

Universität
Rostock



Traditio et Innovatio



Design and Fabrication of Thermoelectric Generators for Implantable Medical Devices

Dissertation to obtain the academic degree of

Doctor of Engineering (Dr.-Ing.)

from the Faculty of Computer Science and Electrical Engineering at the
University of Rostock

submitted by

Yongchen Rao, born on August 23, 1994, in Wuhan, China

Rostock, November 8, 2024

Abstract

Implantable medical devices (IMDs) have revolutionized healthcare by enabling advanced treatment options and gathering vital physiological data for diagnostics, prognostics, therapies, and biological studies. However, the lifespan of IMDs is often limited by the capacity of their integrated batteries. Implantable thermoelectric generators (ITEGs) present a promising solution by converting internal body temperature differences into electrical energy via the Seebeck effect, potentially extending device lifespan or enabling self-sustaining operation without battery replacements.

This thesis thoroughly investigates ITEGs for powering active IMDs, focusing on design and fabrication. A novel ITEG design using a polyetheretherketone (PEEK) housing was proposed due to PEEK's biocompatibility and low thermal conductivity. Integrated metal heat conductors in the housing reduce thermal resistance between tissue and the TEG.

A simplified tissue model, including skin, fat, and muscle, was developed to simulate the implantation environment and assess ITEG feasibility. This model considers essential bio-heat effects such as metabolic heat generation, blood perfusion, and sweating. An efficient parametric simulation approach was employed using a simplified TEG model with a representative thermopile and decoupled Peltier heat approximation.

To further increase simulation accuracy, detailed human torso and head models with realistic anatomical geometries were developed, applying bio-heat effects across various tissue types. Parametric analysis and design optimization explored the influence of factors such as fill factor, thermolegs quantity, housing size, material, and implant location on ITEG performance. Trade-offs between power, miniaturization, hermeticity, and manufacturability were extensively analyzed.

To maximize power generation and voltage output, ITEGs with free-standing thermolegs of high aspect ratios were identified as optimal. A novel fabrication method using a removable assembly rig was introduced, facilitating the creation of TEGs with varying array configurations. The most complex TEG featured 254 thermolegs with dimensions of $0.5 \times 0.5 \times 4 \text{ mm}^3$. Additionally, a compact TEG with an integrated boost converter circuit was designed and fabricated, meeting the spatial and voltage requirements of IMDs. Characterization was performed using custom setups and benchmarked with commercial devices.

Addressing moisture ingress, which affects ITEG safety and longevity, the hermeticity of the PEEK housing was evaluated through helium leak tests and moisture penetration experiments. Applying Parylene C coating to the PEEK surface significantly enhanced hermeticity.

Zusammenfassung

Implantierbare medizinische Geräte (IMDs) haben die Gesundheitsversorgung revolutioniert, indem sie fortschrittliche Behandlungsmöglichkeiten bieten und wichtige physiologische Daten für Diagnosen, Prognosen, Therapien und biologische Studien sammeln. Die Lebensdauer von IMDs ist jedoch oft durch die Kapazität ihrer integrierten Batterien begrenzt. Implantierbare thermoelektrische Generatoren (ITEGs) bieten eine vielversprechende Lösung, indem sie Temperaturunterschiede innerhalb des Körpers mittels des Seebeck-Effekts in elektrische Energie umwandeln, was die Lebensdauer der Geräte verlängern oder einen energieautonomen Betrieb ohne Batteriewechsel ermöglichen kann.

Diese Dissertation untersucht ITEGs zur Energieversorgung aktiver IMDs umfassend und konzentriert sich auf Design und Fertigung. Ein neuartiges ITEG-Design mit einem Gehäuse aus Polyetheretherketon (PEEK) wurde aufgrund dessen Biokompatibilität und der niedrigen Wärmeleitfähigkeit vorgeschlagen. Integrierte metallische Wärmeleiter im Gehäuse reduzieren den thermischen Widerstand zwischen Gewebe und TEG.

Ein vereinfachtes Geometriemodell, das Haut-, Fett- und Muskelgewebe beinhaltet, wurde entwickelt, um die Implantationsumgebung zu simulieren und die Machbarkeit von ITEGs zu bewerten. Dieses Modell berücksichtigt wichtige Bio-Wärme-Effekte wie metabolische Wärmeerzeugung, Durchblutung und Schwitzen. Ein effizienter parametrischer Simulationsansatz wurde unter Verwendung eines vereinfachten TEG-Modells mit einem repräsentativen Thermopile und entkoppelter Peltier-Wärme-Approximation angewendet.

Zur weiteren Erhöhung der Simulationsgenauigkeit wurden detaillierte Modelle des menschlichen Torsos und Kopfes mit realistischen anatomischen Geometrien entwickelt, die Bio-Wärme-Effekte über verschiedene Gewebetypen anwenden. Parametrische Analysen und Designoptimierungen untersuchten den Einfluss von Faktoren wie Füllfaktor, Anzahl der Thermoelemente, Gehäusegröße, Material und Implantationsort auf die Leistung der ITEG. Kompromisse zwischen Leistung, Miniaturisierung, Dichtigkeit und Herstellbarkeit wurden umfassend analysiert.

Um die Leistungs- und Spannungsausgabe zu maximieren, wurden ITEGs mit freistehenden Thermoelementen und hohen Aspektverhältnissen als optimal identifiziert. Ein neuartiges Fertigungsverfahren mit einem abnehmbaren Montagerahmen wurde eingeführt, um die Herstellung von TEGs mit unterschiedlichen Anordnungsconfigurationen zu erleichtern. Der komplexeste TEG verfügte über 254 Thermoelemente mit Abmessungen von $0,5 \times 0,5 \times 4 \text{ mm}^3$. Zusätzlich wurde ein kompakter TEG mit einem integrierten Spannungswandler entworfen und gefertigt, der die räumlichen Randbedingungen und Spannungsanforderungen von IMDs erfüllte. Die Charakterisierung erfolgte mit benutzerdefinierten Aufbauten und kommerziellen Messgeräten.

Um den Feuchtigkeitseintritt, welche die Sicherheit und Lebensdauer von ITEGs beeinträchtigt, zu adressieren, wurde die Dichtigkeit des PEEK-Gehäuses durch Helium-Lecktests

und Feuchtigkeitsdurchdringungsexperimente bewertet. Die Beschichtung der PEEK-Oberfläche mit Parylene C verbesserte die Dichtigkeit erheblich.