

## Thermoregulation

der Mensch  $\Rightarrow$  ein **homiothermes (gleichwarmes)** Lebewesen

- die Erhaltung organischer Funktionen von homoithermen Organismen erfordert eine weit gehend **konstante Körpertemperatur**
- zwischen einem Körper mit definierter Temperatur und seiner Umgebung erfolgt ein steter **Wärmeaustausch über die Körperoberfläche**
- ein **Temperaturgefälle** besteht zwischen
  - **Körperkern, Körperschale** und **Umgebung**,  
sofern die Umgebungstemperatur von der Körperkerntemperatur abweicht
- **Körperkern** und **Körperschale** sind als **Temperaturfeld** eines Körpers zu verstehen

## Thermoregulation

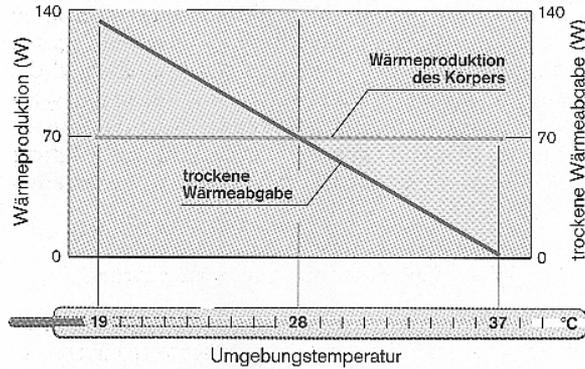
der Mensch  $\Rightarrow$  ein **homiothermes (gleichwarmes)** Lebewesen

- obere Kerntemperaturgrenze des Menschen  
**ab 40°C  $\Rightarrow$  43°C (Hyperthermie)**
- und
- untere Temperaturgrenze  
**ab 32°C (Hypothermie)**
- **künstliche Hypothermie:**  
Senkung der Körperkerntemperatur auf ca. **-20°C**
  - $\Rightarrow$  von der Temperatur abhängiger Gewebestoffwechsel
  - $\Rightarrow$  in der Chirurgie zur Herabsetzung des Gewebestoffwechsels,  
um an Organen längere Zeit ohne Durchblutung,  
d.h. **ohne O<sub>2</sub>- Zufuhr** arbeiten zu können!

## Körperkerntemperatur

bestimmt durch **Verhältnis** von **Wärmeproduktion** des Körpers und **Wärmeabgabe** durch **Konduktion, Konvektion, Verdunstung, Strahlung**

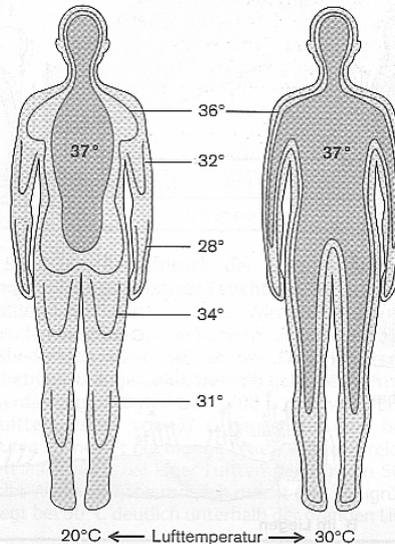
- **Wärmeabgabe** proportional der **Temperaturdifferenz**  
bei einer Wärmeproduktion von 70 W erfordert die Erhaltung einer Körperkerntemperatur von 37°C
- **unter 28°C** ⇒ Produktion von mehr Wärme
- **über 28°C** ⇒ Abgabe von mehr Wärme



## Thermoregulation

- Wärmebildung -

- **Körperkern** des Menschen: **Gehirn, Inneres des Rumpfes** mit stoffwechselintensiven Organen ⇒ entwickeln in Ruhe **70% der Gesamtwärme**
- **Körperkern** ⇒ **homiothermer Bereich**, Kerntemperatur bei geringen Außentemperaturschwankungen **weitgehend konstant**
- **Körperschalentemperatur** nähert sich von innen nach außen der Umgebungstemperatur
  - **Ausdehnung abhängig** von der **Umgebungstemperatur**
- **Messorte der Kerntemperatur:**
  - axillär
  - sublingual
  - oesophageal
  - rektal

