

Bild: Rudolf A. Blaha

Radarkontrolle am Bett

EEG-Haftpatch und Radar bringen das Schlaflabor nach Hause

Schlafprobleme sind verbreitet, Plätze im Schlaflabor hingegen rar. Mit möglichst wenig störender Sensorik wollen Forscher Biowerte während des Schlafs in gewohnter Umgebung messen – mit selbstklebenden Elektroden im Gesicht und Radargerät auf dem Nachttisch.

Von Arne Grävemeyer

Wenn ein Mensch nachts nicht gut schläft oder sogar am Tag häufig kurz einnickt, dann können Mediziner das Schlafverhalten am gründlichsten nach ein oder zwei Nächten im Schlaflabor analysieren. Bei der sogenannten Polysomnografie kommt die ganze Palette verfügbarer Messmethoden zum Einsatz: Die Aufnahme der Hirnströme (Elektroenzephalografie, EEG) erkennt die Schlafphasen und den Traumschlaf, das Elektrokardiogramm (EKG) verfolgt Herzfrequenz und -rhythmus, Mikrofone belauschen die Schnarchgeräusche, ein Brustgurt misst die Atembewegungen, Elektroden messen die Muskelspannung des Kinns sowie

Beinmuskelnbewegungen, ein Fingersensor die Sauerstoffsättigung des Blutes, ein anderer Sensor den Atemfluss und eine Infrarotkamera behält Körperlage und Schlafbewegungen im Blick. Weitere Messungen etwa des Blutdrucks oder von nächtlichen Erektionen können hinzukommen.

Ein Patient, der solchermaßen mit vielen Elektroden, Sensoren, Gurten und Schnallen ausgestattet, von Kameras überwacht und von Pflegenden betreut wird, schläft im Labor möglicherweise in der ersten Nacht gar nicht ein – auf jeden Fall ist die Situation anders als daheim. Trotz der vielfältigen Messmethoden sind die

alltäglichen Schlafprobleme eines Patienten dann im Schlaflabor nicht zu beobachten. Abgesehen davon sind die Plätze in den gut ausgestatteten Schlaflaboren begrenzt, lange Wartelisten für Termine sind die Folge.

Ein Team um Insa Wolf am Fraunhofer-Institut für Digitale Medientechnologie (IDMT) in Oldenburg arbeitet an komfortableren Sensorsystemen, die man sich vor dem Einschlafen selbst anlegen kann und die den Schlaf in den eigenen vier Wänden möglichst wenig stören. Zentrale Komponenten sind ein selbsthaftendes Elektrodenpatch für das EEG und ein Radargerät auf dem Nachttisch.

EEG zum Selbermessen

Bereits vor sieben Jahren ist an der Universität Oldenburg das sogenannte cEE-Grid entwickelt worden, eine biegsame, C-förmige Elektrodenschablone, die hinter das Ohr geklebt wird und mobile EEG-Aufnahmen außerhalb des Labors ermöglicht. Dieses System haben die Forscher am IDMT nun weiterentwickelt. Ihr heutiges flexibles und weiches Elektrodenpatch haftet auf einer Gesichtshälfte und hinter dem Ohr. Es umfasst inzwischen acht Elektroden, um Hirnaktivität als EEG und Augenbewegungen mittels einer Elektrookulografie (EOG) zu erfassen. Zwei weitere beobachten die Muskelbewegungen am Kinn. Ein leitfähiges Material an den Elektroden senkt den elektrischen Widerstand zur Haut. Durch eine Klebefläche bleibt das Patch auch ohne Kopfband und ohne permanenten Druck an Ort und Stelle. Allerdings ist es für einen ausreichenden Halt auf haarlose Hautstellen angewiesen.

Beim Anlegen kann sich der Patient an zwei markanten Punkten am Kopf orientieren. Das ist erstens der Tragus-Knorpel vor dem Ohr und zweitens die Erhebung des Jochbeins oberhalb der Wange. Geplant sind künftig drei Größenvarianten für das Elektrodenpatch. Kleinere Unterschiede zwischen individuellen Kopfformen gleicht der Träger aus, indem er das elastische, biegeschlaffe Material in der benötigten Form auflegt. In Labortests mit einem Prototypen gelang es zwölf Probanden beim ersten Versuch, das Patch anzulegen. Sechs von ihnen erzielten allerdings mit ein oder zwei Elektroden, meist denen hinterm Ohr, keine optimale Signalqualität, mit den übrigen Elektroden aber schon.

