Institut für Angewandte Forschung Hochschule Offenburg

forschung im fokus

Ausgabe Nr. 20 / 2017

Hannover Messe-Publikumsmagnet & Fußball-Vizeweltmeister *Sweaty* bereitet sich auf die WM in Japan vor

E-Feld-Simulation bei CRT und Ablation

Martin Krämer M. Sc., Dipl.-Ing. (FH) Reinhard Echle M. Eng.,
Prof. Dr.-Ing. Lothar Schüssele, Prof. Dr.-Ing. med. habil. Matthias Heinke

Die Entwicklung von neuartigen Elektrodentypen und die Weiterentwicklung bestehender Produkten machen einen großen Teil der entstehenden Kosten für ein Unternehmen aus. Mithilfe geeigneter Software können Änderungen der Konstruktionen erfasst und bestimmte Simulationen, bspw. das Auftreten von Wechselwirkungen im elektrischen Feld, vor der eigentlichen Prototypenerstellung durchgeführt werden. Das Ziel der Studie besteht in der Modellierung unterschiedlicher Schrittmacher- und Ablationselektroden und deren Integration in das Offenburger Herzrhythmusmodell (HRM) zur statischen und dynamischen Simulation der biventrikulären Stimulation und HF Ablation bei Vorhofflimmern (AF).

The development of innovative types of electrodes and the further development of existing products account for a large part of the resulting costs for a company. With the help of suitable software, changes of the constructions can be recorded and certain simulations, eg. the occurrence of interactions in the electric field, can be carried out before the actual prototyping. The aim of the study was to model different pacing and ablation electrodes and to integrate them into the Offenburg heart rhythm model (HRM) for the static and dynamic simulation of bivenrtricular stimulation and HF ablation in atrial fibrillation (AF).

Einleitung

Das elektrische Feld (E-Feld) der biventrikulären (BV) Stimulation ist bei Patienten mit Herzinsuffizienz und verbreitertem QRS Komplex von großer Bedeutung für den Erfolg der kardialen Resynchronisationstherapie (CRT). Die 3D Modellierung ermöglicht die Simulation der CRT und Hochfrequenz (HF) Ablation. Das Ziel der Studie besteht in der Modellierung unterschiedlicher Schrittmacher- und Ablationselektroden und deren Integration in ein Herzmodell zur statischen und dynamischen Simulation der BV Stimulation und Ablation bei Vorhofflimmern (AF) mithilfe der CST STUDIO SUITE® (CST Computer Simulation Technology AG, Darmstadt).

Methoden

Die Modellierung und Simulation erfolgte mithilfe der Konstruktions- und Simulationssoftware CST (Computer Simulation Technology, Darmstadt). Auf Basis der technischen Handbücher der Hersteller Medtronic und Biotronik wurden insgesamt fünf multipolare linksventrikuläre (LV) Elektroden, eine epikardiale LV-Elektrode, vier bipolare rechtsatriale (RA-)Elektroden, zwei rechtsventrikuläre (RV) Elektroden und ein HF Ablationskatheter modelliert (Abb. 1). Für die Simulation des E-Feldes während BV Stimulation wurde die Select Secure 3830, Capsure VDD-2 5038 und Attain