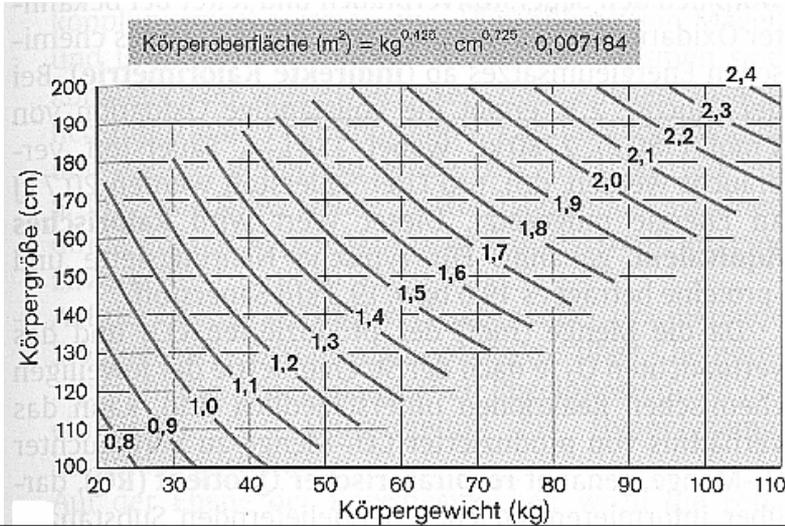


## Thermoregulation

### - Wärmebildung -

Wärmeproduktionsangabe in  $\text{Watt/m}^2 \Rightarrow$  relativ konstante Wechselbeziehung von produzierter Wärme pro Zeiteinheit und pro  $\text{m}^2$ -Körperoberfläche

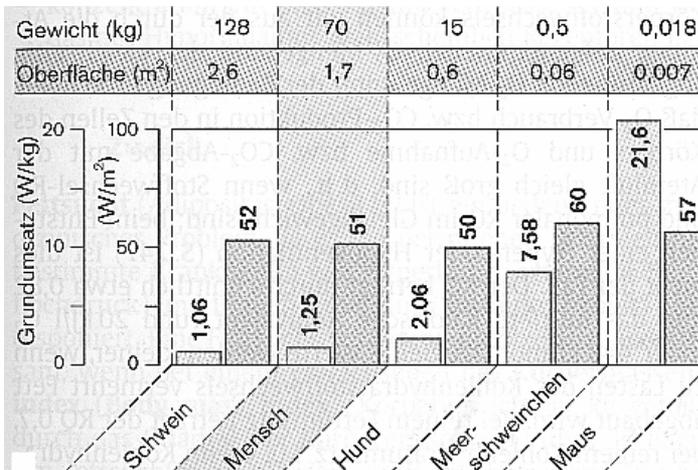
Körperoberfläche: Funktion von Körpermasse und Körpergröße



## Thermoregulation, Körperoberfläche und- masse

relativ geringere Körperoberflächenabnahme als Körpermassenabnahme

$\Rightarrow$  **Erhaltung** der Körperkerntemperatur erfordert bei **kleinen Individuen** eine pro Masseneinheit **stärkere Wärmeproduktion** wegen der relativ größeren OF



## Thermoregulation

### - Wärmebildung -

**Richtwert** unter **Ruhe(Grundumsatz)**-Bedingungen:

**45 W/ m<sup>2</sup>**

- Körpergewicht 80 kp,  
Körperlänge 180 cm  
**Körperoberfläche 2 m<sup>2</sup>**  
**GU<sub>absolut</sub> ⇒ 90 W**
- **Wärmeabgabe > 90 W** erfordert  
⇒ **Steigerung der Wärmeproduktion**  
i.d.R. durch
  - **eiweißreiche Mahlzeit**
  - **körperliche Arbeit**  
⇒ Wirkungsgrad < 25%  
garantiert eine dabei entwickelte Wärmemenge von mindestens 75%
  - **Kältezittern** beim Erwachsenen (rhythmische Muskelkontraktionen)  
⇒ Wärmebildung durch **Muskularbeit**

