Quantensensoren zur magnetischen Messung

Neue Einblicke in die Muskelphysiologie – kontaktlos und dreidimensional

Muskelaktivität und Trainingseffekte kontaktlos messen: Mit hochsensitiven Quantensensoren setzen Forschende der Universitäten Tübingen und Stuttgart neue Maßstäbe. Die Technologie könnte die klinische Diagnostik, Trainingssteuerung und neurowissenschaftliche Forschung revolutionieren.

Muskelermüdung betrifft viele – ob durch neurologische Erkrankungen, Unfallfolgen oder beim Sport. Was genau passiert im Muskel, wenn die Kraft nachlässt, und was sind die zugrunde liegenden Mechanismen? Ist eine frühzeitige Erkennung der Muskelermüdung möglich, noch bevor der Mensch selbst sie bemerkt? Ein interdisziplinäres Forschungsteam aus Tübingen und Stuttgart liefert neue Antworten: Mit Quantensensoren können sie die biomagnetische Aktivität der Muskulatur messen und fanden heraus, wie sich die Leitungsgeschwindigkeit von Signalen während der Ermüdung verändert. Das Besondere daran ist, dass die Messungen vollständig kontaktlos sind, was zeitsparend, schmerzfrei und auch wiederholt anwendbar ist. Der Hintergrund: Wenn ein Muskel aktiv ist, fließen elektrische Ströme, die winzige Magnetfelder erzeugen – also extrem schwache Signale, die sich jedoch mit Quantensensoren messen lassen.

Muskelaktivität neu messen durch Magnetomyographie



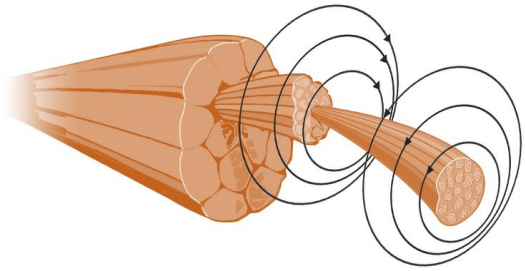
Prof. Dr. Justus Marquetand ist Neurowissenschaftler, Facharzt für Neurologie und Arbeitsgruppenleiter an den Universitäten Tübingen und Stuttgart.
© Marquetand

Die Geschwindigkeit, mit der diese schwachen Signale entlang der Muskelfasern geleitet werden (Muscle Fiber Conduction Velocity, MFCV), ist ein wichtiger diagnostischer Parameter. Eine verringerte MFCV kann auf Muskelermüdung, -abbau oder Nervenschäden hinweisen. Außerdem leiten trainierte Muskeln Signale schneller als untrainierte, das heißt die Messung der MFCV kann genutzt werden, um Trainingsfortschritte sowie den Erfolg von Rehabilitation gezielt zu verfolgen.

„Ein etabliertes Verfahren für die Messung der Muskelaktivität ist die Elektromyographie, kurz EMG“, erklärt Prof. Dr. Justus Marquetand, Leiter der Arbeitsgruppe Magnetomyographie am Hertie-Institut für klinische Hirnforschung in Tübingen und Wissenschaftler an der Universität Stuttgart. Allerdings hat die EMG Grenzen: Elektroden müssen auf die vorbereitete Haut aufgebracht werden, was zeitaufwendig ist und Hautirritationen verursachen kann. Die daneben häufig im klinischen Kontext angewandte invasive EMG mit Nadelelektroden, die für den Nachweis neuromuskulärer Erkrankungen nötig ist, ist schmerzhaft und wird daher nicht von allen Menschen toleriert, z. B. von Kindern. Folglich sucht Marquetand stetig neue Methoden, die schnell, kontaktlos und schmerzfrei dieselbe oder komplementäre Information zur etablierten EMG bieten. „Da elektrische Ströme Magnetfelder erzeugen, lässt sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit auch berührungslos über die Magnetomyographie (MMG) messen. Herzstück des Systems sind Quantensensoren“, sagt Marquetand.

Quantensensoren neu aufgelegt

Beim Thema Quanten bleibt der Wissenschaftler, der zur Fragestellung „Quantensensorische Anwendungen in der klinischen Neurophysiologie“ habilitiert hat, gerne auf dem Boden der Tatsachen: „Schon der Begriff Quantensprünge ist eigentlich fehlgeleitet. Ein Quant bewegt sich außerhalb unserer Erfahrungswelt – es ist gewissermaßen die kleinste Einheit einer Größe.“ Klein ist also grundlegend. Während in der Elektrophysiologie Signale im Bereich von 10^{-4} (ein Zehntausendstel) üblich sind, lassen sich verschiedene quantenphysikalische Phänomene für Messungen im Bereich 10^{-12} (ein Billionstel) nutzen. Schlüsselrolle dabei spielen Quantensensoren.

