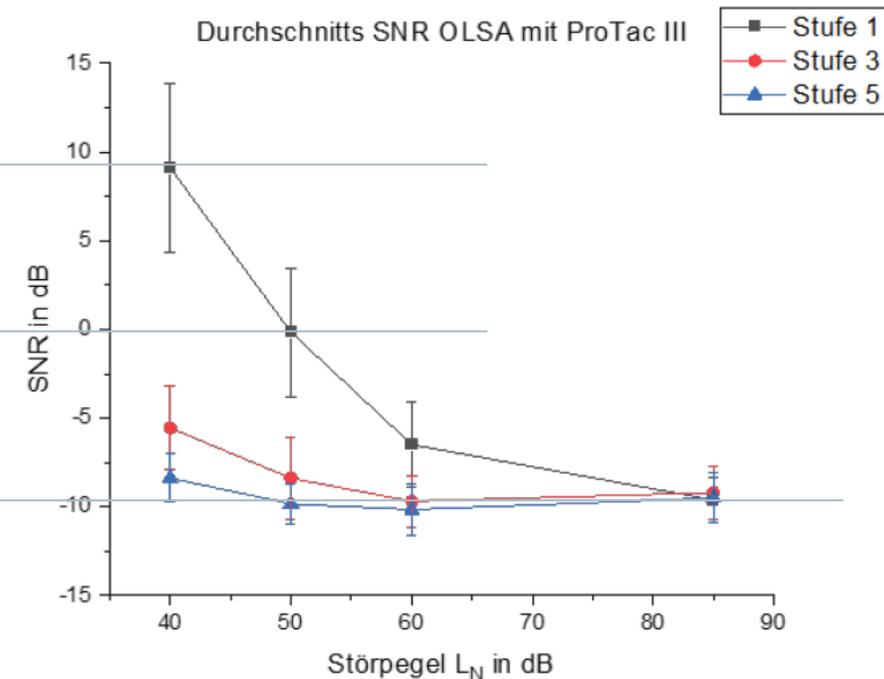
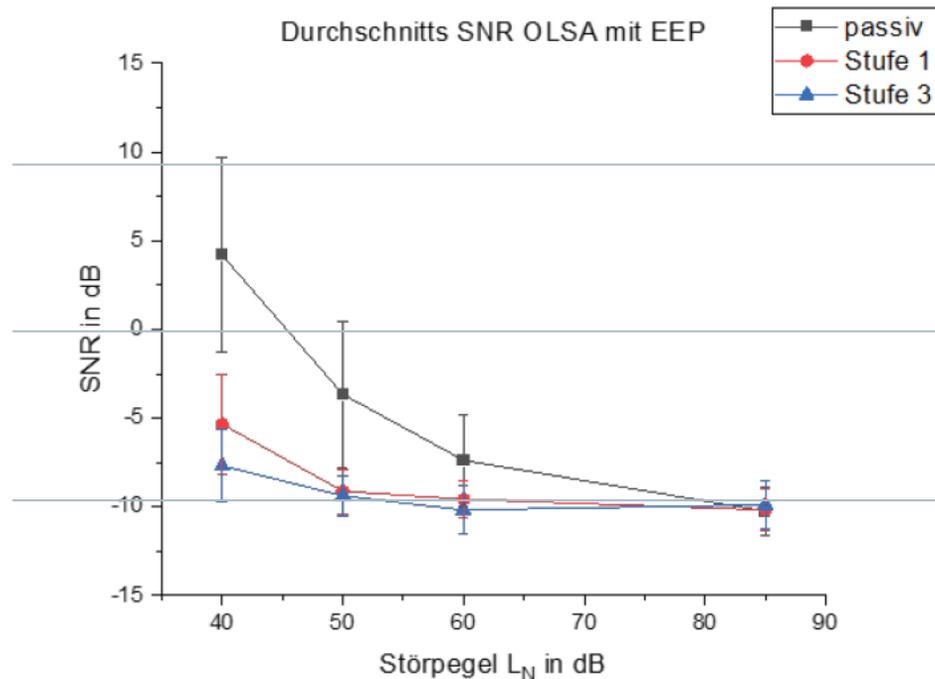


[1]

# Sprachverständlichkeit: Subjektive Messungen

## Standardisierte Tests (hier: Oldenburger Satztest)

- Auch kleinere Unterschiede zwischen Gehörschutzmodellen und deren Einstellungen sind messbar
- Es gibt keinen Einfluss der Reihenfolge der Messbedingungen



[1]

# Sprachverständlichkeit: Instrumentelle Messungen

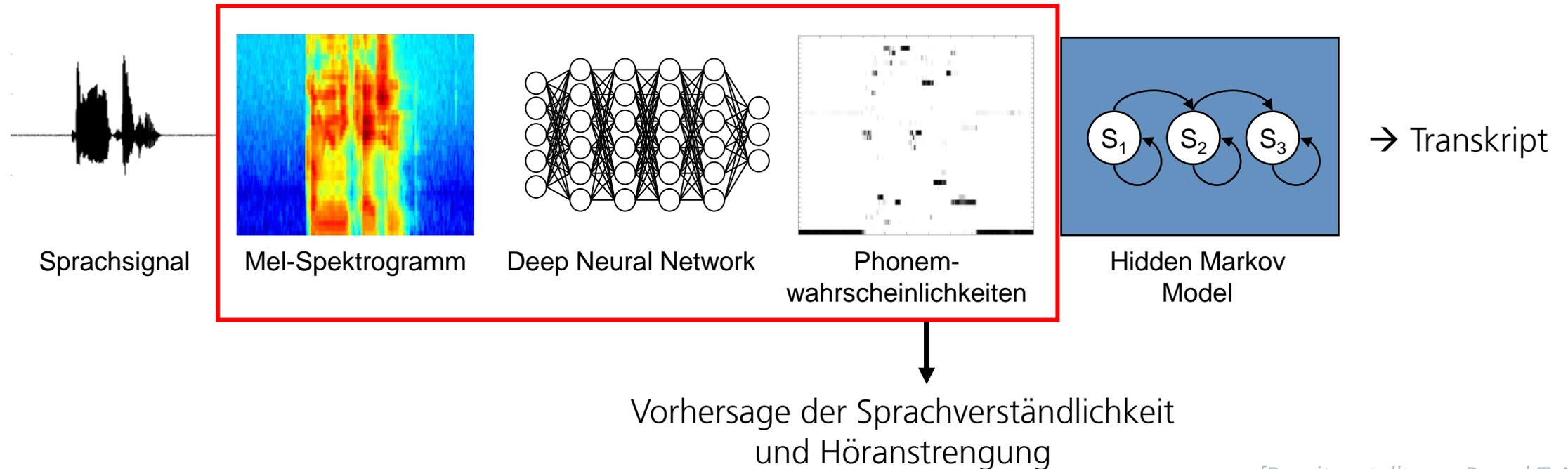
---

## Wie funktioniert ein Hörmodell?

- Berechnung akustischer Eigenschaften
- Abbildung der Eigenschaften auf perzeptive Größen
- Herausforderungen:
  - Welche akustischen Eigenschaften sind wichtig?
  - Wie kann man sie messen?
  - Besonders schwierig für pegelabhängige Gehörschützer
  - Wie vermeidet man Overfitting?
- Ideales Modell:
  - Braucht Sprache und Störgeräusche nicht getrennt
  - Reproduziert zuverlässig die menschliche Sprachverständlichkeit auch für neue, unbekannte Hörbedingungen

# Berechnungsmodelle für Sprachverständlichkeit

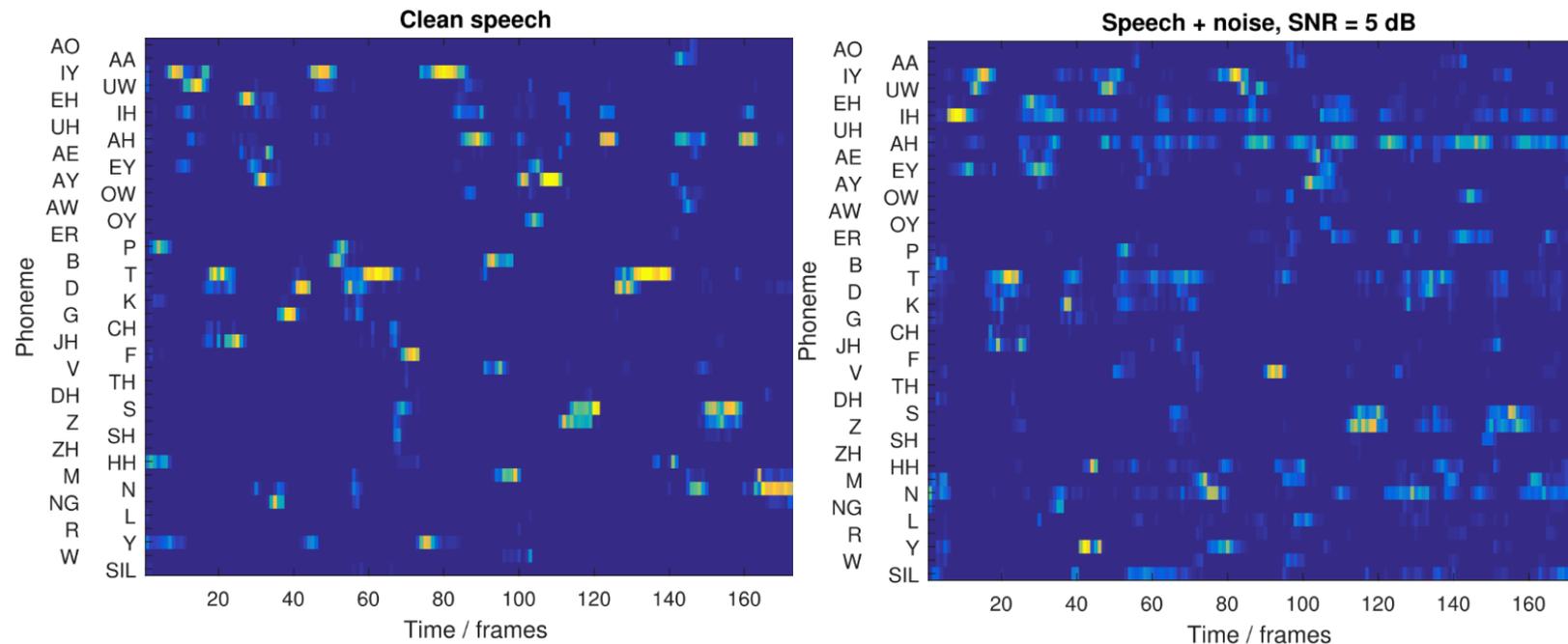
- Diverse Berechnungsmethoden zur instrumentellen Bestimmung der Sprachverständlichkeit
- Einige standardisiert (Sprachverständlichkeitsindex [SII], Sprachübertragungsindex [STI / STIPA])
- Aktuelle Forschungsansätze nutzen weitergehende Konzepte, zum Beispiel Technologien aus automatischen Spracherkennung



