



## Kapitel 11

### System zur Temperaturregelung

#### Physiologie des Menschen

Das System zur Temperaturregelung sorgt dafür, dass die Körperkerntemperatur um 37 °C konstant erhalten bleibt. Die Abweichung von diesem Wert kann biologische Funktion der Moleküle stark beeinträchtigen und dazu führen, dass diese verloren geht: Leicht erhöhte Körperkerntemperatur beschleunigt chemische Reaktionen, die nun chaotischer ablaufen. Zu hohe Temperaturen führen zur Denaturierung von Protein (ca. 43°C [117, S.433]). Zu niedrige Temperaturen blockieren die Enzyme, welche im Stoffwechsel von Bedeutung sind.

Die Temperaturregelung bildet einen typischen Regelkreis. Durch Thermorezeption wird die aktuelle Körperkerntemperatur gemessen und dem Hypothalamus mitgeteilt. Falls die gemessene Temperatur von dem Sollwert abweicht, passt der Hypothalamus die Prozesse der Wärmebildung und -abgabe so an, dass die Temperatur auf ihren Sollwert zurückkehrt.

---

Das Vitalsystem zur Temperaturregelung bildet diesen Regelkreis mit Prozessen zur Wärmeproduktion und Abgabe ab.

#### 11.1 Einstellung der Körperkerntemperatur

Der Parameter  $t_{\text{patient}}$  samt seinen Ausprägungen bildet im Modell die Körperkerntemperatur des Verletzten ab:

1. die physiologisch normale Körperkerntemperatur  $t_{\text{patient,normal}}$ :  
 $t_{\text{patient,normal}}$  wird nach [3, S.476] mit einem Wert aus dem Bereich [36.4; 37.6] °C initialisiert;
2. die maximale Körperkerntemperatur eines lebenden Menschen  $t_{\text{patient,max}}$ : Die obere Temperaturgrenze ist die Temperatur, bei welcher Hitze bedingte Denaturierung von Protein einsetzt. Diese Temperatur liegt zwischen 42–44 °C;
3. die minimale Körperkerntemperatur eines lebenden Menschen  $t_{\text{patient,min}}$ :  
 $t_{\text{patient,min}}$  wird im Modell zwischen 20 – 27 °C eingestellt;<sup>1</sup>
4. die Soll-Körperkerntemperatur  $t_{\text{patient,shouldBeReached}}$ :  
 $t_{\text{patient,shouldBeReached}} = t_{\text{patient,normal}}$  und bleibt konstant während gesamter Simulation;
5. die tatsächliche Körperkerntemperatur im Zeitpunkt  $t_i$  der Simulation  $t_{\text{patient},i}$  (die ist-Körperkerntemperatur):  $t_{\text{patient},i}$  wird während der Simulation stets neu ausgerechnet.

## 11.2 Wärmeaustausch mit der Außenwelt

### Physiologie des Menschen

Die Körperwärme wird hauptsächlich durch die Haut, Lunge und Luftwege mit der Außenwelt ausgetauscht.

Im Modell wird ausschließlich der Wärmeaustausch durch die Haut berücksichtigt. Hier wird thermale Energie mittels

- Konvektion (Wärmeströmung);
- Konduktion (Wärmeleitung);
- Radiation (Wärmestrahlung) und
- Evaporation (Verdunstung)

zwischen der Haut und der Umwelt transportiert.

<sup>1</sup> Der Bereich für untere Temperaturgrenze ist sehr breit, grundsätzlich sind aber die Körperkerntemperaturen unter 27 °C lebensgefährlich. Die tiefste gemessene Temperatur eines überlebenden Erwachsenen beträgt 13.7 °C [3, Tab.20.4].

### 11.2.1 Konvektion

Konvektion ist der Wärmetransport über ein bewegtes Medium. Im menschlichen Organismus wird konvektive Wärme mit dem zirkulierenden Blut und über die Luft an der Körperoberfläche verteilt. Da das Modell zwischen dem Körperkern und der Körperhülle nicht unterscheidet, wird die Blutzirkulation bei der Konvektion nicht berücksichtigt.

