

A2I augmented auditive intelligence

Teilvorhaben: Ohr-nahe EEG Datenerhebung für KI-Anwendungen

Schlussbericht A2I-EEG

Förderkennzeichen:	16SV8596
Zuwendungsempfänger:	Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
Ausführende Stelle:	Prof. Debener, Abteilung Neuropsychologie (NPSY)
Laufzeit des Vorhabens:	09.02.2021 – 28.02.2025

Autoren:

Lisa Straetmans, MSc. Neurocognitive Psychology

Prof. Dr. Stefan Debener

Inhaltsverzeichnis

I. Kurzdarstellung	5
1 Aufgabenstellung.....	5
2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	7
3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	8
4 Wissenschaftlicher und technischer Stand	8
4.1 Kontinuierliche medizinische Vitalparametererfassung	9
4.2 Kontinuierliche Erfassung der Hirnaktivitäten	9
4.3 Subjektive Erfassung der Höranstrengung.....	10
4.4 Methoden der menschenzentrierten Entwicklung.....	10
4.5 Akzeptanz soziotechnischer Systeme	10
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
II. Eingehende Darstellung.....	13
1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses.....	13
1.1 AP1: Anforderungsanalyse und mensch-zentriertes Design.....	13
1.2 AP3: Datenerfassung und Datenaufbereitung.....	13
1.3 AP4: Entwicklung Systemarchitektur und KI-Algorithmen	17
1.4 AP6: Entwicklung des vernetzten Sensorsystems.....	21
1.5 AP7: Evaluation.....	21
1.6 AP8: Projektkoordination / Querschnittsthemen	23
2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	24
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	24
4 Voraussichtlicher Nutzen	24
4.1 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte	24
4.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten (mit Zeithorizont).....	25
4.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten (mit Zeithorizont)	25
4.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	25
5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	25
6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	25
6.1 Erfolgte Publikationen zu den Projektergebnissen	25
6.2 Geplante Veröffentlichungen zu den Projektergebnissen	26

I. Kurzdarstellung

1 Aufgabenstellung

Sensordaten zur Prognose des Gesundheitszustandes und zur Unterstützung medizinischer Entscheidungen durch die kontinuierliche Erfassung relevanter Vitalparameter gewinnen immer stärker an Bedeutung. Die Dynamik komplexer Erkrankungen und die Wirksamkeit von therapeutischen und medizintechnischen Interventionen kann oft nur durch den Einsatz eines kontinuierlichen Monitorings unter Kombination verschiedener Vitalparameter hinreichend verfolgt werden. Im Gesundheitswesen birgt die Fusion sensorischer Vitaldaten auf einer Sensorplattform besonderes Potential für den Einsatz der Künstlichen Intelligenz (KI) zur medizinischen Entscheidungsunterstützung und zur Bestimmung von Frühwarnsignalen, die sonst durch konventionelle diagnostische Methoden verborgen bleiben. Durch den Einsatz von KI-Technologien eröffnen sich die Möglichkeiten zur Prognose und (teil-) autonomen Diagnose von Gesundheitszuständen, welche das Gesundheitswesen und das traditionelle Arzt-Patienten-Verhältnis jedoch radikal verändern können.

Die Grundlage der KI-basierten Prognose bildet die präzise und kontinuierliche Erfassung multipler Sensordaten. Ein dafür optimal geeigneter Messpunkt am Körper ist das Ohr. Hier können moderne Hörsysteme um nichtinvasive Sensoriken erweitert werden. Dazu gehören Temperatursensoren, Inertialsensoren zur Beschleunigungs- und Bewegungsmessung, optische Sensoren zur Messung u.a. der Sauerstoffsättigung, Herzrate und Herzratenvariabilität sowie EEG-Sensoren zur Messung der Hirnaktivität. Das Ohr ermöglicht hierbei einen genauen und für Langzeitmessungen geeigneten Ort, bei dem ein mit Sensoren ausgestattetes Hörsystem ambient in den Alltag der Patienten integriert werden kann. Über ein Mensch-Maschine-Interface ist das medizinische Personal und der Patient in der Lage, mit dem System und der KI zu interagieren. Hier kommt der akustischen Interaktion und Ausnutzung der Basisfunktionalität eines Hörgerätes eine besondere Bedeutung zu.

Die engmaschige Erfassung und Auswertung der Sensordaten und deren Nutzung für datenbasierte Entscheidungsunterstützungssysteme sind Grundlage vielfältiger medizintechnischer und sozialer Innovationen. Entscheidungsunterstützende Systeme im Gesundheitswesen sind dabei in der Lage, mit den durch Sensoren erfassten und exponentiell zunehmenden Datenkombinationen umzugehen. Die Verknüpfung der am und im Ohr erfassten Sensordaten mit den Ansätzen der künstlichen Intelligenz hat für die Optimierung von Versorgungsprozessen in verschiedenen medizinischen Anwendungsfeldern eine hohe Bedeutung:

- **Anwendungsfeld Audiologie:** Die sensorische Ermittlung des individuellen Stresslevels (Höranstrengung) und der Hörmüdung (Fatigue) mit Hilfe der KI-Methoden ermöglicht die Entwicklung und Vermarktung von Anwendungen durch Audiologen und Hörgerätehersteller zur automatischen Hörgeräteeinstellung, welche die Höranstrengung des Hörgeräteträgers im Alltag reduzieren und dadurch die Hörmüdung vermeiden.
- **Anwendungsfeld Arbeitsmedizin:** Ein potenzielles Anwendungsgebiet jenseits der Audiologie liegt im Kontext der Arbeitsmedizin, z.B. zur Minimierung gesundheitlicher Risiken und zum Arbeitsschutz in sicherheitskritischen Aufgabenbereichen. Bei Vorliegen gesundheitlicher Risikofaktoren kann beispielsweise der Zustand der Ermüdung, des Stresslevels oder kardiovaskulärer Belastungen bestimmt und in der Arbeitsmedizin genutzt werden, um Maßnahmen des präventiven Arbeitsschutzes durchzuführen und Überlastungen durch das Erkennen und

Kommunizieren von kritischen Situationen zu vermeiden.

- **Anwendungsfeld Monitoring von Risikopatienten:** Ein kontinuierliches Monitoring von Risikopatienten, insbesondere im Bereich der Kardiologie zur Erkennung kardiologischer Anomalien, unterstützt das medizinische Personal in der Diagnose, der Behandlungsplanung und der Identifizierung von Risiken. Ein smartes Sensorsystem kann zudem durch entsprechend gestaltete Nutzerschnittstellen Informationen direkt für die Patienten aufbereiten und dadurch die Fähigkeit von Patienten zu selbständigem Handeln unterstützen (Patient Empowerment).

Diese drei Anwendungsfelder profitieren von den kontinuierlich steigenden Datenmengen und dem Training komplexer Algorithmen auf hoch-parallelisierbaren Hardwarearchitekturen. Da ein fertig-trainierter KI-Algorithmus keine großen Hardwareressourcen benötigt, ist es möglich, diese auf weniger leistungsstarken Hardwaresystemen, wie Hörgeräten oder Mobiltelefonen, in Echtzeit und energieeffizient auszuführen. Durch diese technologischen Entwicklungen ist es möglich, KI-Algorithmen auch lokal und mobil am Menschen einzusetzen, um die Hörqualität zu verbessern, die Sekundärprävention in der Arbeitsmedizin zu unterstützen und ein kontinuierliches Gesundheitsmonitoring mit integrierter Interaktion zu etablieren.

Die Veränderung des klassischen Arzt-Patienten-Verhältnisses und die Verlagerung von Kompetenzen des medizinischen Personals auf technische Systeme muss bei der Gestaltung des sozio-technischen Systems berücksichtigt werden. Eine Verlagerung von Kompetenzen und Aufgaben auf das technische System kann als Autonomie- und Kontrollverlust in der medizinischen Entscheidungsfindung wahrgenommen werden. Auf Seiten der Patienten kann die fehlende oder als unzureichend wahrgenommene Konsultation von medizinischem Fachpersonal zur Vernachlässigung emotionaler Kompetenzen und des sozialen Kontextes und damit zu fehlendem Vertrauen in die medizinische Versorgung führen. Sowohl das medizinische Personal als auch Patienten sehen sich durch die Verlagerung von Entscheidungskompetenzen auf (teil)autonome technische Systeme damit konfrontiert, dass die Technik und nicht mehr zwingend der Mensch zur führenden Instanz im Versorgungsprozess wird [NH19]. Ethische Konsequenzen, z.B. hinsichtlich der Rechtfertigung medizinischer Entscheidungen, sind die Folge. KI-Algorithmen und deren Entscheidungen stellen zudem eine "Black Box" dar [Dar11], die mit rechtlichen Problemen u.a. hinsichtlich der Zulassung und der ärztlichen Berufsordnungen sowie erneut negativen Implikationen für die Akzeptanz verbunden ist. Weitere Herausforderungen ergeben sich durch den Datenschutz der sensiblen Patientendaten, Haftungsfragen und die Gestaltung der zukünftigen Arbeitswelt. Eine zentrale Problemstellung ergibt sich daher in der optimalen Gestaltung der Rollenverteilung im sozio-technischen System, der Transparenz der Entscheidungsfindung und der Berücksichtigung ethischer, rechtlicher und sozialer Problemstellungen im Zusammenspiel von medizinischem Personal, Patient und technischen System, welche bereits in den frühen Phasen des Innovationsprozesses berücksichtigt werden müssen.

Ziel des Projekts A2I war vor diesem Hintergrund die nutzerzentrierte Entwicklung und Evaluation eines sozio-technischen Systems zur Nutzung von Künstlicher Intelligenz zur Analyse von im und am Ohr erhobenen Gesundheitsdaten für die Verbesserung audiologischer, arbeitsmedizinischer und kardiologischer Versorgungsprozesse.

Dabei sollten die gemeinsam mit medizinischen Fachkräften und Patienten entwickelten Organisations- und Rollenmodelle die Entwicklung des technischen Sensorsystems definieren, welches die Möglichkeiten moderner, vernetzter Hörsysteme als Sensorplattform für das Monitoring gesundheitsrelevanter Vitaldaten ausnutzt. Basis bildete die partizipative Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion zwischen medizinischem Personal, Patient und Sensorsystem. Erwartetes Ergebnis waren domänenspezifische Ansätze einer Augmented Intelligence, die die technischen Ansätze der künstlichen Intelligenz

bzw. des maschinellen Lernens und der Automatisierung mit Ansätzen der Human Computer Interaction (HCI) und des Human-Centered-Design verknüpfen.

Ziel des NPSY-Teilprojekts „A2I-EEG“ war es, zum Anwendungsfeld Audiologie beizutragen und EEG-Daten in verschiedenen akustischen Szenarien zu erfassen, um die Einsatzmöglichkeiten mobiler EEG-Systeme unter realitätsnahen Bedingungen zu evaluieren. Ein besonderes Augenmerk lag auf der Erfassung hirnelektrischer Korrelate der Aufmerksamkeit und Ermüdung mit Ohr-naher EEG Sensorik. Die Szenarien umfassten akustische Bedingungen unterschiedlicher Komplexität, wie etwa die Präsentation eines einzigen Hörbuchs ohne Störgeräusche, die Kombination von Hörbüchern mit Störsignalen oder die Simulation einer Cafeteria-Umgebung. Zusätzlich wurden die Probanden in realistischen Alltagssituationen untersucht, indem sie auf festgelegten Routen außerhalb des Labors oder in öffentlichen Fluren Daten sammelten. Die Erhebung wurde durch die Synchronisierung verschiedener Sensoren, darunter EEG-, Vital- und Akustikdaten, ergänzt. Ein weiteres Ziel war es, die Leistungsfähigkeit eines neu entwickelten KI-Algorithmus zur Detektion der auditiven Aufmerksamkeit in alltagsnahen Situationen zu ermitteln.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projekt „Augmented Auditive Intelligence“ wurde im Rahmen der BMBF-Förderlinie „Adaptive Technologien für die Gesellschaft – Intelligentes Zusammenwirken von Mensch und Künstlicher Intelligenz“ durchgeführt. Als solches sollte es Beiträge zu zwei nationalen Forschungsprogrammen liefern:

Technik zum Menschen bringen – Forschungsprogramm zur Mensch-Technik-Interaktion: A2I zielte auf einen Fortschritt im Themenfeld „Körpernah und tragbar: „Technik unterstützt am Körper“ ab, indem Voraussetzungen für die Nutzung medizinischer Vitalparametersensorik als Bestandteil eines vernetzten Hörsystems schaffen und damit ein langfristiges Monitoring gesundheitsrelevanter Parameter erlauben sollte. Als Beitrag zum Themenfeld „Mobil und digital: Gesund bleiben mit präventiven Technologien“ hatte A2I zum Ziel, durch die Minimierung der Höranstrengung in schwierigen Hörsituationen die Hörermüdung zu vermeiden. Dies würde Schwerhörenden helfen, nicht allzu schnell von der Geräuschkulisse müde zu werden und sich von der Gesellschaft zu isolieren. Darüber hinaus zielte A2I mit dem Anwendungsfeld Arbeitsmedizin auf die Prävention bzw. Sekundärprävention bei Arbeitnehmern bei vorhandenen kardiovaskulären Risikofaktoren.

