

- ◆ 7 Wärmehaushalt und Temperaturregulation
- ◆ 7.1. Energieumsatz
 - ▶ 7.1.1. Umsatzformen
 - ▶ 7.1.2. Spezielle Definitionen
 - ▶ 7.1.3. Arten des Wärmeaustausches
 - ▶ 7.1.4. Die menschliche Körper(kern)temperatur (36,5 – 37,0°C)
- ◆ 7.2. Temperaturregulation
 - ▶ 7.2.1. Thermosensoren
 - ▶ 7.2.2. Regler
 - ▶ 7.2.3. Stellglieder
 - ▶ 7.2.4. Regelkreis
 - ▶ 7.2.5. Besonderheiten der Temperaturregulation beim Neugeborenen
 - ▶ 7.2.6. Akklimation (in Tagen bis Monaten)
- ◆ 7.3. Pathophysiologie
 - ▶ 7.3.1. Hypothermie
 - ▶ 7.3.2. Hyperthermie
 - ▶ 7.3.3. Fieber

7 Wärmehaushalt und Temperaturregulation

7.1 Energieumsatz

Energieumsetzungen → Wärme
umgekehrt

sind alle chemischen (v.a.) und physikalischen (z.B. Diffusion wenig) Vorgänge im Organismus
temperaturabhängig

Senkung der Temperatur → energieverbrauchende Prozesse ↓

(z.B. K⁺/Na⁺-Pumpe)
Störung der Erregungsbildung und -leitung
Zellschwellung
(Körpertemperatur < 25°C = lethal)

[Nutzung: Kühlung von Organen zur Erhaltung für Transplantation]

Anstieg der Temperatur → Energieumsatz ↑

O₂-Angebot limitierend (> 42°C lethal)

Homoiothermie

= Konstanz der Körpertemperatur

("gleichwarme" Lebewesen: Säugetiere und Vögel, die einen hohen Ruheumsatz aufweisen = Tachymetabolismus;

Gegensatz: *Poikilothermie* bei "wechselwarmen" Lebewesen; z.B. bei Reptilien)

Menschliche Körper(kern)temperatur 36,5 - 37,0 °C

7.1.1 Umsatzformen

Grundumsatz

- ◆ Frauen ~ 6,3 MJ/d (76 W)
- ◆ Männer ~ 7,1 MJ/d (85 W)

Freizeitumsatz

- ◆ Frauen ~ 8,4 MJ/d
- ◆ Männer ~ 9,6 MJ/d

Arbeitsumsatz variabel

7.1.2 Spezielle Definitionen

Grundumsatzmessung morgens, nüchtern (12 h Nahrungskarenz), in physischer und psychischer Ruhe und bei indifferenter Umgebungstemperatur (22 - 25°C bei leichter Bekleidung).

Anteil der verschiedenen Organsysteme am Grundumsatz

| Organ | Anteil % |
|-----------|----------|
| Leber | 26 |
| Muskel | 26 |
| Gehirn | 18 |
| Herz | 9 |
| Nieren | 7 |
| Restliche | 14 |

Wirkungsgrad (syn. Nutzeffekt)

$$\frac{\text{äußere Arbeit}}{\text{Gesamtumsatz}} = \leq 0,25$$

**75% der umgesetzten
Energie wird als Wärme frei**

7.1.3 Arten des Wärmeaustausches

a) Wärmestrahlung

$$q_s = \sigma \cdot \varepsilon_H \cdot \varepsilon_W \cdot (T_H^4 - T_W^4)$$

q_s : Strahlungswärmestrom je Flächeneinheit

σ : Strahlungskonstante

ε_H u. ε_W : Emissions- bzw. Absorptionskonstanten von Haut und Wand

T_H u. T_W : absolute Temperaturen von Haut und Wand (etc.)

