

**Universität
Rostock**



Traditio et Innovatio

Modelling and simulation of the electric field distribution of electrostimulative implants for regeneration of mandibular bone defects

Dissertation

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der Fakultät für Informatik und Elektrotechnik

der Universität Rostock

vorgelegt von

Hendrikje Raben, geboren am 07. März 1993 in Schwerin
aus Rostock

Rostock, 18. März 2024

Zusammenfassung

Unterkieferdefekte, die beispielsweise aus Tumorresektionen resultieren, beeinträchtigen die Lebensqualität der Betroffenen erheblich und erfordern oft komplexe chirurgische Eingriffe. Der Goldstandard zur Regeneration dieser Defekte, autologe Knochentransplantate, gehen jedoch häufig mit Komplikationen und langwierigen Heilungsprozessen einher. Elektrostimulation ist eine vielversprechende alternative Methode zur Verbesserung der Knochenheilung, die bisher jedoch hauptsächlich in anderen anatomischen Bereichen, wie der Hüfte, angewendet wird. Bisher gibt es für den Unterkiefer keine klinisch etablierten Implantatdesigns mit elektrischer Stimulation. Diese Dissertation widmet sich daher der Entwicklung solcher elektrostimulierender Implantate zur Regeneration von Unterkieferdefekten. Diese Implantate sollen den defekten Knochen dabei mit optimalen elektrischen Feldstärken zwischen 5 und 70 V/m versorgen. Ziel der Arbeit ist es, die elektrische Feldverteilung in der Umgebung des Implantats zu analysieren und daraus Schlüsse für die Anwendung der Methode in der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie zu ziehen. Hierfür wird zunächst ein detailliertes, makroskopisches 3D-Modell eines Schweineunterkiefers mit einem Knochendefekt kritischer Größe, umgebendem Weichteilgewebe und einem implantierten bipolaren Stimulationsimplantat erstellt. Die dielektrischen Eigenschaften von Unterkieferknochen von Minischweinen werden basierend auf Messungen modelliert und es werden zwei verschiedene Szenarien unterschieden. Diese Szenarien berücksichtigen entweder eine Korrektur der Messdaten bei niedrigen Frequenzen oder vernachlässigen diese. Das Minischwein-Modell wird mittels der Finite-Elemente-Methode numerisch analysiert. Die Untersuchung konzentriert sich darauf, das unter-, über- und nutzbringend stimulierte Volumen in der Defekt-

region zu quantifizieren, um den Erfolg der Elektrostimulation zu bewerten. Dabei werden die Elektrodenlänge und das Stimulationspotential bei einer Stimulationsfrequenz von $f = 20$ Hz numerisch optimiert, um einen maximalen Bereich mit nutzbringenden Feldstärken zu versorgen. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit besteht in der Analyse des Einflusses von unsicheren Modellparametern auf die Simulationsergebnisse durch die numerische Quantifizierung von Unsicherheiten (*Uncertainty Quantification*). Hierbei werden die dielektrischen Eigenschaften der biologischen Gewebe, sowie die Parameter der Elektrode-Gewebe-Grenzfläche berücksichtigt. Zusätzlich zum Minischwein-Modell werden zwei Simulationsmodelle von menschlichen Unterkiefern untersucht, um wertvolle Erkenntnisse über wichtige Parameter und Aspekte der Elektrostimulation in diesem Anwendungsbereich zu gewinnen. Damit trägt die vorliegende Doktorarbeit zur Entwicklung fortschrittlicher Implantatdesigns und zur Optimierung der Elektrostimulation in der Mund-, Kiefer-, und Gesichtschirurgie bei.

Abstract

Mandibular defects, for example resulting from tumour resections, significantly impair the quality of life of patients and often require complex surgical procedures. However, autologous bone graft, the gold standard for regenerating these defects, is often associated with complications and prolonged healing processes. Electrical stimulation is a promising alternative method for improving bone healing, but so far it has mainly been used in other anatomical areas, such as the hip. At present, there are no clinically established mandibular electrostimulation implant designs. This dissertation is therefore dedicated to the development of such electrostimulating implants for the regeneration of mandibular defects. These implants aim to provide optimal electric field strengths of 5 to 70 V/m to the defect area. The objective of this thesis is to examine the electric field distribution around the implant and to draw conclusions for the application of the method in oral and maxillofacial surgery. To this end, a detailed, macroscopic 3D model of a minipig mandible with a critical-size bone defect, surrounding soft tissue and an implanted bipolar stimulation implant is created. Furthermore, the dielectric properties of mandibular bone of minipigs are modelled based on own measurements and two different scenarios are distinguished. These scenarios either consider a correction of the measurement data at low frequencies or neglect them. The minipig model is then analysed numerically using the finite element method. The investigation focusses on quantifying the under-, over- and beneficially stimulated volume in the defect region in order to evaluate the success of the electrical stimulation. The electrode length and the stimulation potential are numerically optimised at a stimulation frequency of $f = 20$ Hz to ensure a maximum region of beneficially stimulated tissue. A further aim of this work is to analyse the influ-

ence of uncertain model parameters on the simulation results using uncertainty quantification. The dielectric properties of the biological tissues and the parameters of the electrode-tissue interface are taken into account. In addition to the minipig model, two simulation models of human mandibles are analysed in order to gain valuable insights into important parameters and aspects of electrical stimulation in this field of application. This doctoral thesis thus contributes to the development of advanced implant designs and the optimisation of electrical stimulation in oral and maxillofacial surgery.