Strategie Künstliche Intelligenz der Bundesregierung: Die KI-Strategie der Bundesregierung beschreibt zwei Ziele, zu denen das Vorhaben A2I beitragen sollte: 1. „Die Bundesregierung ist entschlossen, sowohl Forschung und Entwicklung als auch Anwendungen von KI in Deutschland und Europa auf ein weltweit führendes Niveau zu bringen und dort zu halten. Deutschland soll zu einem weltweit führenden Standort für KI werden, insbesondere durch einen umfassenden und schnellen Transfer von Forschungsergebnissen in Anwendungen [...]“, sowie 2. „Wir setzen uns für eine menschenzentrierte Entwicklung und Nutzung von KI-Anwendungen ein, insbesondere im Hinblick auf den Einsatz von KI in der Arbeitswelt. Wir wollen dafür Sorge tragen, dass die Erwerbstätigen bei der Entwicklung von KI-Anwendungen in den Mittelpunkt gestellt werden: die Entfaltung ihrer Fähigkeiten und Talente; ihre Kreativität; ihre Selbstbestimmtheit, Sicherheit und Gesundheit.“

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt umfasste insgesamt 8 Arbeitspakete, wobei mit wenigen Ausnahmen alle Verbundpartner an allen Arbeitspaketen beteiligt waren:

- AP1: Anforderungsanalyse und mensch-zentriertes Design
- AP2: Rollendefinitionen im soziotechnischen Entscheidungssystem
- AP3: Datenerfassung und Datenaufbereitung
- AP4: Entwicklung Systemarchitektur und KI-Algorithmen
- AP5: Entwicklung der Trainingsplattform
- AP6: Entwicklung des vernetzten Sensorsystems
- AP7: Evaluation
- AP8: Projektkoordination / Querschnittsthemen

AP1 hatte eine genauere Bedarfsanalyse (Anforderungen aus Nutzer- und Betreibersicht), die Ausarbeitung des Evaluierungskonzepts sowie des Datenschutzkonzepts zum Ziel. AP2 diente der empirischen Ermittlung der relevanten Akteure, potenzieller Akzeptanz- und Innovationsbarrieren, der Entwicklung rollenbasierter Organisationsmodelle und der experimentellen Prüfung der abgeleiteten Strategien und Prozesse. Darüber hinaus sollten Innovationstrategien vor dem Hintergrund notwendiger organisatorischer Änderungen in der Anwendung von KI-basierten Systemen bei Herstellern und Gesundheitsdienstlern entwickelt werden. AP3 diente der Schaffung von Datensätzen zum Training der KI-Algorithmen im Rahmen zweier Studien zur Erfassung von kardiovaskulären Parametern und EEG-Daten. In AP4 wurde die Systemarchitektur für das vernetzte Sensorsystem definiert und die Verarbeitungskette für die Verfahren des maschinellen Lernens genauer spezifiziert. In AP5 wurde eine mobile Plattform für die synchrone Erfassung multimodaler Sensordaten entwickelt, welche bei allen Studien des Projekts zum Einsatz kam. AP6 diente der Entwicklung des Demonstrators eines vernetzten Sensorsystems, insbesondere der Entwicklung der KI-Modelle für die Bestimmung des attendierten Sprechers, der Hörermüdung sowie die Auswertung der kardiologisch relevanten Vitaldaten. Im Rahmen von AP7 wurden im letzten Projektjahr weitere Probandenstudien zur Evaluation der Ergebnisse des Projekts durchgeführt. AP8 schließlich diente der Projektkoordination, Öffentlichkeitsarbeit und der Planung des Ergebnistransfers.

Mitten in die Projektlaufzeit hinein fiel die COVID-19-Pandemie, welche die Studien in AP3 über mehrere Monate verzögerte, da an beiden Studienstandorten während des „Lock-Downs“ Besuchsverbote für Externe und damit auch für Probanden bestanden. Die daraus resultierenden Verzögerungen konnten im weiteren Projektverlauf nicht aufgefangen werden, so dass von den meisten Verbundpartnern eine kostenneutrale Projektverlängerung (im Falle von NPSY um 12 Monate) beantragt und vom Fördergeber auch bewilligt wurde. Dies ermöglichte den Abschluss der geplanten Arbeiten.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Der folgende Text stellt den wissenschaftlichen und technischen Stand zum Projektbeginn dar, an welchen das Projekt anknüpfte:

4.1 Kontinuierliche medizinische Vitalparametererfassung

In der Kardiologie hat sich über das letzte Jahrzehnt das Telemonitoring mittels kardialer elektronischer Implantate zur kontinuierlichen Überwachung von Patienten mit Herz-Kreislaufkrankungen mit einem stetig wachsenden Spektrum an Möglichkeiten etabliert [MRK+13]. Obgleich hier der Trend in Richtung der Implantation minimalinvasiver Systeme geht, sind sowohl aus Kosten- und Risikoperspektive als auch mit Blick auf die einfache (niederschwellige) Anwendung nichtinvasive Wearables eine Alternative, die zunehmend an Bedeutung gewinnen [VAR+17, PBZ+18, ASS+19]. Am Markt gibt es erste am Ohr getragene Produkte, die als Hearables zur Erfassung von Pulsfrequenz, Herz-Raten-Variabilität, Körpertemperatur, Sauerstoffsättigung des arteriellen Blutes, Atemfrequenz, sowie zur Erfassung von Bewegungen im Fitnessbereich eingesetzt werden. In dem vom BMBF geförderten Verbundprojekt MikroBO [Mik19] wurde darüber hinaus ein Demonstrator für die Messung des absoluten Blutdrucks im Ohr entwickelt, der die bisherigen invasiven Systeme ersetzen soll. Die Erfassung möglichst vieler Vitalparameter eröffnet die Möglichkeit einer umfassenden Analyse des Gesundheitszustands und darauf basierend die Ableitung eines medizinischen Handlungsbedarfs. Das mit der chronischen Erkrankung verbundene Risiko des Patienten kann durch entsprechende schnell und präzise ergriffene Maßnahmen weiter abgesenkt werden. Die übergreifende Auswertung (und bspw. Korrelation) von verschiedenen Vitaldaten findet allerdings aufgrund fehlender Analysen bisher noch nicht im medizinischen Kontext statt. Lösungen, die KI nutzen, sind bisher noch nicht auf dem Markt.

4.2 Kontinuierliche Erfassung der Hirnaktivitäten

Es ist bekannt, dass aufmerksam verfolgte Ereignisse im Gehirn zu einer erhöhten Aktivität in bestimmten Hirnsignalen führen, was mittels EEG messbar ist. So kann die Konzentration auf einen bestimmten Sprecher gut in den EEG-Signalen bestimmt werden [OPM+14]. Dies ist möglich, da die Verarbeitung im auditorischen System vom Input abhängig ist, d.h. die Hirnsignale z.T. mit der Einhüllenden des attendierten Sprechers korreliert. Erste Laborstudien zeigen, dass der attendierte Sprecher auch aus einem tragbaren, am Ohr abgeleiteten EEG-Signal dekodiert werden kann [MBD+16]. Die dort verwendeten Methoden beruhen auf einer linearen, statistischen Methode, wobei bisher mögliche nicht-lineare Anteile ignoriert werden. Neue Forschungsergebnisse [TKM17] haben jedoch gezeigt, dass KI-Ansätze eine deutliche Verbesserung in der Schätzung des attendierten Sprechers erzielen können. KI-Methoden leiden aber unter dem Bedarf an großen Datenmengen und entsprechenden Trainingszeiten, was ein Problem für die Integration von Biosignalen darstellt. Um eine anwendbare Messung zu gewährleisten, wird eine KI-Methode in Kombination mit kontinuierlichen Biosignalerfassungsmethoden benötigt, die ohne große Datenmengen und lange Trainingszeiten eine hinreichende Schätzung des attendierten Sprechers erzielen kann. Die oben genannten Studien basieren ausschließlich auf in kontrollierten Laborbedingungen gewonnenen Biosignalen. Mit dem jungen Forschungsfeld des Mobile Brain Body Imaging werden inzwischen immer bessere Technologien und Signalanalysemethoden bereitgestellt, die es erlauben, Biosignale in alltagsnahen Situationen zu erheben. In [DME+12] konnten wir erstmals zeigen, dass hirnelektrische Korrelate der auditorischen Aufmerksamkeit mit einem um das Ohr angebrachten Sensorstreifen ableitbar sind. Aus diesen und nachfolgenden Ohr-EEG Studien entstand das Konzept der transparenten EEG-Ableitung [BD17], in welchem die technologischen Bedingungen und Nutzeranforderungen für eine Biosignalaufzeichnung in Alltagssituationen dargestellt sind.

4.3 Subjektive Erfassung der Höranstrengung

Die Höranstrengung kann mit objektiven Messmethoden, wie EEG, sowie mit subjektiven Methoden ermittelt werden. Die subjektive Bewertung beinhaltet die aktive und dadurch sehr individuelle Bewertung des Wahrgenommenen. Für die Erfassung subjektiver Eindrücke eignen sich besonders Fragebögen und Skalen. Etablierte Fragebögen, wie der SSQ und IOI-HA, liefern Informationen über die subjektive Bewertung von Höranstrengung in verschiedenen Hörsituationen, wodurch Erkenntnisse aus dem Alltag der Befragten gewonnen werden. Neben der wahrgenommenen Höranstrengung werden dabei auch die wahrgenommene Lebensqualität und anderen Befindlichkeiten erfasst. Für die Validierung der mittels EEG erfassten objektiven Höranstrengung eignet sich die adaptive Höranstrengungsmethode ACALES (Adaptive Categorical Listening Effort Scaling, [KSB+17]). Dieses adaptive Verfahren erfasst die individuelle subjektive Höranstrengung in spezifischen Hörsituationen mittels einer 13-stufigen Bewertungsskala. Während der Messung wird das Stör-Nutz-Signal-Verhältnis adaptiv, basierend auf den vorherigen Bewertungen der wahrgenommenen Höranstrengung, variiert und dem Nutzer zur Bewertung dargeboten. Dadurch kann die individuelle Höranstrengungsfunktion für jeden Nutzer in Relation mit den Fragebogen- und EEG-Ergebnissen ausgewertet werden. In ersten Studien konnten bereits vielversprechende Zusammenhänge zwischen den objektiven Messergebnissen und subjektiven Bewertungsergebnissen gefunden werden [WWV+16], die in diesem Vorhaben weiter systematisch untersucht werden.

