

RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG
Computer Assisted Clinical Medicine
Dr. Friedrich Wetterling
6/20/2011 | Page 1

Hochschule Mannheim

Bildgebende Systeme in der Medizin
Infrarot-Bildgebung
Dr. Friedrich Wetterling



Computer Assisted Clinical Medicine
Faculty of Medicine Mannheim
University of Heidelberg
Theodor-Kutzer-Ufer 1-3
D-68167 Mannheim, Germany
Friedrich.Wetterling@MedMa.Uni-Heidelberg.de
www.ma.uni-heidelberg.de/inst/cbtrn/ckm/

RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG
Computer Assisted Clinical Medicine
Dr. Friedrich Wetterling
6/20/2011 | Page 2



Übersicht

- 1) Temperaturstrahlung: Grundlagen
- 2) Messprinzip
- 3) Passive Thermographie
- 4) Aktive Thermographie
- 5) Exponentielle Regression

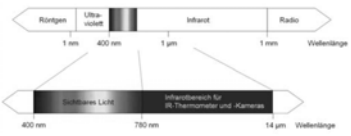
RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG
Computer Assisted Clinical Medicine
Dr. Friedrich Wetterling
6/20/2011 | Page 3

Historie

- William Herschel forschte im Bereich neuer optischer Materialien
- Leitete Sonnenlicht durch ein Glasprisma
- Benutzte geschwärzte Spitze eines Thermometers, um die Temperaturänderungen in den verschiedenen Farbbereichen zu detektieren
- Stellte fest, dass die Temperatur auch ausserhalb des sichtbaren Lichtes anstieg → Entdeckung der Infrarotstrahlung (1800)

William Herschel (1738 - 1822)



RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG
Computer Assisted Clinical Medicine
Dr. Friedrich Wetterling
6/20/2011 | Page 4

Infrarotstrahlung

- elektromagnetische Wellen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten

$$c = \lambda \cdot f$$

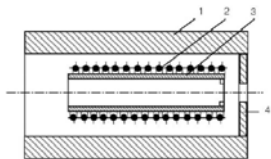
$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s (Lichtgeschw.)}$

- Infrarot Temperaturmessbereich: 0,7 bis 1000μm

RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG
Computer Assisted Clinical Medicine
Dr. Friedrich Wetterling
6/20/2011 | Page 5

Der Schwarze Strahler

- Absorbiert einfallende Strahlung komplett
- Keine Reflexion und keine Transmission
- Strahlt für jede Wellenlänge die maximal mögliche Energie ab (schwarze Strahlung)
- Winkelunabhängige Strahldichte
- wird zur Kalibration von IR-Kameras benötigt



Schnittbild eines schwarzen Strahlers:
1 - keramisches Rohr, 2 - Heizung, 3 - Rohr aus Al₂O₃, 4 - Blende

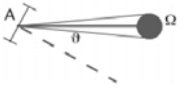
RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG
Computer Assisted Clinical Medicine
Dr. Friedrich Wetterling
6/20/2011 | Page 6

Definitionen

- Strahlungsleistung Φ : $[\Phi] = 1 \text{ Watt}$

Die gesamte in Form von elektromagnetischen Wellen abgestrahlte oder durch eine vorgegebene Fläche durchlaufende Leistung

- Strahldichte L : $L = \frac{d^2\Phi}{\cos(\nu)dA \cdot d\Omega}$

$$[L] = 1 \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr}}$$


Gibt an wieviel Strahlungsleistung von einem gegebenen Punkt der Strahlungsquelle in eine Richtung (definiert durch ν - Winkel zwischen Ausstrahlrichtung und Flächennormalen) pro Raumwinkelenelement ausgesendet wird.

RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG
Computer Assisted Clinical Medicine
Dr. Friedrich Westerting
6/20/2011 | Page 7

Definitionen

- Reflexionsgrad: $\rho = \frac{\Phi_R}{\Phi_0} = \frac{\text{reflektierte Strahlungsleistung}}{\text{aufireffende Strahlungsleistung}}$
- Absorptionsgrad: $\alpha = \frac{\Phi_A}{\Phi_0} = \frac{\text{absorbierte Strahlungsleistung}}{\text{aufireffende Strahlungsleistung}}$
- Für schwarzen Körper gilt: $\alpha = 1$
- Emmissionsgrad: $\varepsilon(\lambda, T) = \frac{L_\lambda(\lambda, T)}{L_{\lambda S}(\lambda, T)} = \frac{\text{Strahlungsdichte eines beliebigen Körpers}}{\text{Strahlungsdichte des schwarzen Körpers}}$

RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG
Computer Assisted Clinical Medicine
Dr. Friedrich Westerting
6/20/2011 | Page 8

Planck'sches Strahlungsgesetz

- Fundamentales Gesetz für berührungslose Temperaturmessung
- Gibt die spektrale Leistungsdichte für einen schwarzen Körper an mit
 - h...Planck'sches Wirkungsquantum ($6,626176 \cdot 10^{-34}$ Js)
 - c...Lichtgeschwindigkeit ($2,99792458 \cdot 10^8$ m/s)
 - k...Boltzmann-Konstante ($1,3806503 \cdot 10^{-23}$ J/K)
 - λ ...Wellenlänge
 - T...Temperatur

$$L_{\lambda S}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}$$

RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG
Computer Assisted Clinical Medicine
Dr. Friedrich Westerting
6/20/2011 | Page 9

Spektrale Strahlungsdichte eines schwarzen Körpers

- Haut verhält sich im Infrarotbereich annähernd wie ein schwarzer Körper

$$\varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T) = 0.98$$

RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG
Computer Assisted Clinical Medicine
Dr. Friedrich Westerting
6/20/2011 | Page 10

Temperaturmessung

- Jede Kurve weist ein eindeutiges Maximum auf

Aus Kapitel 'IR Bildgebung' von T.M.Buzug, in 'Medizintechnik – Verfahren, Systeme und Informationsverarbeitung', Rüdiger Kramme, Springer Verlag, 2006

RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG
Computer Assisted Clinical Medicine
Dr. Friedrich Westerting
6/20/2011 | Page 11

Wien'sches Verschiebungsgesetz

- Je höher die Temperatur ist, desto kürzer ist die Wellenlänge bei der das Maximum auftritt (eine glühende Herdplatte ändert ihre Farbe von rot nach gelb mit steigender Temperatur)

$$\lambda_{\max} = \frac{2,898 \text{ mm} \cdot \text{K}}{T}$$

Aus Kapitel 'IR Bildgebung' von T.M.Buzug, in 'Medizintechnik – Verfahren, Systeme und Informationsverarbeitung', Rüdiger Kramme, Springer Verlag, 2006

RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG
Computer Assisted Clinical Medicine
Dr. Friedrich Westerting
6/20/2011 | Page 12

Spektrale Durchlässigkeit der Atmosphäre

BAZ & MP, Intro, Optics & IO, Rev. 10/03/03

Strahlungsenergie: Sonne 6000 K, Erde 300 K

Atmosphärische Durchlässigkeit: 100%

Wellenlängenbereiche: Röntgen, Ultraviolett, nahes IR, mittleres und fernes Infrarot, Mikrowellen, Radiowellen

Wellenlängenwerte: 0,01 μm, 0,1 μm, 1 μm, 10 μm, 100 μm, 1 mm, 10 mm, 100 mm, 1 m

Detection methods: Thermal-Scanner, Radar Verfahren, Photographische Aufnahme, Multispektral-Scanner

Legend: α = Absorption, β = Reflexion, τ = Transmission, ε = Emission

RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG
Computer Assisted Clinical Medicine
Dr. Friedrich Westerting
6/20/2011 | Page 13

Detektortypen

- Aufgabe: Umwandlung der einfallenden Strahlungsleistung in ein elektrisches Signal
- die einfallende Strahlung wird zuerst in Wärme am Detektorelement umgesetzt und dann in eine Widerstands-, Spannungs-, oder Ladungsänderung umgewandelt.

