

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Prof. Dr. Surjo Soekadar

Charité – Universitätsmedizin Berlin – CCM –
Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie

QSens: Mensch-Maschine-Schnittstelle basierend auf Quantensensoren (QHMI) - D

Autoren: Prof. Surjo Soekadar, Jan Zerfowski

Förderkennzeichen: 03ZU1110DD

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt unter dem Förderkennzeichen 03ZU1110DD gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor.

Teil I – Kurzbericht QSens –QHMI der Charité

Weltweit sind Millionen Menschen von schweren motorischen Einschränkungen infolge von Amputationen, neuromuskulären Erkrankungen oder Rückenmarks- bzw. Hirnverletzungen betroffen. Diese führen zu gravierenden Beeinträchtigungen der Lebensqualität und stellen Medizintechnik und Rehabilitation vor große Herausforderungen. Mensch-Maschine-Schnittstellen (Human-Machine Interfaces, HMIs) sind ein vielversprechender Ansatz, um durch gezielte Erfassung und Verarbeitung von Körper- oder Hirnsignalen die Steuerung technischer Hilfsmittel wie Prothesen oder Exoskelette zu ermöglichen – idealerweise ohne physischen Kontakt mit dem Körper.

Bisherige Technologien – etwa die Elektromyographie (EMG) oder Elektroenzephalographie (EEG) – stoßen jedoch an physikalische Grenzen, insbesondere bei der räumlichen Auflösung, Signalqualität und Bewegungsfreiheit. Zudem ist deren Anwendung häufig mit Einschränkungen in der Alltagstauglichkeit verbunden. Fortschritte in der Quantentechnologie eröffnen hier neue Perspektiven: Optisch gepumpte Magnetometer (OPMs) und Sensoren auf Basis von Stickstoff-Fehlstellen (NV-Zentren) in Diamantkristallen bieten eine bislang unerreichte Empfindlichkeit und erlauben die kontaktfreie, hochauflösende Messung biomagnetischer Signale des Gehirns und der Muskulatur.

Das Projekt QSens – Mensch-Maschine-Schnittstelle basierend auf Quantensensoren (QHMI) verfolgt das Ziel, alltagstaugliche Schnittstellen zwischen Mensch und Maschine zu erforschen. Zentrale Anwendungsfelder sind die Miniaturisierung der Sensorsysteme, Echtzeit-Steuerung für Gehirn-Computer Anwendungen, und Muskelsignal-basierte Prothesensteuerung.

Im Verlauf des Projekts wurden an der Charité – Universitätsmedizin Berlin verschiedene Systemkomponenten entwickelt, validiert und im Labor getestet. In Zusammenarbeit mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt wurde eine Benchmarking-Methode zur standardisierten Charakterisierung von Magnetfeldsensoren etabliert, die zukünftig auch für NV-Sensoren genutzt werden kann. Dabei wurde eine Methodik zur Messung und Analyse zentraler Parameter wie Sensitivität, Signal-Rausch-Verhältnis, Genauigkeit, Langzeitstabilität und Richtungsgenauigkeit beschrieben. Diese Methodik stellt einen wichtigen Schritt zur Qualitätssicherung und Vergleichbarkeit künftiger Sensorentwicklungen dar.

Zur Erprobung der Sensoren im praktischen Einsatz wurden mehrere Hirnfeldmessungen mit OPMs durchgeführt. Basierend auf der Modulation von Oszillationen im Motor Cortex

bei Bewegungsvorstellung konnte die Machbarkeit einer Echtzeit-Klassifikation von Hirnaktivität gezeigt werden. Ergänzend konnte gezeigt werden, dass auch höherfrequente, auditorisch induzierte Signale um 40 Hz zuverlässig detektiert werden können - ein Bereich der mit klassischen EEG-Methoden nur eingeschränkt messbar ist. Zuletzt wurde eine umfangreiche OPM-Studie durchgeführt, in der die zuverlässige Unterscheidbarkeit (>70%) von diversen mentalen Aufgaben anhand der Hirnsignale gezeigt werden konnte.

Eine wesentliche Innovation ist die Entwicklung individueller Sensorhelme, die auf Basis von MRT-Daten maßgeschneidert werden. Damit lässt sich die Platzierung der Sensoren auf dem Schädel exakt an neuroanatomischen Zielregionen ausrichten. Die automatisierte Herstellung per 3D-Druck ermöglicht eine präzise, reproduzierbare Anwendung in klinischen Studien.