## Thermoregulation

### - Wärmebildung -

- **zitterfreie Wärmebildung** beim Säugling  
und kleinen Säugetieren  
⇒ **braunes Fettgewebe** (hoher Stoffwechselumsatz)  
in den schalennahen Schichten steigert unter Kältebedingungen die Wärmebildung  
um bis zu 60%
  - **Ursache:**  
hohe Mitochondrienzahl und  
**Umgehen der ATP-Produktion in der Atmungskette** zu Gunsten der  
Wärmebildung
  - **Bedeutung**  
Wechselbeziehung von Körpergewicht und Körperoberfläche  
⇒ **kleinere Lebewesen:** in **Relation** zur **Körpermasse** eine **größere**  
**Körperoberfläche**  
  
⇒ die **Erhaltung der Körperkerntemperatur**  
erfordert in Relation zum Erwachsenen  
eine **stärkere Wärmeproduktion**

## Thermoregulation

### - Wärmeabgabe -

**Gesamtwärmeabgabe = Summe** aus der **Wärmeabgabe** via **Strahlung, Konduktion, Konvektion, Verdunstung**

- **Konduktion:** Wärmeleitung entlang einem Temperaturgefälle

bei einer **proportionalen Wechselbeziehung** zur **Oberfläche** und **Temperaturdifferenz** bestimmt zusätzlich  
⇒ die **Wärmeleitfähigkeit** die weiterleitbare **Wärmemenge**

- **schlechte Wärmeleiter** ⇒ Fettgewebe, Luft, Schaumstoffe
- **gute Wärmeleiter** ⇒ Wasser, Metall
- Dicke des **subcutanen Fettgewebes** bestimmt die **Weiterleitung und Wärmeabgabe** an die **Umgebung** der bis zur Haut abgeleitete Wärmemenge

**inneren Wärmestrom** ⇒ Vorgang der **Wärmeleitung (Konduktion)** und **Konvektion** innerhalb des Körpers

die **Konvektion** dient der **Erhaltung** resp. **Vergrößerung** des **Temperaturgefälles**

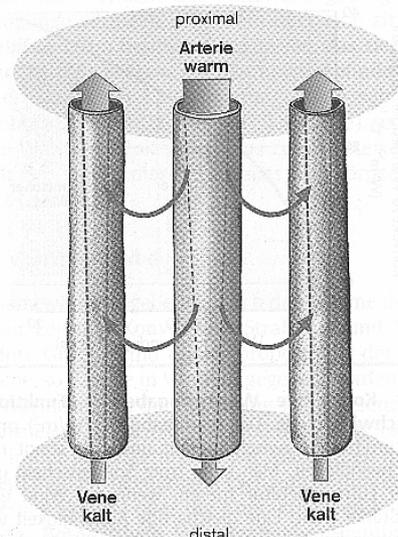
## Thermoregulation

### - innerer Wärmestrom -

**Konvektion** ⇒ **Wärmetransport** über das **Vehikelsystem** ⇒ **Blut**, in das die Wärme auf Grund eines Temperaturgefälles via **Konduktion** gelangt

**verstärkter Effekt** durch

- **venöser Blutrückstrom** in den **Extremitäten**  
⇒ die **parallele Anordnung** von **Venen** und **Arterien** ermöglicht **im Gegenstrom** eine direkte Abgabe von Wärme aus den Arterien
- **verstärkte venöse Oberflächen-Durchblutung** unter Hitzebedingung  
⇒ **Öffnung der arterio-venösen Anastomosen** ⇒ Steigerung der z.B. Hautdurchblutung an Fingern von 2 auf 1200 ml/(min kg Gewebe)



