

Karl-Steinbuch-Stipendium 2006

Abschlussbericht

„Berechnung der Wärmeleitfähigkeit von Geweben in der Hyperthermie unter Verwendung von Berechnungsmethoden des Wärme- und Kälteschutzes aus der Industrie“

Johannes Spallek (johannes.spallek@ibt.uni-karlsruhe.de)

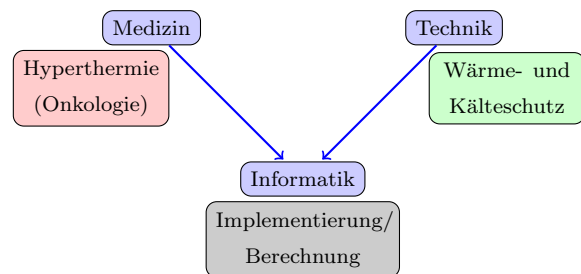
Zusammenfassung

In der Onkologie wird die Hyperthermie sehr erfolgreich als Behandlungsmethode eingesetzt. Dabei ist entscheidend, nur genau den Bereich des pathologisch veränderten Gewebes zu überhitzen, um Schädigungen an gesundem Gewebe zu vermeiden. Dennoch sollte die übertragene Wärme ausreichend sein, um das geschädigte Gewebe auch vollständig zu vernichten. Dieser Artikel beschreibt ein mögliches Vorgehen zur Berechnung der optimalen Energiezufuhr unter Verwendung von Berechnungsmethoden aus dem industriellen Wärme- und Kälteschutz. Nach einer kurzen Motivation und Schilderung des Projektverlaufs wird der entwickelte Algorithmus vorgestellt. Anschließend wird die mögliche Anwendung auf die Medizintechnik diskutiert.

1 Motivation

Heute werden im medizinischen Bereich der Hyperthermie (= künstliche lokale Überhitzung von Gewebe) verschiedene Möglichkeiten zur Berechnung der Wärmeübertragung durch Gewebe verwendet, allen voran komplexe Berechnungen beruhend auf der Finite-Elemente-Methode. In anderen Bereichen, z.B. im Maschinenbau, werden für die Berechnung notwendiger Isolierungen etc. ganz andere Berechnungsmethoden angewandt, um die Übertragung der Wärme durch verschiedene Materialien (in diesem Fall meist Festkörper) zu bestimmen.

In der Natur und der Wissenschaft gibt es zahlreiche Beispiele, bei denen das Gleiche zweimal erfunden wurde, nur weil Forschung ohne Berücksichtigung interdisziplinärer Aspekte betrieben wurde. Aus persönlichem Interesse an der Medizin wurde in Verbindung mit dem eigenen Studium der Informatik das oben genannte Thema hergeleitet.



2 Projektverlauf

Der Beschäftigung mit den Grundlagen wurde von vorneherein viel Zeit eingeräumt, um die notwendigen Kenntnisse für den medizinischen Teil zu erarbeiten und auch um bereits bekannte Verfahren zu untersuchen. Da die Komplexität deutlich größer als erwartet war, wurde das dem

Projekt zugrunde liegende medizinische Modell auf eine Variante (Schichtmodell mit n Schichten, siehe unten) reduziert.

Die für das Projekt notwendige Norm VDI 2055 wurde mir von einem Pforzheimer Isolier-Unternehmen leihweise zur Verfügung gestellt. Dieses Unternehmen stand mir während der Projektbearbeitung auch beratend (bei Fragen zur Praxis in der Industrie) zur Seite.

Nach der ausführlichen Betrachtung wie die Anwendung der technischen Seite auf den medizinischen Hintergrund aussehen könnte, wurde mit dem eigentlichen Entwurf und der Programmierung der Software begonnen. Die Einarbeitung in die gewünschte Programmierumgebung QT von trolltech war ebenfalls zeitaufwendiger als erwartet, mit der erstandenen Literatur jedoch machbar.

Besonders hilfreich bei der medizinischen Literaturrecherche war die Unterstützung durch das Institut für Biomedizinische Technik an der Universität Karlsruhe (TH), Lehrstuhl von Prof. Dr. Armin Bolz. Durch die zahlreichen Abonnements medizinischer Fachzeitschriften war die Auswahl von Materialien am Institut sehr groß.