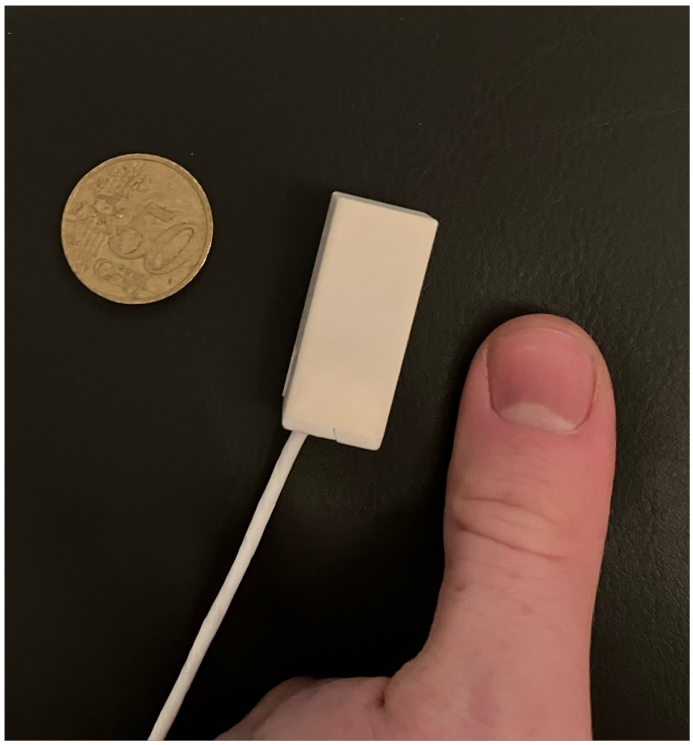


Durch die elektrische Aktivität der Muskelzellen einer Muskelfaser entsteht ein Magnetfeld.
© Marquetand

Ganz neu ist die Idee nicht, denn bereits 1972 wurde die MMG vorgeschlagen, mit sogenannten supraleitenden Quanteninterferenzdetektoren, kurz SQUIDs. Diese biomagnetischen Sensoren gelten als Goldstandard für feinste magnetische Messungen, erfordern jedoch eine kryogene Kühlung auf −268 °C. Dies setzt eine starre und große Bauweise der Systeme voraus, wie man sie für die Messung von Gehirnströmen kennt. Marquetand nennt eine weitere, an der Uni Stuttgart vorangetriebene Sensortechnologie: „Stickstoff-Vakanz-Zentren (NV-Zentren), also atomare Defekte in Diamantkristallen, sind hochinnovativ. Bei der MMG konnten sie die erforderliche Empfindlichkeit allerdings noch nicht erreichen.“ Vielversprechend hingegen für die Studien von Marquetand: optisch gepumpte Magnetometer (OPM). Der extrem empfindliche Quantensensor ermöglicht hochauflösende Messungen schwacher Magnetfelder, jedoch ohne die Notwendigkeit einer kryogenen Kühlung, sodass jeder Sensor nur circa daumengroß ist und dadurch flexibel am Muskel der Wahl positioniert werden kann.

Krankheiten besser erkennen

Kontaktlose, präzise Einblicke in die neuromuskuläre Gesundheit bieten besonders in der Pädiatrie großes Potenzial. Da die Messung berührungs- und schmerzlos erfolgt, wird sie von Kindern gut akzeptiert. So lassen sich neuromuskuläre Veränderungen frühzeitig erkennen und gezielt behandeln.



Der Quantensensor ermöglicht durch seine extrem kompakte Bauweise eine flexible Position am Muskel.
© Marquetand

Das Team um Marquetand hat im letzten Jahr mehrere Studien veröffentlicht, von denen zwei hervorstechen. In der ersten Studie konnten die Forschenden erstmals zeigen, dass sich die Leitungsgeschwindigkeit von Muskelfasern mithilfe von OPM-Sensoren magnetisch messen lässt und die Innervationszone eines Muskels – die Region, in der die Nervenenden die Muskelfasern erreichen – berührungslos lokalisiert werden kann.

Bestätigt wurde damit auch das zugrunde liegende Prinzip: Es basiert auf der sich ausbreitenden elektrischen Aktivität, die von Motoneuronen an ihren innervierten Muskelfasern induziert wird und sich entlang der Muskelfasern ausbreitet; und zwar ausgehend von der Innervationszone in beide Richtungen. Zudem zeigte sich, dass mit steigender Muskelkraft auch die Leitungsgeschwindigkeit zunimmt. Die magnetische Methode liefert somit vergleichbare Ergebnisse wie die EMG – nur dass kontaktlos gemessen wurde. Diese Erkenntnisse ebnen den Weg für weitere Entwicklungen und den Einsatz von Quantensensoren in der klinischen Neurophysiologie.