## Thermoregulation

### - äußerer Wärmestrom -

#### Konduktion (äußere)

geringer Anteil der Wärmeabgabe an die Umgebung in Folge

⇒ **geringer Wärmeleitfähigkeit der Luft**

⇒ i.d.R. **geringer Wärmeleitfähigkeit von Kleidung**

⇒ **eng anliegende Kleidung** ⇒ **Zunahme der Wärmeleitfähigkeit** wegen des geringen „Luftpolsters“

⇒ **sehr gute Wärmeleitfähigkeit von Wasser**

bei einer **Temperaturdifferenz von 1°C**

erlaubt

- **Sommerkleidung** einen Wärmedurchgang von **20 W/m<sup>2</sup>**
- **Polarkleidung** hingegen **2 W/m<sup>2</sup>**

durch

⇒ **mehrschichtiges Gewebe, Luftkammern**

## Thermoregulation

### - äußerer Wärmestrom -

#### Konvektion (äußere)

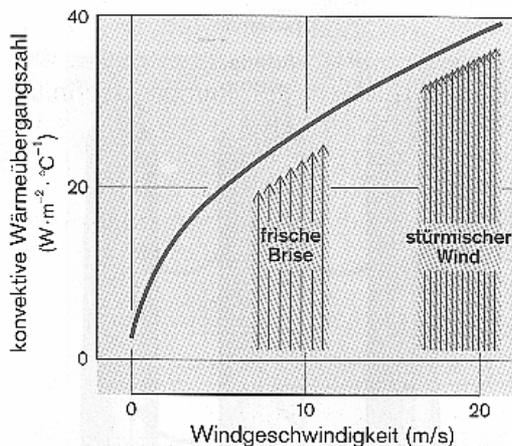
Erhaltung ggf. Verstärkung eines Temperaturgefälles

- **freie Konvektion** ⇒ Temperaturdifferenz von 1°C zwischen Haut und Luft  
⇒ **3,5 W/m<sup>2</sup>**

**Aufsteigen der durch Wärmezufuhr leichteren Luft**

- **erzwungene Konvektion**  
⇒ z.B. **Wind, Wasserströmung**

⇒ **Steigerung der Wärmeabgabe um bis zu 200-fach**



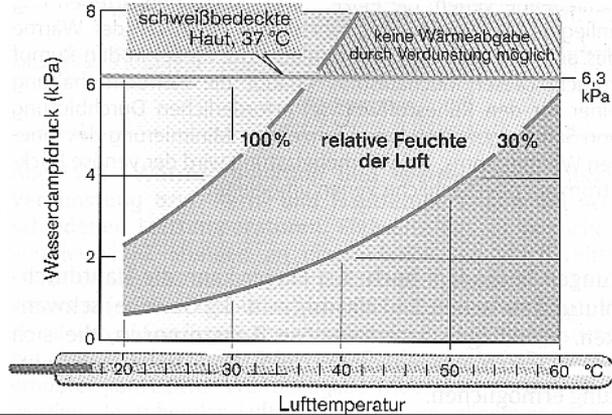
## Thermoregulation

- äußerer Wärmestrom -

**Verdunstung: Schweißsekretion + Perspiration insensibles** ( $\Rightarrow$  Diffusion von  $H_2O$  durch die Haut/Schleimhaut)

- **Verdampfungswärme von Wasser**  $\Rightarrow 2400 \text{ kJ/lH}_2\text{O}$ 
  - **500 ml Schweiß** können pro Stunde produziert werden  $\Rightarrow 333 \text{ W/m}^2$   
( $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$ )  $\Rightarrow$  **7-Faches** der **Ruhwärmeproduktion**
  - **Voraussetzung**  
Wasserverdampfung

$\Rightarrow$  **Wasserdampfpartialdruckdifferenz** von Haut (**6,3 kPa bei 37°C**) und Umgebungsluft (**< 6,3 kPa**)