„Die Messungen im Schlaflabor sind sicherlich der Goldstandard. Das gilt auch

für das EEG dort mit zehn oder mehr Einzelelektroden über den Kopf verteilt und weiteren Elektroden, um Augen- und Muskelaktivitäten aufzunehmen. Aber die Daten aus unserem mobilen EEG sind inhaltlich und qualitativ sehr ähnlich“, berichtet Wolf gegenüber c't. Im Prinzip wird aus den Messungen der am Kopf verteilten Elektroden und den Differenzen zwischen ihnen eine Karte der Hirnaktivität erstellt. Das sei auch mit Elektroden möglich, die enger beieinander liegen, wenngleich das Signal-Rausch-Verhältnis dann ungünstiger ist, sagt Wolf.

Anders als im Schlaflabor, wo Mediziner die EEG-Messungen auswerten, setzen die Oldenburger auf autonome Auswertungen mittels Machine-Learning-Verfahren. Damit wird es im Hausgebrauch möglich, die verschiedenen Schlafphasen in den EEG-Daten zeitlich zuzuordnen. Die Ergebnisse zeigten in Vergleichstests eine Qualität, die der Einschätzung von Medizineren nahekommt.

Jede Regung auf dem Schirm

Einen großen Schritt hin zu weniger Sensoren am Körper bedeutet der Einsatz eines Radargeräts auf dem Nachttisch, das vor allem die Atmung des Schlafenden beobachtet. Dafür ist am IDMT ein unscheinbarer schwarzer Prototyp entstanden, der 15×12×6 Zentimeter misst. Das Radar hat einen Wirkungsradius von etwa drei Metern in den Raum hinein und Beobachtungswinkel horizontal und vertikal von jeweils 120 Grad. „Außer Metall und Wasserflächen durchdringen die Funkwellen die meisten

c't kompakt

- Ein EEG-Pflaster mit Klebeelektroden können Anwender zu Hause eigenständig anlegen.
- Kombiniert mit Radar und Mikro lassen sich damit schon viele für Schlaflabore typische Daten aufnehmen.
- Langzeitdaten aus dem gewohnten Schlafumfeld versprechen neue wissenschaftliche Erkenntnisse.

Materialien und machen die Bewegungen eines menschlichen Körpers sehr gut sichtbar“, sagt IDMT-Forscher Lars Hornig. Es gibt also keine Einschränkungen für das Bettzeug oder den Schlafanzug. Das Radargerät muss lediglich auf die schlafende Person ausgerichtet werden und in unmittelbarer Nähe zum Bett stehen.

Das Radar erkennt Abstandsänderungen im Submillimeterbereich und verfolgt die Bauchbewegungen beim Atmen. Dabei kommt es dem System zugute, dass sich der Bauch beim Einatmen in alle Richtungen ausdehnt. Auch wenn sich ein Schlafender etwa gedreht hat, lassen sich die Atembewegungen aus fast jeder Richtung erkennen. In Versuchen erzielte das Radar ähnlich gute Erkennungsergebnisse wie ein typischer Brustgurt im Schlaflabor.

Zusätzlich zur Atemfrequenz kann das Radar auch die schnellere Pulsfrequenz



Bilder: Fraunhofer IDMT/Anika Bödecker

Das flexible Elektrodenpatch sollen Anwender selbst anlegen können, bevor sie schlafen gehen. Die Entwickler haben für ihre mobile EEG-Sensorik inzwischen auch modische Tattoo-Muster entworfen.



Bild: Fraunhofer IDMT/Anika Bödecker

Berührungslos vom Nachttisch aus misst ein Radargerät die Atmung und registriert zudem unruhige Schlafbewegungen.

mung. Aber erst durch die parallele EEG-Messung lassen sich die unterschiedlichen Schlafphasen sicher unterscheiden und auch zeitlich genau bestimmen.