Zudem wurde ein MEG-kompatibles Hand-Exoskelett an die entwickelte Mess- und Auswertungssoftware angebunden. Hierzu wurde eine Programmschnittstelle geschaffen, mit der gemessene Hirnsignale in Echtzeit verarbeitet und künftig zur Steuerung einzelner Fingerbewegungen genutzt werden können. Die Integration bildet eine Grundlage für die Entwicklung eines geschlossenen BCI-Systems mit bidirektionaler Kommunikation zwischen Gehirn und Maschine in der zweiten Projektphase (QHMI2).

Insgesamt zeigen die bisherigen Ergebnisse, dass quantensensorbasierte Magnetfeldmessung eine vielversprechende Grundlage für neuartige HMIs bildet. Die flexible, kontaktlose und präzise Erfassung von Hirn- und Muskelaktivität eröffnet neue Möglichkeiten für die klinische Diagnostik, Neurorehabilitation und Prothetik – insbesondere bei vulnerablen Patientengruppen. Nur die enge Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen wie der Universität Stuttgart, Fraunhofer IPA, der PTB und Industriepartnern wie Bosch und Ottobock, erlaubte den interdisziplinären und zukunftsweisenden Ansatz, mit dem die Vorgestellten Ergebnisse erst ermöglicht wurden.

Durch den systematischen Ausbau der Sensorik, Signalverarbeitung und Anwendungsszenarien legt QSens den Grundstein für eine breite medizinische Nutzung quantenbasierter HMIs – und damit für eine neue Ära der Mensch-Maschine-Interaktion.

Teil II – Eingehende Darstellung

Im Rahmen des Projekts *QSens – Quantensensorische Mensch-Maschine-Schnittstelle (QHMI)* wurden in der ersten Phase (2021–2024) bedeutende Fortschritte bei der Entwicklung neuartiger Schnittstellentechnologien erzielt, die auf optisch gepumpten

Magnetometern (OPMs) und NV-Magnetometern basieren. Die Arbeiten der Charité Berlin konzentrierten sich dabei auf die Validierung dieser Technologie im medizinischen Umfeld mit Fokus auf Sensorcharakterisierung und die Entwicklung von Human-Machine Interfaces (HMI).

Ausgehend von der ursprünglichen Vorhabenbeschreibung, in der die Realisierbarkeit eines OPM-basierten Mensch-Maschine-Interfaces dargelegt wurde, konnte im Berichtszeitraum ein skalierbarer, multikanalfähiger Aufbau entwickelt werden. Durch das System konnten unterschiedliche Paradigmen zur Bewegungsvorstellung aufgenommen, in Echtzeit analysiert und für Echtzeit-Feedback-Anwendungen verwendet werden. Die wesentlichen technischen Herausforderungen – insbesondere die OPM-Platzierung, Charakterisierung und Kontrolle von Bewegungsartefakten, Online-Klassifikation und Systemintegration – wurden systematisch adressiert.

Abweichungen vom Zeitplan ergaben sich vor allem durch Lieferengpässe bei Sensorhardware und Schwierigkeiten bei der Rekrutierung wissenschaftlichen Personals. Letzteres wurde durch eine Umverteilung der Aufgaben und ergänzende Unterstützung durch erfahrene Wissenschaftler kompensiert. Die Projektarbeiten blieben dabei innerhalb des finanziellen Rahmens. Im Rahmen des Projekts wurden mehrere OPM-Sensoren der neuesten Generation angeschafft, um auch Studien mit Sensorabdeckung des gesamten Kopfes zu ermöglichen und die erreichbare räumliche Auflösung weiter zu verbessern. Da die Echtzeit-Auswertung der Daten rechnerisch sehr anspruchsvoll ist, wurde eine Workstation zur Biosignal-Datenverarbeitung angeschafft. Diese wurde sowohl zur Aufnahme der Experimentdaten als auch zur späteren Analyse eingesetzt.