4.4 Methoden der menschenzentrierten Entwicklung

Bislang sind die Methoden des Human-Centered Designs oft nur ungenügend in technische Entwicklungsprozesse integriert, obwohl sie seit vielen Jahren Stand der Forschung sind [Den18]. Im Bereich der Medizintechnik existieren entsprechende Vorgehensweisen des Usability Engineerings durch einschlägige Normen und Regeln, wie bspw. DIN 62366-1 [DIN17]. Die entsprechenden Vorgehensweisen werfen aber im Bereich radikaler Innovationen Probleme auf und eignen sich eher für inkrementelles Optimieren [Ver09]. Das sich entwickelnde Feld der Augmented Intelligence erfordert neue Entwicklungsansätze in der Art und Weise des Einbeziehens von Stakeholdern und Anwendern sowie der Bewertung der Auswirkungen auf funktionaler, wie auf sozialer Ebene. Hierzu sind die Ansätze des partizipatorischen Designs und der Co-Creation gut geeignet. Dabei werden gemeinsam Artefakte erzeugt, die schnell Konzepte und Ansätze überprüfbar machen und die Beteiligten aktiv in den Entstehungsprozess integrieren [Kuh96, SN93].

4.5 Akzeptanz soziotechnischer Systeme

Die erfolgreiche Implementierung soziotechnischer Systeme in den Bereichen der Telemedizin, der Gesundheitsvorsorge und der Audiologie wird in besonderem Maße von der Akzeptanz und damit verbundenen Adoptionsbereitschaft des medizinischen Personals und der Patienten determiniert. Durch den Einsatz von KI-Technologien eröffnen sich die Möglichkeiten zur frühzeitigen, schnellen und zuverlässigen Prognose von Gesundheitszuständen, was durch eine steigende Anzahl aktueller Studien belegt wird. KI-basierte Systeme sind aufgrund der fortschreitenden technischen Entwicklung und anwachsenden Datenverfügbarkeit jedoch auch zunehmend in der Lage, die dominierende Rolle in komplexen Entscheidungsprozessen zu übernehmen und das Gesundheitswesen aufgrund ihres disruptiven Charakters radikal zu verändern. Die Adoptionsbereitschaft und Akzeptanz technischer Systeme kann dabei maßgeblich durch die frühe Einbindung und nutzerzentrierte Entwicklung des sozio-technischen Systems gesteigert werden. Dafür ist es zunächst nötig, die angedeuteten Akzeptanz- und Innovationsbarrieren sowie ihre ethischen, rechtlichen und sozialen Faktoren empirisch zu ermitteln.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt wurde in enger Zusammenarbeit mit den A2I-Verbundpartnern durchgeführt:

- **Hörzentrum Oldenburg:** Zu den Kernkompetenzen des Hörzentrums Oldenburg zählen die Entwicklung von KI-Algorithmen zum Einsetzen in den audiologischen Applikationen und hör-diagnostischen Verfahren, Modellen zur Vorhersage von Sprachverständlichkeit und Audioqualität. Das Hörzentrum Oldenburg entwickelt und vertreibt Softwareplattformen zur Entwicklung und Evaluation von KI- und Audiosignalverarbeitungsalgorithmen und arbeitet an KI-Algorithmen zur Bestimmung der beweglichen Sprachquellen in einer akustischen Szene sowie zur Erkennung der Hörsituation im Hörgerät.
- **Advanced Bionics (AB)** gehört zu den vier weltweit führenden Unternehmen bei der Entwicklung, Herstellung und Vertrieb von Cochlea-Implantat-Systemen für Kinder und Erwachsene. AB beschäftigt weltweit ca. 1000 Mitarbeiter und verkauft seine Produkte in mehr als 50 Ländern. Als Teil der Sonova AG hat Advanced Bionics Zugriff auf führendes technisches Know-How auf den Gebieten Akustik und Mikrosystemtechnik sowie auf komplexe audiologische Algorithmen. Am European Research Center (ERC) in Hannover beschäftigen sich Mitarbeiter mit Forschungs- und Vorentwicklungsstudien zu Cochlea-Implantaten (CI) auf den Gebieten elektrische Stimmulationsstrategien, elektroakustische und bimodale Stimulation, Vorverarbeitungsalgorithmen zur Reduktion von Störgeräuschen, effiziente Anpassungsverfahren, Messverfahren zur objektiven Charakterisierung des Neurointerfaces, Elektrodendesign und Evaluationsmethoden sowie implantierbare akustische Sensoren und Aktoren.
- Das **OFFIS**-Institut für Informatik erforscht als An-Institut der Universität Oldenburg neue Formen computer-gestützter Informationsverarbeitung und setzt die Ergebnisse in anwendungsnahe Entwicklungen um. Der OF-FIS FuE-Bereich Gesundheit beschäftigt sich seit über 20 Jahren mit der Nutzung von IT-Systemen im Gesundheitswesen und seit 2005 mit der Entwicklung von Assistenzsystemen auf der Basis von Sensorik und Verfahren des maschinellen Lernens und der explorativen Datenanalyse, u. a. in den Projekten Audio-PSS, Cicely, DiDiER, GAL, Hearing at Home, IDEAAL, LivingCare, LivingSmart, Medolution, MeSiB, PIZ, QuoVadis, TEDIPA. OFFIS koordiniert das Verbundprojekt und kann dabei auf eine langjährige Erfahrung in der Koordination von BMBF-, BMWi- und EU-Projekten zurückgreifen. **Iconstorm** ist Spezialist für das Design digitaler Produkte. Das inhabergeführte Unternehmen hat 15 Mitarbeiter und arbeitet branchenübergreifend u.a. für DAX-Konzerne wie die Deutsche Telekom, für KMU wie den Hörgerätehersteller audifon, sowie Start-Ups. Iconstorm war 2018 am BMBF-geförderten Projekt "CIP-Med – Cross Innovation in der Medizintechnik" beteiligt. Daneben organisiert Iconstorm u.a. den World Usability Day Frankfurt.
- Das **Herz- und Diabeteszentrum NRW** (HDZ-NRW) beteiligt sich mit dem **Institut für angewandte Telemedizin** am Projekt. Das HDZ NRW ist ein international führendes universitäres Spezialklinikum in der Behandlung von Herz-Kreislaufkrankungen. Als „Pionier“ für innovative telemedizinische Versorgung in Deutschland forscht das IFAT seit 2003 in zahlreichen Forschungsprojekten auf dem Gebiet innovativer telemedizinischer Betreuungskonzepte, legt die Grundlagen für aktuelle Versorgungsangebote und bietet unterschiedliche telemedizinische Programme für die Betreuung von Patienten mit Herz-Kreislaufkrankungen an.

-
- Der **Lehrstuhl für Technologiemanagement der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel** fokussiert in seiner Forschung die Herausforderungen von Innovationen insb. in der Gesundheits- und Energiewirtschaft sowie die Entwicklung und Evaluierung von Instrumenten des Innovationsmanagements. In drei Arbeitsbereichen werden Forschungsprojekte zum Innovationsmanagement von medizinischen Einrichtungen, zum IT-basierten Management integrierter Versorgungsnetzwerke und zur methodischen Unterstützung der Entwicklung neuartiger Dienstleistungen und Produkt-Service-Systeme bearbeitet.

II. Eingehende Darstellung

1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses

1.1 AP1: Anforderungsanalyse und mensch-zentriertes Design

Im Jahr 2021 war die Uni Oldenburg an den APs 1.1. und 1.2. beteiligt. Die Uni Oldenburg war in AP 1 für die Erhebung des Stands der Technik im Bereich mobile EEG-Technologien in Bezug auf Signalverarbeitung für echtzeitfähige mobile EEG-Anwendungen sowie in Bezug auf Hardwarelösungen für chronische Ohr-nahe Elektrophysiologie (Sensortechnik). Eine Literaturrecherche wurde durchgeführt und mit den anderen Partnern geteilt. Die Literaturrecherche wurde während der Laufzeit des Projektes kontinuierlich aktualisiert. AP 1.1 gilt als abgeschlossen. In AP 1.2. hat Uni Oldenburg an der Erstellung des Ethikantrags für die EEG-Aufzeichnungsstudien in Oldenburg mitgewirkt. Der Ethikantrag wurde in Kollaboration mit dem Partner Hörzentrum fertiggestellt. AP 1.2. gilt somit als abgeschlossen.

1.2 AP3: Datenerfassung und Datenaufbereitung

Im Jahr 2021 bis 2024 war die Uni Oldenburg an den APs 3.1 und 3.2 beteiligt. AP 3.1 startete im Sommer 2021. Zusammen mit den Partnern Hörzentrum, IFAT und OFFIS wurden zwei Aufzeichnungsstudien konzipiert. Zusammen mit dem Partner Hörzentrum wurde der Studienaufbau konkretisiert und dafür notwendige, aufwändige Messtechnik entwickelt und pilotiert. Die Aufzeichnungsstudie am Herz-und-Diabeteszentrum in Bad Oeynhausen wurde vor Ort mehrmals geprobt. Im Weiteren wird die Aufzeichnungsstudie in Oldenburg beschrieben. In Oldenburg lag der Fokus auf der Erhebung von EEG-Daten innerhalb verschiedener akustischen Alltagssituationen. EEG-Daten sollten zum einen mit einer konventionellen EEG-Kappe, zum anderen mit einem Ohr-naher EEG-Sensorik erhoben werden. Basierend auf der in AP 1.1 erstellten Literaturrecherche wurde sich für das cEEGrid als Ohr-nahes EEG-System entschieden (siehe Abbildung 1). Bereits in mehreren vorangegangenen Laborstudien wurde gezeigt, dass sich der attendierte Sprecher anhand von cEEGrid Daten ableiten lässt [MBDV+16, HRJ+22].



Abbildung 1 - Ohr-nahes EEG-System cEEGrid, entwickelt von der AG Debener (NPSY).

Ein Ziel dieser ersten EEG-Aufzeichnungsstudie war es den Probanden verschiedene akustische Szenarien zu präsentieren. Die Komplexität dieser Szenarien variierte je nach Bedingung. Probanden sollten kontinuierlich einem Hörbuch aufmerksam zuhören, welches von einem männlichen Sprecher oder ei-

ner weiblichen Sprecherin gelesen wurde. Die Studie wurde in drei Blöcke unterteilt, jeder Block dauerte ungefähr eine Stunde. Die Messung des ersten Blocks fand in einem Labor im Hörzentrum Oldenburg statt. Hier saßen die Probanden auf einem Stuhl in der Mitte eines Lautsprecherrings (16 Lautsprecher). In der ersten und einfachsten akustischen Bedingung wurde nur ein Hörbuch ohne weitere Störquellen präsentiert. In der zweiten Hörbedingung wurde wieder das zu attentierende Hörbuch präsentiert. Gleichzeitig wurde ein weiteres Hörbuch präsentiert, welches die Probanden so gut wie möglich ignorieren sollten. In der dritten Hörbedingung wurde wieder nur ein Hörbuch präsentiert. Zusätzlich hörten die Probanden eine typische Hintergrundkulisse aus einer Cafeteria. Diese Hintergrundkulisse sollten die Probanden wieder so gut wie möglich ignorieren. In der vierten Hörbedingung wurde wieder ein zu attentierendes Hörbuch präsentiert. Gleichzeitig wurde ein zu ignorierendes zweites Hörbuch und die Cafeteria Hintergrundkulisse abgespielt. Im zweiten Block der Messung verließen die Probanden das Labor. Das Ziel war, Daten aus realistischeren, alltäglichen Situationen zu erheben. Probanden saßen entweder auf einem Stuhl in einem öffentlichen Flur im Hörzentrum oder sollten entlang einer festgelegten Route in der direkten Umgebung des Hörzentrums gehen. Während der sitzenden und der gehenden Bedingung wurden den Probanden über Hörgeräte wieder Hörbücher präsentiert. In der einfachen Hörbedingung sollten die Probanden nur dem einen Hörbuch folgen, ohne das weitere Störgeräusche präsentiert wurden. In der schwierigen Hörbedingung wurde neben dem zu attentierenden Hörbuch ein weiteres, zu ignorierendes Hörbuch präsentiert. Im dritten und letzten Block wurde die Messung des ersten Blockes wiederholt. Dies erlaubte es uns, verschiedene Aspekte wie Höranstrengung und Hörermüdung, speech envelope tracking, und Qualität des EEG-Signals zwischen Anfang und Ende der dreistündigen Messung zu vergleichen (für eine schematische Darstellung des Messaufbaus siehe Figure 1).

