Techniken zur Visualisierung der elektrischen Aktivität der Herzens

F. B. Sachse, C. D. Werner, O. Dössel

Institut für Biomedizinische Technik, Universität Karlsruhe
Kaiserstraße 12, D 76128 Karlsruhe, email: fs@ibt.etec.uni-karlsruhe.de

Zusammenfassung. Die computergestützte Modellierung und Visualisierung der elektrischen Erregungsausbreitung im Herzen kann zu einem besseren Verständnis in der elektrokardiologischen Diagnostik, Therapie und Ausbildung beitragen. Die auf Grundlage derartiger Modelle berechneten elektrischen Feldverteilungen erfordern Techniken zur Visualierung, die an ihr hohes Datenvolumen sowie ihre zeitliche und räumliche Variabilität angepasst sind. Im Beitrag werden volumen-, oberflächen- und linienorientierte Techniken zur Visualisierung der elektrischen Feldgrößen vorgestellt und untersucht. Die Darstellung der Feldgrößen erfolgt zeitabhängig und im anatomischen Kontext.

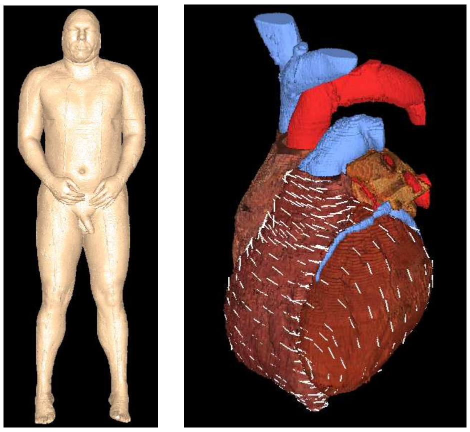
Schlüsselwörter: Visualisierung, Elektrische Felder, Numerische Feldberechnung, Erregungsausbreitung im Herzen, Elektrokardiologie, Elektrokardiogramm, Multikanal-EKG-Ableitung

1 Einleitung

Informationen über die Verteilung des elektrischen Potentials im menschlichen Körper ausgehend von den Stromquellen im Herzen sind für die elektrokardiologische Diagnostik, Therapie und Ausbildung von großem Interesse.

Diese Informationen lassen sich nur indirekt durch Messungen gewinnen, z. B. mittels elektro- und magnetokardiographischer Verfahren. Eine Ergänzung dazu ist die computergestützte Simulation auf der Grundlage von makroskopischen Modellen, welche die elektrische Erregungsausbreitung im Herzen [1][2] und die Leitfähigkeitsverteilung im Körper nachbilden [3]. Zur Berechnung der Verteilung des Potentials und des Stroms werden hierbei numerische Verfahren eingesetzt [4]. Die bei derartigen Simulationen berechneten Feldverteilungen erfordern aufgrund ihrer zeitlichen und räumlichen Variabilität, sowie ihres hohen Datenvolumens angepasste und effiziente Techniken zur Visualisierung [5].

In vorliegender Arbeit sollen Techniken zur Visualisierung der physiologischen und pathologischen Ausbreitung der elektrischen Erregung und der damit verbundenen Feldverteilung untersucht werden. Es werden volumen-, oberflächen- und linienbasierte Techniken zur Darstellung der Verteilungen elektrischer Feldgrößen im anatomischen Kontext vorgestellt und verglichen.



(a) (b)

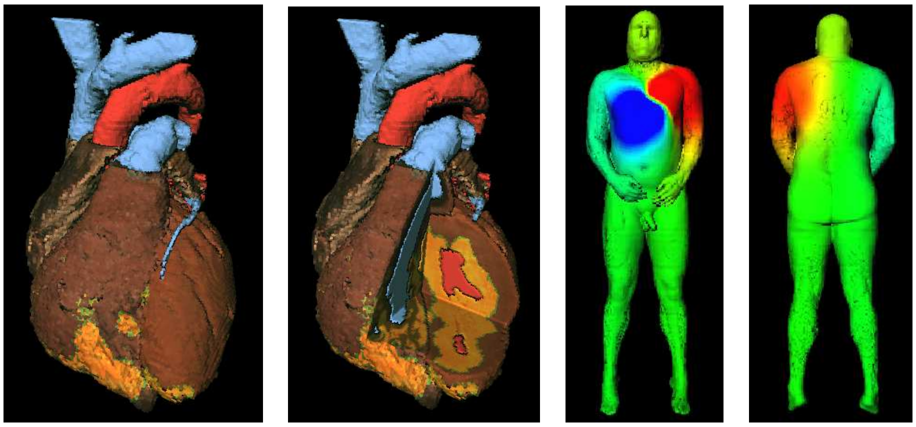
Abb. 1. Anatomisches Modell. (a) Ganzkörpermodell, bestehend aus ca. 370 Mio. kubischen Volumenelementen, denen jeweils eine von vierzig Gewebearten, der Farbwert, der Hounsfieldwert und zwei Winkel zur Beschreibung der Gewebeorientierung zugeordnet sind (b) Modell des Herzens. Die weissen Linien kennzeichnen die Orientierung der Muskelfasern.

