

Elektrophysiologische Modellierung des Herzens zur Planung von herzchirurgischen und kardiologischen Eingriffen

G. Reinerth¹, G. Seemann², O. Dössel², C. Vahl¹, S. Hagl¹

¹Klinik für Herzchirurgie, Universität Heidelberg, Deutschland

²Institut für Biomedizinische Technik, Universität Karlsruhe (TH), Deutschland

Einführung

Mit dem Ziel, therapeutische Interventionen am Herzen computer-gestützt zu simulieren und zu planen, wurden verschiedene Modelle zur Modellierung des elektro-physiologischen Verhaltens des Herzens entwickelt. Es werden zwei Rechenmodelle eingesetzt; eines berücksichtigt die Elektrophysiologie auf der Ebene der Zellmembran, das andere mittelt die elektrischen Eigenschaften des Muskelgewebes über viele Zellen. Diese Modelle ermöglichen die Simulation von Pathologien wie z. B. Vorhofflimmern / -flattern und der Wirksamkeit therapeutischer Interventionen, z. B. RF-Ablationen oder Aneurysmaresektionen bei ventrikulären Aneurysmata.

Methodik

Anhand medizinischer, tomographischer Datensätze wurde zunächst die Herzanatomie modelliert. Die Datensätze von 3D-Echokardiographie, Computer- und Magnetresonanztomographien können verwendet werden.

Zur Erzeugung der Computermodelle werden Methoden der digitalen Bildverarbeitung eingesetzt. In der Vorverarbeitung werden Aufnahmeartefakte entfernt, anschließend werden mit Hilfe von Segmentationsalgorithmen zusammenhängende Geweberegionen erzeugt. *Durch die folgende Klassifikation werden den segmentierten Geweberegionen passende Gewebearten zugeordnet.*

In die Modellierung geht ebenfalls die schichtenabhängig unterschiedliche Orientierung der Muskelzellen ein, da diese die Richtung der elektrischen Leitfähigkeit beeinflussen. Diese Eigenschaften lassen sich durch Messungen am Langendorff-Präparat erfassen (3) und in die Modelle einbringen (s. Abb. 1).

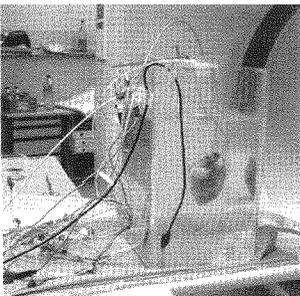


Abb. 1: Langendorff-Präparat im CT

Die kardiale elektrische Aktivität beruht auf der Bewegung von Ladungsträgern, die durch Konzentrationsunterschiede von Ionen über der Zellmembran verursacht wird. Die Konzentrationsunterschiede entstehen durch Öffnen und Schließen von Ionenkanälen und aktive Transportmechanismen. Die elektrische Kopplung der Zellen erfolgt über gap-junctions, die gewebe- und richtungsabhängig verteilt sind. Noble et al. (1) entwickelten ein mathematisches Modell zur Beschreibung dieser Vorgänge, auf dem aufbauend Systeme gekoppelter partieller Differentialgleichungen und Verfahren der numerischen Feldrechnung als Grundlage der heutigen Modellierung entwickelt wurden. Der rechnerische Aufwand dieses Ansatzes ist so groß, dass in den nächsten Jahren nicht mit einer Echtzeitsimulation des gesamten Herzens zu rechnen ist.

Neben diesen komplexen Modellen wurden echtzeitfähige, regelba-

sierte Systeme entwickelt (2). Diese „zellulären Automaten“ ordnen jeder Gewebearbeit des anatomischen Datensatzes physiologische Parameter der elektrischen Erregungsausbreitung (Ausbreitungsgeschwindigkeit, Aktionspotentialverlauf und Refraktärzeit in Abhängigkeit von der Herzfrequenz) zu. Diese Parameter wurden durch numerische Experimente mit den oben beschriebenen komplexen Modellen bestimmt und durch Messungen an Zellen und Zellverbänden validiert (3).

Ergebnisse

Mit Hilfe des „zellulären Automaten“ lassen sich verschiedene Flimmer- und Flutterzustände des Herzens darstellen und untersuchen. Der Einfluß medikamentöser Therapien auf bestimmte Arrhythmien lässt sich über die Änderung der Transmembranspannungen ebenfalls simulieren. Aber auch potentielle Therapiemaßnahmen, wie RF-Ablationslinien, lassen sich im Vorfeld simulieren und austesten, ebenso wie die Effektivität unterschiedlicher Linienführung der Ablation auf eine vorliegende Pathologie. Diese Erkenntnisse sind wichtig für die Planung eines eventuell in Zukunft durchführbaren minimal-invasiven Vorgehens.