Jeder Proband wurde zu zwei Messterminen eingeladen. Bei einem Messtermin wurden EEG-Daten mit einer 32-Kanal EEG Kappe erhoben. Bei dem anderen Messtermin wurden Daten mit dem cEEGrid erhoben. Während beider Messtermine wurde neben EEG-Daten auch Vitaldaten (EKG, Atemfrequenz, Sauerstoffsättigung) sowie Accelerometerdaten und Aufnahmen der akustischen Umgebung des Probanden erhoben. Ein weiteres Ziel der Aufzeichnungsstudie war diese verschiedene Datenströme zeit-synchron mit mobiler Hardware bzw. Smartphones aufzuzeichnen. Zeitliche Synchronisierung der Datenströme realisiert indem sichergestellt wurde, dass sich alle Datenströme in einem Netzwerk befinden. So konnten sie mithilfe des Lab Streaming Layer Framework empfangen, synchronisiert und aufgezeichnet werden (siehe Abbildung 3, weitere Informationen zu Lab Streaming Layer: KSS+24).

Der Start der Datenerhebung verzögerte sich durch Corona Schutzmaßnahmen im Hörzentrum, sodass die Erhebung erst im Frühjahr 2022 starten konnte. Die Datenerhebung wurde im August 2022 beendet. Die Daten wurden annotiert und dokumentiert bevor sie mit den Partnern OFFIS und Hörzentrum geteilt wurden. Somit gilt AP 3.1 als abgeschlossen.

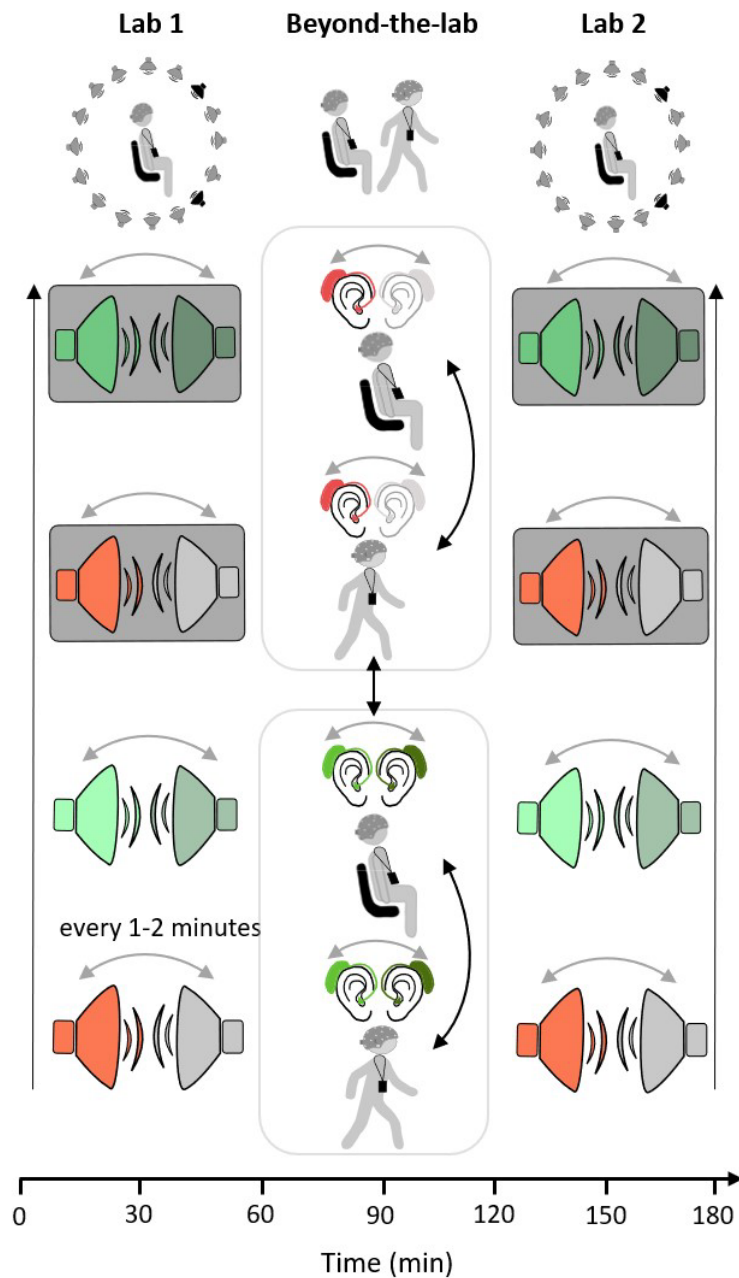


Abbildung 2 - Messprotokoll: Bedingungen mit einem Lautsprecher in rot und Bedingungen mit zwei Lautsprechern in grün. Die Reihenfolge der Bedingungen in den Messungen in Labor 1 und Labor 2 beginnt mit der Ein-Lautsprecher-Bedingung (rot) und endet mit einer Zwei-Lautsprecher-Bedingung mit Cafeteria-Hintergrundgeräuschen (grün mit grauem Hintergrund). Die Reihenfolge der Bedingungen ändert sich nicht zwischen den Teilnehmern oder innerhalb der Messung (schwarzer Pfeil, Reihenfolge der Bedingungen von unten nach oben). Bei der Messung außerhalb des Labors ist die Reihenfolge der Bewegungsbedingungen (Sitzen/Gehen) und der Hörbedingungen (Single/Dual) zwischen den Teilnehmern pseudo-randomisiert (schwarze Pfeile). In allen drei Messkontexten wechselt die Seite der Präsentation des betreuten Sprechers alle 1 bis 2 Minuten (graue Pfeile).

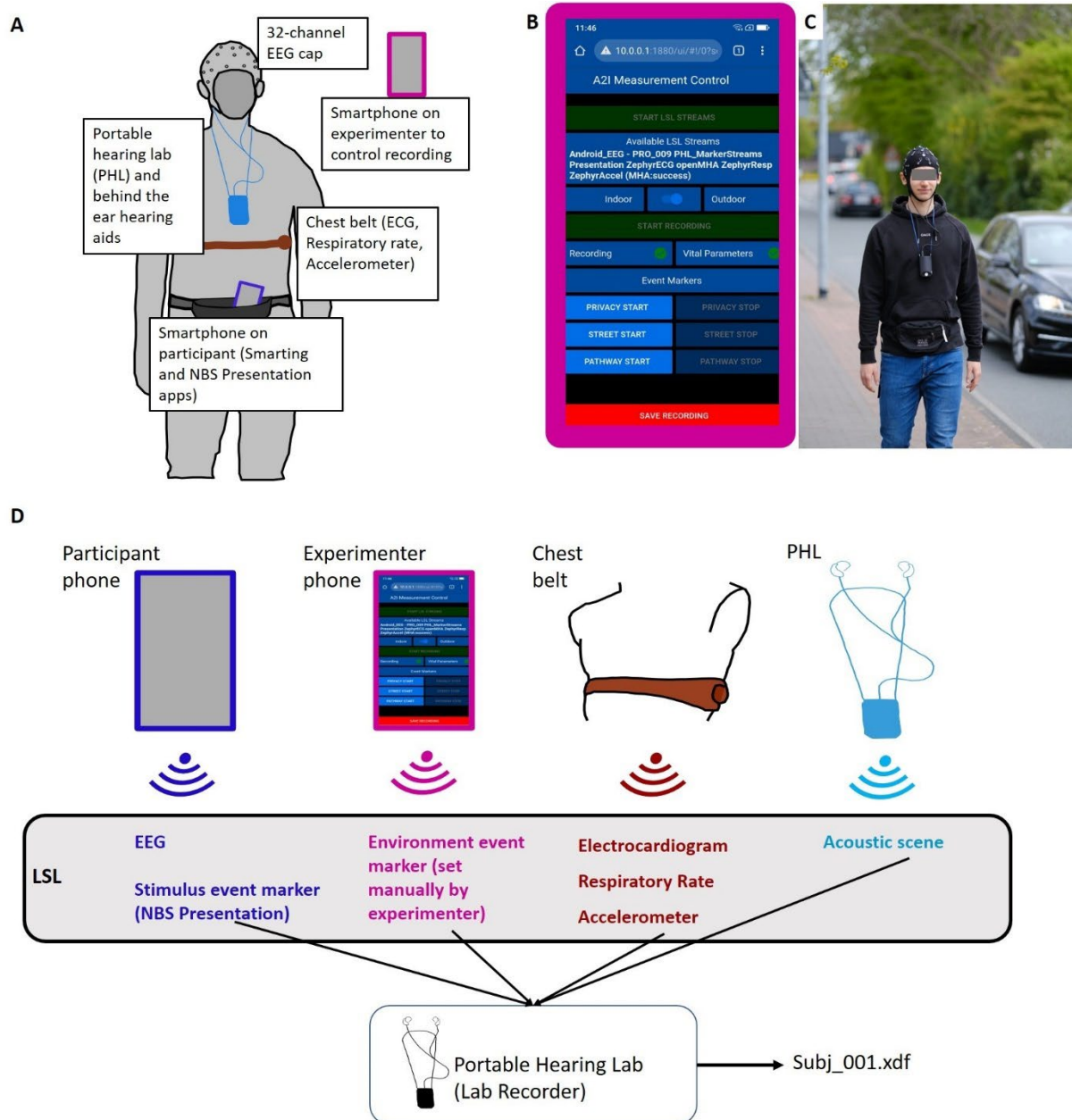


Abbildung 3 - Aufbau der Studie. (A) Piktogramm aller beteiligten Sensoren und Aufzeichnungsgeräte am Teilnehmer. (B) Node Red GUI auf dem Telefon des Experimentators zur Steuerung des Experiments und zur Überwachung der Verfügbarkeit der LSL-Datenströme. (C) Teilnehmer in der BTL-Gehbedingung. (D) Piktogramm des technischen Aufbaus. LSL-Datenströme von verschiedenen Geräten werden über Wi-Fi gestreamt und auf dem PHL in einer .xdf-Datei aufgezeichnet.

Die Bearbeitung des AP 3.2 startete im Sommer 2022. Die in AP 3.1 aufgenommenen Rohdaten wurden annotiert und dokumentiert. Nach Sichtung der Datenqualität mussten keine weiteren Daten nacherhoben werden. Skripte zur systematischen Vorverarbeitung wurden bereits während der Datenerhebung mithilfe eines exemplarischen Datensatzes vorbereitet. Durch den nicht kompensierbaren Ausfall einer Mitarbeiterin musste die Bearbeitung des AP 3.2 bis April 2023 pausiert werden. Ab April 2023 startete die systematische Vorverarbeitung der Kappendaten. Aufgrund von zwischenzeitlich erschienen neuen

wissenschaftlichen Erkenntnissen bzgl. der nicht nachweisbaren Verbesserung von speech envelope tracking Ergebnissen nach einer Datenbereinigung durch ASR, wurde auf die ASR basierte Datenbereinigung verzichtet [SHD+21]. Stattdessen wurden die Daten gefiltert und von defizitären Kanälen befreit. Die Ergebnisse dieser recheneffizienten und echtzeitfähigen Datenbereinigung wurden mit einem *state-of-the-art* offline Verfahren (ICA) verglichen. Die Ohr-nah erhobenen cEEGrid Daten wurden einer ähnlich recheneffizienten Vorverarbeitung unterzogen, um eine hohe Vergleichbarkeit zwischen den EEG-Kappen und den cEEGrid EEG-Daten gewährleisten zu können. Die bereinigten Datensätze wurden dokumentiert und mit den Partnern Hörzentrum und OFFIS geteilt. Damit ist A.P. 3.2 abgeschlossen.

1.3 AP4: Entwicklung Systemarchitektur und KI-Algorithmen

Bei Fragen bezüglich der EEG-Signalkette stand NPSY der Uni Oldenburg allen Partnern stets zur Verfügung. In mehreren Gesprächsreihen stand NPSY insbesondere mit den Partnern OFFIS und Hörzentrum in engem Austausch. Die Kompatibilität der verschiedenen Sensorsignale während der technischen Konzipierung der Aufzeichnungsstudie wurde berücksichtigt, technische Probleme gelöst und dokumentiert.