[Bereitgestellt von Bernd T. Meyer]

# Sprachverständlichkeit: LEAP-Modell

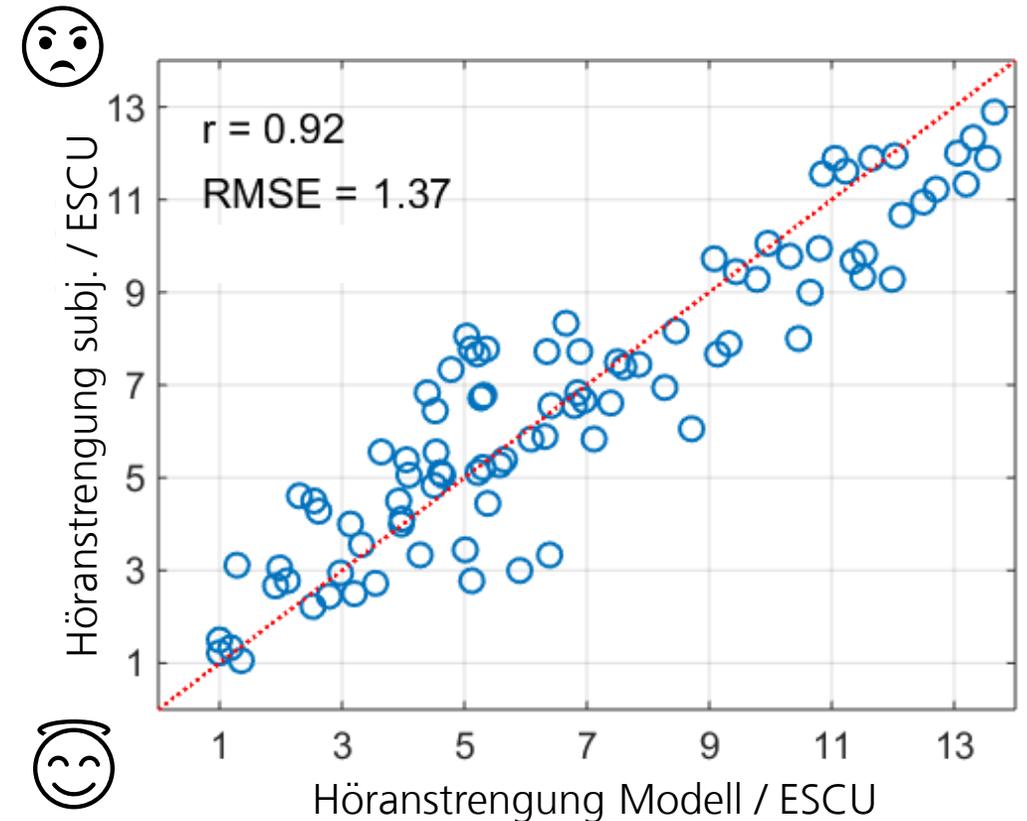
- Automatische Spracherkennung berechnet Wahrscheinlichkeiten für bestimmte Laute zu jedem Zeitpunkt
- Wenn Sprache gestört ist, "verschmieren" die berechneten Wahrscheinlichkeiten
- Diese Unsicherheit kann mathematisch quantifiziert werden



[3]

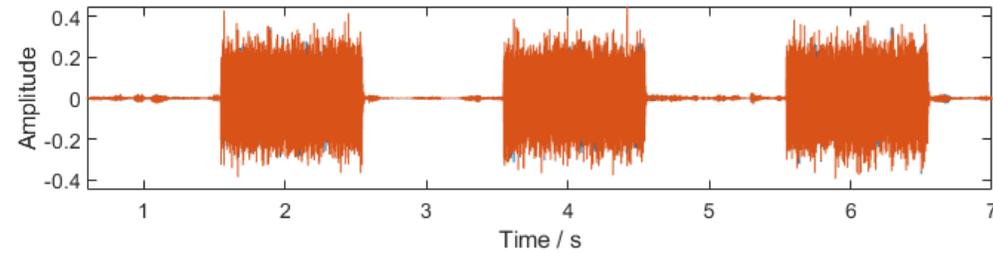
# Sprachverständlichkeit: LEAP-Modell

- Bisher in verschiedenen Studien erfolgreich validiert:
  - Sehr hohe Übereinstimmung von Modellvorhersagen und Hörversuchen, z.B. für
    - Synthetische Stimmen
    - Verarbeitete Sprachsignale (Hörgeräte, Störgeräuschreduktion, Sprachverbesserung, ...)
    - Viele verschiedene Störgeräusche
    - Film und Fernsehen

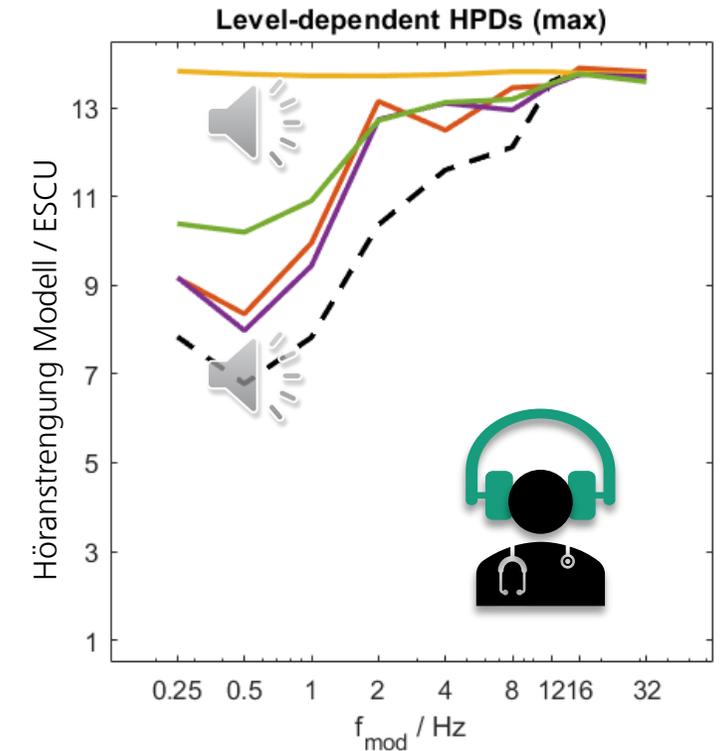
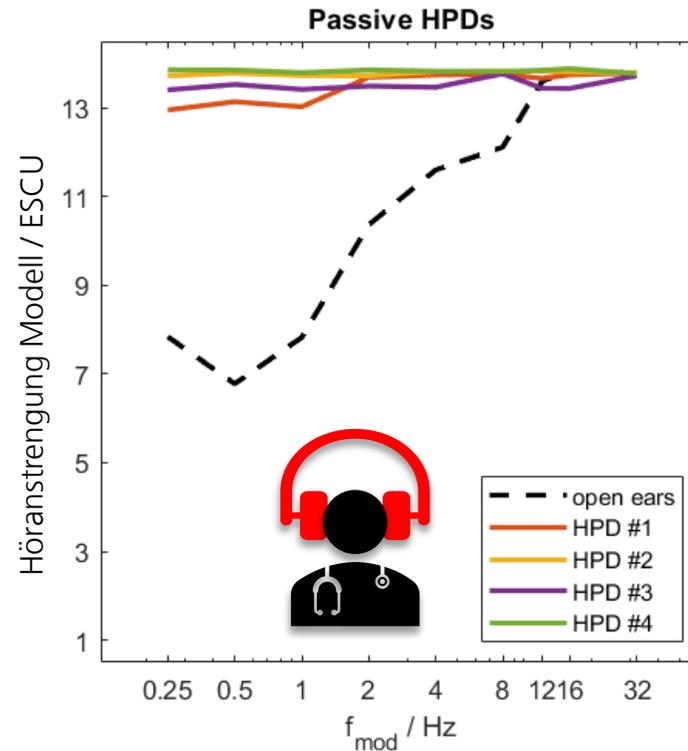
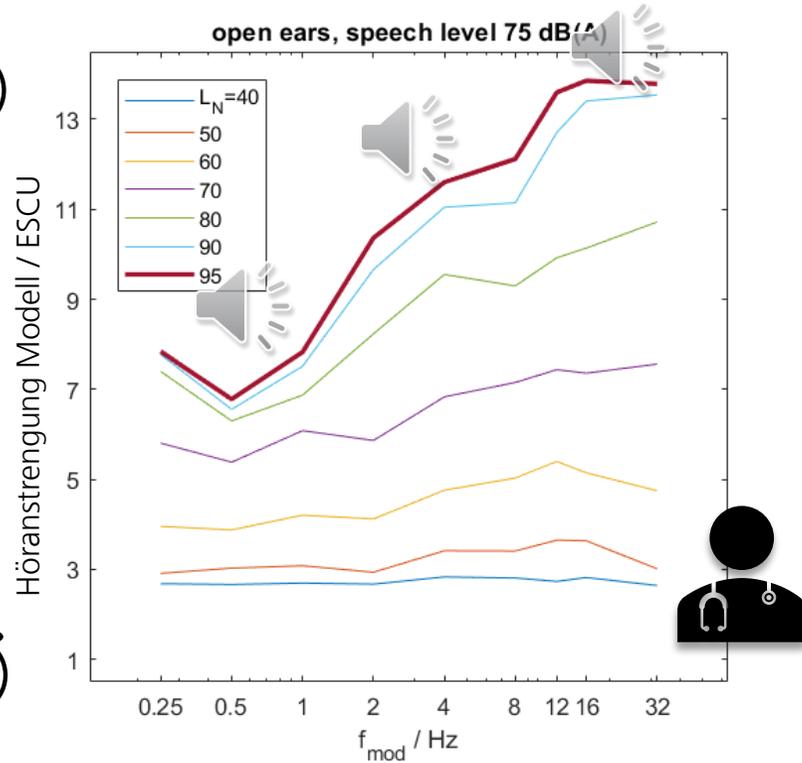