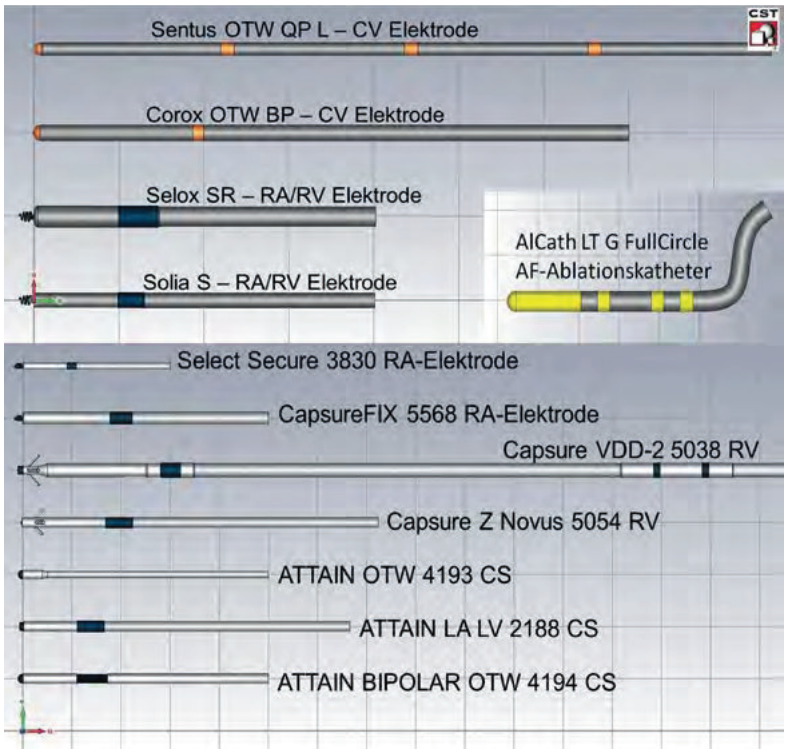

Abb. 1:
Übersicht über die verschiedenen modellierten RA-, RV-, LV-Elektrodenmodelle

OTW 4194 (Medtronic) in das Herzrhythmusmodell (Schalk, Offenburg [1]) integriert. Die Simulation einer AV-Knoten-Ablation bei CRT erfolgte mit RA-, RV- und LV-Elektroden und integriertem Ablationskatheter AlCath LT G FullCircle (Biotronik)(Abb.2).

Ergebnisse

Die RV- und LV-Stimulation erfolgten zeitgleich bei einer Amplitude von 3 V an der LV-Elektrode und 1,5 V an der RV-Elektrode mit einer Impulsbreite von jeweils 0,5 ms. Die von der BV-Stimulationen erzeugten Fernpotentiale konnten von der RA-Elektrode wahrgenommen werden. Das Fernpotential an der RA -Elektrodenspitze betrug 32,86 mV. In 1 mm Abstand von der RA-Elektrodenspitze ergab sich ein Fernpotential von 185,97 mV (Abb. 3).

Die AV-Knoten Ablation wurde mit einer anliegenden Leistung von 5 W bei 420 kHz an der distalen 8 mm Ablationselektrode simuliert. Die Temperatur an der Katheterspitze betrug nach 5 s Ablationsdauer 103,87 °C, in 1 mm Abstand von der Katheterspitze im Myokard 44,17 °C und in 2 mm Abstand 37,61 °C. Nach 10 s betrug die Temperatur an den drei zuvor beschriebenen Messpunkten 107,33 °C, 50,87 °C, 40,05 °C und nach 15 s 118,42 °C, 55,75 °C und 42,13 °C. In Abbildung 4 ist die Temperaturausbreitung im Gewebe nach 1 s, 5 s und 15 s grafisch dargestellt und der Temperaturverlauf über die Gesamtablationsdauer von 30s an den vier Messpunkten wiedergegeben.

Schlussfolgerungen

Virtuelle Herz- und Elektrodenmodelle sowie die Simulationen von E-Feldern und Temperaturverläufen ermöglichen die statische und dynamische Simulation von vorhofsynchroner BV-Stimulation und HF-Ablation bei AF. Die 3D-Simulation von E-Feld und Temperaturverlauf können möglicherweise zur Optimierung der CRT- und AF-Ablation genutzt werden

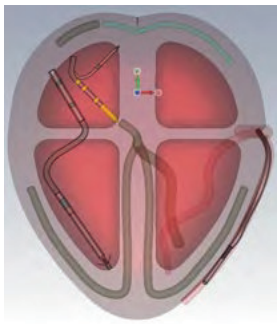

Abb. 2:
CRT-Elektrodenanlage der Select Secure 3830, Capsure VDD-2 5038, Attain OTW 4194 und dem Ablationskatheter AlCath LT G FullCircle im Herzmodell als Frontalansicht