Und auch wenn das Radargerät selbst die schnellen Pupillenbewegungen im REM-Schlaf registrieren könnte, erfassen die EOG-Elektroden am Auge dieses Phänomen zuverlässiger. Die EEG-Daten zeigen überdies, ob damit ein gesunder Traumschlaf einhergeht.

Ein heikler Punkt ist die Schlafapnoe, der zeitweilige Atemstillstand während des Schlafes. Derartige Atemaussetzer in der Nacht führen, wenn sie gehäuft auftreten, zu Tagesmüdigkeit und begünstigen Sekundenschlaf im Tagesablauf. Sie haben zudem langfristige Auswirkungen, die bis zum Herzinfarkt oder Schlaganfall reichen können. Auch die Atemaussetzer erkennt das Radar. Aber das Zusammenspiel aus einem Anstieg des Kohlendioxidgehalts im Blut, der darauf folgenden Alarmreaktion im Gehirn und der resultierenden Weckreaktionen offenbaren erst die Blutsauerstoffmessung und das EEG. Nur damit lässt sich auch nachweisen, ob der Schlafende in gesundem Schlaf alle Schlafphasen durchlaufen hat oder ob er die tiefe Schlafphase aufgrund häufiger Atemaussetzer nie erreichte.

Derzeit sieht das mobile Schlaflabor noch vor, die Sauerstoffsättigung im Schlaf durch einen Fingersensor zu messen. Die Hoffnung der Forscher ist es, diese Funktion in Zukunft in das EEG-Grid zu integrieren. Ebenso wollen sie dort noch eine Pulsmessung mit einbauen. Ein Wermutstropfen ist, dass das System derzeit um einen einfachen Brustgurt nicht herum-

erkennen und ebenso sporadische Bewegungen von Armen und Beinen. Es erkennt damit Bewegungen der Extremitäten besser als Schlaflabore, die oft nur Elektroden an einem Unterschenkel anbringen und damit unruhige Muskelaktivitäten an diesem einen Bein erfassen.

Die Identifikation der unterschiedlichen Signale in den Radarmessungen erfolgt über regelbasierte Algorithmen, die die gemessenen Frequenz-Peaks analysieren. Selbst wenn die schlafende Person sich bewegt und von einer Seite auf die andere wälzt, greifen diese Algorithmen im Anschluss die Erkennung von Atembewegungen und Puls wieder auf und registrieren auch weitere Bewegungen der Extremitäten.

Das Radar für die Schlafforschung arbeitet mit einer Funkfrequenz zwischen 60 und 64 Gigahertz. Geltenden EU-Richtlinien zufolge sind Frequenzen im Gigahertz-Bereich unverdächtig, in den menschlichen Körper einzudringen; sie könnten höchstens die Haut erwärmen. So haben die Forscher zusätzliche Studien zurate gezogen. Mithilfe dieser Vorarbeiten berechneten sie, dass ein 60-Gigahertz-Radar, wenn es in nur zehn Zentimeter Abstand zu einer nackten Handfläche aufgestellt ist und dauerhaft misst, eine Leistungsdichte von 0,063 Milliwatt auf einen Quadratcentimeter erzeugt. Der Temperaturanstieg auf der Haut betrüge in diesem konstruierten Fall dauerhaft weniger als 0,01 Grad.

Mikrofon blendet Sprache aus

Ein zusätzliches Mikrofon unterstützt das mobile Schlaflabor durch akustische Aufnahmen. Mit ihnen lassen sich Schnarchen, Röcheln oder Hustenanfälle zusätzlich analysieren. Um diese Signale zu verarbeiten, haben die Forscher eigens eine

künstliche Intelligenz entwickelt, die die verschiedenen Atemgeräusche klassifiziert.

