

Elektroimpedanztomografie für die Lungendiagnostik



Langzeit-Lungenmonitoring wird genauer, intelligent und mobil. Künstliche Intelligenz ermöglicht mit bestehenden Elektroimpedanztomografie (EIT)-Systemen eine hochpräzise 3D-Tomografie

Tomogramme – oder auch Schnittbilder – haben in der Diagnostik einen hohen Stellenwert, beispielsweise bei der Bestimmung von Lungenschädigungen. Das wohl bekannteste bildgebende Verfahren ist die Computer-Tomografie (CT). Mit ihrer hohen räumlichen Auflösung liefert sie eine detaillierte Darstellung des untersuchten Organs. Die CT verwendet jedoch ionisierende Strahlung. Ein andauerndes Monitoring, um Veränderungen der Lungenfunktion während der akuten Krankheitsphase zu analysieren oder für regelmäßige Nachuntersuchungen ist aufgrund der entstehenden Strahlenbelastung somit ausgeschlossen. Gerade in langen Therapiephasen bei den vielen Long-Covid-Patienten sind neue alternative Methoden zukünftig notwendig. Bei Patienten, die mechanisch beatmet werden müssen, bei bettlägerigen älteren Menschen oder chronisch Kranken ist jedoch ein kontinuierliches und zuverlässiges Monitoring der Lunge zur Anpassung und Verbesserung der Behandlung nötig.

Das Verfahren

Ein relativ neues Bildgebungsverfahren ist die Elektroimpedanz-

tomografie (EIT). Das Verfahren beruht auf der Visualisierung der räumlichen Verteilung der elektrischen Impedanz im Körper. Statt ionisierender Strahlung werden höherfrequente Wechselströme im Bereich zwischen 10 und 100 kHz mit Stromstärken im Bereich von 100 nA bis 10 mA eingesetzt. Dazu wird an zwei benachbarten Elektroden eines Elektrodengürtels ein Wechselstrom eingespeist und an allen verbleibenden Elektrodenpaaren werden die Differenzspannungen gemessen. Anschließend wird die Stromeinspeisung kreisförmig verschoben, bis alle Elektrodenpaare einmal für die Stromeinspeisung verwendet wurden. Dabei wird jedes Mal an den verbleibenden Paaren die Spannungsmessung durchgeführt. Aus den gemessenen Spannungen wird die regionale Impedanz berechnet. Da Körpergewebe und Körperflüssigkeiten unterschiedliche Leitfähigkeiten besitzen, können so regionale Flüssigkeitsansammlungen erkannt und die Durchblutung einzelner Organe untersucht werden. EIT eignet sich besonders für die Lungenfunktionsdiagnostik, da menschliches Lungengewebe eine etwa fünffach geringere Leitfähigkeit als anderes Weichgewebe im Brustkorb aufweist, was zu einem hohen Kontrast führt.

Vorteile

Da EIT nicht-invasiv ist, kann sie kontinuierlich am Patienten eingesetzt werden. Ein weiterer Vorteil: Die benötigte Ausrüstung der EIT ist kleiner und günstiger als bei anderen Verfahren. Auch die zeitliche Auflösung ist bei der EIT relativ hoch, wodurch sowohl die Belüftung als

auch die Durchblutung in Echtzeit erfasst werden können.

Herausforderungen

Allerdings ist die räumliche Auflösung der rekonstruierten Bilder deutlich geringer und auf den Abstand zwischen den Elektroden begrenzt. Geräte, die bereits im Klinikalltag eingesetzt werden, stellen zudem den Zustand der Lunge nur in einer zweidimensionalen Lage des Elektrodenbands dar. Für das Monitoring der verteilten Läsionen des Lungengewebes im Fall von Covid-19-Patienten, ist ein 3D-Monitoring jedoch dringend notwendig. Eine weitere große Herausforderung der EIT: Bereits kleinste Messfehler können zu erheblichen Änderungen der Impedanzverteilung führen und somit die Ergebnisse verfälschen.

Erweiterte Funktionalität

Hier setzt das Forschungsprojekt ELIOT (siehe Kasten) an, um kurzfristig eine praxisorientierte Lösung für die Langzeitbehandlung von Lungenpatienten zu liefern. Dazu wird die Funktionalität bestehender EIT-Systeme erweitert, um ein umfassendes dreidimensionales Monitoring der Lunge zu realisieren. Hierfür wird der Einsatz von Rekonstruktionsalgorithmen untersucht, die auf künstlichen neuronalen Netzwerken beruhen und eine neuartige Messstrategie entwickelt.

