

Dissertation  
zur Erlangung des Grades  
Doktor - Ingenieur  
der  
Fakultät für Elektrotechnik  
der  
Ruhr - Universität Bochum

# **Numerische Simulation der hyperthermen isolierten Extremitätenperfusion**

Joachim Gantenberg

Mai 2000







# Bochumer Berichte aus der Biomedizinischen Technik



Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. H. Ermert und Prof. Dr.-Ing. J. Werner

---

**Joachim Gantenberg**

## **Numerische Simulation der hyperthermen isolierten Extremitätenperfusion**

---

Aachen 2000

**SHAKER**  
VERLAG

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

*Gantenberg, Joachim:*

Numerische Simulation der hyperthermen isolierten Extremitätenperfusion/  
Joachim Gantenberg. Aachen : Shaker, 2000

(Bochumer Berichte aus der Biomedizinischen Technik)

Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2000

ISBN 3-8265-8215-2

Copyright Shaker Verlag 2000

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen  
oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungs-  
anlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-8215-2

ISSN 1432-8569

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung und Fragestellung</b>	<b>1</b>
<b>2. Geometriemodelle</b>	<b>7</b>
2.1. Rekonstruktion von Volumenmodellen . . . . .	7
2.1.1. Erzeugung optimierter Randkanten in Tomographieschicht- bildern . . . . .	12
2.1.2. Generierung der Volumenmodelle auf Basis der optimier- ten Randkanten . . . . .	18
2.1.3. Diskretisierung des Lösungsgebietes . . . . .	21
2.1.4. Kriterien für die Auswahl eines Mesh- Modells . . . . .	24
2.1.5. Für die Simulation verwandte Geometriemodelle . . . . .	26
2.1.5.1. Kegelstumpfmodell mit Gefäßen . . . . .	26
2.1.5.2. Geweberekonstruktion des gesamten Beines . . . . .	28
2.1.5.3. Segmente der Gesamtgeweberekonstruktion (Bein- scheiben) . . . . .	30

---

<b>3. Wärmebilanzgleichung und Perfusionsmodelle</b>	<b>33</b>
3.1. Fourier ´sche Wärmebilanzgleichung . . . . .	33
3.2. Der konvektive Wärmetransport kleiner GefäÙe . . . . .	34
3.2.1. Bioheat- Transfergleichung von Pennes (1948) . . . . .	35
3.2.2. Effektivitätsfunktion EF (1992) . . . . .	35
3.2.3. New fundamental bioheat equation (1997) . . . . .	39
3.2.4. Vergleichende Betrachtung der Perfusionsmodelle . . . . .	43
3.3. Der Wärmetausch zentraler GefäÙe . . . . .	44
3.3.1. Berechnung der arteriellen Temperatur . . . . .	49
3.3.2. Berechnung der venösen Temperatur . . . . .	50
3.4. Entwicklung eines Perfusionsmodells für Tumorgewebe . . . . .	51
3.5. Parametersatz . . . . .	54
3.5.1. Physikalische Parameter . . . . .	56
3.5.2. Aus Perfusionsmodellen entwickelte Parameter . . . . .	56
<b>4. Lösungsverfahren für die Wärmebilanzgleichung</b>	<b>59</b>
4.1. Stationäre Probleme . . . . .	61
4.2. Transiente Probleme . . . . .	62
4.3. Lösung des Gleichungssystems . . . . .	63
4.3.1. Die sparse- Bibliothek . . . . .	64
<b>5. Hyperthermietherapie</b>	<b>67</b>
5.1. Isolierte Extremitätenperfusion . . . . .	68
5.1.1. Beschreibung des Verfahrens . . . . .	68