Ein Schutz der persönlichen Daten ist direkt mit eingebaut: Die KI erkennt Sprachäußerungen und unterdrückt deren Aufnahme. Ebenso wird die Aufnahme gestoppt, wenn Stimmen anderer Personen im Raum zu hören sind. Die Patienten sollen sich in ihren eigenen vier Wänden sicher fühlen können. Weder können Mit Hörer aus den aufgezeichneten Audiodaten Informationen gewinnen, die im Schlaf oder vor dem Einschlafen gesprochen worden sind, noch soll es möglich sein, Besucher über ihre aufgenommenen Stimmen zu identifizieren.

Sensordaten ergänzen sich

In vielen Situationen ergänzen sich die Messergebnisse der unterschiedlichen Sensoren. Beispielsweise erkennt das Radar eine Tiefschlafphase an einer besonders ruhigen und entspannten At-

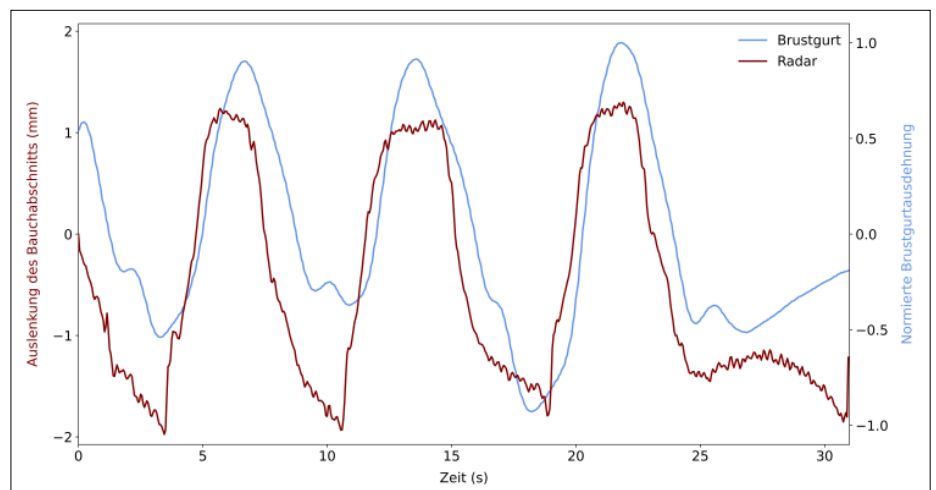


Bild: Fraunhofer IDMT

Im Vergleich zur Messung mit einem Brustgurt zeigt auch die Radarmessung zu denselben Zeitpunkten an, wie sich der Brustkorb beim Atmen hebt und senkt.

kommt. Dieser trägt zwar keine Sensorik, ist aber erforderlich, um einen EEG-Verstärker festzuhalten.

Es gibt bereits andere mobile EEG-Messsysteme, die der Anwender selbst anlegen kann, beispielsweise ein Kopfband mit Trockenelektroden des französischen Anbieters Dreem. Ein Problem bei derartigen Systemen ist allerdings, dass das Kopfband die Elektroden mit einer gewissen Kraft andrücken muss, damit der Kontakt zur Haut sicher funktioniert. Das kann eine Person bei EEG-Messungen über die ganze Nacht belasten. Sollten die Elektroden sich doch während der Messung bewegen oder verrutschen, mindert das die Aussagefähigkeit des EEGs.

Blick in viele Schlafzimmer

Das EEG-Grid für zu Hause planen die Oldenburger im Frühjahr 2023 einsatzbereit zu haben. Den zugehörigen EEG-Verstärker samt einfachem Brustgurt wollen sie bis dahin mit Industriepartnern umsetzen. Offen ist allerdings noch die Zukunft des mobilen Schlaflabors für zu Hause. „Wir könnten uns vorstellen, dass das als ein Consumer-Produkt für Privatleute angeboten wird, es ist aber auch vorstellbar, dass es in Zukunft als ein Produkt der Gesundheitsversorgung auf Rezept erhältlich ist“, sagt Wolf. Denkbar wäre auch, dass Hausärzte das System im Rahmen turnusmäßiger Screenings anbieten und dabei zur korrekten Benutzung anleiten.

