

forschung im fokus

Ausgabe Nr. 23 / 2020



Autonomie des Menschen
versus autonome Systeme



Regio
WIN²⁰₃₀
RIZ Energie
Regionales Innovationszentrum
für Energietechnik

3D-Druck der Ablation von Vorhofflimmern

Sandra Wehsener B.Sc., Prof. Dr.-Ing. med. habil. Matthias Heinke, Robin Müssig M.Sc., Prof. Dr.-Ing. Stefan Junk, Johannes Hörth M.Sc., Steffen Schrock M.Eng.

Um medizinische Behandlungsverfahren in der Praxis besser verstehen und anwenden zu können, gewinnt die Visualisierung der Prozesse an immer größerer Bedeutung. Durch Anwendung der Computer-Simulationssoftware CST können elektromagnetische und thermische Simulationen zur Analyse verschiedener Herzrhythmusstörungen durchgeführt werden. Eine weitere Form der Visualisierung erfolgt durch haptische, dreidimensionale Druckmodelle. Diese Modelle können mit einem generativen Herstellungsverfahren, wie z. B. einem 3D-Drucker, in kürzester Zeit hergestellt werden.

In order to better understand and apply medical treatment procedures in practice, the visualization of processes is becoming increasingly important. By using the computer simulation software CST, electromagnetic and thermal simulations can be carried out to analyse various cardiac arrhythmias. Another form of visualization is the use of haptic, three-dimensional pressure models. These models can be produced with a generative manufacturing process, such as a 3D printer, in a very short time.

Einleitung

Der Einsatz neuer Technologien und Innovationen bedeutet für ein Unternehmen meist einen langen Entwicklungsprozess und somit einen erhöhten Kostenaufwand. Im Vorfeld erstellte virtuelle Simulationen und Prototypen können diesen Entwicklungsprozess deutlich effizienter gestalten. Mit diesen virtuellen Simulationen können verschiedenste Materialien und deren Eigenschaften in einem frühen Entwicklungsstadium getestet und analysiert werden. Durch die Herstellung eines daraus resultierenden Prototyps entsteht eine weitere Visualisierungsmöglichkeit, die einen Eindruck von Optik und Haptik des Produkts vermittelt [1]. Zur Anfertigung solcher Prototypen werden zunehmend additive Fertigungsverfahren, wie der 3D-Druck, eingesetzt. Die Kombination beider Möglichkeiten bietet erhebliche Vorteile, insbesondere in der Medizintechnik. So könnte in der Kardiologie und Elektrophysiologie die Ablations-Therapie zur Isolierung der Pulmonalvenen, die zur Behandlung von Vorhofflimmern eingesetzt wird, patientenindividuell geplant werden.

Zielsetzung

Ziel dieser Forschungsarbeit war, geeignete 3D-Modelle des Offenburger Herzrhythmusmodells mit unterschiedlichen 3D-Druckverfahren zu realisieren, um diese zur Visualisierung ei-

nes Vorhofflimmer-Ablationsverfahrens für die Lehre und Forschung einzusetzen.

Methoden

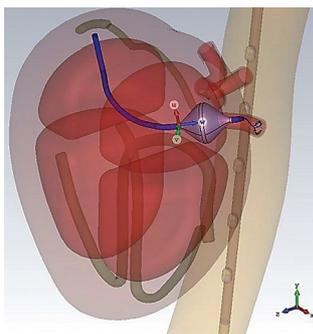
Die Simulation der Pulmonalvenen-Isolation durch Kryoablation wurde mit der elektromagnetischen und thermischen Simulationssoftware CST (Computer Simulation Technology) durchgeführt. Der Arctic Front Advance™-Katheter mit einem Durchmesser von 28 mm und ein zirkulärer Mapping-Katheter wurden entsprechend den technischen Handbüchern des Herstellers Medtronic modelliert und in das Offenburger Herzrhythmusmodell integriert (Abb. 1 und 2) [2, 3, 4].