Der konvektive Wärmestrom wird durch folgende Formel beschrieben:

$$Q_{\text{convection}} = \alpha_{\text{convection,environment}} \cdot S \cdot (t_{\text{patient}} - t_{\text{environment}}) \cdot \Delta t \quad (11.1)$$

wobei  $S$  – die Austauschfläche;  $\Delta t$  – das Zeitintervall;  $t_{\text{patient}}$  – die Kernkörpertemperatur;  $t_{\text{environment}}$  – die Temperatur der Außenwelt und  $\alpha_{\text{convection,environment}}$  – der Wärmeübergangskoeffizient der Außenwelt sind.

Im Modell wird die Außenwelt durch die sog. Außenwelthülle abgebildet (Abschnitt 12.3). Jede in Abschnitt 5.3 definierte Hautregion  $x$  mit der Oberfläche  $S_{\text{skin,region}=x}$  wird mit einem Teil der Hülle assoziiert, der im Modell entweder ein Gas-, ein Flüssigkeits- oder ein Festkörpermedium darstellen kann. Dadurch werden auch die Parameter

$\alpha_{\text{convection,environment,region}=x}$  und  $t_{\text{environment,region}=x}$  für die Hautregion  $x$  entweder vordefiniert, oder sie werden nach (12.6) vom Modell berechnet.

Die konvektive Wärmeübertragung des ganzen Körpers im Zeitintervall  $\Delta t$  gleicht im Modell der Summe der konvektiven Wärmeströme durch alle seinen Hautregionen:

$$Q_{\text{convection}} = \sum Q_{\text{convection,region}=x} \quad (11.2)$$

### 11.2.2 Konduktion

Konduktion ist der Wärmetransport über ein ruhendes Medium. Der Wärmeaustausch folgt hier dem Diffusionsgesetz:

$$Q_{\text{thermalConduction}} = \frac{\lambda_{\text{thermalConduction}}}{d} \cdot S \cdot (t_{\text{patient}} - t_{\text{environment}}) \cdot \Delta t \quad (11.3)$$

wobei  $\lambda_{\text{thermalConduction}}$  – die Wärmeleitfähigkeit des Transportmediums und  $d$  – seine Dicke sind. Da das Modell die Haut als Transportmedium für Konduktion betrachtet, werden die Parameter  $\lambda_{\text{thermalConduction}}$  und  $d$  als Eigenschaften der Haut für jede Hautregion im Vorfeld definiert.

Wie in (11.2) bestimmt das Modell aus (11.3) die Wärmemenge, welche durch Konduktion zwischen der Haut und der Umgebung in der Zeit  $\Delta t$  ausgetauscht wird. Sie gleicht der Summe der konduktiven Wärmeströme durch alle Hautregionen:

$$Q_{\text{thermalConduction}} = \sum Q_{\text{thermalConduction,region}=x} \quad (11.4)$$

### 11.2.3 Radiation

Radiation ist der Wärmetransport über elektromagnetische Strahlung. Die Wärmestrahlung kann dabei nach

$$Q_{\text{radiation}} = \alpha_{\text{radiation,environment}} \cdot S \cdot (t_{\text{patient}}^4 - t_{\text{environment}}^4) \cdot \Delta t \quad (11.5)$$

berechnet werden, wobei  $\alpha_{\text{radiation,environment}}$  – der Wärmetransferkoeffizient der Umgebung darstellt. Analog zu (11.2), (11.4) und nach (11.5) berechnet das Modell, wie viel Wärme der Körper in der Zeit  $\Delta t$  über die ganze Haut mit der Umgebung austauscht:

$$Q_{\text{radiation}} = \sum Q_{\text{radiation,region}=x} \quad (11.6)$$

### 11.2.4 Evaporation

Evaporation ist der Wärmetransport über die Verdunstung eines Fluides von der Oberfläche eines festen Mediums.

## Physiologie des Menschen

Evaporation ist ein sehr wichtiger Weg für den Wärmeaustausch. So erfolgt eine nahezu gesamte Wärmeableitung bei starker körperlicher Arbeit durch Verdunstung des Schweißes von der Haut.