Aus unterschiedlichen Gründen entwickelte sich die Bearbeitung des Projekts etwas anders als ursprünglich erwartet, als Folge konnten keine ausführlichen Testrechnungen mehr durchgeführt werden. Es konnte jedoch auf Basis verschiedener Literatur ein Algorithmus entwickelt und implementiert werden, der zumindest einfache Testrechnungen zuließ.

3 Ergebnis

Dieser Abschnitt stellt die inhaltlichen Erkenntnisse und den entwickelten Algorithmus bei der Bearbeitung des Projekts vor. Für tiefere Informationen wurden verschiedene Artikel und Informationen zum Projekt auf der Homepage <http://johannes.spallek.name> zur Verfügung gestellt.

Grundbegriffe

Unter Wärmeübertragung (engl. *heat transfer*) versteht man den Transfer von Energie (in Form von Wärme) auf Grund einer Temperaturdifferenz. Weitere zum Verständnis wichtige Definitionen wie *Wärmestrom (-dichte)* oder *Wärmeleitfähigkeit* findet man in [6], [3] und [2]), sie werden hier nicht weiter erläutert.

3.1 Berechnungsmethoden der Industrie

Im Rahmen des Projekts wird in Analogie zur Hyperthermie (wo später n Schichten verschiedenen Gewebes betrachtet werden) der allgemeine Fall eines mit n Lagen gedämmten Körpers betrachtet.

Bei *vorgegebener Dämmstoffdicke* und der Betrachtung von n Dämmstoffschichten sind in den Berechnungsgleichungen drei Unbekannte enthalten (bis auf den inneren und den äußeren Wärmeübergang mit je zwei Unbekannten, vgl. [2]). Jede Gleichung beinhaltet den Wärmestrom \dot{q} als Unbekannte. Ist also der Wärmestrom bekannt, so lässt sich die Gleichung für den inneren und den äußeren Wärmeübergang berechnen wodurch sich rekursiv jede weitere Schicht berechnen lässt. Unter der Voraussetzung dass der Wärmestrom bekannt ist, lässt sich somit ein Algorithmus entwerfen, mit dem das nichtlineare Gleichungssystem für den allgemeinen Fall gelöst werden kann.

Für die Berechnung der Oberflächentemperatur und der Dämmstoffdicke geht [2] z.B. folgenden Weg: Ein beliebiger Wärmestrom \dot{q}_0 wird angenommen. Berechnet man nun mit \dot{q}_0 die Oberflächentemperaturen, so stellt man fest, dass im Falle eines im Vergleich zum tatsächlichen Wärmestrom \dot{q} kleineren \dot{q}_0 folgende Relation zwischen den ermittelten und tatsächlichen Oberflächentemperaturen auftritt:

$$T_{n, \text{ innen}} < T_n < T_{n, \text{ außen}}$$

mit der am inneren Wärmeübergang berechneten Oberflächentemperatur $T_{n, \text{ innen}}$, der am äußeren Wärmeübergang berechneten Oberflächentemperatur $T_{n, \text{ außen}}$ sowie der tatsächlichen Oberflächentemperatur T_n . Ist der angenommene Wärmestrom \dot{q}_0 dagegen größer als der tatsächliche Wärmestrom \dot{q} so ergibt sich folgende Relation der Oberflächentemperaturen:

$$T_{n, \text{ innen}} > T_n > T_{n, \text{ außen}}$$

Somit hat sich allein mit den errechneten Oberflächentemperaturen ein geeigneter Indikator für die Genauigkeit des abgeschätzten Wärmestroms \dot{q}_0 ergeben. Zur Berechnung des Wärmestroms und der Oberflächentemperatur wird also der angenommene Wärmestrom \dot{q}_0 solange variiert, bis sich die errechneten Oberflächentemperaturen nur noch geringfügig von einer vorgegebenen Genauigkeitsschranke unterscheiden.

Ist die *Oberflächentemperatur* oder der *Wärmestrom* vorgegeben, so ergeben sich bei leichter Modifikation ähnliche Vorgehensweisen. Für detaillierte Infos hierzu sei auf [2] verwiesen.