Abb. 1:
Ballonkatheter Arctic Front Advance™, 28 mm durch CST-Software

Zur Realisierung der 3D-Druck-Objekte musste das Modell mit einer CAD-Software (PTC Creo Elements Direct Modeling) vorbereitet werden (Abb. 3) [5]. Anschließend konnten zwei verschiedene 3D-Druckverfahren genutzt werden: zum einen ein Bindemittelstrahldrucker mit Polymergeips und zum anderen ein Multimaterialdrucker mit Photopolymer. Das erste 3D-Druckmodell aus Polymergeips wurde

Abb. 2:
Ballonkatheter Arctic
Front Advance™ in der
linken unteren Lungen-
vene des Offenburger
Herzrhythmusmodells
mit CST-Software



mit dem Projekt 660Pro von 3D-Systems im Pulverbett gedruckt. Das zweite Modell wurde mit einem Stratasys-Multimaterialdrucker aus Photopolymer gedruckt. Die Druckmodelle sind so gestaltet, dass sie zum Blick ins Innere des Modells geteilt werden können.

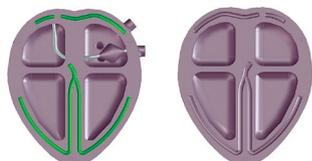


Abb. 3:
CAD-Modell – unterer
und oberer Teil des
Druckmodells

Ergebnisse

Nach den Druckvorgängen liegen zwei Präsentationsmodelle vor. Diese sind in zwei Hälften teilbar. Im Inneren der Modelle sind die Reizleitung des Herzes sowie der Ballonkatheter dargestellt. Die Druckzeit für das erste 3D-Druckmodell aus Polymergips (Abb. 4) betrug etwa 90 Minuten und musste anschließend noch weitere 90 Minuten im Pulverbett aushärten. Nach dem Druck wurde das Modell zusätzlich bearbeitet, um die Oberfläche widerstandsfähiger zu machen (Infiltration). Die Farben wurden in gleicher Weise gestaltet wie das CST-Simulationsmodell und kommen in ihrer vollen Wirkung zur Geltung.

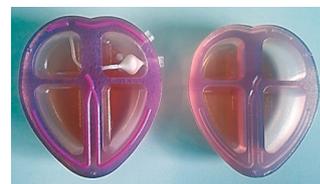


Abb. 4:
3D-Druck Modell
„Offenburger Herz-
rhythmusmodell mit
Kryoballonkatheter“
aus Polymergips

Das zweite 3D-Druckmodell aus Photopolymer (Abb. 5) war nach etwa 10,5 Stunden Druck fertig und musste nicht nachbearbeitet werden. Um einen kostspieligen Materialkartuschenwechsel zu umgehen, wurden die Druckfarben hier nur begrenzt eingesetzt und beschränkten sich auf die zum Zeitpunkt der Ausarbeitung installierte Farbpalette (Magenta-Clear-Spektrum). Das zweite Modell ist doppelt so teu-

er wie das erste Modell, bietet aber bessere Materialeigenschaften. Das erste Modell ist wegen des Gipsmaterials bruchempfindlicher und kann somit lediglich als Präsentationsmodell eingesetzt werden.

Abb. 5:
3D-Druck Modell
„Offenburger Herz-
rhythmusmodell mit
Kryoballonkatheter“
aus Photopolymer



Schlussfolgerungen

Die Simulation der Pulmonalvenen-Isolation durch Kryoablation mit der Software CST Studio Suite™ kann zur Planung und Gestaltung komplexer Ablationskatheter eingesetzt werden. Parallel zur Simulation können die dreidimensionalen Druckmodelle als Präsentationsmodelle in der Lehre und Forschung oder für die Patientenaufklärung genutzt werden. Auch eine Weiterentwicklung dieser Modelle ist möglich. Sie könnten durch weitere Komponenten (z. B. Herzklappen) oder durch leitfähige Materialien ergänzt werden. Zusätzlich könnte die thermische Ausbreitung während des Ablationsvorgangs in Form von verschiedenen Farben am Druckmodell verstärkt werden.