[4]

# Sprachverständlichkeit: LEAP-Modell

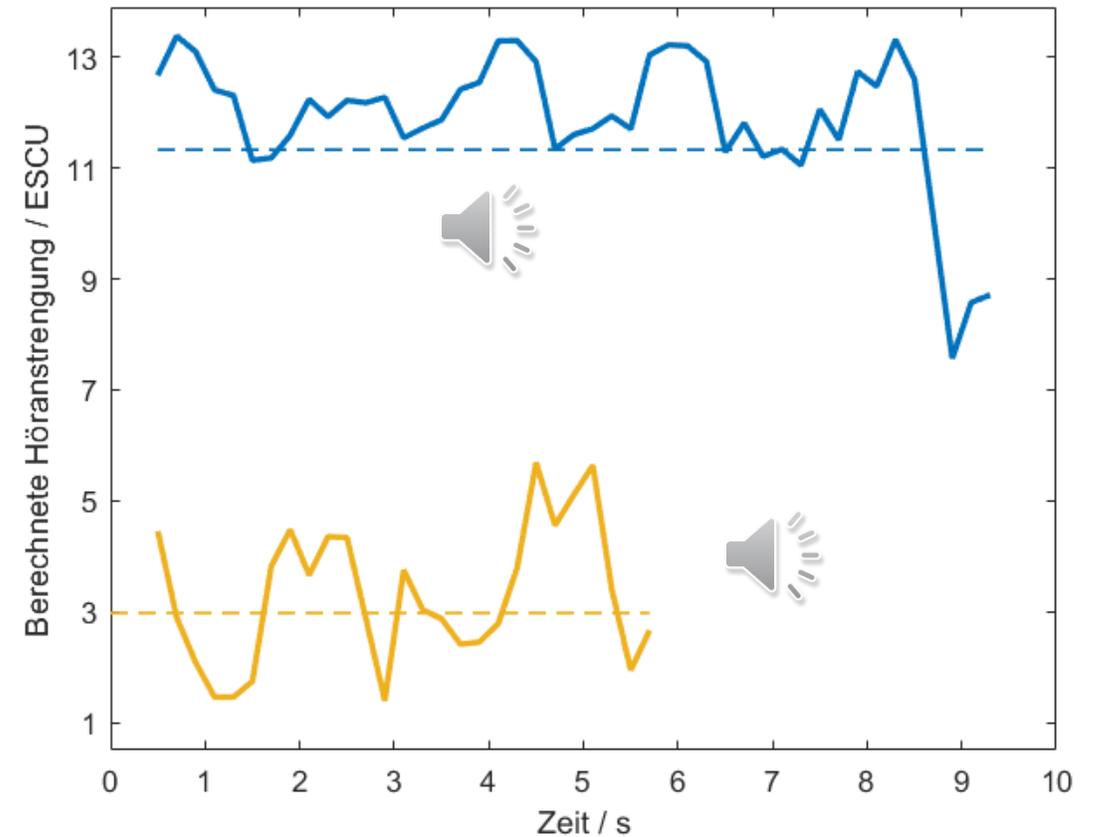


- Ohne Gehörschutz können Menschen "in die Lücken hören"
- Manche GH scheinen dies zuzulassen und erlauben so Sprachverstehen auch bei hohen Lärmpulsen



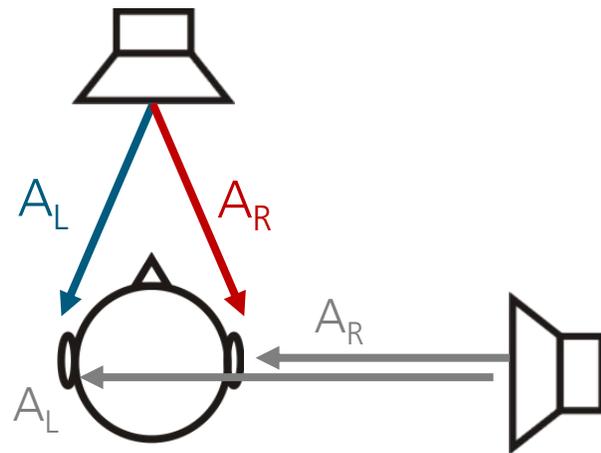
# Sprachverständlichkeit: LEAP-Modell

- Hoffnung: dieses Modell sollte auch Sprachverständlichkeit bei Verwendung von Gehörschützern gut vorhersagen können
- Potenzielle Anwendungen:
  - Einfacher Vergleich unterschiedlicher Gehörschützer
  - Echtzeit-Überwachung der Sprachverständlichkeit



# Lokalisation von Alarmgeräuschen

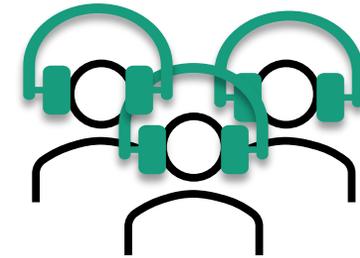
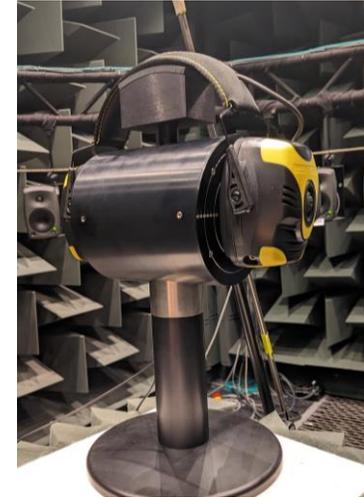
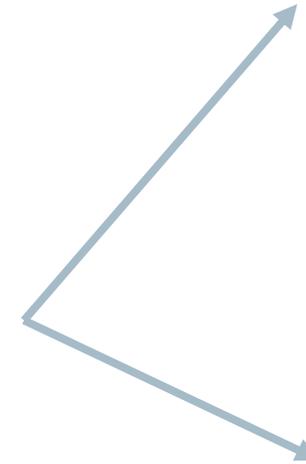
- Richtungswahrnehmung hängt von interauralen Unterschieden ab
  - Laufzeitunterschiede (<1.5 kHz)
  - Pegeldifferenzen (>1.5 kHz)
  - Asymmetrischer Gehörschutz oder aktive Gehörschützer mit unabhängiger Verarbeitung an beiden Ohren kann diese Informationen empfindlich stören