2 Modellierung

Modellierung der Anatomie Das anatomische Modell basiert auf dem Visible Man Datensatz [6] der National Library of Medicine (USA). Dieser Datensatz wurde in vorangegangenen Arbeiten [3] mit Verfahren der digitalen Bildverarbeitung vorverarbeitet, segmentiert und klassifiziert (siehe Abb. 1 a). Die Muskelorientierung wurde durch Detektion von Orientierungen und deren Normalen an Stützstellen und anschließende Interpolation im Bereich des Muskelgewebes in das Modell eingebracht (siehe Abb. 1 b) [7]. Von dem anatomischen Modell werden abhängig von der Anwendung weitere Modelle abgeleitet, welche z. B. eine geringere Auflösung besitzen und nur ausgewählte Körperregionen nachbilden.

Modellierung der Leitfähigkeitsverteilung im Körper Ausgehend von den anatomischen Modellen werden Leitfähigkeitsmodelle erstellt [7]. Jedem Voxel ist gewebespezifisch ein Leitfähigkeitstensor $\boldsymbol{\sigma}_{local}$ zugeordnet, der in einem lokalen Koordinatensystem Diagonalform hat. Die Transformation in das globale Koordinatensystem zum Leitfähigkeitstensor $\boldsymbol{\sigma}_{global}$ wird berechnet durch Rotation mit einer aus der Gewebeorientierung ermittelten Matrix T_R.

Modellierung der Erregungsausbreitung im Herzen Die Modellierung erfolgt unter Anwendung des anatomischen Modells mit Hilfe eines zellulären Automaten



(a) (b) (c) (d)

Abb. 2. Oberflächenbasierte Visualisierung von skalaren Feldgrößen. Farbkodiertes Transmembranpotential U_m (a) auf der Herzoberfläche und (b) im Innern zum Zeitpunkt ventrikulärer Erregung. Zugehöriges farbkodiertes Oberflächenpotential ϕ in (c) frontaler und (d) dorsaler Ansicht des Körpers.

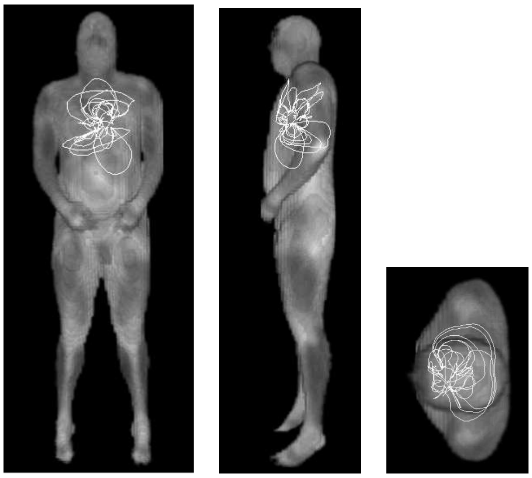
[2][8]. Dazu wird ein anisotropes Modell des Herzens eingesetzt, bei welchem ein Verhältnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit in Faserrichtung zu senkrecht dazu von 1 zu 3 gewählt ist. Das Modell liefert u. a. die Verteilung des Transmembranpotentials U_m und der Quellstromdichte f im Herzen zu vorgegebenen Zeitpunkten.

Bestimmung der elektrischen Feldgrößen Die Bestimmung der elektrischen Feldgrößen im Körper erfolgt zu den im Erregungsausbreitungsmodell vorgegebenen Zeitpunkten. Der Leitfähigkeitstensor $\boldsymbol{\sigma}$ und die Quellstromdichte f sind hierbei vorgegeben. Berechnet wird das Potential ϕ eines stationären Strömungsfeldes, welches durch die generalisierte Poisson-Gleichung $\nabla(\boldsymbol{\sigma}\nabla\phi) + f = 0$ beschrieben wird. Aus dem Potential läßt sich die elektrische Feldstärke $\mathbf{E}$ durch $\mathbf{E} = -\nabla\phi$ und daraus die Stromdichte $\mathbf{J}$ durch $\mathbf{J} = \boldsymbol{\sigma}\mathbf{E}$ bestimmen. Zur Lösung der Poisson-Gleichung wird das Finite-Differenzen-Verfahren herangezogen [4].

3 Visualisierung der elektrischen Feldgrößen

Die darzustellenden Feldgrößen sind zum einen skalar, z. B. das Potential ϕ und die Quellstromdichte f, zum anderen vektoriell, z. B. die Feldstärke $\mathbf{E}$ und die Stromdichte $\mathbf{J}$.