3.2 Der Algorithmus

Dieser Abschnitt beschreibt den Kernpunkt des Projekts. Der entwickelte Algorithmus wird stark vereinfacht in Form von Pseudo-Code dargestellt. Es handelt sich dabei um die Berechnung der Schichtdicke s bei vorgegebenem Wärmestrom q . Der Wärmestrom wirkt in diesem Fall zusammen mit dem Wärmeübergangskoeffizienten auf eine Temperaturdifferenz zwischen der Umgebungstemperatur und der errechneten Oberflächentemperatur (an der Grenze der betrachteten Schicht). Die Änderung dieser Differenz dient dann als praktisches Abbruchkriterium, da es die Annäherung an den vorgegebenen Wärmestrom beschreibt. Die anderen Berechnungsfälle (auch für mehrere Schichten) können mit Hilfe von [2] sowie [1] analog nachvollzogen werden.

```

1 //***** Beispiel einer industriellen Berechnung *****
2 //t_a : Umgebungstemperatur
3 //t_i : Oberflaechentemperatur innen (Mediumstemperatur)
4 //q : Waermestromdichte
5 //l1,l2, l3 : Lambdafunktions-Koeffizienten
6 //skoeff : Strahlungskoeffizient
7
8 CalculateThickness(t_a, t_i, q, skoeff, l1, l2, l3)
9 {
10     decimal res = -1.0;
11     decimal alpha_a = -1.0;
12     decimal tmp_diff = 10;
13     decimal t_o = t_a + tmp_diff;
14         // Startwert: Umgebungstemperatur + 10 K
15     decimal t_o_old = t_o;
16     decimal eps = 0.00001;

```

```

17             // Stoppwert fuer Temperaturdifferenz.
18
19         // Berechnung des Waermeuebergangskoeffizienten
20         alpha_a = alpha_a_w(t_o, t_a, skoeff, tmp_diff);
21
22         // Berechnung der neuen tmp_diff
23         tmp_diff = q * l / alpha_a;
24         t_o = t_a + tmp_diff;
25
26         while (||t_o - t_o_old|| >= eps)
27         {
28             t_o_old = t_o;
29             alpha_a = alpha_a_w(t_o, t_a, skoeff, tmp_diff);
30             tmp_diff = q * l / alpha_a;
31             t_o = t_a + tmp_diff;
32         }
33
34         // Berechnung des verwendeten Lambdawerts
35         decimal temp = (t_i + t_o) / 2
36         decimal lambda_tmp = l1 * temp * temp + l2 * temp + l3;
37
38         // Berechnung der Schichtdicke
39         res = lambda_tmp * ((t_i - t_a) / q - l / alpha_a);
40     }

```

Die vorausgesetzte Funktion `alpha_a_w(t_o, t_a, skoeff, tmp_diff)` berechnet den äußeren Wärmeübergangskoeffizienten gemäß [1] für eine senkrechte Fläche ohne weitere äußere Beeinflussung. Der innere Wärmeübergangskoeffizient wird in der Berechnung nach den Vorgaben von [1] nicht berücksichtigt. Zuschläge oder Faktoren bezüglich des λ -Faktors werden der Einfachheit halber nicht dargestellt.

3.3 Übertragung auf die Hyperthermie

Der Begriff *Hyperthermie* (aus dem Griechischen für *Überwärmung*) besitzt mehrere Bedeutungen: 1. klinische Symptome, z.B. die Überhitzung aufgrund von falscher Medikation oder einer erhöhten Körpertemperatur entgegen des Temperaturregulationszentrums, 2. die therapeutische Hyperthermie, eine Behandlung, bei der die Körpertemperatur künstlich angehoben wird. Als Teilbereich der *Thermotherapie* unterscheidet man dabei zwischen der Überwärmung des gesamten Körpers und der Überwärmung von einzelnen Gewebestellen oder Organen. Die therapeutische Hyperthermie einzelner Gewebestellen oder Organe wird überwiegend in der Krebsbehandlung (*Onkologie*) eingesetzt und ist auch Betrachtungsgrundlage dieses Projekts.

Die Erhitzung des Gewebes in Tumorgebieten erfolgt mit unterschiedlichen Methoden, wie z.B. Mikrowellen oder Laser. Bei allen Methoden ist auf jeden Fall die Tatsache entscheidend, dass Gewebe außerhalb des vom Tumor befallenen Gebiets nicht beschädigt werden soll. Aus diesem Grund muss genau berechnet werden, welche Temperaturen an welchen Stellen des Gewebes und in welcher Entfernung vom jeweiligen Erhitzer auftreten. Dieser Punkt stellt die Motivation dieses Projekts dar: die meisten Berechnungen verwenden in Theorie und Praxis komplizierte Berechnungsmethoden auf molekularer bzw. Zellebene. Anwendung findet hier häufig die *Finite-Elemente-Methode*, welche jedoch sehr hohe Ansprüche an die zur Berechnung verwendete Hardware stellt.