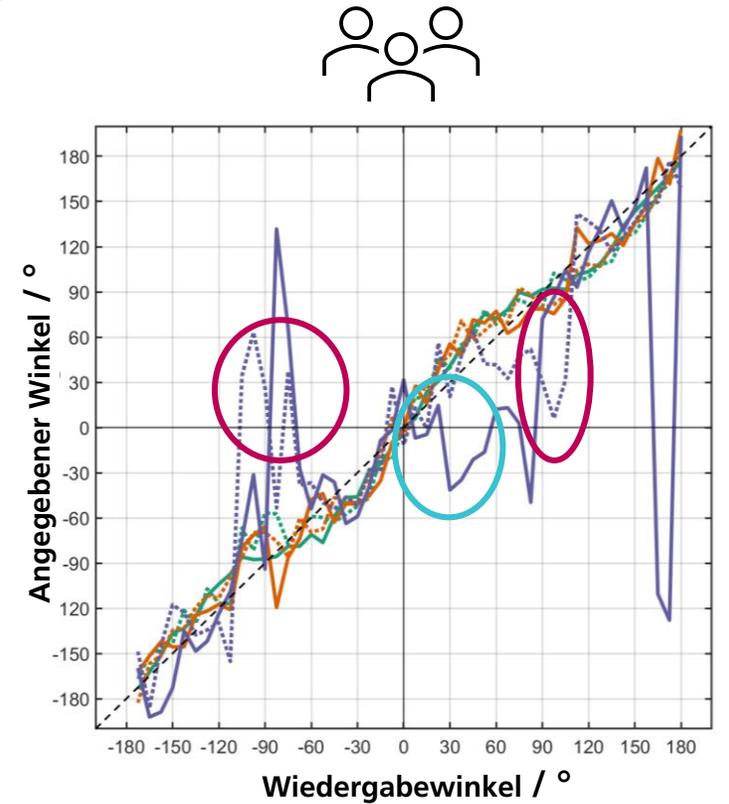
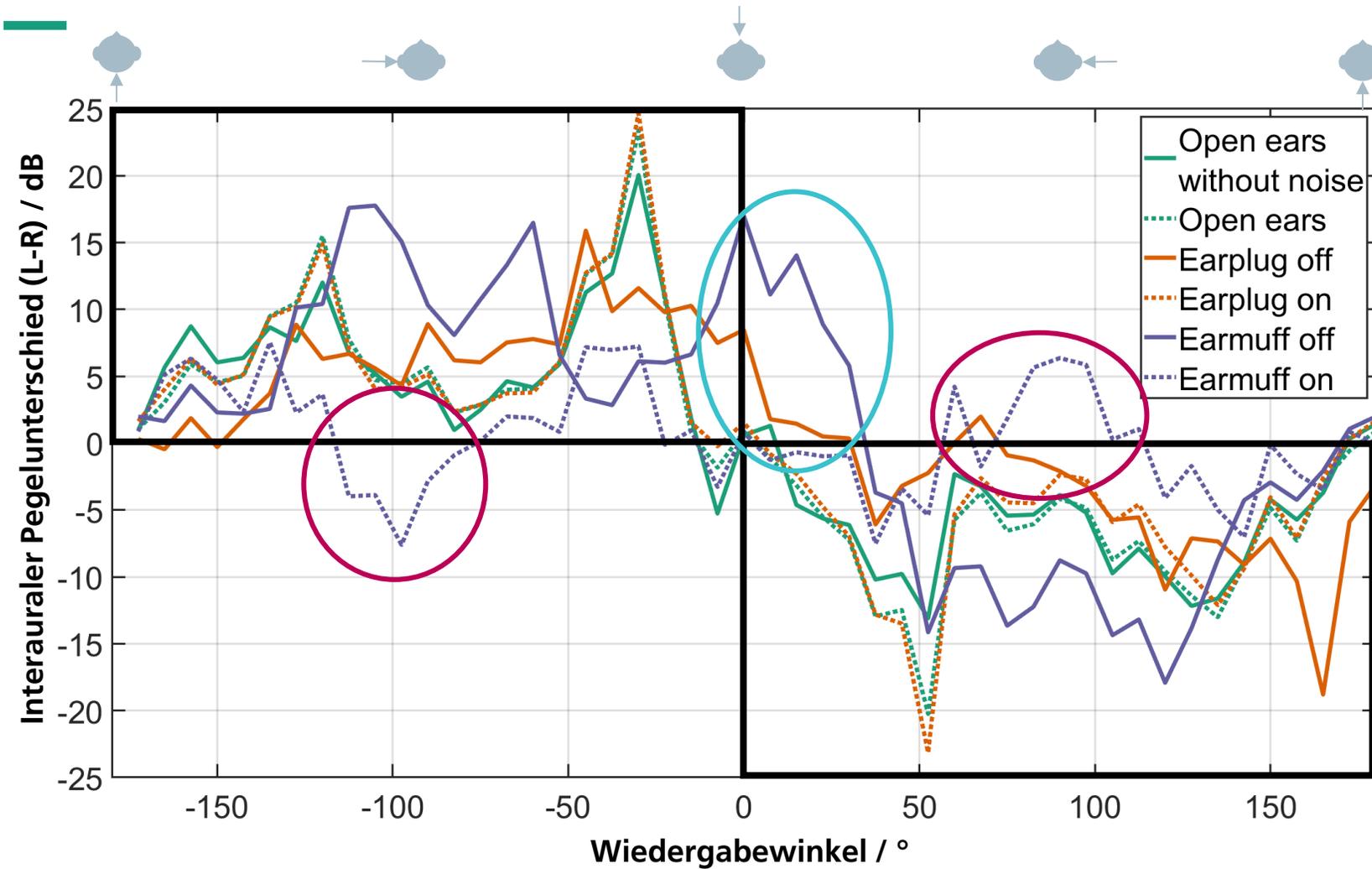
# Lokalisation von Alarmgeräuschen

Aktuelle Studien:

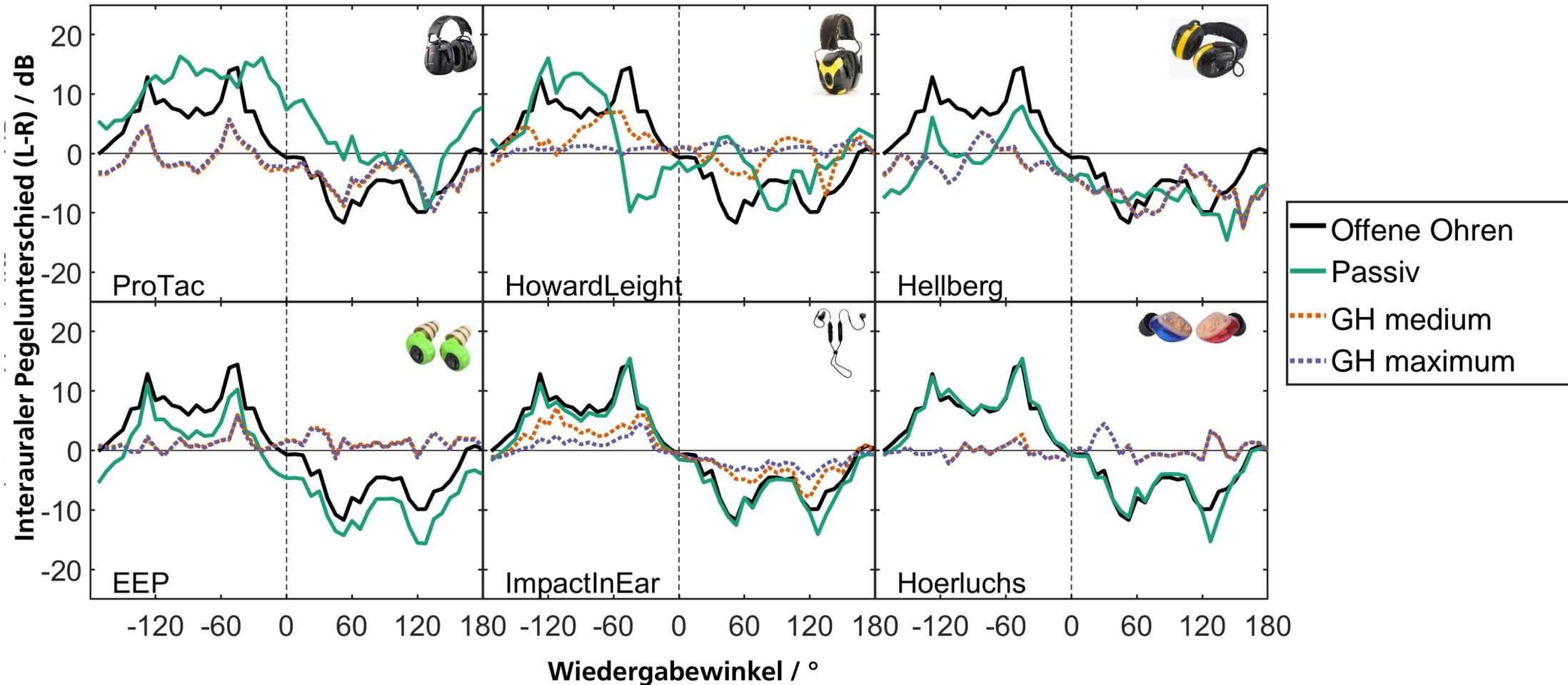
- Akustische Messungen der interauralen Pegel- und Laufzeitunterschiede
- Tonales Alarmgeräusch
- Verschiedene pegelabhängige Gehörschützer
- Hier: ProTac III und EEP 100



# Lokalisation von Alarmgeräuschen



# Lokalisation von Alarmgeräuschen



# Zwischenfazit

---

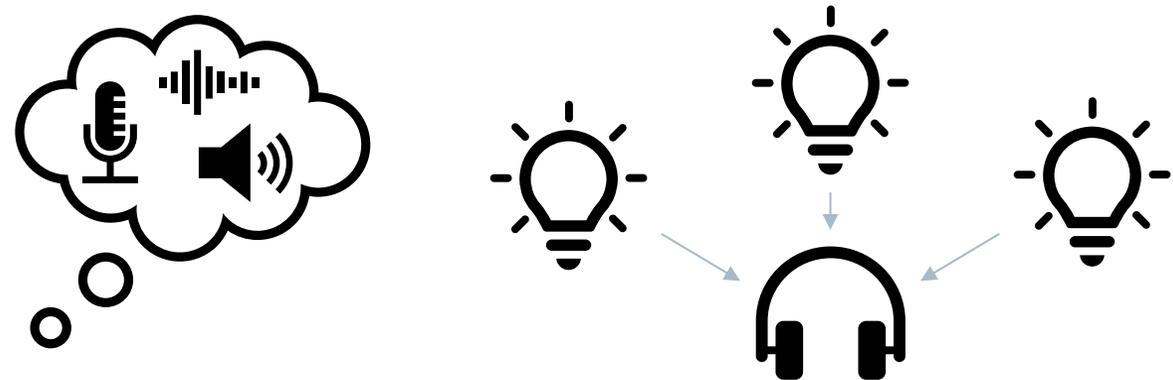
- (Pegelabhängige), elektronische Gehörschützer beeinflussen die auditorische Wahrnehmung erheblich und auf verschiedene Art und Weise
  - Potenziell bessere Sprachverständlichkeit in nicht zu lauten Umgebungen
  - Bessere Hörbarkeit von Alarmsignalen
  - Aber teilweise auch starke Beeinflussung der auditorischen Lokalisation
- Erfassung der unterschiedlichen Wahrnehmungsgrößen ist nicht trivial und i.d.R. kosten- und zeitintensiv
- Hörmodelle, die aus akustischen Signalen Vorhersagen der menschlichen Wahrnehmung berechnen, könnten zukünftig die Charakterisierung und den Auswahlprozess von Gehörschützern unterstützen