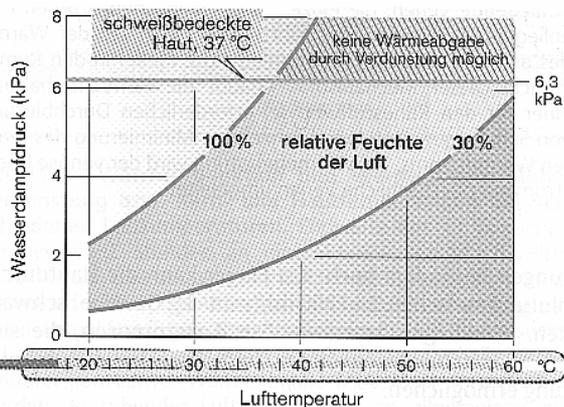


## Thermoregulation

- äußerer Wärmestrom -

### Verdunstung

- **Wasserdampfsättigung 100%**  $\Rightarrow$  maximal möglicher Luftanteil von  $H_2O$  in gasförmigem Zustand
- **Zunahme der Wasserdampfsättigung mit der Lufttemperatur**, der **Wasserdampfdruck** entsprechend
- **geringe Wasserdampfsättigung**  
 $\Rightarrow H_2O$ -Aufnahme in gasförmigem Zustand verstärkt möglich  
 $\Rightarrow H_2O$  verdampft und entzieht Wärme!
- **hohe Wasserdampfsättigung**  
 $\Rightarrow H_2O$  bleibt flüssig, verdampft nicht



## Thermoregulation

- äußerer Wärmestrom -

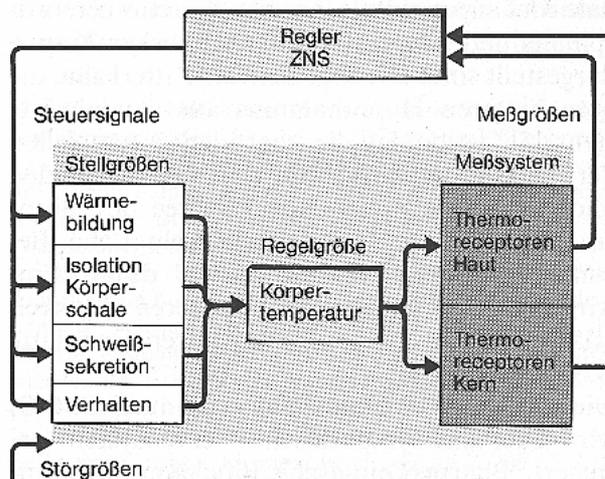
**Strahlung**  $\Rightarrow$  **Wärmeabgabe** in Form von **elektromagnetischen Wellen**, verstärkt im nicht sichtbaren Infrarot-Bereich:  $\lambda$  (Wellenlänge)  $> 0,8 \mu\text{m}$

- **Zunahme der Wärmeabgabe** durch Strahlung mit der **Temperatur** des strahlenden **Körpers**
  - Wärmestrahlen werden absorbiert  $\Rightarrow$  durch schwarze Kleidung oder reflektiert  $\Rightarrow$  durch helle Kleidung
- im biologische Bereich gilt eine annähernd lineare Wechselbeziehung zur Temperaturdifferenz zwischen dem biologischen System und dem umgebenden ebenfalls strahlenden Körper: Heizungskörper, Wand, ...Sonne
  - mögliche Wärmeabgabe durch Strahlung bei einer Temperaturdifferenz von  $1^\circ$  (Haut - Wand)  $\Rightarrow 5,4 \text{ W/m}^2$
  - mögliche Wärmeaufnahme durch Sonnenstrahlung bei klarem Himmel  $\Rightarrow$  bis zu  $800 \text{ W/m}^2$