Referenzen/References:

- [1] S. Wehsener, M. Heinke, R. Müssig, J. Hörth, S. Junk, S. Schrock: 3d print of heart rhythm model with cryoballoon catheter ablation of pulmonary vein. Current Directions in Biomedical Engineering, Band 5, Heft 1, Seiten 235–238, ISSN (Online) 2364-5504, DOI: <https://doi.org/10.1515/cdbme-2019-0060>
- [2] M. Schalk, M. Heinke, R. Echle: Heart rhythm model and simulation of electrophysiological studies and highfrequency ablations. Europace 19, Suppl. 3, 2017, iii1822
- [3] M. Kraemer, R. Echle, M. Heinke: Simulation of electrical fields in cardiac resynchronization therapy and temperature spread in HF ablation. Europace 19, Suppl. 3, 2017, iii185
- [4] Metzner et al. (August 2013). Increased Incidence of Esophageal Thermal Lesions Using the Second-Generation 28-mm Cryoballoon.
- [5] A. Gebhardt, Additive Fertigungsverfahren, Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping – Tooling – Produktion (5. Auflage), München: Carl Hanser Verlag, 2016

AUTOREN



Sandra Wehsener B.Sc.
Fakultät EMI, Medizintechnik Absolventin
swehsene@stud.hs-offenburg.de



Prof. Dr.-Ing. med. habil.
Matthias Heinke
Fakultät EMI, Praktikantenamtsleiter Medizintechnik, Wissenschaftl. Ltg. Labor Kardi-ovaskuläre Gerätetechnik u. Rhythmologie
matthias.heinke@hs-offenburg.de

Robin Müssig M.Sc.: Fakultät EMI; Medizintechnik Absolvent, rmuessig@hs-offenburg.de

Prof. Dr.-Ing. Stefan Junk: Prodekan Fakultät B+W Wissenschaftl. Ltg. Labor Rapid Prototyping/ Tooling und Reverse Engineering; stefan.junk@hs-offenburg.de

Johannes Hörth M.Sc.: Fakultät EMI, Akad. Mitarbeiter; johannes.hoerth@hs-offenburg.de

Steffen Schrock M.Eng.: Fakultät B+W, Akad. Mitarbeiter; steffen.schrock@hs-offenburg.de

Simulation der transösophagealen Neurostimulation

Manuela Schleh B.Sc., Prof. Dr.-Ing. med. habil. Matthias Heinke, Johannes Hörth M.Sc.

Die transösophageale Neurostimulation ist eine neue Therapieform und könnte unter anderem zur Schmerzlinderung während einer transösophagealen Linksherzstimulation angewendet werden. Sie ist in die Kategorie der Rückenmarksstimulation (SCS) einzuordnen, die die meist verwendete Technik der Neurostimulation ist. Die derzeit auf dem Markt vorhandenen Ösophaguskatheter werden bei einer elektrophysiologischen Untersuchung mit Ablation und transösophagealer Echokardiographie zur Temperaturüberwachung eingesetzt. Das Ziel dieser Arbeit war, das vorhandene Offenburger Herzrhythmusmodell, um die Wirbelsäule zu erweitern, einen neuen Ösophagus-Elektroden-Katheter für die transösophageale elektrische Stimulation des Rückenmarks zu modellieren und mittels 3D-Computer-Simulationen auf Ihre Wirksamkeit zu untersuchen.

Transesophageal neurostimulation is a new form of therapy and could be used to reduce pain during transesophageal left heart stimulation. It belongs to the category of spinal cord stimulation (SCS), which is the most commonly used technique of neurostimulation. Esophageal catheters currently available on the market are used to monitor the temperature during an electrophysiological examination with ablation and transesophageal echocardiography. The aim of this work was to extend the existing Offenburg heart rhythm model with the spinal column, to model a new esophageal electrode catheter for transesophageal electrical stimulation of the spinal cord and to investigate the effectiveness by means of 3D computer simulations.

Einleitung

Die in diesem Forschungsbericht vorgestellten Methoden und Forschungsergebnisse zur Modellierung und Simulation der transösophagealen Neurostimulation wurden in einem Vortrag und einer Publikation auf der BMT Conference of the German Society for Biomedical Engineering (DGBMT within VDE), 25. – 26. Sep. 2019 in Frankfurt a. M. vorgestellt und sind Bestandteil dieses Forschungsberichts [1]. Die Entwicklung innovativer Ösophagus-Elektroden oder deren Weiterentwicklung ist für ein Unternehmen kostspielig. Zusätzliche Kosten entstehen für die Zeit, die benötigt wird, um Prototypen herzustellen und in einer realen Umgebung zu testen – insbesondere um die Wechselwirkung mit biologischem Gewebe zu testen. Virtuelle 3D-Computer-Simulationen ermöglichen, Modelle mit realen Materialeigenschaften zu erstellen und die Interaktion mit ihrer Umgebung zu simulieren und zu bewerten. Diese Alternative kann Kosten und Zeit einsparen. Die Rückenmarkstimulation ist heute eine der häufigsten Behandlungsmethoden für chronische Schmerzen [2]. Ziel der Arbeit war, die Wirbelsäule und einen neuartigen Öso-