Bei volumenbasierten Visualisierungstechniken werden die Feldgrößen und anatomischen Strukturen auf Volumenelemente abgebildet. Die Abbildung er-



(a) (b) (c)

Abb. 3. Feldlinien im volumenbasiert visualisierten, semitransparenten Körper in (a) frontaler und (b) ventraler Ansicht, sowie von (c) oben. Die Feldlinien werden erzeugt ausgehend von der elektrischen Feldstärke **E** zum Zeitpunkt ventrikulärer Erregung.

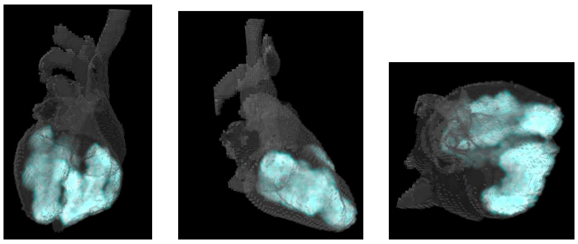
folgt durch Zuordnung von Farben und Transparenz. Bei oberflächenbasierten Visualisierungstechniken werden die Feldgrößen auf Flächenelemente unter Zuordnung von Farben und Transparenz abgebildet. Derartige Elemente lassen sich zum einen aus den Oberflächen von Strukturen und aus Schnittebenen im anatomischen Modell, zum anderen aus den Feldgrößen ermitteln. Dies führt z. B. bei skalaren Feldgrößen zu Isopotentialflächen. Bei linienbasierten Visualisierungstechniken werden die Feldgrößen auf Linienelemente abgebildet. Der Verlauf einer Linie, sowie Farbe und Transparenz eines Linienelementes werden aus den Feldgrößen ermittelt wird.

Die sequentielle Visualisierung der elektrischen Feldgrößen zu den im Erregungsausbreitungsmodell vorgegebenen Zeitpunkten erlaubt die Erstellung von Animationen.

4 Ergebnisse und Diskussion

Eine oberflächenbasierte Visualisierung skalarer Feldgrößen zeigt Abbildung 2. Die Oberflächen werden aus Strukturen und Schnittebenen im anatomischen Modell extrahiert.

Skalare Feldgrößen werden volumenbasiert in Abbildung 4, vektorielle werden linienbasiert in Abbildung 3 dargestellt. Die anatomischen Strukuren sind unter



(a) (b) (c)

Abb. 4. Semitransparente, oberflächenbasierte Visualisierung des Herzens und volumenbasierte Darstellung des Transmembranpotentials bei ventrikulärer Erregung in (a) frontaler und (b) ventraler Ansicht, sowie von (c) unten.

Verwendung von Transparenz visualisiert, um die Feldverteilung im Innern des Herzens sichtbar zu machen.

Die vorgestellten Techniken sind geeignet, die mit der Erregungsausbreitung im Herzen verbundenen elektrischen Feldverteilungen zu illustrieren und damit zu einem besseren Verständnis in der elektrokardiologischen Diagnostik, Therapie und Ausbildung beizutragen.

Literatur

1. B. E. H. Saxberg and R. J. Cohen. Cellular Automata Models of Cardiac Conduction. In L. Glass, P. Hunter, and A. McCulloch, editors, *Theory of Heart*, Seiten 437–476. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1991.
2. C. D. Werner, F. B. Sachse, and O. Dössel. Applications of the Visible Man Dataset in Electrocardiology: Simulation of the Electrical Excitation Propagation. In *Proc. Second Users Conference of the National Library of Medicine's Visible Human Project*, 1998.
3. F. B. Sachse. *Modelle des menschlichen Körpers zur Berechnung von physikalischen Feldern.* Doktorarbeit, Techn. Univ. Karlsruhe, Aachen, 1998.
4. H. R. Schwarz. *Numerische Mathematik.* Teubner, Stuttgart, 3. Auflage, 1993.
5. F. B. Sachse, C. Werner, K. Meyer-Waarden, and O. Dössel. Applications of the Visible Man Dataset in Electrocardiology: Calculation and Visualization of Body Surface Potential Maps of a Complete Heart Cycle. In *Proc. Second Users Conference of the National Library of Medicine's Visible Human Project*, 1998.
6. M. J. Ackerman. Viewpoint: The Visible Human Project. *Journal Biocommunication*, 18(2):14, 1991.
7. F. B. Sachse, M. Wolf, C. Werner, and K. Meyer-Waarden. Ein Leitfähigkeitsmodell des menschlichen Körpers unter Berücksichtigung der Anisotropie von Muskelgewebe. In *31. Jahrestagung der Dt. Gesellschaft f. Biomed. Technik*, 1997.
8. C. D. Werner, F. B. Sachse, and O. Dössel. Electrical Excitation of the Human Heart: A Comparison of Electrical Source Distributions in Models of Different Spatial Resolution. In *Proc. Computer in Cardiology*, 1998.