Ein zentrales Ergebnis ist die Etablierung eines standardisierten Benchmarkverfahrens zur sensorübergreifenden Charakterisierung von Quantenmagnetfeldsensoren, das gemeinsam mit der PTB entwickelt wurde. Die Charakterisierung relevanter Parameter wie Sensitivität, Bandbreite, linearer Messbereich und Frequenzantwort bildet die Grundlage für Vergleiche der verschiedenen Messtechnologien und kann auch auf zukünftige Entwicklungen übertragen werden. Das systematische Benchmarking fördert die gezielte Weiterentwicklung der Sensoren und erlaubt informierte Entscheidungen, welche Messtechnologie am besten für ein bestimmtes Anwendungsszenario geeignet ist. (Elzenheimer, E. *et al.* Key Metrics and Experimental Test Bench for Assessing Highly-Sensitive Magnetometers in Research. *IEEE Sensors Journal* 1–1 (2024) doi:10.1109/JSEN.2024.3491164)

Außerdem wurden an der Charité unterschiedliche Experimente zur Validierung der Sensoren für biomagnetische Messungen durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass

Modulationen der neuronalen Oszillation durch Bewegungsvorstellung, insbesondere im Mu-Rhythmus bzw. Alpha Frequenzband (8-16 Hz) erfolgreich klassifiziert werden konnten. Es wurde so ein Human-Machine Interface implementiert, das dem Benutzer automatisiert und zuverlässig per visuellem Feedback eine Rückmeldung zur Genauigkeit der Klassifikation gibt. Die Ergebnisse der Forschung wurden auf der Fachkonferenz Biomag 2022 als Poster vorgestellt (Zerfowski, J. *et al.* Motor-Imagery Brain-Computer Interface Using Optically Pumped Magnetometers. 2022. Biomag Conference 2022, Birmingham, UK).

Die gemessenen MEG-Daten wurden in Zusammenarbeit mit USTUTT.ISS eingehend untersucht und analysiert. Da die Menge der verfügbaren mit Quantensensoren gemessenen neurologischen Daten, insbesondere zu Anfang des Projekts, recht gering war, musste auch auf alternative Datenquellen zurückgegriffen werden. Es wurden daher anhand verschiedener EEG-basierter Datensätze neue Methoden entwickelt, die sich 1:1 auf MEG-Daten übertragen lassen. Hierfür wurden sowohl traditionelle Machine Learning-Techniken sowie moderne Deep Learning-Methoden eingesetzt. Es konnten so zum Teil wesentliche Verbesserungen gegenüber herkömmlichen Analysemethoden erzielt werden. Insbesondere wurde auch die Übertragbarkeit der trainierten Algorithmen zwischen verschiedenen Probanden verbessert, sodass weniger Trainingsdaten für neue Probanden gesammelt werden müssen. Dies ist vor allem im Einsatz am Patienten hilfreich, da für diese nur kürzere Experimente machbar sind. Die Ergebnisse dieser Arbeiten wurden bereits in einschlägigen Fachzeitschriften und Konferenzpublikationen veröffentlicht oder zur Begutachtung eingereicht. (Wimpff, M., Gizzi, L., Zerfowski, J. & Yang, B. EEG motor imagery decoding: a framework for comparative analysis with channel attention mechanisms. *J. Neural Eng.* 21, 036020 (2024); Wimpff, M., Zerfowski, J. & Yang, B. Towards calibration-free online EEG motor imagery decoding using Deep Learning. in *ESANN 2024 proceedings* 589–594. doi:10.14428/esann/2024.ES2024-26.; Wimpff, M., Zerfowski, J. & Yang, B. Tailoring Deep Learning for Real-Time Brain-Computer Interfaces: From Offline Models to Calibration-Free Online Decoding. Preprint, 2024)

Ebenfalls wurden an der Charité Messungen zur Untersuchung von auditorisch evozierten Feldern durchgeführt. Diese Felder im Bereich über 30 Hz sind mit herkömmlichen elektrischen Messmethoden nur bedingt messbar, da der menschliche Schädel das Signal durch seine schlechte Leitfähigkeit dämpft und verzerrt. Um die Eignung von Quantensensoren für solche Messungen zu evaluieren, wurden evozierte Hirnaktivitäten durch auditorische Stimuli erzeugt und mit einer Kontrollkondition verglichen. Es konnte sowohl die räumliche Dipolstruktur der neuronalen Antwort, also auch die direkte