# Elektronischer Gehörschutz für Industrie 4.0

1. Zukünftige Entwicklungen zu Auswahl von Gehörschützern



2. Zukünftige Möglichkeiten für neue Funktionen und Mehrwerte



# Gehörschutz - Von „letzter Bastion“ ...

Verhindern

Die Gefahr beseitigen

Ersetzen

Weniger gefährliche Umstände herstellen

Begrenzen

Verbleibende Gefahr durch technische Maßnahmen minimieren

Re-Organisieren

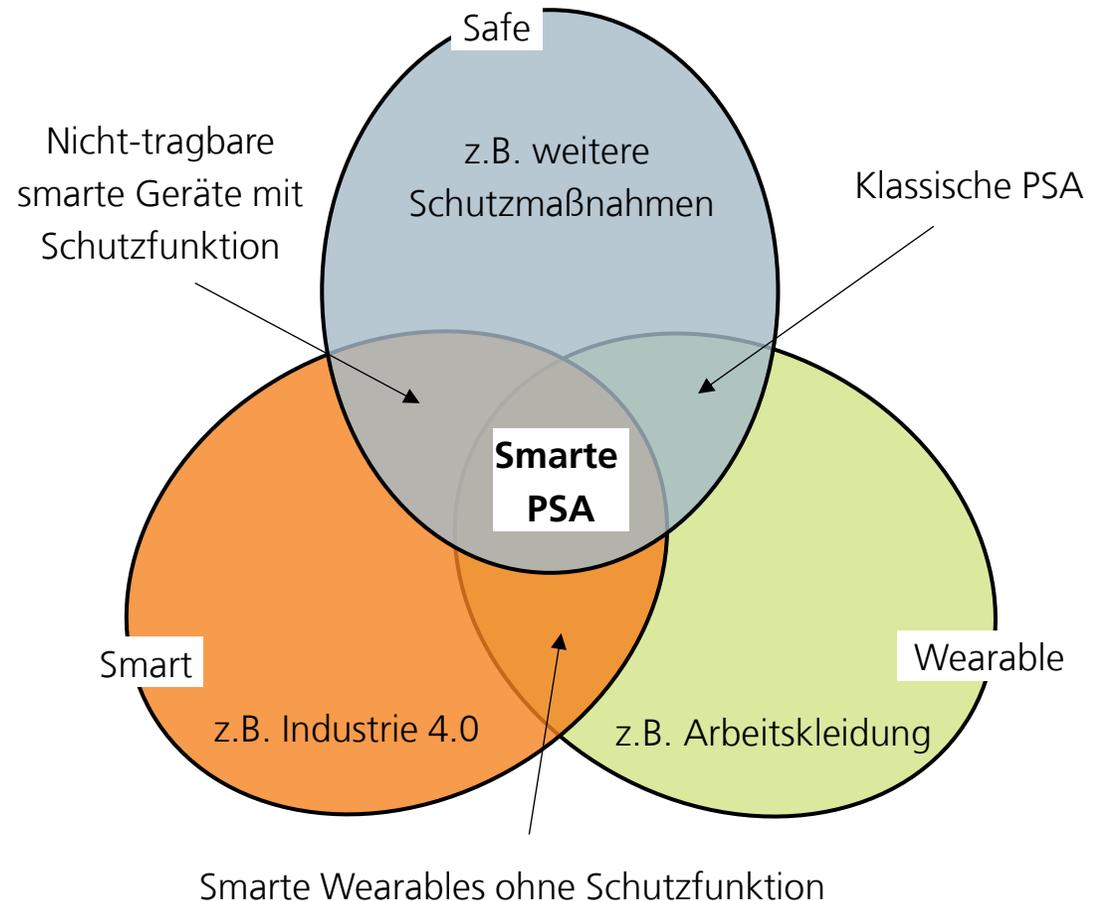
Verbleibende Gefahr durch organisatorische Maßnahmen minimieren

Persönliche Schutzausrüstung

Gehörschutz



# Gehörschutz - ... zum „intelligenten Helfer am Industriearbeitsplatz“



*“Smart personal protective equipment (PPE) [...] has the potential to re-shape the future of PPE.”*

*(Frost & Sullivan, 02/2020: Global Smart PPE Market) [6]*

# Gehörschutz - ... zum „intelligenten Helfer am Industriearbeitsplatz“



# Gehörschutz - ... zum „intelligenten Helfer am Industriearbeitsplatz“

---

## Potenziale smarterer Audiotechnologien am Lärmarbeitsplatz:

- Erkennung: Was wird gesprochen?
  - Effizienzsteigerung durch Sprachsteuerung von Produktionsmaschinen oder sprachbasierte Kommunikation
- Erkennung: Wer hat gesprochen?
  - Automatische Quittierung oder Dokumentation
- Sprachverbesserung und Störgeräuschreduktion
  - Verringerung der Höranstrengung und Reduktion von Stress

# Industrie 5.0: Produktion im Wandel

Automatisierung vs. effiziente Mensch-Maschine-Interaktion?

---

- Sinkende Losgrößen, kürzere Produktlebenszyklen und Hyper-Individualisierung erschweren wirtschaftliche Automatisierung von Produktionsprozessen
- Aufträge können durch mangelndes Personal nicht bedient werden oder kostenintensive Fachkräfte machen die Produktion in Deutschland unwirtschaftlich
- Maschinenbediener werden in Hochgeschwindigkeits-Produktionsprozessen zum Flaschenhals der Informationsverarbeitung durch nicht ausreichend effiziente Bedienschnittstellen

***„Fertigungsprozess werden individueller und komplexer – gleichzeitig fehlen Fachkräfte. Die smarte Steuerung der Anlagen avanciert zum Schlüsselfaktor.“***

Handelsblatt 14.11.2023

# Vorteile einer Sprachsteuerung

## ■ Warum Spracherkennung in der Produktion?

- Erhöhte Bedienfreundlichkeit
- Bedienung ohne Hände
- Einsparen von Laufwegen
- Erhöhte Bedieneffizienz

## ■ Herausforderungen

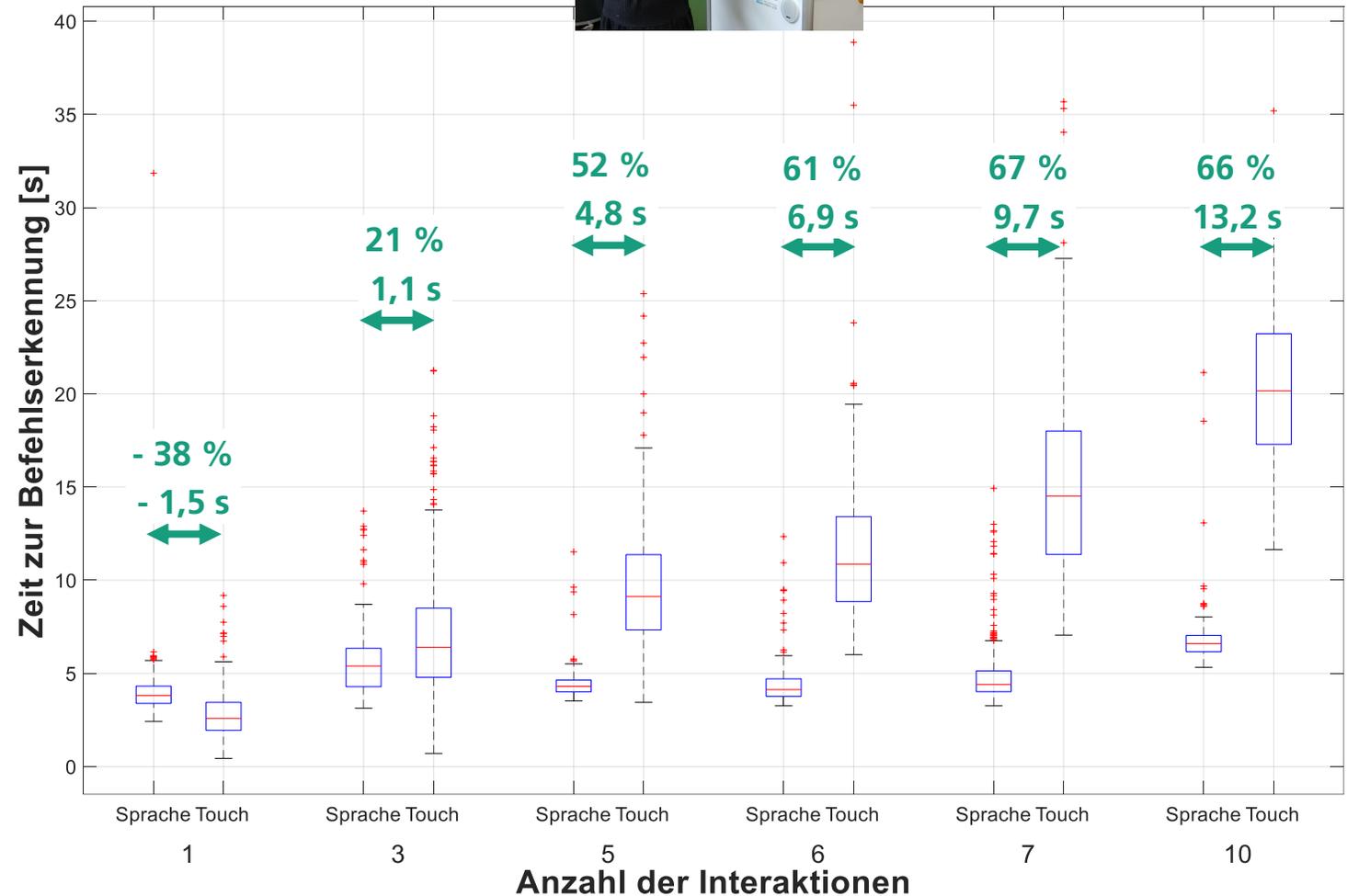
- Integration und Schnittstellen zu Produktionsmanagementsystemen
- Datensicherheit
- Robustheit und Sicherheit im Industrielärm
- Sicherstellen, dass nur autorisiertes Personal Sprachbefehle abgeben kann