---

Die Wärmeübertragung durch Verdunstung kann wie folgt berechnet werden:

$$Q_{\text{perspiration}} = \alpha_{\text{perspiration,environment}} \cdot S \cdot (P_{\text{H}_2\text{O,skin}} - P_{\text{H}_2\text{O,environment}}) \cdot \Delta t \quad (11.7)$$

wobei  $\alpha_{\text{perspiration,environment}}$  – der Wärmetransferkoeffizient für Verdunstung;  $P_{\text{H}_2\text{O,skin}}$  – der Wasserdampfdruck auf der Schweiß bedeckten Haut, und  $P_{\text{H}_2\text{O,environment}}$  – der Wasserdampfdruck der Umgebung sind. Nach [119, S.505] ist  $P_{\text{H}_2\text{O,skin}}=6.3$  kPa bei einer Körpertemperatur von 37 °C. Wie der Wärmeübergangskoeffizient bei der Konvektion ist  $\alpha_{\text{perspiration,environment}}$  von vielen Umgebungsfaktoren abhängig. So steigt  $\alpha_{\text{perspiration,environment}}$  bei der Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit der umgebenden Luft an, weil dadurch mehr Wasser von der Hautoberfläche verdampfen kann.

Das Modell ermittelt die Wärmeübertragung durch Verdunstung in der Zeit  $\Delta t$  für die gesamte Körperoberfläche mit Berücksichtigung (11.7):

$$Q_{\text{perspiration}} = \sum Q_{\text{perspiration,region}=x} \quad (11.8)$$

### 11.3 Effektoren der Thermoregulation

#### Physiologie des Menschen

Zu Effektoren der Thermoregulation gehören autonome Mechanismen, welche der Körper zum Erhalt einer konstanten Körpertemperatur aktiv einsetzen kann. Dazu zählen:

- der Stoffwechsel und die Muskelkontraktionen, durch welche thermische Energie erzeugt wird und
- die Hautdurchblutung und Transpiration, welche die Wärmeabgabe an die Umwelt regulieren.

---

Das Modell setzt die Thermoregulation durch die Abbildung des Stoffwechsels, Kältezittern und der Transpiration um.

### 11.3.1 Grundumsatz

#### Physiologie des Menschen

Die Stoffwechselaktivität bestimmt den Grundumsatz, welcher bei unveränderten physiologischen Bedingungen konstant bleibt. Ändern sich die Bedingungen, wie etwa bei der Kälteakklimatisierung, wird der Grundumsatz durch eine vermehrte Sekretion von Adrenalin und Thyroxin Hormonen langfristig erhöht.

Das Modell berechnet für jeden Bereich der Mikrozirkulation den Wert seiner Stoffwechselintensität im Zeitintervall  $\Delta t$ . Danach wird der totale Grundumsatz  $Q_{\text{basalHeat}}$  als die Summe der Energien des basalen Stoffwechsels aller Mikrozirkulationsbereiche bestimmt. Um daraus die aktuelle Körperkerntemperatur zu ermitteln, wird der Parameter zur Körperwärmekapazität  $k_{\text{bodyHeatCapacity}}$  verwendet. Dieser zeigt, wie viel Energie benötigt wird, um 1 kg Körpergewicht auf 1 °C zu erwärmen. Laut [119, S.505] gleicht  $k_{\text{bodyHeatCapacity}} = 3.5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$  und daraus kann

$$\Delta t_{\text{patient}} = \frac{Q_{\text{basalHeat}}}{k_{\text{bodyHeatCapacity}} \cdot m_{\text{patient}}} \quad (11.9)$$

berechnet werden.

### 11.3.2 Muskelkontraktionen

#### Physiologie des Menschen

Die Wärmeproduktion kann durch Muskelkontraktionen kurzfristig vervierfacht und über Stunden verdoppelt werden. Hierzu zählen:

- willkürliche Bewegungen,
- die Erhöhung des Muskeltonus sowie
- das Kältezittern: Das Kältezittern setzt bei 36°C Körpertemperatur ein. Wenn diese absinkt, intensiviert sich das Zittern bis es bei ca. 35°C sein Maximum erreicht. Beim Weiteren abkühlen, nimmt die Intensität des Zitterns aber ab. Bei 31°C Körpertemperatur wird das Zittern eingestellt [3, Tab.20.4].