Die Forscher können sich auch eine therapeutische Funktion des mobilen Schlaflabors vorstellen. Ein System, das die unterschiedlichen Schlafphasen beobachtet, könnte in Zukunft diese Phasen unterstützen und den Schlaf durch gezielte akustische Stimulation verbessern. Voraussetzung dafür, ein solches System zu entwickeln, ist es allerdings, zunächst in breitem Umfang Schlafdaten zu erheben.

Das EEG im Alltag

Weitere Forschungen in Oldenburg beziehen sich darauf, epileptische Anfälle automatisiert zu erkennen. Das mobile EEG ermöglicht ein Dauermonitoring, tags und nachts, und soll helfen, mehr über die Entstehung und den Ablauf epileptischer Anfälle zu lernen. Ohne mobiles EEG sind die Betroffenen darauf angewiesen, ihre Anfälle und Beobachtungen selbst zu dokumentieren, beispielsweise in einem Tagebuch. Dabei bleiben viele Anfälle zum Beispiel im Schlaf unentdeckt. Ein mobiles



Bilder: Fraunhofer IDMT/Anika Bödecker

Der sogenannte Phantom Head (links) ist ein Kunstkopf mit einer leitfähigen Schicht aus Gelatine und integrierten elektrischen Quellen. Damit simuliert er elektrische Gehirnaktivität und hilft, Alternativen zur EEG-Haube (rechts) zu entwickeln.

EEG verspricht dazu vollständigere und genauere Daten.

Auch bei Autofahrern könnten mobile EEG-Grids in Zukunft an Bedeutung gewinnen, nämlich wenn es darum geht, den mentalen Zustand des Fahrers zu beurteilen. Ein Beispiel wäre das autonome Fahren, wenn das Fahrzeug situationsbedingt die Kontrolle wieder an den Fahrer übergeben muss. Ist der aber nach langer autonomer Fahrt überhaupt für die Übergabe bereit? Ein EEG könnte darüber Aufschluss geben.

Um die Akzeptanz mobiler EEG-Grids zu steigern, versuchen die Entwickler nicht mehr, die Klebeelektroden zu verstecken oder in Hautfarben auf der Haut verschwinden zu lassen. Sie haben bereits Versionen als hübsche Klebe-Tattoos gestaltet, etwa in Form von Blumenornamenten oder für das mobile Schlaflabor mit Sternen- und Planetenmustern.

Auch für den Radar-Atmensensor sind noch weitere Anwendungsfelder vorstellbar. Der könnte in Zukunft berührungslos die Atmung von Säuglingen und Kleinkindern überwachen und damit zum Beispiel auch Bestandteil eines Schutzkonzepts sein, das den plötzlichen Kindstod verhindern soll. Im Krankenhaus gibt es überdies Probleme, Brandopfern einen Brustgurt anzulegen. Auch für diese Fälle bietet die Überwachung per Radar eine Unterstützung.

Fazit

Die Technik des mobilen Schlaflabors kann das umfassende Schlaflabor nicht ersetzen, sie bietet aber eine besser handhabbare Lösung, die der Patient in seiner gewohnten Schlafsituation einsetzen kann. Dadurch, dass die überwachte Person nur sehr wenig Sensorik anlegen muss, ermöglicht das mobile Schlaflabor auch Messungen über längere Zeiträume und den Einsatz in weiten Bereichen der Bevölkerung. Das könnte der Forschung zahlreiche neue Daten liefern und beispielsweise helfen, Zusammenhänge zwischen Depressionen und Schlafstörungen aufzudecken. Heute rätseln einige Mediziner, ob Depressionen die Ursache für Schlafprobleme sind oder ob Schlafstörungen nicht ihrerseits Auslöser für Depressionen sein können.

Ebenso hoffen einige Wissenschaftler, mit umfangreichen Daten aus Reihenuntersuchungen und Langzeitdaten der Schlafbeobachtung die Entwicklung neurodegenerativer Erkrankungen wie der Alzheimer Krankheit zu beobachten. Das könnte dazu führen, dass Ärzte derartige langsam fortschreitende Krankheiten in Zukunft früher erkennen können.

(agr@ct.de) **ct**

Literatur

- [1] Michael Link, Schlafigrafie, Wie genau Schlaftracker messen, c't 18/2022, S. 126