Die Bearbeitung des AP 4.4 startete im Sommer 2023 mit der Auswertung der in AP 3.1 erhobenen Daten. Um die Leistungsfähigkeit des neuen KI-Algorithmus zu bestimmen, ist ein Vergleich mit Ergebnissen konventioneller Methoden notwendig. Hierfür wurden die in AP 3.1 erhobenen Daten mit dem Fokus auf sogenannte Speech Envelope Tracking Methoden analysiert, um den attendierten Sprecher zu bestimmen. Grundlage des Speech Envelope Trackings ist die Beziehung zwischen neuronalen Daten und verschiedenen Merkmalen der verarbeiteten Sprachstimuli. Während der Verarbeitung von Sprache synchronisieren sich neuronale Oszillationen mit langsamen Amplitudenveränderungen im Sprachsignal. Diese Assoziation zwischen neuronalen Signalen und Sprachmerkmalen ist verstärkt repräsentiert, wenn eine Person sich auf ein bestimmtes Sprachsignal konzentriert. Somit kann anhand von neuronalen Signalen etwa bestimmt werden, welchem von mehreren Sprechern eine Person gerade zuhört. Mithilfe linearer multivariabler Dekodierungsmodellen wurde der attendierte Sprecher in verschiedenen akustischen Bedingungen und Bewegungsbedingungen bestimmt. Diese Analyse wurde sowohl für die EEG-Kappendaten als auch für die am Ohr erhobenen cEEGrid EEG-Daten durchgeführt. Ein wesentliches Ergebnis war, dass die Speech Envelope Tracking Ergebnisse für EEG-Kappendaten vergleichbar sind mit den Ergebnissen, welche für die cEEgrid EEG-Daten erzielt wurden (siehe Abbildung 4 bis Abbildung 6). Die Ergebnisse des Speech Envelope Trackings wurden dem Partner Hörzentrum als Referenz für die Entwicklung der KI-Analysekette zur Verfügung gestellt. Es war weiterhin geplant, die CI EEG-Daten von Partner AB der gleichen Datenanalyse zuzuführen und mit den oben genannten EEG-Datensätzen zu vergleichen. Da Partner AB Partner NPSY die Daten nicht zur Verfügung stellen konnte, konnte dieser Schritt nicht umgesetzt werden.

Ein weiteres Ziel dieses Arbeitspaketes war die Untersuchung der Fluktuationen im Alpha (8-13 Hz) und Theta (4-7 Hz) Frequenzband in Beziehung zu Fluktuationen in subjektiven Messungen von Höranstrengung und Hörermüdung sowie zu Fluktuationen in der Leistung des attendierten Sprechers und lokalen Häufigkeiten von Eye Blinks untersucht. Zu diesem Zweck wurde eine Extraktion der Frequenzbandleistung mithilfe eines recheneffizienten, nahen echtzeitfähigen Verfahrens vorgenommen. Für einzelne akustische Bedingungen wurde die Frequenzbandleistung innerhalb aufeinanderfolgenden Fensters von einer Dauer von 60 Sekunden ermittelt. Die Fluktuationen in Frequenzbandleistung im Alpha-band und im Thetaband wurde daraufhin mit minutenweisen Fluktuationen der lokalen Häufigkeiten

von Eye Blinks und der Leistung des Attention Decoding Models in Beziehung gesetzt. Um Fluktuationen in den Frequenzbändern mit subjektiver Höranstrengung und Hörermüdung in Beziehung zu setzen, wurde die Fluktuation der Frequenzbänder innerhalb der einzelnen Bedingung als Standardabweichung über die Werte für die 60 Sekunden Fenster quantifiziert. Dies war notwendig, da für jede akustische Bedingung nur ein Wert für subjektive Hörermüdung bzw. subjektive Höranstrengung erhoben wurde. Die Standardabweichung im Alpha und Thetaband innerhalb der einzelnen akustischen Bedingungen wurde dann mit den subjektiven Einschätzungen zu Hörermüdung und Höranstrengung in diesen Bedingungen verglichen. Die Korrelation zwischen Fluktuationen in der Leistung des Attention Decoding Models und Fluktuationen im Alpha- sowie im Thetaband waren jedoch nicht signifikant assoziiert. Außerdem ergab sich entgegen unserer Erwartung kein signifikanter Zusammenhang zwischen Fluktuationen im Alpha oder Thetaband und subjektiver Hörermüdung und Höranstrengung. Zuletzt wurde die Beziehung zwischen lokalen Häufigkeiten von Eye Blinks und Fluktuationen im Alpha- und Thetaband untersucht. Für die Analyse wurden Eye Blink Häufigkeiten in aufeinanderfolgenden 60-Sekunden Fenstern extrahiert und mit den bereits extrahierten Frequenzbandfluktuationen verglichen. Die Ergebnisse zeigten keine signifikante Beziehung zwischen Eye Blinks und Fluktuationen in der Frequenzbandleistung im Alpha- sowie im Thetaband.

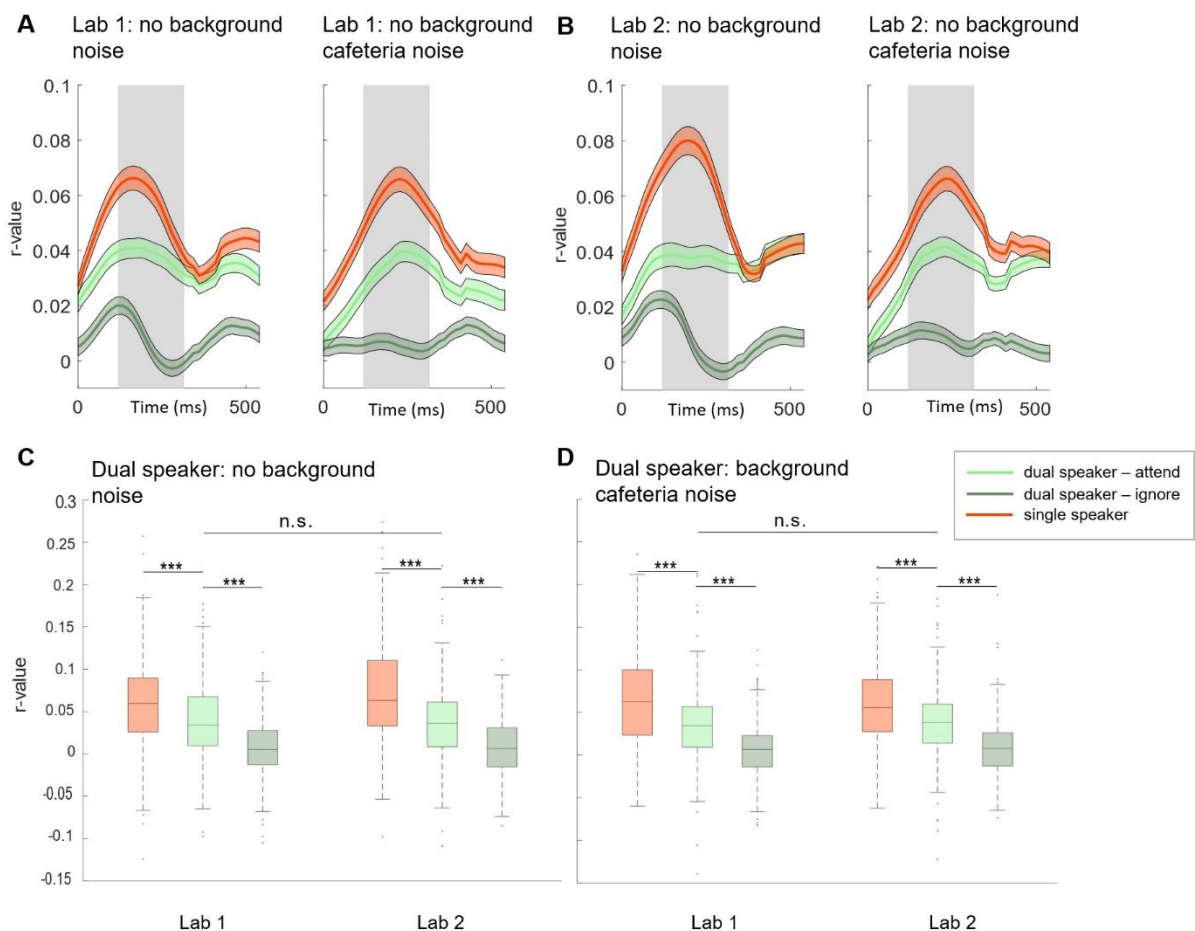


Abbildung 4 - Probandenunabhängiges Modell, Labor 1 und Labor 2. (A, B) Morphologie des neuronalen Trackings von 0 bis 500ms relativ zum speech envelope. Dargestellt für die Bedingungen mit einem (rot) und mit zwei (attendiert: hellgrün, ignoriert: dunkelgrün) Sprechern in den Messungen in Labor 1 (A) und Labor

2 (B). Die schattierten Bereiche zeigen ± 1 Standardfehler. Der schraffierte graue Bereich stellt das für die Analyse verwendete Zeitfenster dar. (C, D) Vergleich des neuronalen Trackings innerhalb und zwischen den Bedingungen mit einem und zwei Lautsprechern in Labor 1 und Labor 2 (C: ohne Hintergrundgeräusche der Cafeteria; D: mit Hintergrundgeräuschen der Cafeteria) *** $p < 0,001$.

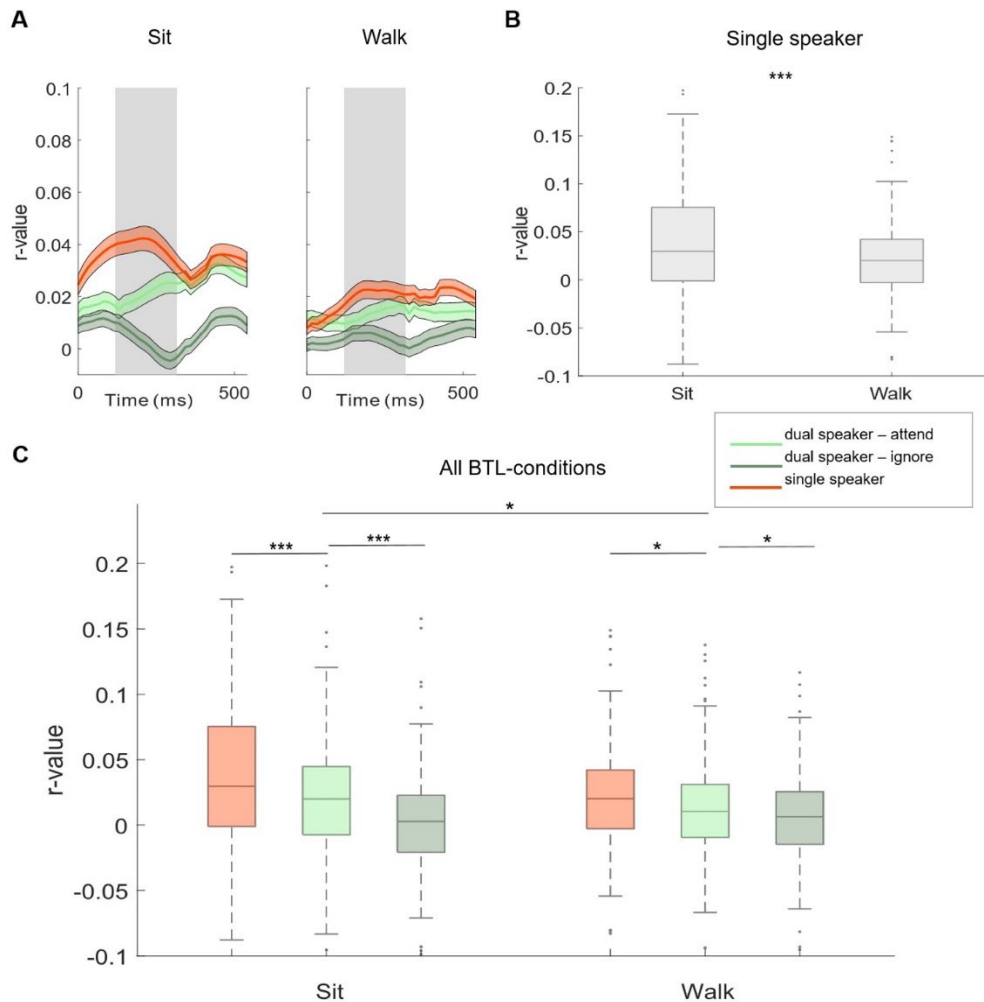


Abbildung 5 - Probandenunabhängiges Modell, BTL. (A) Morphologie des neuronalen Trackings von 0 bis 500 ms relativ zum speech envelope. Dargestellt für einen (rot) und zwei Sprecher (attentiert: hellgrün, ignoriert: dunkelgrün) in BTL-Bewegungszuständen (sitzen und gehen). Der grau schattierte Bereich stellt das für die Analyse verwendete Zeitfenster dar. (B) Vergleich der Bedingungen mit einem Sprecher zwischen den BTL-Bewegungsbedingungen. (C) Vergleich der Hörbedingungen mit einem und zwei Lautsprechern innerhalb und zwischen den BTL-Bewegungsbedingungen. Die Linien zwischen den Boxplots zeigen die Statistiken für einzelne Probanden. Die schattierten Farbflächen zeigen ± 1 Standardfehler. * $p < 0.05$. ** $p < 0.01$. *** $p < 0.001$.