## Thermoregulation

- Regelkreis -

- **Regelgröße:** Körperkerntemperatur
- **Messung** des Istwerts durch **Temperaturfühler im Kern** und in der **Schale** (Kälte-Sensoren  $>$  Wärme-Sensoren)
- **Vergleich**  
Istwert-Sollwert
- **Aktivierung der Stellglieder** der Wärmeabgabe, -produktion, im Falle einer Differenz
- **Regelung im**
  - **ZNS**  
 $\Rightarrow$  Hypothalamus (Zwischenhirn)

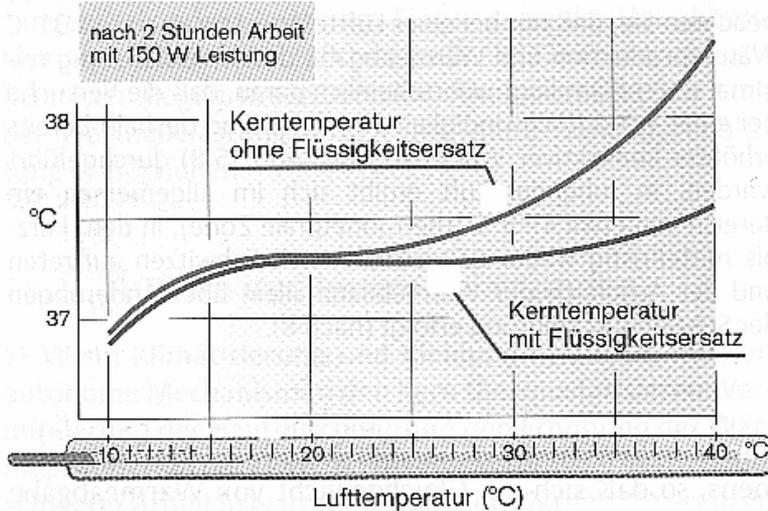


## Thermoregulation

### - Wärmeadaptation -

- **Körperkerntemperatur und Flüssigkeitsersatz**

- körperliche Arbeit ohne Flüssigkeitsersatz führt bei Lufttemperaturen  $> 25^{\circ}\text{C}$  schneller zur Kerntemperaturzunahme



## Thermoregulation

### - Wärmeadaptation -

#### Fieber

- **Sollwertverstellung** der Kerntemperatur durch Pyrogen

- **Kältegefühl**  
Schüttelfrost

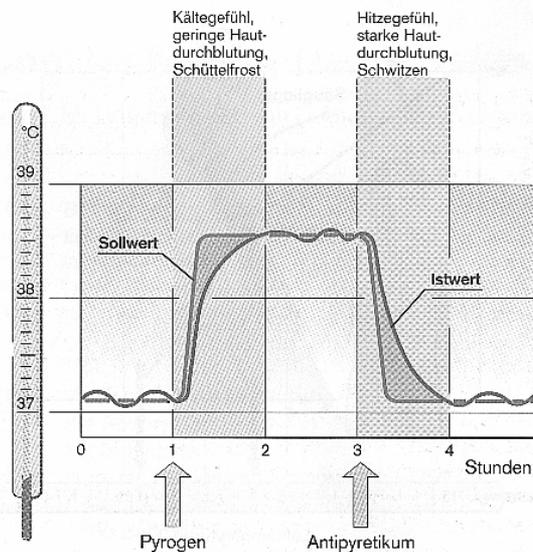
⇒ Wärmebildung

- **Sollwertrückverstellung**

⇒ Abklingen der Pyrogenwirkung

- u.a. Schwitzen
- Antipyretikum

- **Istwert-Normalisierung**



# Thermoregulation

## - Akklimation und Training -

- **Kälte** ⇒ Nachlassen der Kälteempfindung
- **Wärme** ⇒ verstärkte Schweißsekretion durch
  1. Training der Schweißdrüsensekretion
  2. Abnahme des NaCl-Gehalts im Schweiß ⇒ reduzierte Wasserbindung
  3. Verschiebung der Schwitzschwelle
  4. größeres Flüssigkeitsvolumen
  5. besserer Wirkungsgrad