# Effizienzsteigerung durch Sprachbedienung

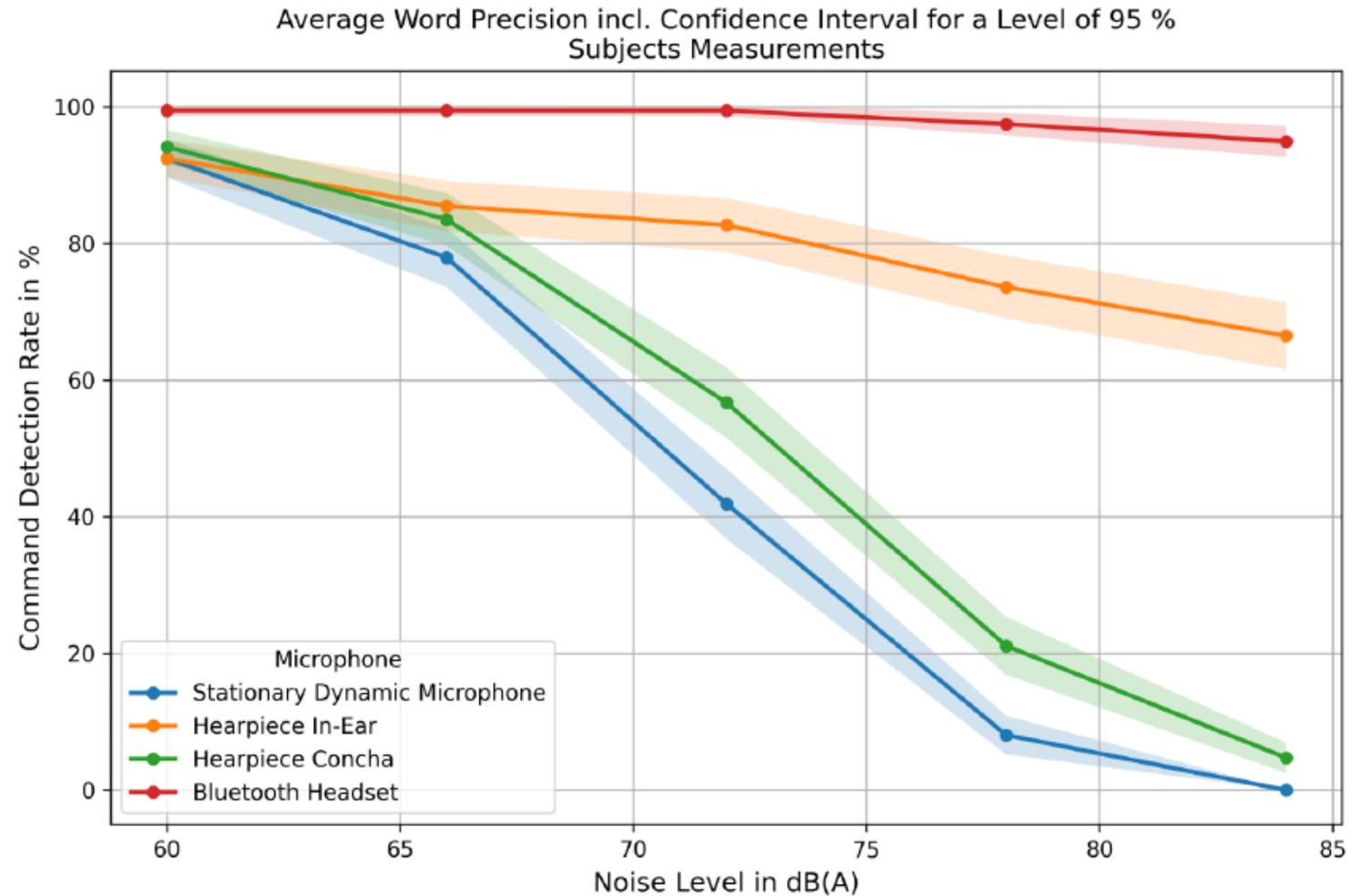


- Studie: Vergleich Bedienung mit Touchscreen vs. Sprachsteuerung
- 15 Probanden, 33 Befehle, jeweils 3 Wiederholungen
- Fazit:
  - Sobald ein Mindestmaß an Befehlskomplexität erreicht ist, ist die Bedienung per Sprache schneller
  - In der Praxis zusätzlicher Zeitgewinn, wenn Laufwege hinzukommen



# Robustheit in lauten Produktionsumgebungen

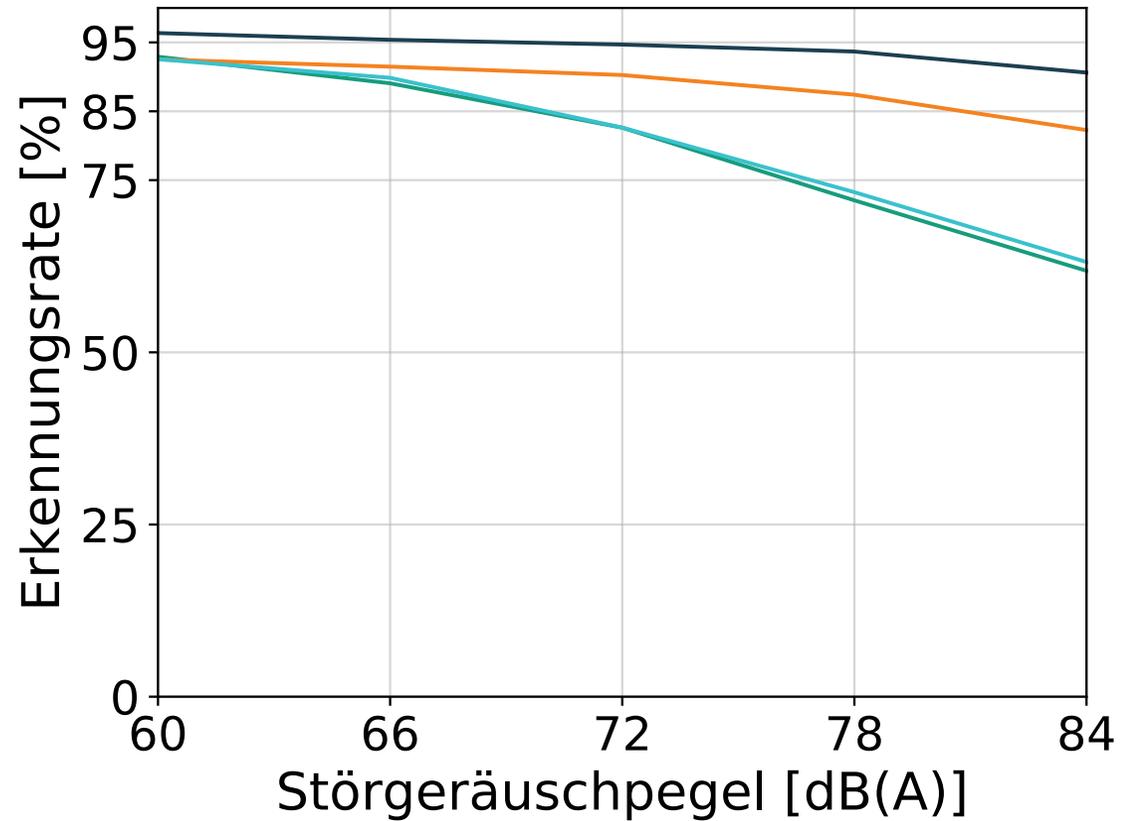
- Mit einer guten Mikrofonierung in Verbindung mit optimierter Spracherkennung lässt sich eine sehr hohe Erkennungsrate der Maschinenbefehle realisieren



[8]

# Potenzial von automatischer Sprechererkennung

- Mit einer guten Mikrofonierung in Verbindung mit optimierter Sprechererkennung lässt sich eine **sehr hohe Erkennungsrate der Personen** realisieren



[9]

# Kommunikationsunterstützung am Lärmarbeitsplatz

- Manuelle Arbeit in komplexen Produktionsabläufen
- Hoher Druck und Stress durch Effizienzanforderungen, Fehlerrisiko, Multitasking
- Sprachkommunikation notwendig, aber schwierig
- Häufige „Lösungen“ wirken wenig unterstützend
  - Offene Ohren
  - Passiver Gehörschutz



# Kommunikationsunterstützung am Lärmarbeitsplatz



**Tabelle 1:** Schallpegel in Abhängigkeit von der Operation

Operation	$L_{Aeq}$ in dB	$L_{AFmax}$ in dB
Tympanoplastik <sup>1</sup>	68,3	94,2
Cochlear-Implantation <sup>2</sup>	72,8	104,4
Mastoidektomie <sup>3</sup>	76,4	104,2
Mittelwert 23 Operationen	72,9	105,2