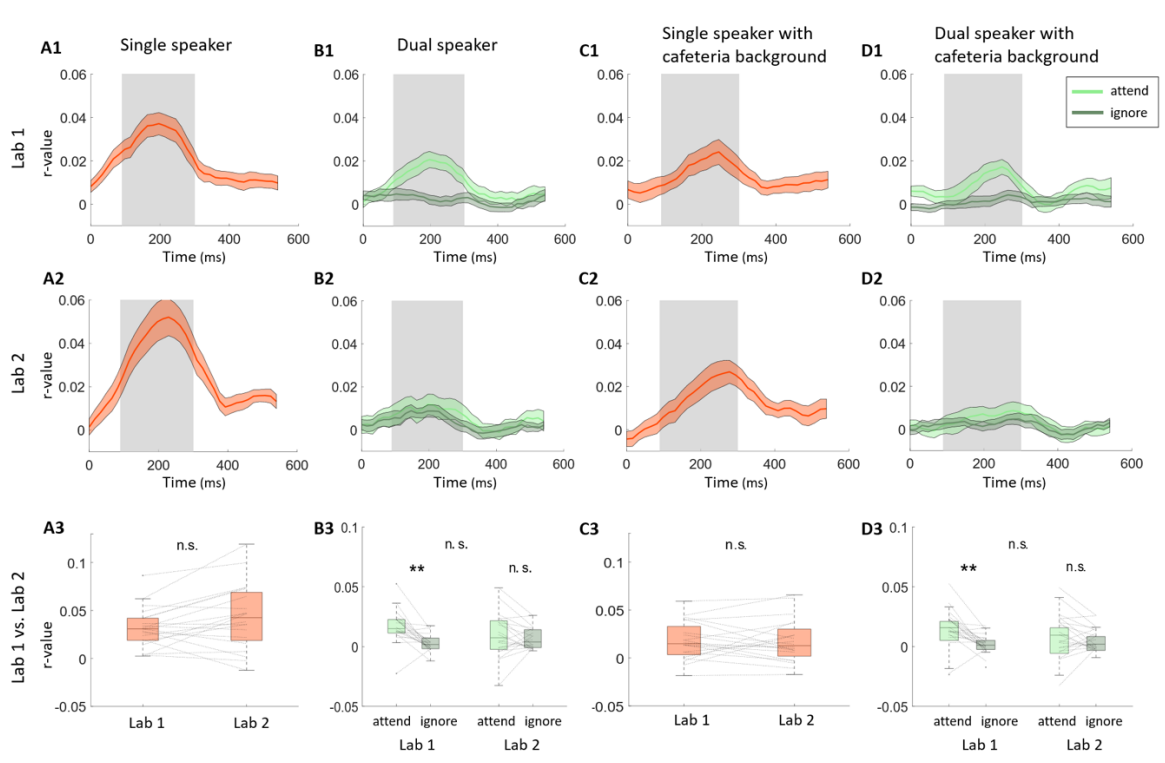


Abbildung 6 - Probandenabhängiges Modell in Labor 1 und Labor 2: Die Spalten stellen die Morphologie der neuronalen Sprachverfolgung von 0-500ms relativ zur Sprachhüllkurve in den einzelnen Hörbedingungen (A-D) dar, die Zeilen die Ergebnisse der Messungen in Labor 1 (A1-D1) und Labor 2 (A2-D2). Die schattierten Bereiche in den Diagrammen A1-D2 stellen ± 1 Standardfehler dar. Der grau schattierte Bereich in den Diagrammen A1-D2 stellt das für die Analyse gewählte Zeitfenster dar. A3-D3 zeigen den Vergleich zwischen den Hörbedingungen in Labor 1 und Labor 2. Bedingungen mit einem Sprecher werden in rot dargestellt. Bedingungen mit zwei Sprechern in hellgrün (beachteter Sprecher) und dunkelgrün (ignorierte Sprecher). Die Linien zwischen den Boxplots (A3-D3) stellen die Statistiken für einzelne Probanden dar. ** $p < 0.01$.

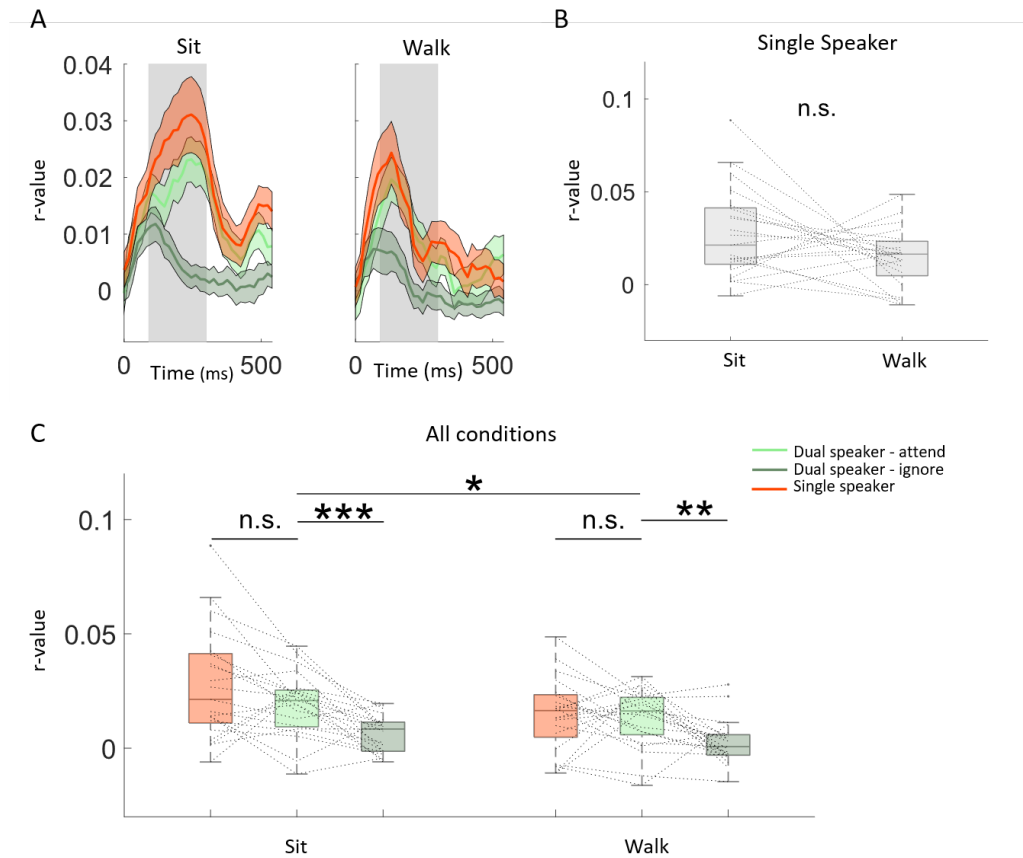


Abbildung 7 - Ergebnisse cEEGrid Daten in den alltagsnahen beyond the lab (BTL) Messungen

1.4 AP6: Entwicklung des vernetzten Sensorsystems

Im regelmäßigen Austausch wurde der Partner Hörzentrum in der Gestaltung eines flexiblen Echtzeitsystems bezüglich der Verarbeitung von Kappen und Ohr-nahem EEG von Partner NPSY der Uni Oldenburg unterstützt und beraten.

1.5 AP7: Evaluation

Die Vorbereitungen für die Evaluationsstudie starteten Ende 2023. Die Datenerhebung wurde im Frühjahr 2024 begonnen. Partner NPSY der Universität Oldenburg hat gemeinsam mit dem Partner Hörzentrum die Evaluationsstudie konzeptionell und technisch entwickelt (siehe Abbildung 7). Die Umsetzung der Evaluationsstudie wurde entgegen der Vorhabensbeschreibung durch NPSY der Universität Oldenburg und nicht durch Partner Hörzentrum durchgeführt. Dies war notwendig, da die verantwortliche Person im Hörzentrum das Hörzentrum vor Start der Datenerhebung verlassen hat und es im Hörzentrum daher an notwendiger Expertise und Kapazitäten bezüglich dieser speziellen Studie fehlte. Während der Messungen wurde allerdings deutlich, dass der vom Hörzentrum entwickelte KI-Algorithmus Mängel aufwies und keine zuverlässigen Dekodierungsergebnisse liefern konnte. Der Algorithmus wurde daher durch eine einfache Korrelationsanalyse ersetzt. Dadurch konnte die Datenerhebung trotz-

dem fortgesetzt werden. Die Datenerhebung wurde erfolgreich abgeschlossen mit dem Ziel, einen Datensatz zu generieren, der für zukünftige KI-Algorithmenentwicklungen den Partnern Hörzentrum und Offis, oder auch anderen interessierten Partnern, zur Verfügung gestellt werden kann. Durch den Weggang der zuständigen Person im Hörzentrum fehlte es leider an Expertise, die entsprechenden Analysen vollständig durchzuführen.