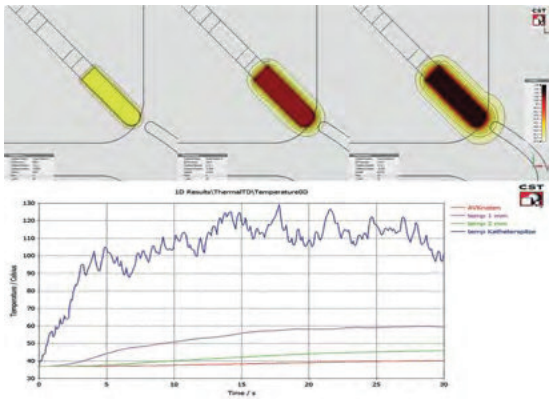

Abb. 3:
v.o.n.u.: 2D-Ansicht der Potentialfeldausbreitung bei biventrikulärer Stimulation und Schnittebene auf Höhe der rechtsventrikulären Elektrode. Spannungsmessung während BV-Stimulation an verschiedenen Messpunkten entlang der rechtsatrialen Elektrodenachse

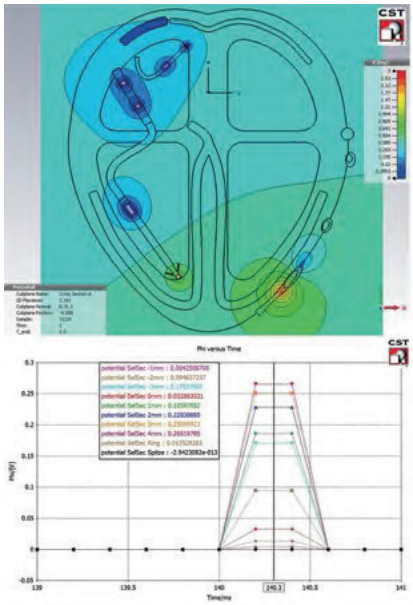

Abb. 4:
v.o.n.u.: Ausbreitung der Temperatur zum Zeitpunkt T = 1 s, 5 s und 15 s nach Ablationsbeginn. Temperaturverlauf, gemessen über 30 s an vier verschiedenen Messpunkten in 1 mm Abständen, ausgehend von der Katheterspitze

Referenzen/References:
[1] M. Schalk (2016). Rhythmologisches Herzmodell und Simulation mit CST, Offenburg

AUTOREN

Martin Krämer M. Sc.
Absolvent Medizintechnik Fakultät E+I
kraemer-martin@gmx.net

Prof. Dr.-Ing. Lothar Schüssele
Wissenschaftlicher Leiter der Labore Hochfrequenztechnik und EMV, Mitglied IAF ,Geschäftsführer des Kuratoriums der Hochschule
l.schuessele@hs-offenburg.de

Dipl.-Ing. (FH) Reinhard Echle M. Eng.,
Akad. Mitarbeiter Fakultät E+I, Laborleiter Hochfrequenztechnik und EMV, Laborleiter Mobile Kommunikation und Wellen
reinhard.echle@hs-offenburg.de

Prof. Dr.-Ing. med. habil. Matthias Heinke
Praktikantenamtsleiter Medizintechnik und Leiter Labor Kardiovaskuläre Gerätetechnik und Rhythmologie
matthias.heinke@hs-offenburg.de

Herzrhythmusmodell zur Simulation von EPU und Ablation

Marco Schalk M. Sc., Dipl.-Ing. (FH) Reinhard Echle M. Eng.,
Prof. Dr.-Ing. Lothar Schüssele, Prof. Dr.-Ing. med. habil. Matthias Heinke

Die Simulation komplexer kardialer Strukturen und kardialer Elektroden ist von Bedeutung für die Optimierung langatmiger und kostspieliger klinischer Studien. Das Risiko der Patientengefährdung wird durch diese Methode auf ein Minimum reduziert. Das Ziel der Studie besteht im Entwurf eines anatomisch korrekten 3D CAD Herzrhythmusmodells (HRM) zur Simulation von elektrophysiologischen Untersuchungen (EPU) und Hochfrequenz-(HF-)Ablationen.