Phasenabhängigkeit zwischen Stimulus und Hirnantwort, gezeigt werden. Die Ergebnisse dieser Studie wurden auf verschiedenen Fachtagungen präsentiert und soll demnächst als Publikation eingereicht werden. (Jonany, V. *et al.* Reliable Assessment of Evoked Brain Responses Targeted by Transcranial Alternating Current Stimulation (tACS) Using Optically Pumped Magnetometers (OPMs). 2022. Biomag Conference 2022, Birmingham, UK; Jonany, V. *et al.* Reliable Assessment of Evoked Brain Responses Targeted by Transcranial Alternating Current Stimulation (tACS) Using Optically Pumped Magnetometers (OPMs). 2023. 5th International Brain Stimulation Conference, Lisbon, Portugal).

Die Arbeiten wurden in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Bosch durchgeführt, der im Rahmen des Projekts auch ein eigenes Messsystem erhalten hat. Die Charité konnte hier mit den bereits gesammelten Erfahrungswerten bei der Einrichtung und Charakterisierung des Systems unterstützen.

Die Etablierung von Quantensensoren als eine dem EEG überlegenen Methode für Human-Machine Interfaces erfordert zudem die Demonstration zuverlässiger Multiklassen Klassifizierung von neuronalen Daten. Ein erstes Experiment zur Validierung der Methode wurde zusammen mit der PTB und Universität Stuttgart (ISS) durchgeführt. Hierfür wurden 12 gesunde Proband:innen mit einem kombinierten 40-Kanal OPM-System gemessen, während sie fünf verschiedene mentale Aufgaben durchführten (vorgestellte Handbewegungen und Fußbewegungen, mentale Subtraktion, Wortvorstellungen, mentale Rotation). Es konnte gezeigt werden, dass eine individuelle Auswahl von drei bis vier Klassen in fast allen Nutzer:innen eine Klassifikationsgenauigkeit von über 70% erlaubt. Eine entsprechende Publikation dieser Ergebnisse befindet sich aktuell im Review-Prozess.

Um die Passgenauigkeit der Sensoren zu verbessern, und gezielte Messungen mit erhöhter Sensor-Auflösung durchzuführen, wurde außerdem eine 3D-gedruckte, individualisierte Sensorhalterung für OPMs entwickelt, die sich an MRT-Daten orientiert. Sie kann weitestgehend automatisiert generiert werden und ermöglicht die genaue Platzierung der Sensoren über spezifischen kortikalen Regionen, was wiederum die Qualität der Quellenlokalisierung und damit der Datenverwertung entscheidend verbessert.

Neben der akkuraten Sensorplatzierung ist auch die Vermeidung und Eliminierung von Signalstörungen ein elementarer Bestandteil wissenschaftlicher Messungen. Ein großer Vorteil von neuartigen Quantensensoren ist ihre geringe Größe und Mobilität. Durch die bestehenden Restfelder in magnetisch geschirmten Umgebungen können bestimmte Bewegungen jedoch Störsignale erzeugen, wenn sich die Sensoren innerhalb der statischen Restfelder und Gradienten verschieben oder verkippen. Hierfür wurde eine

Messreihe durchgeführt, in der verschiedene natürliche Bewegungen innerhalb der magnetisch geschirmten Umgebungen durchgeführt wurden. Anhand der gemessenen Sensorstörungen wurde dann eine Charakterisierung der Artefakte vorgenommen: Es konnte gezeigt werden, dass die meisten Bewegungen keine prohibitiv großen Störungen erzeugen, bzw. kleine oder langsame Störungen durch einfache Filter aus dem Signal eliminiert werden können. Lediglich größere Bewegungen wie Kopfnicken können zu Störungen führen, die je nach Messumgebung vermieden werden sollten.

Zuletzt wurde auch die Einbindung eines bereits an der Charité vorhandenen Hand-Exoskeletts in die BCI-Software implementiert. Das Exoskelett kann nun manuell aus der Software gesteuert und einfach in automatisierte Analysepipelines eingebunden werden. Zusammen mit dem bereits etablierten OPM-BCI-System und dem Ansatz zur Unterscheidung mehrerer Klassen, stehen nun fast alle notwendigen Komponenten zur Verfügung um in QSens - QHMI2 ein vollwertiges Hand-Exoskelett-BCI basierend auf OPM-Sensoren zu implementieren.