Vor dem Start der Datenaufzeichnung wurde bei jedem Probanden ein Audiogramm erhoben, um normales Hörvermögen bei allen inkludierten Probanden sicherzustellen. Daraufhin wurden die Probanden mit einer 32-Kanal EEG-Kappe ausgestattet. Es wurden explizit keine Ohr-nahen EEG-Daten erhoben, da es das Hauptziel dieser Studie war, die Leistungsfähigkeit des KI-Algorithmus zu testen. Hierfür war ein entsprechender Referenzdatensatz. Um dies zu gewährleisten, wurden in dieser Studie EEG-Signale mittels Kappen erhoben. Während der Messung wurden den Probanden über in-ear Kopfhörer Hörbücher präsentiert. Es wurden immer zwei Hörbücher gleichzeitig präsentiert. Die Probanden sollten sich immer nur auf ein Hörbuch konzentrieren und das zweite Hörbuch ignorieren. Der Messaufbau war unterteilt in drei Phasen. Phase 1 dauerte ca. 40 Minuten. Diese Phase startete entweder im Sitzen innerhalb eines Labors des Hörzentrums oder im Gehen innerhalb der unmittelbaren Umgebung außerhalb des Hörzentrums. Probanden sollten sich in den ersten 10 Minuten auf das von einem männlichen Sprecher oder einer weiblichen Sprecherin gelesene Hörbuch konzentrieren. Nach jeweils einer Minute wurde das Hörbuch pausiert. Nun sollten die Probanden eine multiple choice Frage zum Inhalt der präsentierten Geschichte beantworten. Daraufhin teilte der Versuchsleiter dem Probanden das Ergebnis der Korrelationsanalyse mitgeteilt und die Probanden sollten angeben, ob diese Einschätzung richtig oder falsch war. Alle fünf Minuten sollten die Probanden zusätzlich ihr Müdigkeitszustand bewerten. Nach den ersten 10 Minuten wurden die Probanden instruiert, für die nächsten 10 Minuten dem anderen Sprecher bzw. Sprecherin zu folgen. Auch hier wurde das Hörbuch nach jeweils einer Minute pausiert und den Probanden wurden die oben beschriebenen Inhaltsfragen präsentiert. Welcher Sprecher (weiblich oder männlich) zuerst präsentiert wurde, wurde über alle Probanden randomisiert. Im zweiten Teil der ersten Phase wurde dieser Ablauf wiederholt. Falls Probanden in der sitzenden Bedingung gestartet hatten, folgte nun ein identischer Ablauf im Gehen, oder andersherum. Die Reihenfolge wurde über alle Probanden randomisiert. Nach Abschluss der ersten Phase hatten die Probanden eine 10-minütige Pause. Nach der Pause startete Phase 2 der Messungen. Falls Probanden Phase 1 in der sitzenden Bedingung gestartet hatten, fand Phase 2 im Sitzen statt. In Phase 2 nur einer der Sprecher (z.B.: männlich) wurde den Probanden als attendierter Sprecher präsentiert, während der andere Sprecher (z.B.: weiblich) ausschließlich als ignoriertes Sprecher präsentiert wurde. In Phase 3 dies wurde in der gehenden (bzw. sitzenden) Bedingung wiederholt. Hörbücher in Phase 2 und Phase 3 wurden jeweils für 15 Minuten präsentiert. Wie schon in Phase 1 wurden die Hörbücher wieder nach je 60 Sekunden pausiert, um die oben beschriebenen Fragen zu stellen.

Es wurden insgesamt 19 Datensätze erhoben. Nach Beendigung der Datenaufnahme wurden die Daten durch NPSY der Universität Oldenburg annotiert und dokumentiert. Durch die fehlenden Ergebnisse des Algorithmus konnten diese nicht mit den Ergebnissen aus der Aufzeichnungsstudie in Beziehung gesetzt werden. Daher bleibt diese Aufgabe offen.

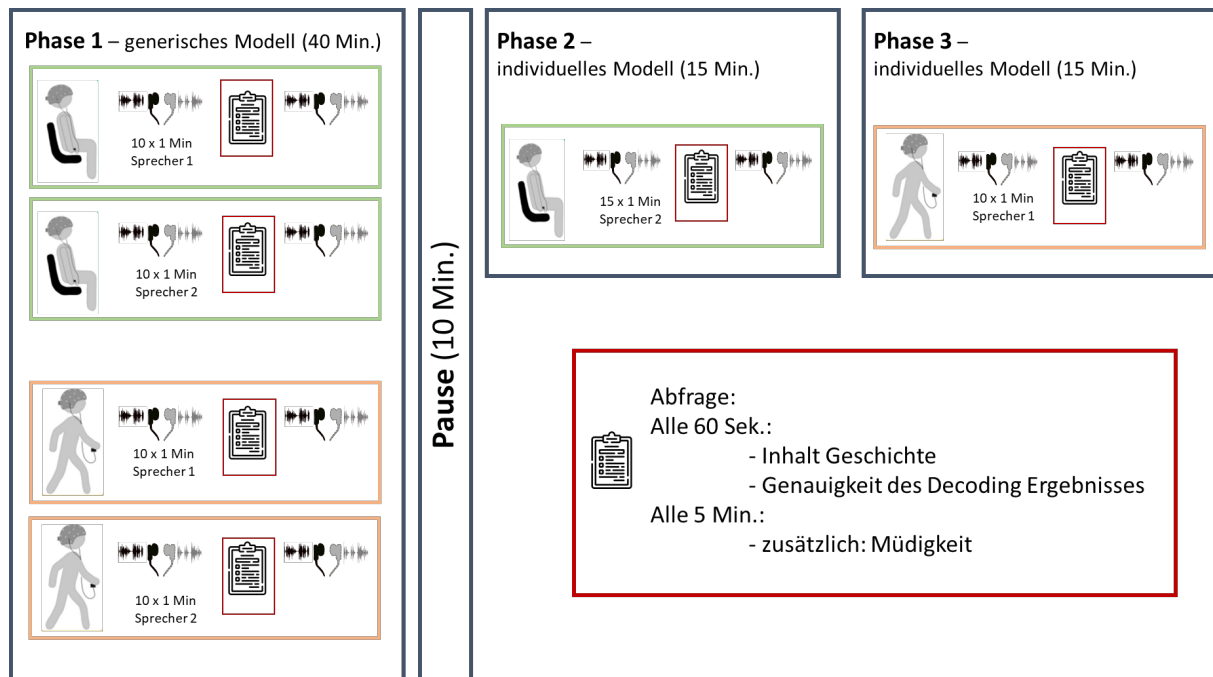


Abbildung 8 - Aufbau Evaluationsstudie

1.6 AP8: Projektkoordination / Querschnittsthemen

Die Teilergebnisse wurden im Rahmen von Fachvorträgen, wissenschaftlichen Postern, veröffentlichten Publikationen und einem erfolgreichen Dissertationsprojekt veröffentlicht:

Öffentlichkeitsarbeit auf Konferenzen:

Im Rahmen des Workshops „Mobile Health in Kommunikation, Wahrnehmung und Mobilität“ (Okt. 2023) wurden die vorläufigen Ergebnisse der Aufzeichnungsstudie in Form eines wissenschaftlichen Vortrages vorgestellt.

Im Rahmen der Mobile Brain Imaging Konferenz, welche im Sommer 2024 in Piran (Slowenien) stattfand, wurden die Ergebnisse der Aufzeichnungsstudie vorgestellt.

Publikationen:

Straetmans, L., Holtze, B., Debener, S., Jaeger, M. & Mirkovic B. (2021). Neural tracking to go: auditory attention decoding and saliency detection with mobile EEG. *J. Neural Eng.* 18 doi: 10.1088/1741-2552/ac42b5

Straetmans, L., Adiloglu, K. & Debener, S. (2024). Neural speech tracking and auditory attention decoding in everyday life. *Front. Hum. Neurosci.* 18:1483024. Doi: 10.3389/fnhum.2024.1483024

Dissertationsschrift:

Die Ergebnisse der beiden veröffentlichten Publikationen, sowie die Ergebnisse der cEEGrid Daten aus der Aufzeichnungsstudie wurden in einer Dissertation zusammengefasst, welche im Dezember 2024 fertiggestellt wurde. Die Disputation der Arbeit ist auf den 02.07.2025 terminiert.

Partner NPSY hat sich nach Bedarf an Diskussionen zur möglichen Ausarbeitung eines verbundübergreifenden Verwertungsplanes beteiligt. Da die technische Entwicklung aufgrund von Corona und Personalengpässen nicht den ursprünglich anvisierten Technologiereifegrad erzielte, ist eine kommerzielle Weiternutzung der von Partner NPSY an der Uni Oldenburg erzielten Ergebnisse nicht in Sicht.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die im zahlenmäßigen Teil des Berichts dargelegten Zahlen entsprechen den tatsächlichen Ausgaben der Uni Oldenburg im Projekt A2I-EEG gemäß Verwendungsnachweis.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Zusammenführung der zur Erreichung der Ziele des Projekts erforderlichen Kompetenzen (für Partner NPSY: experimentalpsychologische Kompetenzen in der Umsetzung von EEG und Aufmerksamkeitsstudien; Expertise in der Signalanalyse mobiler EEG Daten; Expertise in Ohr-naher EEG Sensorik) sowie zur Erforschung der relevanten Themenfelder (Rollenverteilung der Mensch/Maschine Interaktion, Entscheidungstransparenz und Governance und Ethik) im Anwendungsfeld eHealth an den Beispielen diagnostischer und audiologischer Fragestellungen erforderte eine interdisziplinäre Zusammensetzung des Konsortiums, das einerseits eine kritische Breite, andererseits sowohl die notwendige tiefgehende Expertise in Einzelbereichen, wie auch ausreichende Überlappungen der Erfahrungen zur Sicherstellung einer guten Kooperation erfordern.

Für das Projekt A2I bestand ein wissenschaftliches, technisches und wirtschaftliches Risiko, verbunden mit einem hohen Aufwand, das ohne öffentliche Förderung durch das BMBF nicht eingegangen werden konnte. Die durchgeführten Arbeiten sowie die dafür aufgewandten Ressourcen waren notwendig und angemessen, da sie der in der Vorhabenbeschreibung detailliert dargelegten Planung entsprachen und die im Arbeitsplan formulierten Aufgaben weitgehend erfolgreich bearbeitet wurden.

4 Voraussichtlicher Nutzen

4.1 Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

Partner NPSY an der Uni Oldenburg hat im Rahmen des Projekts keine Erfindungen oder Schutzrechte angemeldet.

4.2 *Wirtschaftliche Erfolgsaussichten (mit Zeithorizont)*

NPSY der Uni Oldenburg führt als Hochschule keine direkte wirtschaftliche Verwertung von Projektergebnissen durch. Eine wirtschaftliche Verwertung der im Projekt erzielten Ergebnisse erscheint nur in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner plausibel. Entsprechende Anfragen an Partner NPSY hat es von interessierter Seite während der Projektlaufzeit nicht gegeben.

4.3 *Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten (mit Zeithorizont)*

Das Projekt A2I-EEG hat Partner NPSY der Uni Oldenburg aus wissenschaftlicher Sicht die Möglichkeit geboten, die international sichtbare Rolle im Bereich des Mobil EEG weiter auszubauen. Wesentliche Ergebnisse des Projektes sind der Nachweis der erfolgreichen Aufmerksamkeitsverfolgung in alltagsnahen Situationen, sowie der erstmalige erfolgreiche Nachweis der Verwendung des Ohr-EEG Ansatzes zur Aufmerksamkeitsverfolgung in alltagsnahen, mobilen Messsituationen. Das erste Ergebnis hat bereits gute internationale Sichtbarkeit erzielt, das zweite, technisch relevante Ergebnis wird in Kürze publiziert, internationale Sichtbarkeit erreichen, und im Forschungsfeld mobile EEG neue Standards setzen. Zusammengefasst hat das Projekt zu wichtigen Veröffentlichungen von Forschungsergebnissen geführt und damit die Sichtbarkeit von NPSY in der wissenschaftlichen Community sehr deutlich gestärkt.

4.4 *Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit*

Die Ergebnisse von A2I-EEG haben die Motivation von NPSY, einen closed-loop Ansatz der auditorischen Aufmerksamkeitsdekodierung auf mobilen Endgeräten zu erzielen, weiter erhöht. Auch wenn ein höherer Technologiereifegrad nicht einfach zu erzielen ist, so sollten die Grundprinzipien des propagierten Systems doch innerhalb der nächsten Jahre demonstrierbar und umsetzbar sein. Es haben sich eine Reihe von interessanten Anschlußfragestellungen ergeben, die Partner NPSY in Zukunft angehen wird.

5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es sind in der Projektlaufzeit keine relevanten F&E-Ergebnisse von dritter Seite auf dem Gebiet des Vorhabens bekannt geworden, die nicht Eingang in die Arbeiten des Projekts gefunden hätten.

6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

6.1 *Erfolgte Publikationen zu den Projektergebnissen*

Straetmans, L., Holtze, B., Debener, S., Jaeger, M. & Mirkovic B. (2021). Neural tracking to go: auditory attention decoding and saliency detection with mobile EEG. *J. Neural Eng.*, 18 doi:

Straetmans, L., Adiloglu, K. & Debener, S. (2024). Neural speech tracking and auditory attention decoding in everyday life. *Front. Hum. Neurosci.* 18:1483024. Doi: 10.3389/fnhum.2024.1483024

6.2 Geplante Veröffentlichungen zu den Projektergebnissen

Straetmans, L.*, Haupt,, T.* in prep. Mobile Speech Tracking in Everyday Life with Ear-EEG.