The simulation of complex cardiologic structures and cardiac electrodes have the potential to replace clinical studies due to its high efficiency regarding time and costs. Furthermore, the method is more careful for the patients' health than the conventional ways. The aim of the study was to create an anatomic 3D-CAD-heart rhythm model (HRM) as accurate as possible, and to show its usefulness for cardiac electrophysiological studies (EPS) and high-frequency (HF) ablations.

Einleitung

CST STUDIO SUITE® ist eine Simulationssoftware (CST Computer Simulation Technology AG, Darmstadt), mit der eine Vielzahl von elektromagnetischen Simulationen durchgeführt werden kann. Von großer Bedeutung für diese Arbeit ist der Niederfrequenzbereich mit Simulationen im Zeitbereich. Durch die Möglichkeit, materialunabhängig elektrische Potenziale anzulegen und Spannungspfade zu definieren, eignet sich die Software hervorragend für die Simulation von Erregungsleitungen innerhalb des Herzens und zur Simulation der elektrischen Herzstimulation und Elektrokardiographie mit intrakardialen und transösophagealen Elektrodenkathetern [1]. Das Ziel der Studie besteht im Entwurf eines anatomisch korrekten 3D-CAD-Herzrhythmusmodells (HRM) zur Simulation von elektrophysiologischen Untersuchungen (EPU) und Hochfrequenz-(HF-) Ablationen.

Methoden

Die Evaluierung vorhandener Herzmodelle führte zur Entscheidung ein eigenes Herzrhythmusmodell zu entwickeln, das auf spezielle rhythmologische Situationen zugeschnitten ist. Die Modellierung erfolgte mit dem CST 3D Modeler, der es ermöglichte, neben den vier Herzkammern das Erregungsbildungs- und Reizleitungssystem des Herzens zu modellieren. Die Material Library von CST beinhaltet eine Vielzahl von Materialien, die sich auf menschliches Körpergewebe beziehen. Dies ist ein weiterer Vorteil von CST, da in diesen Werkstoffen die notwendigen Parameter wie elektrische Leitfähigkeit oder Wärmekapazität enthalten sind. Ein besonderes Merkmal ist die Berücksichtigung der Gewebekühlung durch einen eingerechneten Blutfluss und Metabolismus [2-4].

Um die Elektrodenkatheter zu entwerfen, wurde auf frei erhältliche auf dem Markt etablierte multipolare Herzkatheter zurückgegriffen, die exakt in dem Modeler nachgebildet wurden. Berechnungsdauer und benötigte Speicherkapazität zeigten eine starke Abhängigkeit von den tetrahedralen Mesh-Einstellungen und von der gewählten Schrittweite der Simulation. An der Reizleitung des entwickelten Modells wurden unterschiedliche Ausbreitungssignale, Reizleitungszeiten, Spannungen sowie Monitoringparameter und Katheterpositionen für die EPU getestet (Abb. 1).