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

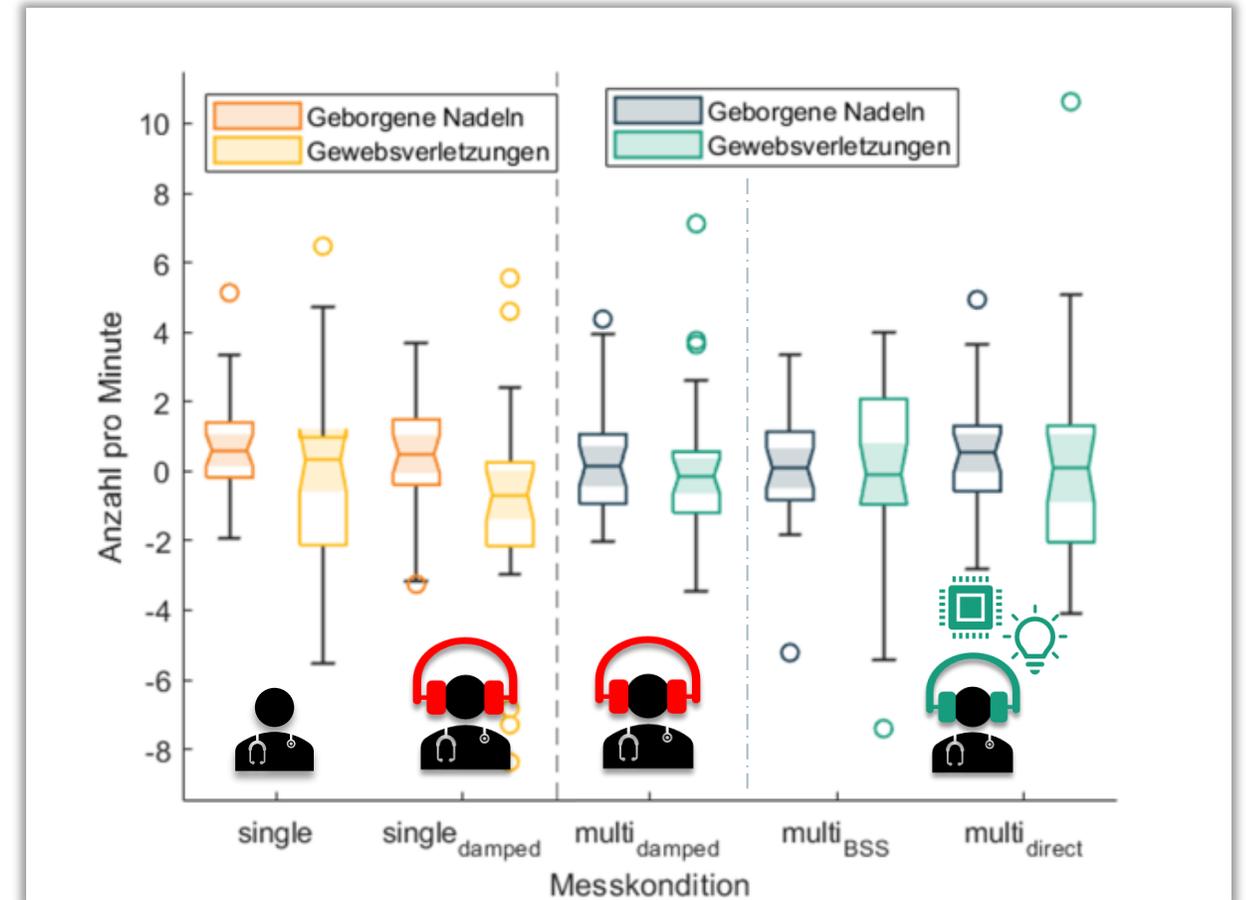
# Kommunikationsunterstützung am Lärmarbeitsplatz

- Akustische Nachbildung der Lärmumgebung im Reallabor an der Uni-Klinik
- Parallele Aufgaben:
  - Operieren möglichst effizient und fehlerfrei
  - Wahrnehmen und Bewerten von Sprachsignalen
  - Wahrnehmen und Bewerten von Alarmsignalen
- Messgrößen:
  - OP-Performance
  - Sprachverständlichkeit
  - Reaktionszeiten / Fehlalarmraten
  - Subjektiv empfundener Stress
- Kein Gehörschutz  vs. passiver Gehörschutz  vs. smarter Gehörschutz 



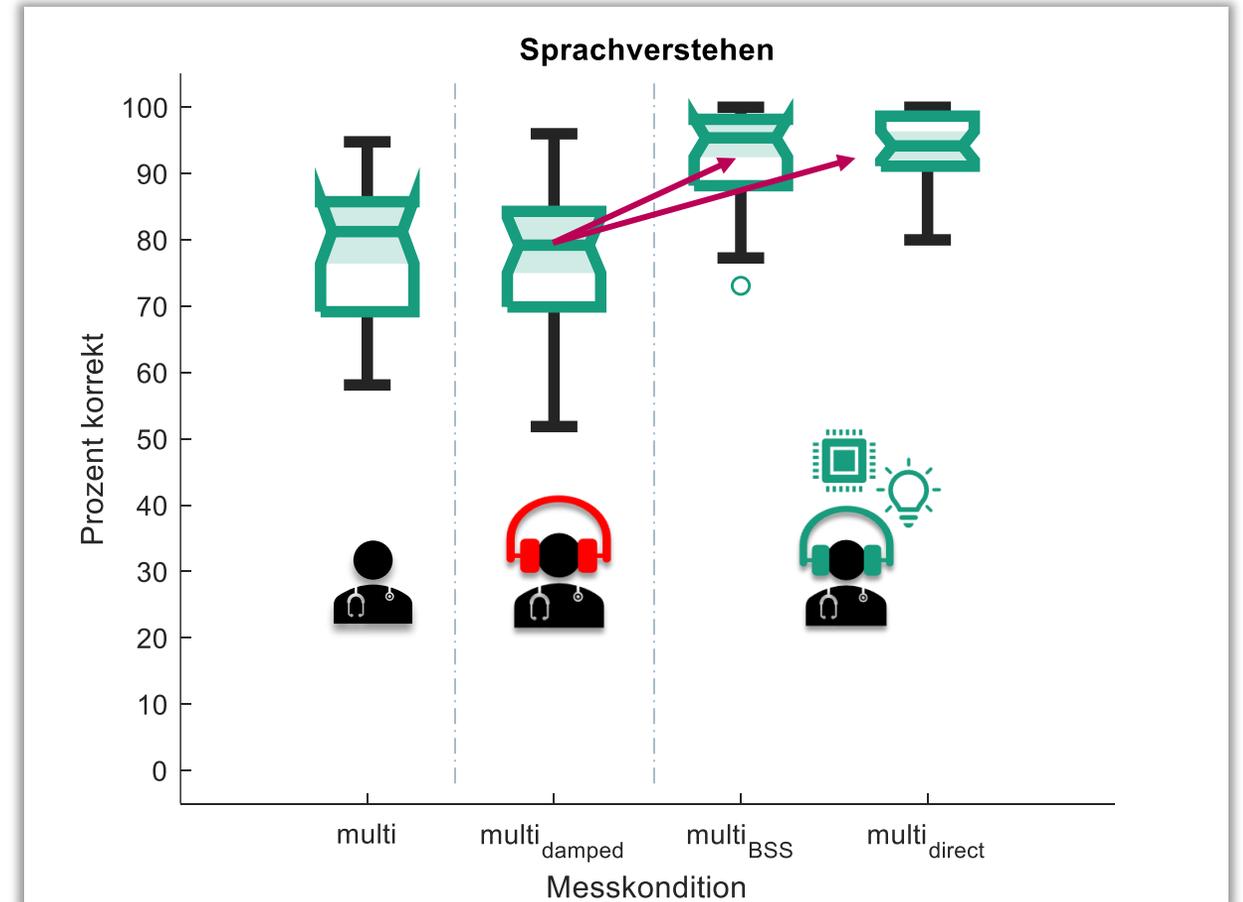
# Kommunikationsunterstützung am Lärmarbeitsplatz

- **Hauptaufgabe:**
  - kein Effekt von Multi- vs. Single-Tasking
  - Kein Vorteil durch smarten Gehörschutz



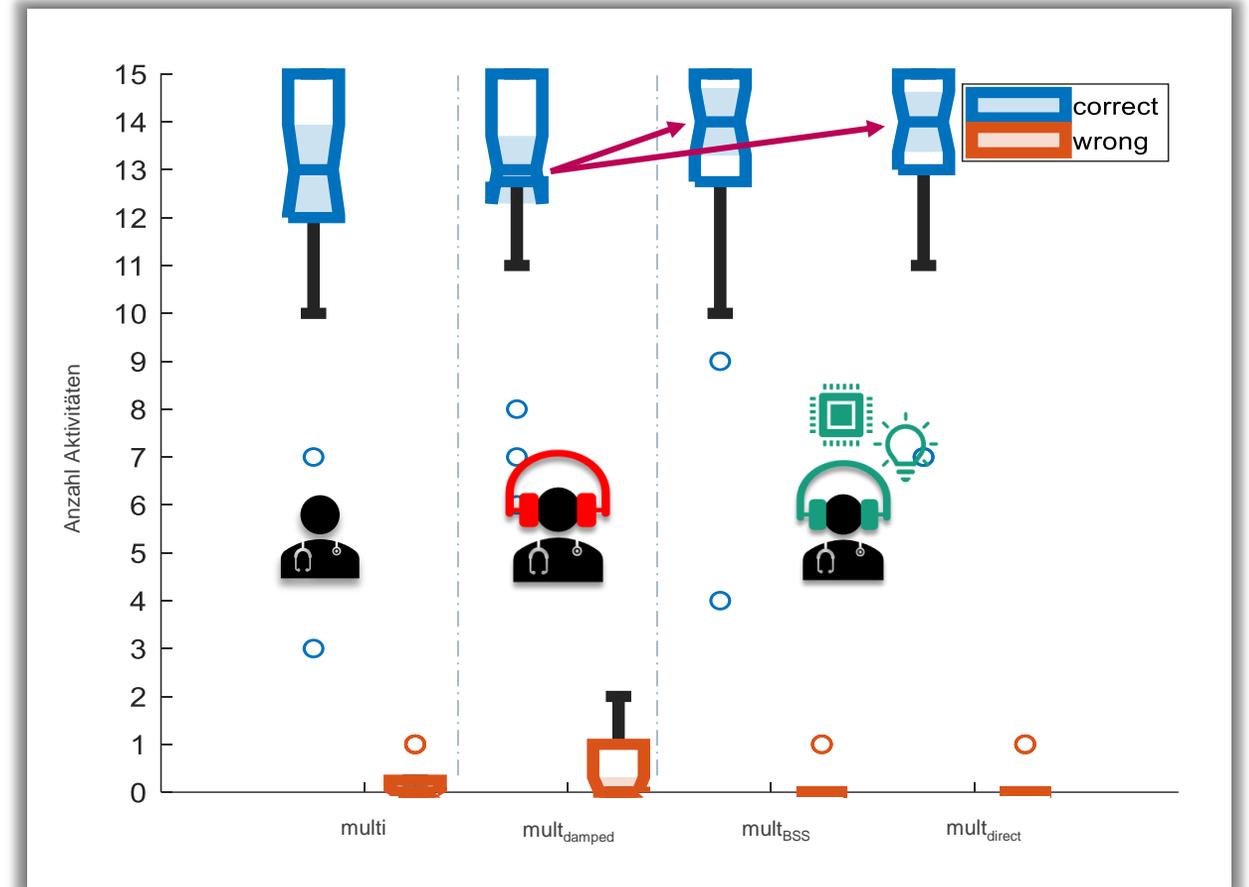
# Kommunikationsunterstützung am Lärmarbeitsplatz