Der Vitalparameter  $Y_{\text{shivering}}$  bildet die Intensität der Muskelkontraktionen ab. Er nimmt Werte aus dem Bereich  $[0; 1]$ , wobei 0 – die minimale Intensität, welche einem physiologischen Muskelgrundtonus ohne Kältezittern entspricht, und 1 – die maximale Intensität mit dem stärksten Zittern, bedeuten. Für die Wärme  $Q_{\text{shivering}}$ , die durch Muskelkontraktionen entsteht, nimmt das Modell an, dass

$$Q_{\text{shivering},i} = Y_{\text{shivering},i} \cdot Q_{\text{shivering},\text{max}} \quad (11.10)$$

wobei  $Q_{\text{shivering},\text{max}} = 4Q_{\text{basalHeat},\text{normal}}$  gleicht. Das Verhalten des Parameters  $Y_{\text{shivering}}$  wird im Modell durch die Funktion:

$$Y_{\text{shivering},i} = \begin{cases} 0 & \text{falls } (t_{\text{patient},\text{min}} \leq t_{\text{patient},i} \leq t_{\text{shiveringMin},\text{patientMin}}) \\ & \vee (t_{\text{shiveringMin},\text{patientMax}} \leq t_{\text{patient},i} \leq t_{\text{patient},\text{max}}) \\ \frac{t_{\text{patient},i} - t_{\text{shiveringMin},\text{patientMin}}}{t_{\text{shiveringMax}} - t_{\text{shiveringMin},\text{patientMin}}} & \text{falls } t_{\text{shiveringMin},\text{patientMin}} < t_{\text{patient},i} \leq t_{\text{shiveringMax}} \\ \frac{t_{\text{shiveringMax}} - t_{\text{patient},i}}{t_{\text{shiveringMin},\text{patientMax}} - t_{\text{shiveringMax}}} & \text{falls } t_{\text{shiveringMax}} < t_{\text{patient},i} < t_{\text{shiveringMin},\text{patientMax}} \end{cases} \quad (11.11)$$

fest vordefiniert (Abbildung 11.1). Dabei sind folgende Parameter wie unten eingestellt:  $t_{\text{shiveringMin},\text{patientMin}} = 31 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{shiveringMax}} = 35 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{shiveringMin},\text{patientMax}} = 36 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

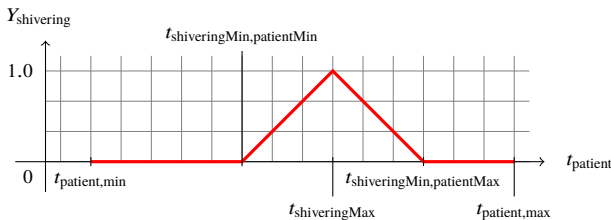


Abb. 11.1: Funktion für Muskelkontraktionen nach (11.11)

### 11.3.3 Transpiration

#### Physiologie des Menschen

Die physiologisch normale Schweißsekretion beträgt 20–50 ml Wasser·h<sup>-1</sup>. Die Schweißsekretion kann bis zu 2 kg Wasser·h<sup>-1</sup> ansteigen ([119, S.504-505]).

Der Parameter  $Y_{\text{transpiration}}$  bildet im Modell die Intensität der Schweißproduktion ab. Für das Zeitintervall  $\Delta t$  berechnet das Modell das Schweißvolumen, welches sich durch Schweißsekretion nun auf der Hautoberfläche befindet:

$$\Delta V_{\text{H}_2\text{O,transpiration,skin}} = Y_{\text{transpiration}} \cdot \Delta t \quad (11.12)$$

Um die Wassermenge zu berechnen, die von der Hautoberfläche in der Zeit  $\Delta t$  verdunstet, wird die Konstante  $k_{\text{H}_2\text{O,evaporation}}$  eingeführt. Diese zeigt, wie viel Energie bei der Verdunstung 1 g Wasser verbraucht wird. Laut [119, S.504] gleicht  $k_{\text{H}_2\text{O,evaporation}} = 2.5 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$  Wasser. Dann mit Berücksichtigung (11.8):

$$\Delta V_{\text{H}_2\text{O,evaporation,skin}} = \frac{Q_{\text{perspiration}}}{k_{\text{H}_2\text{O,evaporation}}} \quad (11.13)$$