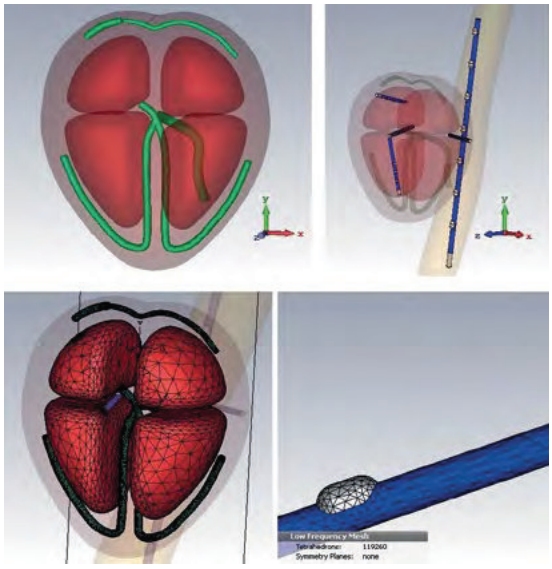

Abb. 1:
v.l.n.r.: CAD-Herzrhythmusmodell mit Erregungsleitung, Herzmodell mit positionierten Herzkathetern, tetrahedrales Mesh der Herzkammern und der Erregungsleitung, Ausschnitt des tetrahedralen Mesh des Oesophaguskatheters

Ergebnisse

Es wurde ein voll funktionsfähiges und funktionelles 3D-Herzrhythmusmodell mit Sinusknoten, Bachmann-Bündel, AV-Knoten, His-Bündel, rechts- und linksventrikuläre Tawaraschenkel konstruiert. Die Anatomie konnte auf Basis von MRT-Aufnahmen und anatomischen Schnittbildern maßstabsgetreu entworfen werden. Ebenso wurden verschiedene Elektrodenkatheter exakt nachgebildet und an geeigneten Stellen im Herzmodell positioniert. Sowohl die für die Herzkatheter verwendeten Materialen als auch die Gewebeparameter der Herzanatomie und Rhythmologie, waren sehr gut für die Simulationen geeignet.

Die Funktion des Monitorings an definierten Punkten ermöglichte die Ableitung simulierter Eigensignale des Herzens mithilfe unterschiedlicher Elektroden der multipolaren Elektrodenkatheter. Die zeitliche Darstellung einer elektrischen Herzaktivität konnte durch LF-Time-Domain-Solver als E-Feld problemlos visualisiert werden. Da sich unterschiedliche Anregungssignale innerhalb der Software erstellen lassen, war die Rekonstruktion von unterschiedlichen Herzrhythmen realisierbar. Eine weitere Möglichkeit der Software bestand in der thermalen Simulation. Hier konnten Wärme- und Leistungsquellen simuliert werden und je nach gewünschtem Ergebnis statisch oder im Zeitbereich über eine definierte Zeitspanne berechnet werden. Durch die Simulation von Leistungsquellen im Zeitbereich konnte eine Therapie in Form einer HF-Ablation durch die Möglichkeit der Definition eines hochfrequenten Sinussignals dargestellt werden.

Die Ergebnisse sind sowohl in animierter, ein- und zweidimensionaler Form plausibel und aussagekräftig. Mit dem neuen HRM wurden Parameter definiert, um Sinusrhythmus, elf unterschiedliche bradykarde und tachykarde Herzrhythmusstörungen (Abb. 2, 3), drei antibradykarde Herzstimulationen (Abb. 4) und fünf verschiedene HF Ablationen (Abb. 5) zu berechnen. Die simulierten Fallbeispiele veranschaulichen die rhythmologische Funktionsweise des Herzens und die elektrischen Abläufe im Rahmen der Diagnostik und Therapie von Herzrhythmusstörungen optimal.

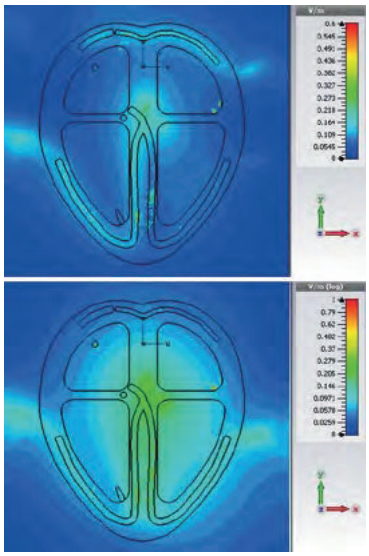

Abb. 2:
v.o.n.u.:Darstellung eines simulierten linksanterioren Hemiblocks zum Zeitpunkt der ventrikulären Erregung, Darstellung eines simulierten Sinusknotensyndroms zum Zeitpunkt der atrioventrikulären Erregung durch den Ersatzrhythmus