- Hauptaufgabe:
  - kein Effekt von Multi- vs. Single-Tasking
  - Kein Vorteil durch smarten Gehörschutz
- **Sprachverstehen**
  - **Kein Vorteil durch passiven Gehörschutz**
  - **20% besser mit smarten Hearables**



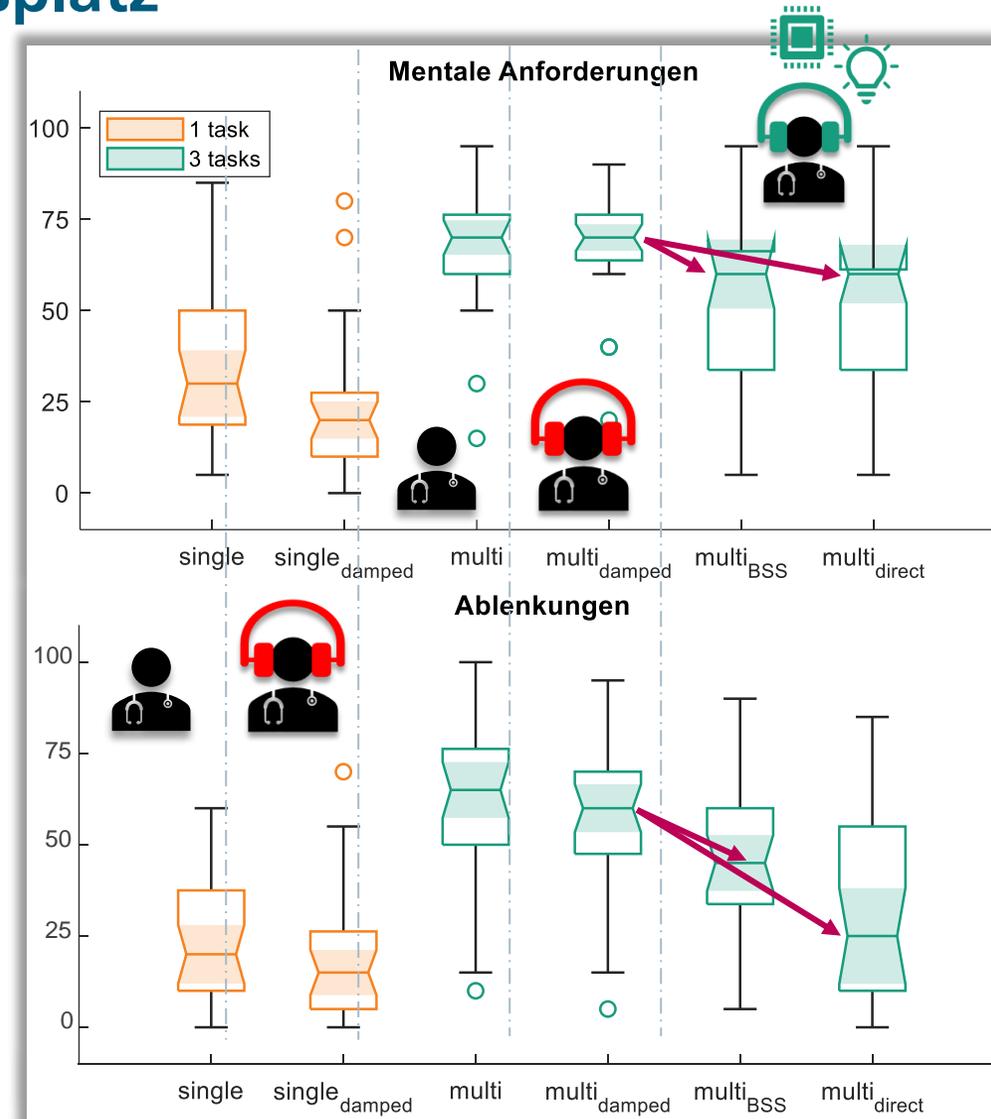
# Kommunikationsunterstützung am Lärmarbeitsplatz

- Hauptaufgabe
  - kein Effekt von Multi- vs. Single-Tasking
  - Kein Vorteil durch smarten Gehörschutz
- Sprachverstehen
  - Kein Vorteil durch passiven Gehörschutz
  - 20% besser mit smarten Hearables
- **Alarmerkennung**
  - **Mit smarten Hearables praktisch immer erkannt und keine Fehlalarme**



# Kommunikationsunterstützung am Lärmarbeitsplatz

- **Hauptaufgabe**
  - kein Effekt von Multi- vs. Single-Tasking
  - Kein Vorteil durch smarten Gehörschutz
- **Sprachverstehen**
  - Kein Vorteil durch passiven Gehörschutz
  - 20% besser mit smarten Hearables
- **Alarmerkennung**
  - Mit smarten Hearables praktisch immer erkannt und keine Fehlalarme
- **Stressempfinden**
  - **Deutlich erhöht durch Multitasking**
  - **Keine Verbesserung durch passiven Gehörschutz**
  - **Signifikant reduziert durch smarte Hearables**



# Fazit

---

- Gehörschützer mit smarten Zusatzfunktionen und digitaler Vernetzung könnten in der Zukunft erhebliche Mehrwerte bieten
  - Effizienzgewinne
  - Kostenersparnisse
  - Arbeitssicherheit
  - Komfort
  - Akzeptanz
  - Stressreduktion
- Auswahl von Gehörschützern könnte in Zukunft durch die instrumentelle Berechnung von relevanten Größen der Hörwahrnehmung unterstützt werden

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

---

Die Weiterentwicklung des Institutsteils Hör-, Sprach- und Audiotechnologie HSA des Fraunhofer-Instituts für Digitale Medientechnologie IDMT in Oldenburg wird gefördert im niedersächsischen Programm »Vorab« durch das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur und die VolkswagenStiftung.



Teile der vorgestellten Arbeit werden unterstützt von der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) – Fördernummer FP 489 und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) – Projekt ID 16SV8811.

# Referenzen

---

- [1] Fenja Hermann. Sprachverständlichkeitstest mit pegelabhängigen Gehörschützern, Bachelorarbeit, Universität Oldenburg, 2024.
- [2] Hörzentrum Oldenburg gGmbH: <https://www.hz-ol.de/de/produkte-neu.html>
- [3] Rainer Huber, Hannah Baumgartner, Stefan Goetze, Jan RENNIES. (2020a): "ASR-Based, Single-Ended Modeling of Listening Effort - A Tool for TV Sound Engineers." Forum Acusticum, Dec 2020, Lyon, France. pp.2441-2445, <10.48465/fa.2020.0317>
- [4] Rainer Huber, Andreas Volgenandt, Jan Reimes, Magnus Schäfer, Jan RENNIES (2022): "Messung und Modellierung der Höranstrengung von Smart-Speaker-Sprachausgaben unter realistischen akustischen Bedingungen." DAGA 2022 - 48. Jahrestagung für Akustik. Stuttgart, Germany
- [5] Sina Buchholz, Steven van de Par, Jan RENNIES. Level-dependent hearing protectors can switch the perception of sound direction; Acta Acustica, *in preparation*.
- [6] Frost & Sullivan, 02/2020: Global Smart PPE Market.
- [7] Marvin Norda , Christoph Engel, Jan RENNIES, Jens-E. Appell, Sven Carsten Lange, and Axel Hahn (2024). Evaluating the Efficiency of Voice Control as Human Machine Interface in Production. IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATION SCIENCE AND ENGINEERING 21(3), pp. 4817-4828.
- [8] Interne Studie Fraunhofer IDMT 2023/2024.
- [9] Lukas Bombel. Evaluation eines Sprechererkennungssystems als Verifikationsmethode für Sprachsteuerung in der Produktion, Bachelorarbeit, Jade Hochschule Oldenburg, 2023.
- [10] Jan RENNIES, Ann-Christin Scherer, Merle Schlender, Andreas Volgenandt, Verena Uslar, Hannah Baumgartner, Inga Holube (2024). Potenzialanalyse für Hearable-basierte Hörassistenz zur kognitiven Entlastung bei Arbeit in lauten OP-Umgebungen. Fortschritte der Akustik DAGA 2024, pp. 745-748.