phagus-Elektroden für die transösophageale elektrische Stimulation des Rückenmarks über die Speiseröhre zu modellieren und in das vorhandene Offenburger Herzrhythmusmodell zu integrieren [3]. Da die linksventrikuläre Herzstimulation in der Speiseröhre oft als schmerzhaft empfunden wird, soll hierbei die Reizübertragung durch die Nerven mit elektrischen Impulsen gehemmt werden.

Methoden

Die Modellierung und Simulationen wurden mit der elektromagnetischen und thermischen Simulationssoftware CST (Computer Simulation Technology, Dassault Systèmes) durchgeführt. Die beiden neuartigen Ösophagus-Elektrodenkatheter wurden auf Basis des technischen Handbuchs des temporären Ösophagus-Katheters TO8 des Herstellers OSYPKA AG modelliert (Abb. 1). Die Brustwirbelsäule wurde auf Basis der Dimensionen eines menschlichen Skeletts modelliert [4]. Der 20 mm Ösophagus-Ballonkatheter und die Brustwirbelsäule wurden anschließend in das

Offenburger Herzrhythmusmodell integriert (Abb. 2). Die Simulation der transösophagealen Neurostimulation stellt mit dem „Low Frequency Time Domain Solver“ das elektrische Feld sowie die Ausbreitung des elektrischen Potentials dar (Abb. 3, 5 und 6).

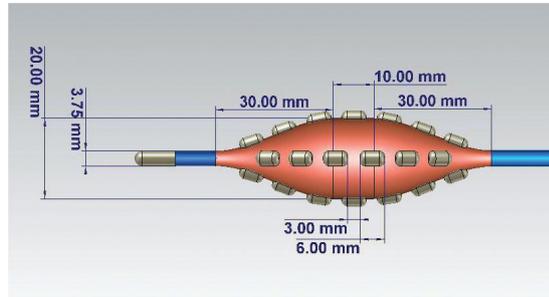


Abb. 1: Modellierung des neuartigen Ösophagus-Ballonkatheters

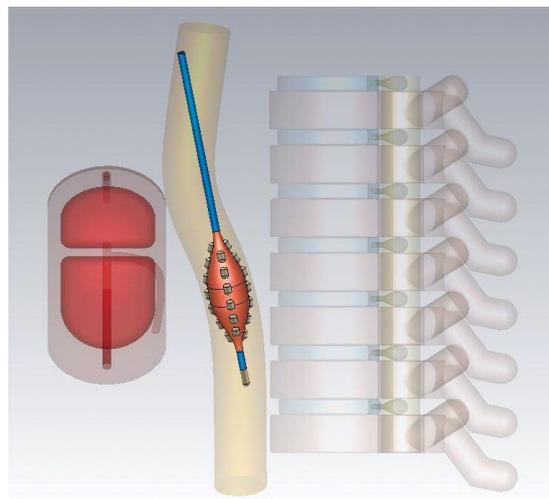


Abb. 2: Ösophagus-Ballonkatheter und Brustwirbelsäule integriert in das vorhandene Offenburger Herzrhythmusmodell

Tiefe gemessen werden. 2,08 V wurden im Rückenmark bei einer Tiefe von 70 mm gemessen (Tab. 1). Die Simulation wurde ebenfalls mit einer Spannung von 2 V und 7 V durchgeführt.

Tiefe	2 V	5 V	7 V
0 mm	1.74 V	4.33 V	6.07 V
2 mm	1.48 V	3.71 V	5.19 V
10 mm	1.07 V	2.68 V	3.76 V
30 mm	0.88 V	2.19 V	3.07 V
50 mm	0.84 V	2.10 V	2.95 V
70 mm	0.83 V	2.08 V	2.91 V

Tab. 1: Vergleich der transösophagealen Neurostimulation

Die drei verschiedenen Messdurchgänge zeigten, dass das Verhältnis zwischen abgegebener Spannung an den Elektroden und der Spannung, die am Rückenmark anliegt, linear ist.