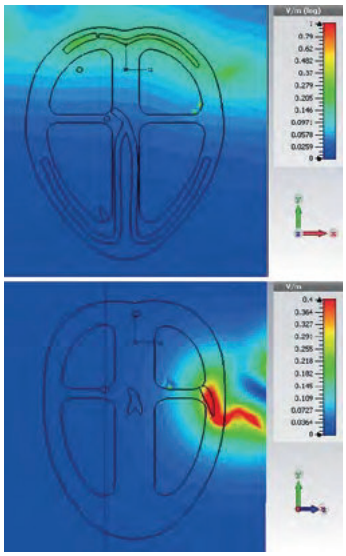

Abb. 3:
v.o.n.u. Darstellung eines simulierten AV-Blocks III.° zum Zeitpunkt der Vorhoferregung, Darstellung einer simulierten WPW-Tachykardie zum Zeitpunkt der Erregung der Kent-Bahn

Referenzen/References:
[1] M. Heinke, H. Kühnert, T. Heinke, J. Tumampos, G. Dannberg: Electrical Left Atrial Conduction Delay with Focused Transesophageal Electrocardiography in Cardiac Resynchronization Therapy. D.A. Jaffray (ed.), World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, June 7-12, 2015, Toronto, Canada, IFMBE Proceedings 51, DOI: 10.1007/978-3-319-19387-8_255
[2] Benjamin Loader (2013).Applications of CST to modelling human interaction with EM fields: a metrological perspective. https://www.cst.com/Content/Articles/article749/NPL_B%20Loader%20CST%202013_web%20friendly.pdf, Abruf am 11.05.2016
[3] Hubert J. Visser (2015). Taking ECG Signals from a human voxel model. file:///E:/Uni/Master%20Thesis/Recherche%20Voxel%20Modelle/Visser-MUL-LAPC2015-2016-Vol14-Mar._Apr.-009%20Taking%20ECG%20Signals%20from%20.....pdf, Abruf am 11.05.2016
[4] CST (2013). Modeling Temperature Effects of RF Thermoablation in a Human Liver using the Bioheat Formulation in CST STUDIO SUITE. https://www.cst.com/Applications/Article/RF-Thermoablation-In-A-Human-Liver-Using-The-Bioheat-Formulation-In-CST-STUDIO-SUITE, Abruf am 15.05.2016

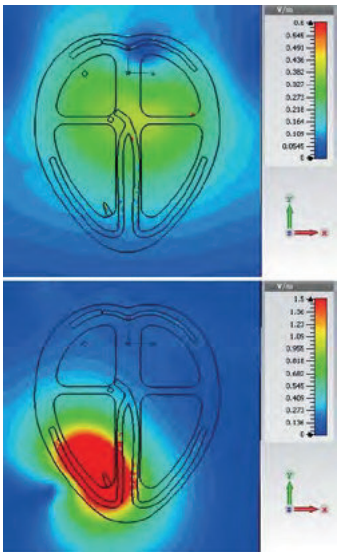

Abb. 4:
v.o.n.u. Darstellung einer simulierten transoesophagealen Vorhofstimulation durch den Oesophaguskatheter, Darstellung einer simulierten vorhofgesteuerten Ventrikelstimulation

Schlussfolgerungen

Das erstellte Herzrhythmusmodell mit integrierten multipolaren Elektrodenkathetern ermöglicht die elektrische Feldsimulation von EPU und die thermale Simulation von HF Ablationen im Rahmen der Diagnostik und Therapie von bradykarden und tachykarden Herzrhythmusstörungen. Die Simulationen von Braykardien, Tachykardien, Elektrostimulation, Elektrokardiographie und HF-Ablation können potentiell die Diagnostik und Therapie von Herzrhythmusstörungen, klinischen Studien sowie Lehre und Forschung unterstützen.