---

5.1.2.	Auswirkung der Anwendung des Verfahrens auf die Temperatursimulation . . . . .	70
5.1.3.	Therapieplanungssystem . . . . .	70
<b>6.</b>	<b>Ergebnisse - Vergleich mit Messungen und Kommentierung</b>	<b>73</b>
6.1.	Möglichkeiten der Validierung . . . . .	73
6.2.	Überprüfung des Parametersatzes . . . . .	74
6.2.1.	Vergleich mit Messungen . . . . .	74
6.2.1.1.	Brück (1953) . . . . .	74
6.2.1.2.	Webb (1992) . . . . .	75
6.2.1.3.	Komentierung der Ergebnisse der Abschnitte 6.2.1.1 und 6.2.1.2 . . . . .	77
6.2.2.	Vergleich mit publizierten Rechnungen . . . . .	80
6.2.2.1.	Aschoff (1958) . . . . .	80
6.2.3.	Vergleich der Simulation des gegenläufigen Wärmetausches großer Gefäße mit invasiven Messungen . . . . .	82
6.2.3.1.	Invasive Temperaturmessung im tiefen Oberschenkelmuskel (G. Kenny 1998) . . . . .	82
6.2.4.	Überprüfung der Simulationen der isolierten Extremitätenperfusion . . . . .	86
6.2.5.	Zusammenfassung der Ergebnisse der Überprüfungen . . . . .	90
6.2.6.	Berechnete arterielle und venöse Bluttemperaturen . . . . .	91
6.3.	Simulationen der isolierten Extremitätenperfusion . . . . .	93
6.3.1.	Transiente Temperaturfelder in der gesamten Extremität . . . . .	93
6.3.2.	Einfluß der Isolation durch Wärmefolien . . . . .	96

6.4. Hyperthermiesimulationen unter Berücksichtigung der Tumorperfusion . . . . .	102
6.4.1. Einfluß der Perfusionsrate auf das Temperaturfeld . . .	102
6.4.2. Einfluß externer Strahlungsquellen auf die Tumortemperatur . . . . .	106
6.4.3. Transiente Temperaturfelder während einer theoretischen Therapie . . . . .	107
6.4.4. Therapievorschläge . . . . .	112
<b>7. Diskussionen und Schlußfolgerung</b>	<b>115</b>
7.1. Diskussion der Rekonstruktion von Geometriemodellen . . . . .	115
7.2. Diskussion der Modelle des konvektiven Wärmetransports . . .	117
7.3. Diskussion des Modells zur Beschreibung des Wärmetransportes zentraler Gefäße . . . . .	120
7.4. Diskussion des Modells zur Beschreibung der Perfusionsbedingungen in soliden Tumoren . . . . .	122
7.5. Diskussion der Simulationsergebnisse unter dem Aspekt der Therapieplanung . . . . .	124
7.6. Schlußfolgerungen . . . . .	126
7.7. Zusammenfassung . . . . .	127
7.8. Ausblick . . . . .	129
<b>A. Alternative Methoden zur Erzeugung von Geometriemodellen für die Methode der finiten Elemente</b>	<b>133</b>
A.1. Generierung der Modelle mit der Methode der <i>marching cubes</i>	134

---

<b>B. Alternative Bibliotheken zur Lösung linearer Gleichungssysteme</b>	<b>137</b>
B.1. Die AZTEC- Bibliothek . . . . .	137
<b>C. Validierung der Teilprogramme</b>	<b>139</b>
C.1. Stationäre Testfälle . . . . .	139
C.1.1. Stationärer Temperaturverlauf in einer Kugel . . . . .	139
C.1.2. Stationärer Temperaturverlauf in einem Zylinder bei Berücksichtigung von Cauchy- Randbedingungen und konvektivem Wärmetausch durch die Bioheat- Perfusionsmodelle . . . . .	141
C.1.3. Linearer Temperaturverlauf bei Dirichlet- Randbedingungen . . . . .	143
C.2. Transiente Testfälle . . . . .	143
C.2.1. Abkühlung einer Kugel . . . . .	143
C.2.2. Linearer Temperaturanstieg bei konstanter Wärmezufuhr	143
C.2.3. Zeitlicher Temperaturanstieg bei konvektivem Wärmetausch . . . . .	144
C.2.4. Zeitlicher Temperaturverlauf bei Dirichlet- Randbedingungen . . . . .	144