Weiterhin soll untersucht werden, inwieweit der therapeutische Nutzen von biventrikulärem Pacing durch Optimierung der Elektrodenlage verbessert werden kann. Geplant ist weiterhin die Simulation von Aneurysmaresektionen, um die postoperative elektrische Stabilität des Herzens vorherzusagen zu können. Mittels eines haptischen Interface kann der geplante Eingriff sogar virtuell am Modell unter Vermittlung der taktil empfundenen Gewebsbeschaffenheit vorgenommen und trainiert werden.

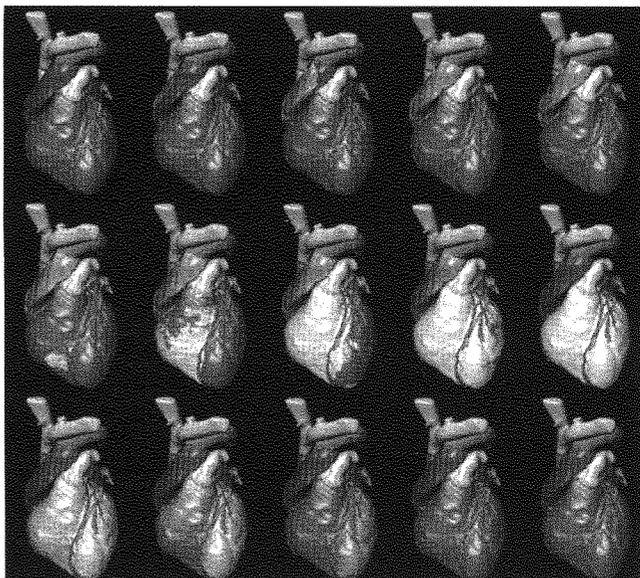


Abb. 2: Farbcodierte Simulation der Erregungsausbreitung und Repolarisation eines modellierten Herzens mittels des „zellulären Automaten“

Diskussion

Die Erforschung der Pathologie des Vorhofflimmerns ist Gegenstand des Interesses mehrerer Arbeitsgruppen. In diesem Umfeld spielen anatomische und elektro-physiologische Modellierungen des Herzens eine wichtige Rolle. Basierend auf der Grundlage von Systemen gekoppelter Differentialgleichungen sind verschiedene Modelle entstanden, die viel zum Verständnis des Auftretens und des Verschwindens von Vorhofflimmern beigetragen haben. Diese Modelle sind allerdings sehr rechenintensiv und auf Vorhofebene beschränkt. Mit dem vorliegenden „zellulären Automaten“ können Rhythmusstörungen und deren chirurgische oder interventionelle Therapie im Bereich des gesamten Herzens in Echtzeit simuliert werden. Die Integration der mechanischen Kontraktion, von Stoffwechselfvorgängen und der Strömungsmechanik in das Modell wird ebenfalls angestrebt.

Zusammenfassung

Durch computergestützte Simulation ist es mit geeigneten Rechenmodellen möglich, das elektrophysiologische Verhalten des Herzens sowie pathologische Störungen zu simulieren. Darüberhinaus können Eingriffe in dieses System sowie deren Folgen mit dem „zellulären Automaten“ hinreichend genau und in Echtzeit dargestellt werden, virtuelle Operationen mit dem haptischen Interface sind möglich. Diese Rechenmodelle wurden mit morphologischen und elektrischen Messungen am isolierten, vitalen Säugetierherz (Langendorff-Präparat) validiert.

Literaturstellen

1. D.Noble, A.Varghese, P.Kohl, P.Noble „Improved guinea-pig ventricular cell model incorporating a diadic space, IKr and IKs, and length- and tension-dependent process“, *Canadian Journal of Cardiology* Vol. 14, pp. 124-134, Jan.. 1998
2. G.Seemann, F.Sachse, C.Werner, O.Dössel „Parametrisierung Zellulärer Automaten der Erregungs-ausbreitung im Herzen ausgehend von elektrophysiologischen Zellmodellen“, in *34. Jahrestagung d. Dt. Gesellschaft f. Biomed. Technik*, 2000
3. S.Kewitz, I.deBoer, W.Schoelz, C.Werner, O.Dössel, C. Vahl „Elektromechanische Modellierung des Vorhofs: Validierung, Planung und Simulation atrialer Rhythmus-chirurgischer Eingriffe“, in *Proc. rechner- und sensorgestützte Chirurgie*, GI-Edition, pp. 306-314, 2001