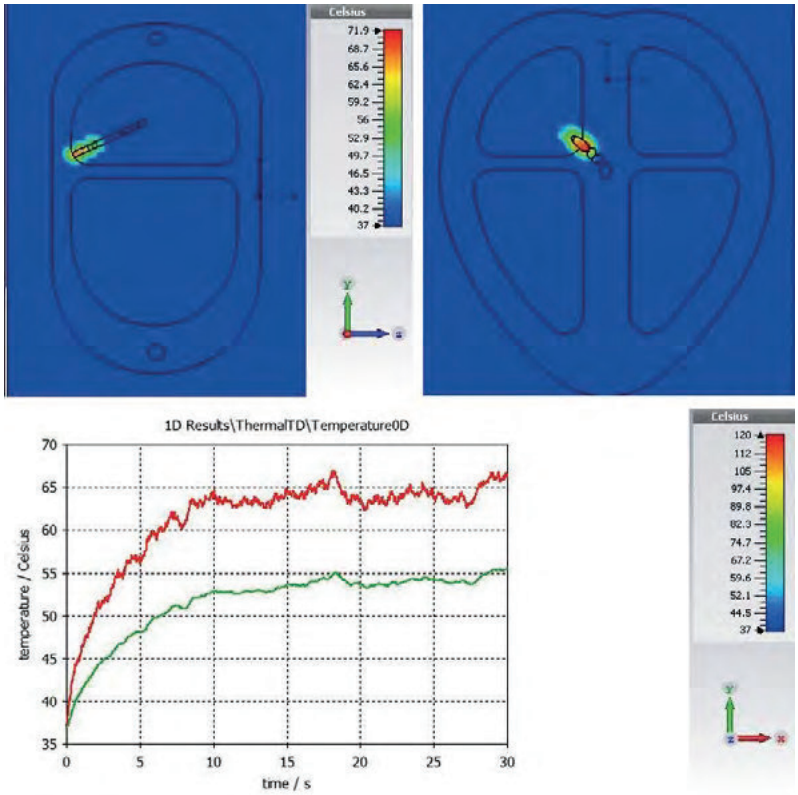

Abb. 5:
v.l.n.r.: Darstellung einer simulierten Isthmus-Ablation bei rechtsatrialem Vorhofflattern, Darstellung einer simulierten Fast-Pathway-AV-Knoten-Modulation bei AV-Knoten-Reentrytachykardie (AVNRT), grafisch dargestellter Temperaturverlauf an der Katheterspitze (rot) und in 1mm Gewebetiefe (grün) bei der simulierten Isthmus-Ablation bei rechtsatrialem Vorhofflattern

AUTOREN

Marco Schalk M. Sc., Absolvent
Medizintechnik Fakultät E+I
marcoschalk@hotmail.com

Prof. Dr.-Ing. Lothar Schüssele
Wissenschaftlicher Leiter der Labore Hochfrequenztechnik und EMV, Mitglied IAF ,Geschäftsführer des Kuratoriums der Hochschule
l.schuessele@hs-offenburg.de

Dipl.-Ing. (FH) Reinhard Echle M. Eng.,
Akad. Mitarbeiter Fakultät E+I, Laborleiter Hochfrequenztechnik und EMV, Laborleiter Mobile Kommunikation und Wellen
reinhard.echle@hs-offenburg.de

Prof. Dr.-Ing. med. habil. Matthias Heinke
Praktikantenamtsleiter Medizintechnik und Leiter Labor Kardiovaskuläre Gerätetechnik und Rhythmologie
matthias.heinke@hs-offenburg.de