1. Bolometer: Temperaturänderung des Detektors wird als Widerstandsveränderung gemessen (Thermistor)
2. Thermoelemente: Temperaturänderung wird über den Seebeck-Effekt in eine Spannung umgewandelt (Seebeck Effekt: Fließt durch einen Festkörper ein Wärmestrom, so kann eine Potentialdifferenz auftreten)
3. Pyroelektrische Empfänger: Kristall mit permanenter elektrischer Polarisierung; wandelt Wärmestrahlung in Polarisationsänderung um, d.h. Temperaturänderung wird in eine Ladungsänderung umgewandelt.

RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG
Computer Assisted Clinical Medicine
Dr. Friedrich Westerting
6/20/2011 | Page 14

Detektortypen

- Einzeldetektorsysteme nutzen Kombination aus Dreh- und Kippspiegeln um das Objekt Punkt für Punkt abzutasten
- Systeme mit einem Focal Plane Array (FPA) besitzen eine Detektormatrix
- Detektorelemente müssen gekühlt werden

Aus Kapitel 'IR Bildgebung' von T.M. Buzug, in 'Medizintechnik – Verfahren, Systeme und Informationsverarbeitung', Rüdiger Krampe, Springer Verlag, 2006

RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG
Computer Assisted Clinical Medicine
Dr. Friedrich Westerting
6/20/2011 | Page 15

Pathologische Temperaturunterschiede

Mamma-Karzinom	$\Delta T = 1,5..4K$
Maligne Melanome	$\Delta T = 2..4K$
Gefäßerkrankungen (z.B. Thrombose)	$\Delta T = 1..2K$
Entzündungen (z. B. Rheuma, Arthritis)	$\Delta T = 1..2K$

Advances in Medical Infrared Imaging 1-3

FIGURE 1.1 (See color insert at the back of the book.) An application of IR technique for breast screening: (a) healthy and (b) pathological breast. (Courtesy: Prof. Reinhold Berr, MD, Informatica Germany.)

RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG
Computer Assisted Clinical Medicine
Dr. Friedrich Westerting
6/20/2011 | Page 16

Passive Thermographie

- Messung der Temperaturverteilung auf der Oberfläche des Herzmuskels vor und nach Verschluss der linken Herzkranzarterie

RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG
Computer Assisted Clinical Medicine
Dr. Friedrich Westerting
6/20/2011 | Page 17

Passive Thermographie

- Messung der Temperaturverteilung auf einer Oberfläche
- Zu beachten ist, dass die gemessene Temperatur nicht nur vom Patienten selbst abgestrahlt wird, sondern auch zu geringem Masse externe Quellen über Reflexion an der Oberfläche des Patienten zum Messsignal beitragen (kein idealer schwarzer Strahler)

$$\epsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T) = 0.98$$

RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG
Computer Assisted Clinical Medicine
Dr. Friedrich Westerting
6/20/2011 | Page 18

Mathematisches Modell für die Erwärmung eines Objekts

$$\text{div}(k \cdot \text{grad} T) - c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = -q(P, t)$$

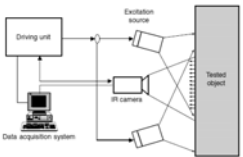

T...Temperatur in K
k...thermische Leitfähigkeit in $W m^{-1} K^{-1}$
 c_p ...spezifische Wärme in $J g^{-1} K^{-1}$
 ρ ...Dichte des Material in $g m^{-3}$
t...Zeit in Sekunden
 $\rho(P,t)$...volumetrische Strahlungsdichte, die Leistung aufnimmt oder abgibt $W m^{-3}$

→ sind die Temperaturänderungen, sowie die Strahlungsdichte der Quelle über einen bestimmten Zeitpunkt bekannt, können die thermischen Gewebeparameter berechnet werden.

RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG
Computer Assisted Clinical Medicine
Dr. Friedrich Westering
6/20/2011 | Page 19

Aktive Infrarot Thermographie

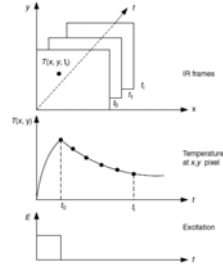
- Erwärmung des Objekts durch externe Wärmequelle
- Messung des Erwärmungs- und Abkühlungsprozess
- Die Zeit, die benötigt wird, ehe das Objekt die ursprüngliche Temperatur wieder erreicht, ist ein Maß für die Wärmekapazität des Gewebes

RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG
Computer Assisted Clinical Medicine
Dr. Friedrich Westering
6/20/2011 | Page 20

Aktive Infrarot Thermographie

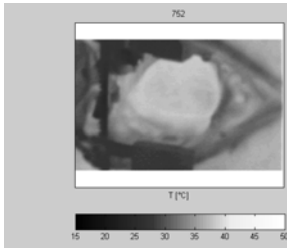
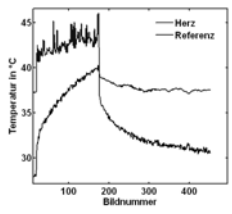
- Temperaturverläufe werden für jeden Punkt (x,y) der Bildfolge über den Zeitraum t_0 bis t_1 extrahiert
- Modellierung der Daten durch mono- oder bi-exponentielles Modell mit einem Offset A_0 und einem Endwert A_1, A_2 , sowie den exponentiellen Zeitkonstanten τ_1 und τ_2



$$T(t) = A_0 + A_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + A_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}}$$

RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG
Computer Assisted Clinical Medicine
Dr. Friedrich Westering
6/20/2011 | Page 21

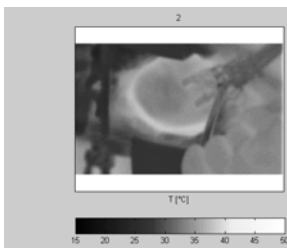
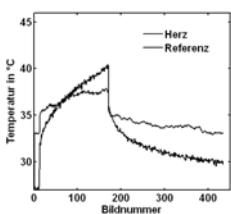
Aktive Infrarot Thermographie

Aktive Thermographie am infarzierten Herzen.

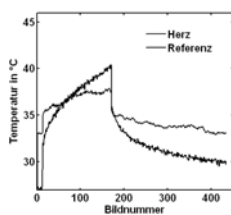
RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG
Computer Assisted Clinical Medicine
Dr. Friedrich Westering
6/20/2011 | Page 22

Aktive Infrarot Thermographie

RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG
Computer Assisted Clinical Medicine
Dr. Friedrich Westering
6/20/2011 | Page 23

Exponentielle Regression

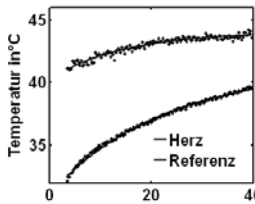


RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG
Computer Assisted Clinical Medicine
Dr. Friedrich Westering
6/20/2011 | Page 24