Aus (11.12) und (11.13) wird das aktuelle Schweißvolumen auf der Haut bestimmt:

$$V_{\text{H}_2\text{O,skin},i} = V_{\text{H}_2\text{O,skin},i-1} + \Delta V_{\text{H}_2\text{O,transpiration,skin},i} - \Delta V_{\text{H}_2\text{O,evaporation,skin},i} \quad (11.14)$$

## 11.4 Regelung der Körperkerntemperatur

Algorithmus 13 beschreibt die Vorgehensweise bei der Thermoregulation, welche im Modell umgesetzt wurde. Im ersten Schritt wird die Menge der thermischen Energie berechnet, die in der Zeit  $\Delta t$  zwischen dem Körper und der Umwelt ausgetauscht wird (Zeilen 1-19). Dabei wird das Schweißvolumen, das sich auf der Haut befindet, sowie das Wasservolumen, über welches der Körper verfügt, aktualisiert und bei der Berechnung der Schweißproduktion mitberücksichtigt (Zeilen 5-19). Die Gesamtwärmebilanz wird dann wie folgt berechnet:







– Berechnung der Körperkerntemperatur sowie der Intensität der Schweißproduktion und des Kältezitterns

- Vitalparameter:
- Körperkerntemperatur  $t_{\text{patient}}$ , °C
  - Konvektiver Wärmestrom  $Q_{\text{convection}}$ , J
  - Konduktiver Wärmestrom  $Q_{\text{thermalConduction}}$ , J
  - Elektromagnetischer Wärmestrom  $Q_{\text{radiation}}$ , J
  - Wärmeübertragung durch Verdunstung  $Q_{\text{perspiration}}$ , J
  - Wasserdampfdruck auf der Schweiß bedeckten Haut  $P_{\text{H}_2\text{O,skin}}$ , kPa
  - Intensität der Muskelkontraktionen  $Y_{\text{shivering}}$ , [0; 1], wobei 0 – die minimale Intensität, welche physiologischem Muskelgrundtonus ohne Kältezittern, und 1 – die maximale Intensität mit dem stärksten Zittern bedeuten
  - Durch Muskelkontraktionen erzeugte Wärme  $Q_{\text{shivering}}$ , J
  - Die niedrigste Körperkerntemperatur, bei welcher das Kältezittern eingestellt wird,  $t_{\text{shiveringMin,patientMin}}$ , °C
  - Die höchste Körperkerntemperatur, bei welcher das Kältezittern eingestellt wird,  $t_{\text{shiveringMin,patientMax}}$ , °C
  - Körperkerntemperatur, bei welcher maximales Kältezittern auftritt,  $t_{\text{shiveringMax}}$ , °C
  - Intensität der Schweißproduktion  $Y_{\text{transpiration}}$ , g Wasser·s<sup>-1</sup>
  - Volumen sekretierten Schweißes auf der Hautoberfläche  $V_{\text{H}_2\text{O,transpiration,skin}}$ , g Wasser
  - Volumen des Schweißes, das von der Hautoberfläche verdunstet,  $V_{\text{H}_2\text{O,evaporation,skin}}$ , g Wasser
  - Volumen des Schweißes auf der Hautoberfläche,  $V_{\text{H}_2\text{O,skin}}$ , g Wasser
- Vitalzeichen:
- Intensität des Kältezitterns basierend auf dem Parameter  $Y_{\text{shivering}}$
  - Schweißvolumen auf der Haut basieren auf dem Parameter  $V_{\text{H}_2\text{O,skin}}$
- Konstanten:
- Körperwärmekapazität  $k_{\text{bodyHeatCapacity}}$ , kJ·kg<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>
  - Benötigte Energie zur Verdunstung 1 g Wasser  $k_{\text{H}_2\text{O,evaporation}}$ , J·g<sup>-1</sup> Wasser

**Open Access** Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