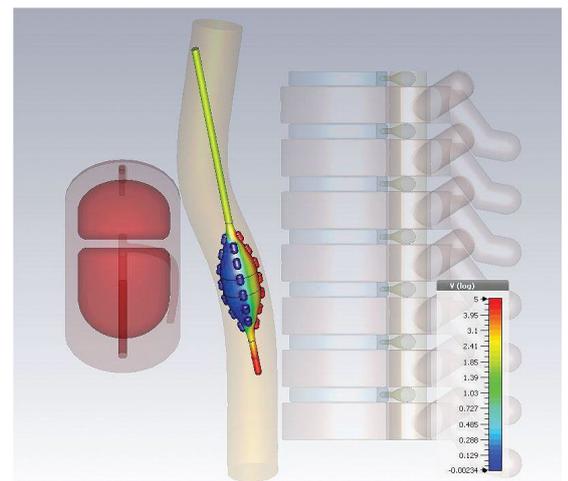


Abb. 3: Ösophagus-Ballonkatheter mit elektrischem Potential an den Elektroden zur transösophagealen Neurostimulation

Ergebnisse

Die transösophageale elektrische Stimulation des Rückenmarks wurde mit einem trapezförmigen Signal und einem den Ösophagus-Elektroden zugeordneten elektrischen Potential von 5 V durchgeführt (Abb. 4). Die Neurostimulation wurde für eine Sekunde mit einem Stimulationsimpuls von 0,01 s und einer Periode von 0,05 s durchgeführt. Dies entspricht einer Frequenz von 25 Hz. Die Streuung des Potentials wurde an sechs Messpunkten gemessen. Nach einer Sekunde konnte ein Potential von 4,33 V direkt an der Elektrode, 3,71 V bei 2 mm Tiefe im Myokard, 2,68 V bei 10 mm Tiefe im Myokard, 2,19 V bei 30 mm Tiefe im Myokard und 2,1 V im Brustwirbel in 50 mm

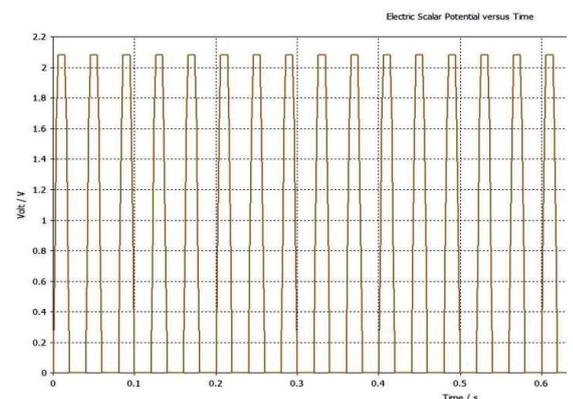


Abb. 4: Messung des Rückenmarkspotentials bei 5 V während der transösophagealen Neurostimulation

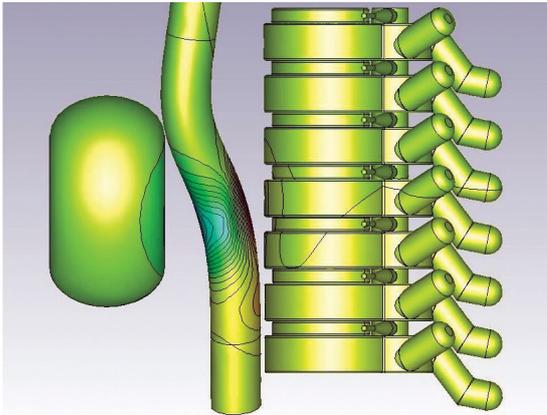


Abb. 5:
Potenzialausbreitung bei der transösophagealen Neurostimulation bei 5 V mit Blick von außen in 3D