Totes Herz: Erwärmung

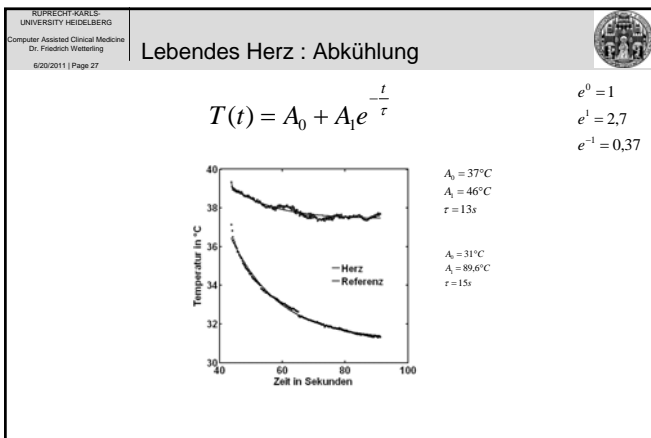
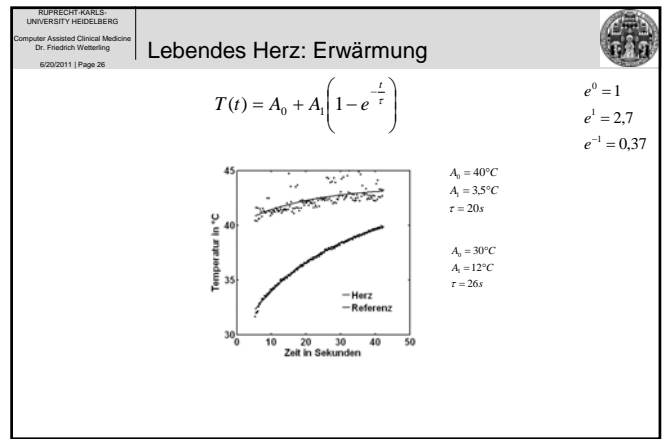
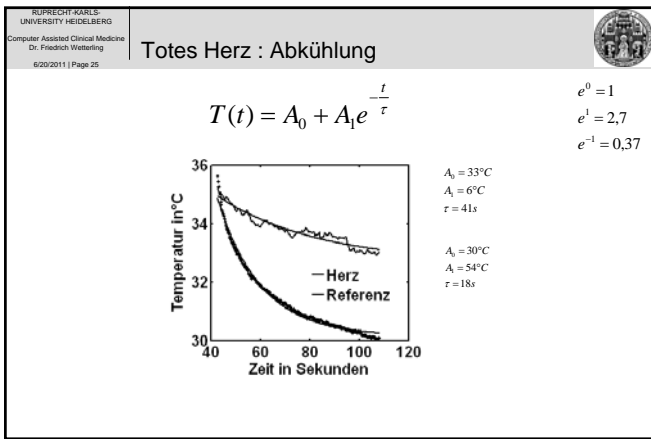
$$T(t) = A_0 + A_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

$e^0 = 1$
 $e^1 = 2,7$
 $e^{-1} = 0,37$



$A_0 = 40^\circ\text{C}$
 $A_1 = 4^\circ\text{C}$
 $\tau = 14\text{s}$

$A_0 = 31^\circ\text{C}$
 $A_1 = 10^\circ\text{C}$
 $\tau = 22\text{s}$

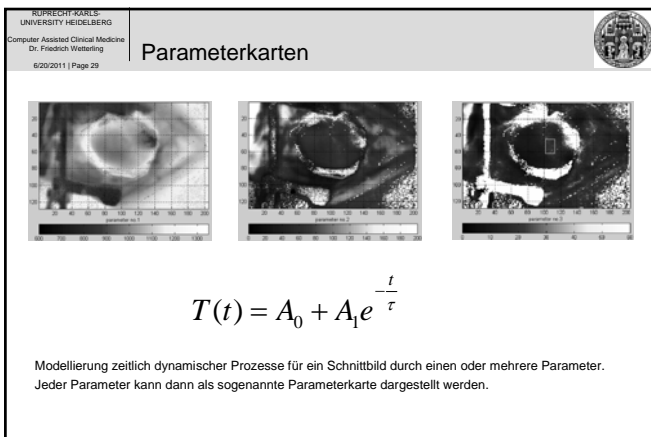


RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG
Computer Assisted Clinical Medicine
Dr. Friedrich Westering
6/20/2011 | Page 28

Vergleich: vor und nach Herztot

	Lebendes Herz	totes Herz
Herz	$A_0 = 37^\circ\text{C}$ $\tau = 13\text{s}$	$A_0 = 33^\circ\text{C}$ $\tau = 41\text{s}$
Abkühlen		
Referenz	$A_0 = 31^\circ\text{C}$ $\tau = 15\text{s}$	$A_0 = 30^\circ\text{C}$ $\tau = 18\text{s}$

Die Durchblutung garantiert einen schnelleren Wärmeausgleich im lebenden Herzen.



- RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG
Computer Assisted Clinical Medicine
Dr. Friedrich Westering
6/20/2011 | Page 30
- ### Zusammenfassung
- Infrarot Temperaturmessbereich: 0,7 bis 1000µm
 - Schwarzer Strahler hat identischen Emmissions- und Absorptionsgrad
 - Planck'sches Strahlengesetz beschreibt die Strahlungsleistung in Abhängigkeit von der Wellenlänge
 - Passive IR-Thermographie
 - Aktive Thermographie
 - Exponentielle Regression
 - Parameterkarten