Die in Arbeitspaket 1 in Verantwortung von Charité zu erreichenden Projektziele und Meilensteine wurden somit vollumfänglich erfüllt. Abweichungen vom Zeitplan ergaben sich vor allem durch Lieferengpässe bei Sensorhardware und Schwierigkeiten bei der Rekrutierung wissenschaftlichen Personals. Letzteres wurde durch eine Umverteilung der Aufgaben und ergänzende Unterstützung durch erfahrene Wissenschaftler kompensiert. Die Projektarbeiten blieben dabei innerhalb des finanziellen Rahmens, wobei aufgrund der verzögerten Sensoranschaffung Mittel aus dem ersten Haushaltsjahr ins zweite übertragen wurden.

Der gesellschaftliche Nutzen des Projekts und der vorgestellten Ergebnisse zeigt sich in mehreren Aspekten: Erstens ermöglicht Quantensensor-basierte Hirnsignalverarbeitung neue Steuerungskonzepte in der Neurorehabilitation und kann so mittelfristig zu effektiveren Rehabilitationsmaßnahmen im Klinikalltag beitragen. Die entwickelten Schritte zur Charakterisierung von Magnetfeldsensoren und die durchgeführten Studien basierend auf OPM-Sensoren bilden eine wichtige Voraussetzung für die Verbesserung von allen Arten von Quantensensoren, welche bisher noch nicht im Klinikalltag integriert sind. Die Projektarbeiten zeichnen sich durch ihre Interdisziplinarität, einen hohen Innovationsgrad und die internationale Relevanz aus. Die Nutzungspotenziale reichen von medizinischer Diagnostik über Neurorehabilitation bis zu neuartigen Mensch-Maschine-Schnittstellen im Consumer-Bereich (z.B. Fitness-Tracking, Neurofeedback).

Aus wirtschaftlicher Sicht schaffen die erforschten Quantensensortechnologien die Grundlage für eine klinisch anwendbare, mobile und kostengünstigere Alternative zur

SQUID-MEG-Technologie. Die gesammelten Erfahrungswerte tragen direkt zur Weiterentwicklung und Miniaturisierung von NV-Magnetometern bei, deren Kommerzialisierung in QHMI2 weiter vorangebracht wird.

In Bezug auf Fortschritte außerhalb des eigenen Projektkonsortiums konnten im Beobachtungszeitraum keine konkurrierenden Entwicklungen identifiziert werden, die das Vorhaben unmittelbar beeinträchtigen. Es wurden jedoch mehrere Arbeiten zur Verbesserung von OPM-Sensorik publiziert, deren Ergebnisse zur Integration in QHMI und berücksichtigt wurden. NV-Zentren-basierte Sensoren sind nach wie vor nicht frei am Markt verfügbar, weshalb deren geplante Integration in Phase 2 nicht durch externe Entwicklungen behindert wird.

Die im Projekt durchgeführten Experimente sind bereits teilweise zur Veröffentlichung eingereicht oder wurden auf einschlägigen Fachkonferenzen vorgestellt (s.o). Weitere Publikationen sind nach Abschluss der vollständigen Datenauswertung geplant.

Die Charité – Universitätsmedizin Berlin spielte im QHMI-Projekt nicht nur eine zentrale Rolle in der Durchführung des eigenen Arbeitspakets AP 1.1 (MEG-Teststand – Proof of Principle HMI mit OPMs), sondern auch als koordinierender und vermittelnder Partner im interdisziplinären Konsortium. Im Rahmen des Projekts übernahm die Charité – Universitätsmedizin Berlin die Rolle der Arbeitspaket-Leitung für das Arbeitspaket 1, in dem zusammen mit Bosch, Universität Stuttgart (Institut für Signalverarbeitung und Systemtheorie), Ottobock und Fraunhofer IPA alle Schritte von Sensor-Benchmarking, Hirn- und Muskelsignal-Aufzeichnung bis hin zur Datenanalyse durchgeführt wurden. Hierfür konnten sich die Partner bei monatlichen von der Charité initiierten und moderierten Organisationsmeetings abstimmen. Die Zusammenarbeit der Projektpartner war durch exzellenten fachlichen Austausch und gegenseitige Wertschätzung geprägt.