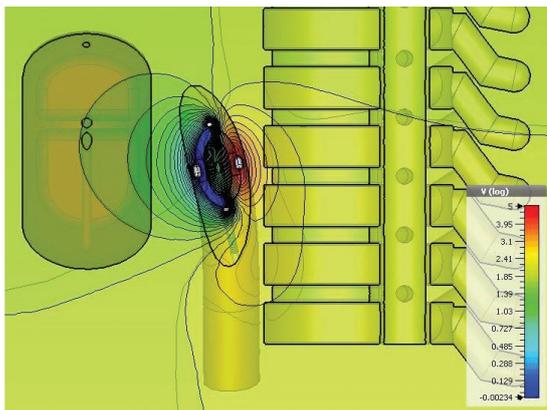


Abb. 6:
Potenzialausbreitung bei der transösophagealen Neurostimulation bei 5 V mit Blick von der Schnittebene in 2D

Diskussion

Ösophagus-Ballonkatheter- und Herzrhythmusmodelle sowie die Simulation von elektrischen Stimulationsfeldern und elektrischen Sensorfeldern ermöglichen die statische und dynamische Simulation der gerichteten transösophagealen elektrischen Stimulation des Rückenmarks. Der Vorteil der Simulation mit CST kennzeichnet sich durch eine realistische Ausbreitung der elektrischen Feldlinien. Grund hierfür ist die Auswahl der unterschiedlichen Leitungseigenschaften von Gewebe und Knochen. Die Simulationen zeigen sowohl das elektrische Potenzial als auch die im Rückenmark detektierten elektrischen Feldlinien auf.

Die Ergebnisse der 25 Hz transösophagealen Neurostimulation lieferten positive Ergebnisse, die für die weitere Forschung in diesem Bereich genutzt werden können. Damit ist eine Schmerzreduktion bei der Herzstimulation möglich. Es zeigt sich, dass sich die transösophageale Neurostimulation auch in Richtung des Herzens ausbreitet. Da die transösophageale Neurostimulation ein unerforschtes Verfahren ist, sind die Auswirkungen auf die Herzstimulation noch unklar. Die 3D-Simulation der elektrischen Abtast- und Stimulationsfelder kann zur Optimierung der transösophagealen Neurostimulation genutzt werden.

Schlussfolgerungen

Virtuelle Herzrhythmus- und Kathetermodelle sowie die Simulation von elektrischen Stimulationsfeldern und elektrischen Sensorfeldern ermöglichen die statische und dynamische Simulation der gerichteten transösophagealen elektrischen Stimulation des Rückenmarks. Die 3D-Simulation der elektrischen Wahrnehmungs- und Stimulationsfelder kann zur Optimierung der transösophagealen Neurostimulation eingesetzt werden.

- Referenzen/References:
- [1] M. Schleh, M. Heinke, J. Hörth: Esophageal electrode model and simulation of directed transesophageal electrical pacing of the spinal cord. *Current Directions in Biomedical Engineering*, Bd. 5, Heft 1, S. 89–92, ISSN (Online) 2364-5504, DOI: <https://doi.org/10.1515/cdbme-2019-0023>
 - [2] Morales A, Yong RJ, Kaye AD, Urman RD: Spinal Cord Stimulation: Comparing Traditional Low-frequency Tonic Waveforms to Novel High Frequency and Burst Stimulation for the Treatment of Chronic Low Back Pain. *Curr Pain Headache Rep*. 2019 Mar 14;23(4):25. doi: 10.1007/s11916-019-0763-3
 - [3] M. Heinke, M. Schalk: Ösophagus-elektroden-sonde und Vorrichtung zur kardiologischen Behandlung und/oder Diagnose. DE 10 2017 010 318 B3 2019.02.21, Anmeldetag: 07.11.2017, Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 21.02.2019
 - [4] Morgenstern U, Kraft M, *Biomedizinische Technik - Faszination, Einführung, Überblick*, Bd. 1, Berlin: De Gruyter, 2014

AUTOREN



Manuela Schleh B.Sc.
Fakultät EMI, Medizintechnik Absolventin
mschleh@stud.hs-offenburg.de



Prof. Dr.-Ing. med. habil. Matthias Heinke
Fakultät EMI, Praktikantenamtsleiter Medizintechnik, Wissenschaftl. Ltg. Labor Kardiologische Gerätetechnik u. Rhythmologie
matthias.heinke@hs-offenburg.de



Johannes Hörth M.Sc.
Fakultät EMI, Akademischer Mitarbeiter, Laborassistent Labor Kardiologische Gerätetechnik und Rhythmologie
johannes.hoerth@hs-offenburg.de