Räumliche Darstellung bildet Muskelanatomie nach

In der zweiten Studie trainierten Probandinnen und Probanden ihren Bizeps über vier Wochen, um Anpassungen durch Krafttraining verfolgen zu können. „In einem multimodalen Versuchsdesign mit gleichzeitigen Messungen mittels OPM, MMG,

EMG und Kraftmesser konnten wir zeigen, dass das kontaktlose Verfahren vergleichbare Ergebnisse liefert wie die etablierte EMG“, so Marquetand. Das Besondere: Signalquelle und Sensor sind getrennt. Wird das Signal im rechten Winkel zu den Muskelfasern gemessen, erhält man dreimal mehr Informationen als mit einer Elektrode auf der Haut. Die Muskelfasern sind wie Kabel, in denen Strom ein Magnetfeld erzeugt. „Aus dem gemessenen Magnetfeld lässt sich der Verlauf der Fasern und damit ihre räumliche Struktur quasi rekonstruieren“, so der Forscher.

Ohne hier ins technische Detail gehen zu wollen, könnten so etwa Handmuskeln gezielt mehrere Sensoren ansteuern und damit Anwendungen für eine kontaktlose und potenziell präzisere Prothesensteuerung ermöglichen, da das MMG-Signal informationsreicher zu sein scheint. Über die Therapiekontrolle hinaus hat die MMG das Potenzial, zusätzliche Informationen über die Muskulatur zu liefern, die für den altersbedingten Muskelabbau, die sportliche Leistungsfähigkeit sowie Erkrankungen wie diabetische Neuropathie und andere chronische Leiden relevant sind. Zusätzlich könnte sie Zugang zu einer neuromuskulären Diagnostik für jene Patientinnen und Patienten ermöglichen, bei denen eine EMG nicht möglich ist. Gleichzeitig nennt Marquetand die Herausforderungen: „Die Technologie muss noch sensibler, robuster, rauscharmer und günstiger werden. Dazu sind weitere Studien nötig.“

Zukunftscluster QSens: Baden-Württemberg als Pionier in Quantensensorik

Hürden sind nach Marquetand hohe Bürokratie, mangelnde Digitalisierung sowie begrenzte Antrags- und Finanzierungsmöglichkeiten: „Zudem ist eine stärkere Vernetzung zwischen Kliniken und Forschungsinstituten entscheidend, um Diagnostik und Therapie gezielt voranzubringen.“ Ein Beispiel für eine erfolgreiche Kooperation ist der vom BMFTR geförderte Zukunftscluster Quantensensoren der Zukunft (QSens), in dem Universitäten, Forschungseinrichtungen und Industriepartner gemeinsam an innovativen Sensorlösungen arbeiten und die Vorreiterrolle Deutschlands in der Quantensensorik stärken.

Literatur:

Baier L. et al. (2025): Contactless measurement of muscle fiber conduction velocity -a novel approach using optically pumped magnetometers. J Neural Eng. 16;22(2). https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1741-2552/adc83b?utm_source=researchgate.net&utm_medium=article

Brümmer T. et al. (2025): Training adaptations in magnetomyography, Journal of Electromyography and Kinesiology 103012, ISSN 1050-6411. https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2025.103012

Fachbeitrag

02.06.2026
Simone Giesler
© BIOPRO Baden-Württemberg GmbH

Weitere Informationen

Prof. Dr. Justus Marquetand
Hertie-Institut für klinische Hirnforschung
Abteilung Neuronale Dynamik und Magnetenzephalographie
Universitätsklinikum Tübingen

Institut für Modellierung und Simulation Biomechanischer Systeme
Universität Stuttgart
Tel.: +49 (0) 7071 29 81196
E-Mail: Justus.marquetand(at)uni-tuebingen.de

Gründer des Telemedizin-Start-ups Cerebri zur digitalen EEG-Befundung bei neurologischen Erkrankungen:

- Cerebri GmbH
- Zukunftscluster QSens

Der Fachbeitrag ist Teil folgender Dossiers



Bioanalytik - Neue Techniken zur Charakterisierung biologischen Materials



Medizintechnik - Technik für die Gesundheit



Bildgebende Verfahren in der medizinischen Diagnostik



Die Quantenrevolution der Gesundheitsindustrie

Diagnostik | Medizintechnik | Neurobiologie | translationale Forschung | Bildgebende Verfahren | Muskel | Universität Tübingen | Universität Stuttgart | Patientenversorgung | Quantentechnologie