7 Literatur

- [ASS+19] Alharbi M, Straiton N, Smith S, et al. Data management and wearables in older adults: A systematic review. *Maturitas.* 2019 Jun;124:100-110. doi: 10.1016/j.maturitas.2019.03.012.
- [BD17] Bleichner, M & Debener, S. (2017) Concealed, Unobtrusive Ear-Centered EEG Acquisition: cEEGrids for Transparent EEG. *Frontiers in Human Neuroscience.*
- [Dar11] Darlington, K. W. (2011). Designing for Explanation in Health Care Applications of Expert Systems. *SAGE Open*, 1(1), 215824401140861.
<https://doi.org/10.1177/2158244011408618>
- [Den18] Denzinger, J. (Ed.). (2018). *Das Design digitaler Produkte – Entwicklungen, Anwendungen, Perspektiven* (1st ed.). Basel: Birkhäuser.
- [DIN17] DIN Deutsches Institut für Normung. (2017). *DIN EN 62366-1 (VDE 0750-241-1):2017-07 Medizinprodukte – Teil 1: Anwendung der Gebrauchstauglichkeit auf Medizinprodukte.* Berlin: Beuth Verlag.
- [DME+12] Debener S, Minow F, Emkes R, Gandras K, De Vos M. How about taking a low-cost, small, and wireless EEG for a walk? *Psychophysiology.* 2012;49(11):1617-1621. <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1469-8986.2012.01471.x>.
- [HRJ+22] Holtze, B., Rosenkranz, M., Jaeger, M., Debener, S., and Mirkovic, B. (2022). Ear-EEG measures of auditory attention to continuous speech. *Front. Neurosci.* 16:869426. doi: 10.3389/fnins.2022.869426
- [KSB+17] Krueger, M., Schulze, M., Brand, T., & Holube, I., Development of an adaptive scaling method for subjective listening effort, *J Acoust Soc Am.* 2017 Jun;141(6):4680.
- [KSS+24] Kothe, C., Shirazi, S. Y., Stenner, T., Medine, D., Boulay, C., Grivich, M. I., et al. (2024). The lab streaming layer for synchronized multimodal recording. *Neuroscience.* bioRxiv [Preprint]. doi: 10.1101/2024.02.13.580071

-
- [Kuh96] Kuhn, S. (1996). Design for People at Work. In T. Winograd (Ed.), *Bringing design to software* (pp. 273–289). New York, N.Y.; Reading, Mass.: ACM Press ; Addison-Wesley;
- [MBD+16] Mirkovic B, Bleichner M, De Vos M, Debener S 2016 Target Speaker Detection with Concealed EEG Around the Ear. *Frontiers in Neuroscience*.
- [Mik19] MikroBO - Mikroelektronik für permanente, nichtinvasive Blutdruckmessung im Ohr [Online], <https://www.elektronikforschung.de/projekte/mikrobo> (Zugriff am 15.03.2024)
- [MRK+13] Müller A, Rybak K, Klingenheben T, et al. Empfehlungen zum Telemonitoring bei Patienten mit implantierten Herzschrittmachern, Defibrillatoren und kardialen Resynchronisationssystemen. *Kardiologie* 7:181–193 (2013).
- [NH19] Novak, T. P., & Hoffman, D. L. (2019). Relationship journeys in the internet of things: A new framework for understanding interactions between consumers and smart objects. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 47(2), 216–237. <https://doi.org/10.1007/s11747-018-0608-3>
- [OPM+14] O'Sullivan J.A., Power A.J., Mesgarani N., Rajaram S., Foxe, J.J., Shinn-Cunningham, B.G., Slaney, M., Shamma, S.A., Lalor, E.C., Attentional Selection in a Cocktail Party Environment Can Be Decoded from Single-Trial EEG, *Cereb Cortex*. 2015 Jul;25(7):1697-706. doi: 10.1093/cercor/bht355. Epub 2014 Jan 15.
- [PBZ+18] Pevnick JM, Birkeland K, Zimmer R, et al. Wearable technology for cardiology: An update and framework for the future. *Trends Cardiovasc Med*. 2018 Feb;28(2):144-150. doi: 10.1016/j.tcm.2017.08.003.
- [PBZ+18] Pevnick JM, Birkeland K, Zimmer R, et al. Wearable technology for cardiology: An update and framework for the future. *Trends Cardiovasc Med*. 2018 Feb;28(2):144-150. doi: 10.1016/j.tcm.2017.08.003.
- [SN93] Schuler, D., & Namioka, A. (1993). *Participatory design: Principles and practices*. Hillsdale, N.J.: L. Erlbaum Associates
- [SHD+21] Straetmans, L., Holtze, B., Debener, S., Jaeger, M., and Mirkovic, B. (2021). Neural tracking to go: auditory attention decoding and saliency detection with mobile EEG. *J. Neural Eng*. 18:066054. doi: 10.1088/1741-2552/ac42b5
- [TKM17] de Taillez, T., Kollmeier, B., Meyer, B.T., Machine learning for decoding listeners' attention from electroencephalography evoked by continuous speech, *Eur J Neurosci*. 2017 Dec 4.
- [Ver09] Verganti, R. (2009). *Design Driven Innovation: Changing the Rules of Competition by Radically Innovating What Things Mean*. Boston, Mass: Harvard Business Review Press.

-
- [WVW+16] Winneke, A., de Vos, M., Wagener, K., Derleth, P., Latzel, M., Appell, J., Wallhoff, F., Reduction of listening effort with binaural algorithms in hearing aids: an EEG study, Annual Scientific and Technology Conference of the American Auditory Society, Scottsdale, Arizona, 2016 Mar.

A2I-EEG

Augmented Auditive Intelligence

Kurzbericht Uni Oldenburg (NPSY)

Förderkennzeichen 16SV8596

Das Projekt zur Entwicklung und Erprobung mobiler EEG-Technologien zielte darauf ab, neuronale Reaktionen in alltäglichen akustischen Szenarien zu analysieren. Die Universität Oldenburg war an mehreren Arbeitspaketen beteiligt. Im Rahmen von Arbeitspaket (AP) 1 wurde der Stand der Technik mobiler EEG-Technologien untersucht. Dabei wurden die Signalverarbeitung für echtzeitfähige Anwendungen und Hardwarelösungen für Ohr-nahe Elektrophysiologie analysiert. Eine umfassende Literaturrecherche bildete die Grundlage für diese Arbeiten, die kontinuierlich aktualisiert und mit den Partnern geteilt wurde. Zudem wurde ein Ethikantrag für EEG-Studien in Kooperation mit dem Hörzentrum entwickelt und abgeschlossen.

Die Arbeit im Rahmen von AP 3 erstreckte sich über den Zeitraum von 2021 bis 2024 und beinhaltete die Konzeption sowie die Durchführung von Aufzeichnungsstudien. Ziel dieser Studien war es, EEG-Daten in verschiedenen akustischen Szenarien zu erfassen, um die Einsatzmöglichkeiten mobiler EEG-Systeme unter realitätsnahen Bedingungen zu evaluieren. Zwei zentrale Studien wurden entwickelt, wobei eine im Herz-und-Diabeteszentrum Bad Oeynhausen und eine weitere in Oldenburg stattfand. In Oldenburg lag der Schwerpunkt darauf, EEG-Daten unter variierenden akustischen Bedingungen zu erheben, wobei sowohl konventionelle EEG-Kappen als auch Ohr-nahe EEG-Systeme (cEEGrid) verwendet wurden.

Die Szenarien umfassten akustische Bedingungen unterschiedlicher Komplexität, wie etwa die Präsentation eines einzigen Hörbuchs ohne Störgeräusche, die Kombination von Hörbüchern mit Störsignalen oder die Simulation einer Cafeteria-Umgebung. Zusätzlich wurden die Probanden in realistischen Alltagssituationen untersucht, indem sie auf festgelegten Routen außerhalb des Labors oder in öffentlichen Fluren Daten sammelten. Die Erhebung wurde durch die Synchronisierung verschiedener Sensoren, darunter EEG-, Vital- und Akustikdaten, ergänzt. Dabei kam das Lab Streaming Layer-Framework zum Einsatz, um die Datenströme zeitsynchron zu erfassen und einer Auswertung zuzuführen. Obwohl die Datenerhebung aufgrund Pandemie-bedingter Einschränkungen erst im Frühjahr 2022 beginnen konnte, wurde sie bis August desselben Jahres erfolgreich abgeschlossen. Die erhobenen Daten wurden im Anschluss annotiert, dokumentiert und mit den Projektpartnern geteilt.

Im AP 4 wurde die Leistungsfähigkeit eines von Partner Hörzentrum neu entwickelten KI-Algorithmus (s.u.) zur auditiven Aufmerksamkeit analysiert. Um die Ergebnisse bewerten zu können, wurden von uns die in AP 3 erhobenen Daten mit etablierten Methoden wie dem Speech Envelope Tracking analysiert. Diese Methode untersucht die Synchronisation neuronaler Oszillationen mit den Sprachstimuli, auf die sich eine Person konzentriert. Sowohl bei der Verwendung von EEG-Kappen als auch bei cEEGrid-Systemen wurden ähnliche Ergebnisse erzielt, was die Vielseitigkeit der Ohr-nahen Systeme unter Beweis stellte.

Ergänzende Analysen bezogen sich auf Fluktuationen im Alpha- und Theta-Band in Relation zu subjektiven Einschätzungen von Höranstrengung und Ermüdung. Diese Untersuchungen ergaben jedoch keine signifikanten Korrelationen. Auch die Beziehung zwischen Augenbewegungen (Eye Blinks) und Frequenzbandfluktuationen konnte nicht eindeutig belegt werden. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden dokumentiert, um in zukünftigen Studien als Grundlage zu dienen.

Die Evaluationsstudie begann Ende 2023 und zielte darauf ab, die Leistungsfähigkeit des KI Algorithmus zu testen. Aufgrund personeller Engpässe beim Partner Hörzentrum übernahm Partner Uni Oldenburg (NPSY) die Durchführung der Datenerhebung der Studie. Dabei wurde ausschließlich mit EEG-Kappen gearbeitet, um eine qualitativ hochwertige Datenqualität sicherzustellen. Die Studie war in drei Phasen unterteilt, wobei die Probanden jeweils zwischen sitzenden und gehenden Bedingungen wechselten. Ziel war es, die Aufmerksamkeit und Ermüdung der Teilnehmer unter verschiedenen Bedingungen zu bewerten. Insgesamt wurden 19 Datensätze generiert, die aufgrund der algorithmischen Einschränkungen jedoch nicht vollständig ausgewertet werden konnten. Die Weiterentwicklung eines leistungsfähigen Algorithmus bleibt ein offenes Ziel.

Die Ergebnisse des Projekts wurden auf verschiedenen Konferenzen präsentiert, darunter der Workshop „Mobile Health in Kommunikation, Wahrnehmung und Mobilität“ sowie die „Mobile Brain Imaging“-Konferenz. Zusätzlich wurden zwei wissenschaftliche Publikationen in Fachzeitschriften veröffentlicht sowie eine Dissertationsschrift eingereicht. Die wesentlichen Ergebnisse des Projekts sind dort im Detail dargestellt. Diese Publikationen dokumentieren den state-of-the-art im Feld und unterstreichen die Bedeutung mobiler EEG-Technologie für die Analyse neuronaler Prozesse in realitätsnahen Szenarien.

Zusammenfassend belegt das Projekt, dass mobile EEG-Systeme wie das cEEGrid eine wertvolle Alternative zu traditionellen EEG-Kappen darstellen. Trotz der Herausforderungen, wie pandemiebedingter Verzögerungen und personeller Engpässe, konnten diesbezüglich wertvolle Erkenntnisse zum EEG-basierten Aufmerksamkeitstracking in alltagsnahen Situationen gewonnen und bedeutende Fortschritte in der Forschung erzielt werden. Die Ergebnisse legen den Grundstein für zukünftige Weiterentwicklungen im Bereich mobiler EEG-Technologien und deren Anwendung in alltagsnahen Kontexten.