3D-Lungenrekonstruktion dank KI

Als Basis für die Simulationen und das Monitoring benötigen die Forscher ein dynamisches und möglichst genaues Modell des menschlichen Thorax. Ein zuvor entwickeltes Finite-Elemente-Paket wird hier-



Autoren:
Prof. Dr. Olfa Kanoun,
Professorin für Mess- und
Sensortechnik an der
TU Chemnitz

Andreas Mangler,
Director Strategic Marketing
Rutronik Elektronische
Baulemente GmbH
www.rutronik.com

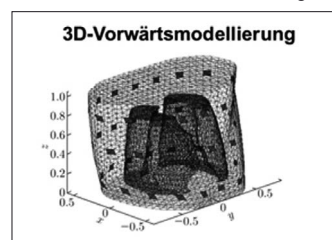


Bild 1

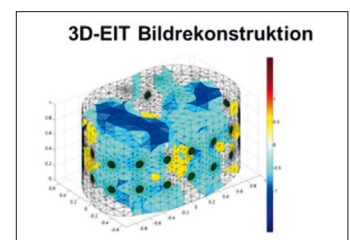


Bild 2

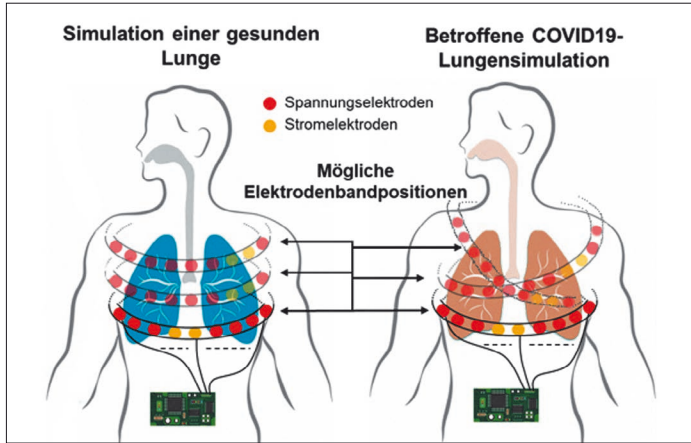


Bild 3

für an die 3D-EIT-Vorwärtssimulation (Bild 1) angepasst und mit üblichen Elektrodenmodellen ausgestattet. Da die Qualität der Messergebnisse unter anderem von der Anzahl der verwendeten Elektroden sowie deren Positionierung am Körper abhängt, werden die spezifischen Signalleistungen an unterschiedlichen Positionen berücksichtigt. Auch der Einfluss der Messparameter, wie Amplitude und Frequenz des Anregungssignals, werden hier untersucht.

Die Rekonstruktion der räumlichen Leitfähigkeitsverteilung aus den Spannungsmessungen – vor allem am Thoraxrand – ist das Herzstück der EIT-Rekonstruktion und fällt in die Klasse der inversen Probleme. Die Herausforderung besteht darin, dass auch kleinste Messfehler, verursacht unter anderem durch unvermeidliches Messrauschen, zu beliebig großen Änderungen der zugehörigen Impedanzverteilung führen können. Eine deutliche Abgrenzung von umliegendem Gewebe oder Wassereinschlüssen wird so erschwert bis unmöglich.

Mit KI zu 3D

Ein vielversprechendes Verfahren, um die Bildgebung der EIT zu schärfen (Bild 2), ist die Bayes'sche 3D-Lungenkonstruktion mittels neuronaler Netze. Der Bayes'scher

Ansatz betrachtet alle auftretenden Größen als Zufallsvariablen und ermöglicht neben der Rekonstruktion der Gewebe-, Luft-, und Wasserverteilung auch die Quantifizierung der Unsicherheit in der Rekonstruktion. So kann mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit eine Aussage getroffen werden, ob beispielsweise ein Wassereinschluss vorliegt oder nicht.

Generative adversarial networks

Für diesen Zugewinn an Informationen ist jedoch ein wesentlich höherer Rechenaufwand nötig. Der Einsatz von Bildrekonstruktionsalgorithmen, sogenannten generative adversarial networks (GANs), soll diesen Rechenaufwand verringern. Nach erfolgreichem Training sind die Algorithmen in der Lage, in kürzester Zeit eine Vielzahl von Rekonstruktionen zu liefern, welche dann zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten genutzt werden können.