Ähnliche Verfahren und verwandte Arbeiten wurden im Rahmen einer ausführlichen Literaturrecherche als Teil des Projekts untersucht und in [5] vorgestellt. Sie werden deshalb hier nicht weiter behandelt.

Analogien zur Industriellen Berechnung

Bei der Simulation und Berechnung im Bereich der Hyperthermie gilt es zwei grundsätzliche Bereiche zu beachten: zum einen die unterschiedlichen Eigenschaften des Gewebes selbst (inklusive die durch die Erwärmung hervorgerufenen Veränderungen über die Zeit) als auch Blutgefäße, welche sich innerhalb des Gewebes befinden und für einen schnellen Wärmetransport an andere Gewebestellen verantwortlich sind. Die Blutgefäße spielen außerdem bei der Betrachtung von Randbedingungen eine große Rolle, da sie im durchflossenen Gewebe durch den Abtransport der Wärme kühlend wirken und somit z.B. verhindern, dass eine gewünschte Minimaltemperatur überhaupt erreicht wird.

Diese Gefäße können jedoch detektiert und meist kurzfristig für die Zeit der Behandlung abgeklemmt werden. Der Wärmetransport, welcher sich in Analogie zur Industrie am ehesten durch Rohrleitungen beschreiben und berechnen ließe, kann also meist verhindert werden. Dieses Projekt hat sich deshalb in erster Linie mit der Wärmeausbreitung innerhalb des Gewebes welches erhitzt werden soll befasst. Aus diesem Grund wurde exemplarisch ein Fall betrachtet:

Wärmeausbreitung im homogenen Gewebe (ggf. mehrere Schichten)

Die Anwendung der industriellen Berechnungsmethoden muss stark abstrahiert werden: von einem Dämmstoffhersteller gelieferte Dämmmaterialien sind normalerweise homogen und verhalten sich über den gesamten Volumenbereich vorhersehbar und einheitlich. Die Eigenschaften des Gewebes kann lediglich durch verschiedene Studien ermittelt werden. Einige Informationen dazu findet man in [4] auf den Seiten (3-12) und (3-13). Hierbei wird aber ebenfalls darauf hingewiesen, dass die Gewebevolumina in der Regel ein inhomogenes Verhalten aufweisen.

Für die Berechnung der Temperatur des am Tumorgebiet angrenzenden Gewebes eignen sich zwei der oben vorgestellten Methoden: *Wärmestrom* bzw. *Dämmstoffdicke vorgegeben*. Bei der Vorgabe des Wärmestroms wird als Ergebnis der entsprechende Abstand von der Wärmequelle sowie die dort aufzufindende Temperatur berechnet. Gibt man die Schichtdicke vor, so erhält man die dem Wärmestrom entsprechende Temperatur im gewünschten Abstand von der Wärmequelle.

Die Parameter des oben beschriebenen Algorithmus müssen wie folgt belegt werden:

t_a :	Umgebungstemperatur (Startwert Körpertemperatur $\sim 37^\circ\text{C}$)
t_i :	Mediumtemperatur = Temperatur der Wärmequelle
q :	Wärmestromdichte
l_1, l_2, l_3 :	λ -Funktionskoeffizienten (müssen über medizinische Studien ermittelt werden)
$skoeff$:	Strahlungskoeffizient

Zur Berechnung des Strahlungskoeffizienten könnten einige Werte für α aus [4] herangezogen werden.

Literatur

- [1] VDI 2055 Blatt 1. Wärme- und Kälteschutz in betriebstechnischen Anlagen in der Industrie und in der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA), Februar 2007.
- [2] R. Merz. Entwicklung und Programmierung numerischer Algorithmen zur Auslegung von Wärmedämmungen in Kraftwerken unter technischen und betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten. Technical report, Universität Karlsruhe (TH), 1989.
- [3] Rockwool Deutschland. Wärmetechnische Berechnungen.
- [4] H.-J. Schwarzmeier. Einführung in die Lasermedizin (Sachkunde). Teil 3: Laser-Gewebe Wechselwirkungen. Fortbildungsunterlagen.
- [5] J. Spallek. Transfer zur Hyperthermie. Technical report, Universität Karlsruhe (TH), Juni 2007.
- [6] P. von Böckh. *Wärmeübertragung. Grundlagen und Praxis*. Springer-Verlag, 2006.