Zuerst wird der Algorithmus auf ein 2D-Modell erprobt, dann auf ein simples 3D-Modell erweitert und anschließend auf das erarbeitete detaillierte Thorax-Modell angepasst. Ziel ist es, die optimale Positionierung der Messelektroden sowie die Anzahl der durchzuführenden Messungen abzuleiten, um

die bestmögliche Bildrekonstruktion zu erhalten.

Simulation und Experiment

Vergleich der simulierten Daten mit experimentellen Messungen: Die untersuchten Szenarien und Testbedingungen (Elektrodenpositionierung und -anzahl, Eigenschaft des Anregungssignals) werden durch Messungen an gesunden und erkrankten Probanden experimentell überprüft. Eingesetzt werden dazu die EIT-Systeme des Forschungspartners (Bild 4). Die Messgeräte sind speziell für die elektrische Impedanztomographie designt und liefern verlässliche Messdaten mit einer hohen Sensitivität. Für die Schlüsselversuche wird das EIT32 eingesetzt. Es hat 32 Dual-Role-Elektroden, die zur Stromeinspeisung (100 nA bis 10 mA Peak-Amplitude) sowie zur Spannungsmessung verwendet werden. Eine Injektions-Schaltermatrix (entweder ultra-low leakage Reed-Relays oder superschnelle Halbleiterschalter) dient zur Auswahl jeder Kombination von zwei Kanälen für positive und negative Strom-Injektions-Ports. Die Spannungsmessung erfolgt für alle 32 Kanäle parallel und in wenigen Millisekunden. Dies ist möglich, da jeder Kanal einen eigenen A/D-Wandler hat. Nur so kann der Zustand des Patienten exakt abgebildet werden.

Vom Messergebnis zu 3D

Die Systeme arbeiten in einem Frequenzbereich von 100 Hz bis 1 MHz. Dabei sind spektrale Messungen mit Frequenz-Sweeps mit bis zu 128 Frequenzen möglich. Die Geräte haben Kommunikati-

onsbausteine zum industriellen PC (IPC) sowie zukünftig eine Drahtlosverbindung zur Kommunikation im IoT-Umfeld. Aus den so erzielten Messergebnissen rekonstruiert der KI-Algorithmus die 3D-Bilder der Lunge, welche zur Bewertung des Gesamtsystems mit einem Facharzt diskutiert werden.

Intelligentes System für vielfältige Einsatzbereiche

Basierend auf den im Forschungsprojekt gewonnenen Daten soll in einem Nachfolgeprojekt eine digitale Plattform für die Tele-Überwachung und Visualisierung der Lunge entwickelt werden. Das mobile Diagnosegerät könnte aus einem technologischen Textil, das am Körper getragen wird, sowie einem Handheld bestehen. Der Patient, das Pflegepersonal oder andere Personen wären damit in der Lage, zuhause regelmäßig einen Thorax-Scan zu erstellen. Die Daten würden direkt an den behandelnden Facharzt weitergeleitet – Stichwort Telemedizin –, um so eventuelle Veränderungen frühzeitig zu erkennen und entsprechend behandeln zu können.

Weitere Einsatzmöglichkeiten

Die im Forschungsvorhaben erzielten Ergebnisse können auch in andere Anwendungsbereiche der EIT übertragen werden. So werden neuartige Funktionalitäten, beispielsweise die Detektion von Fremdkörpern in Wassertanks, die Beobachtung des menschlichen Gehirns oder die Entwicklung von Sensorsystemen auf Basis dünner Schichten aus Nanomaterialien, möglich. ◀



Bild 4



Bild 5

ELIOT – 3D Elektrische Impedanztomografie für Lungen-Monitoring im Rahmen der Post-Covid-Therapie

Unter der Leitung des Lehrstuhls „Numerische Mathematik“ zusammen mit dem Lehrstuhl „Mess- und Sensortechnik“ der Technischen Universität Chemnitz möchte die ESF-Nachwuchsgruppe ELIOT ein akkurates dreidimensionales Monitoring der menschlichen Lunge, basierend auf existierenden Geräten der Impedanztomografie realisieren. Weiteres

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Netzwerkbildung zwischen Medizin, Hochschule und Wirtschaft.

Die Rutronik Elektronische Bauelemente GmbH ist langjähriger Wirtschafts- und Forschungspartner der TU Chemnitz, sowie Distributor und Lieferant der Sciospec Scientific Instruments GmbH, die die EIT-Systeme für das Projekt herstellen.