Absorptionskonstanten von Oberflächen bei Sonnenbestrahlung

| Oberfläche | ϵ |
|------------------|------------|
| schwarzer Körper | 1 |
| menschliche Haut | 0,5 - 0,8 |
| weiße Kleidung | 0,3 |

b) Wärmeleitung (ruhesendes Medium) und Konvektion

(bewegtes Medium)

$$q_k = \alpha (T_H - T_L)$$

q_k : Wärmestrom je Flächeneinheit

α : Wärmeübergangszahl (~ Oberflächenkrümmung,

~ Wurzel aus Windgeschwindigkeit)

T_L : Temperatur der Luft

c) Verdunstung

Verdampfungswärme 2,4 MJ/l

extraglanduläre sowie glanduläre Wasserabgabe

$$q_v = \beta (p_H - p_L)$$

β : Verdunstungszahl (~ Oberflächenkrümmung,

~ Wurzel aus Windgeschwindigkeit)

p_H u. p_L : Wasserdampfdruck der Haut und Luft

(abhängig von Temperatur und Wassergehalt)

Wärmeabgabe im Wasser

- ◆ nur durch Leitung und Konvektion
- ◆ hohe Wärmeübergangszahl

→ Gefahr des Wärmeverlustes hoch (v.a. $< 20^{\circ}\text{C}$ Wasser)

Wärmeabgabe stark abhängig vom (isolierenden) Fettpolster, da Hautdurchblutung stark gedrosselt wird.

7.1.4 Die menschliche Körper(kern)temperatur (36,5 – 37,0°C)

Homoiothermie

- ◆ Erhaltung einer hohen Temperatur im Körperinneren
- ◆ Wärmeabgabe = Wärmebildung + Wärmeaufnahme

Temperaturfelder

Körperkern : Inneres des Rumpfes und des Kopfes
Körperschale : Extremitäten und Haut

Temperaturmessung

Rektal im Mastdarm
Oral in der Mundhöhle (ca. $0,4^{\circ}\text{C}$ niedriger)
Axillar (ungenau)
Gehörgang

Tagesrhythmische Schwankungen um ca. 1°C

Minimal in den frühen Morgenstunden
→ endogene circadiane Periodik.

Bei Frauen periodische Schwankung verbunden mit dem Sexualzyklus (um ca. $0,5^{\circ}\text{C}$; nach KNAUS-OGINO genutzt zur Bestimmung des Konzeptionsoptimums).

7.2 Temperaturregulation

| | |
|---------------|---|
| Regelgröße : | Körperkerntemperatur |
| Fühler : | Warm- und Kaltsensoren (in <u>Hypothalamus</u> , Hirnstamm, Rückenmark, Bauchhöhle, Muskulatur, <u>Haut</u>) |
| Regler : | Temperaturzentrum im Hypothalamus |
| Stellglieder: | Muskulatur, Fettgewebe, Arteriolen der Haut, Schweißdrüsen, willkürliche Verhaltensweisen |

7.2.1 Thermosensoren

Innere (zentrale): v.a. warmsensitiv

ZNS Regio präoptica / vorderer Hypothalamus,
unterer Hirnstamm (Mittelhirn /medulla oblongata)

Bauchhöhle, Rückenmark, Dorsalwand, Muskulatur

Periphere der Haut

Kaltsensoren 32-16°C; (meist III - (Ad -) Fasern)
Warmsensoren 40-47°C; (meist IV- (C-) Fasern)
(Afferenzen über N. trigeminus, tractus spinothalamicus = Vorderseitenstrang)

Besonderheiten der Thermorezeption der Haut

| | |
|------------------------------|--|
| <u>Zwei Qualitäten :</u> | warm und kalt |
| <u>Aufgaben :</u> | Wahrnehmung der Haut- und Außentemperaturregulation der Körpertemperatur |
| <u>Indifferenztemperatur</u> | (Neutralempfindung) $31^{\circ}\text{C} < T < 36^{\circ}\text{C}$ |
| <u>Hitzeempfindung</u> | $T \geq 45^{\circ}\text{C}$ |
| <u>Kälteschmerz</u> | $T \leq 17^{\circ}\text{C}$ |

Dynamisches Antwortverhalten (PD-Regelung) i.e. Adaptation

7.2.2 Regler

Oberstes Steuerzentrum ist der posteriore Hypothalamus, dort werden die Signale der Warm- und Kaltsensoren reziprok verschaltet:

- ◆ Warmsensorische Afferenzen stimulieren Wärmeabwehr und hemmen die Kälteabwehr.
- ◆ Kaltsensorische Afferenzen stimulieren Kälteabwehr und hemmen die Wärmeabwehr.

Gleichgewicht, wenn "Istwert" gleich "Sollwert"

Sollwertverstellung

- tagesrhythmische Schwankungen
- sexualzyklische Schwankungen
- Fieber

7.2.3 Stellglieder

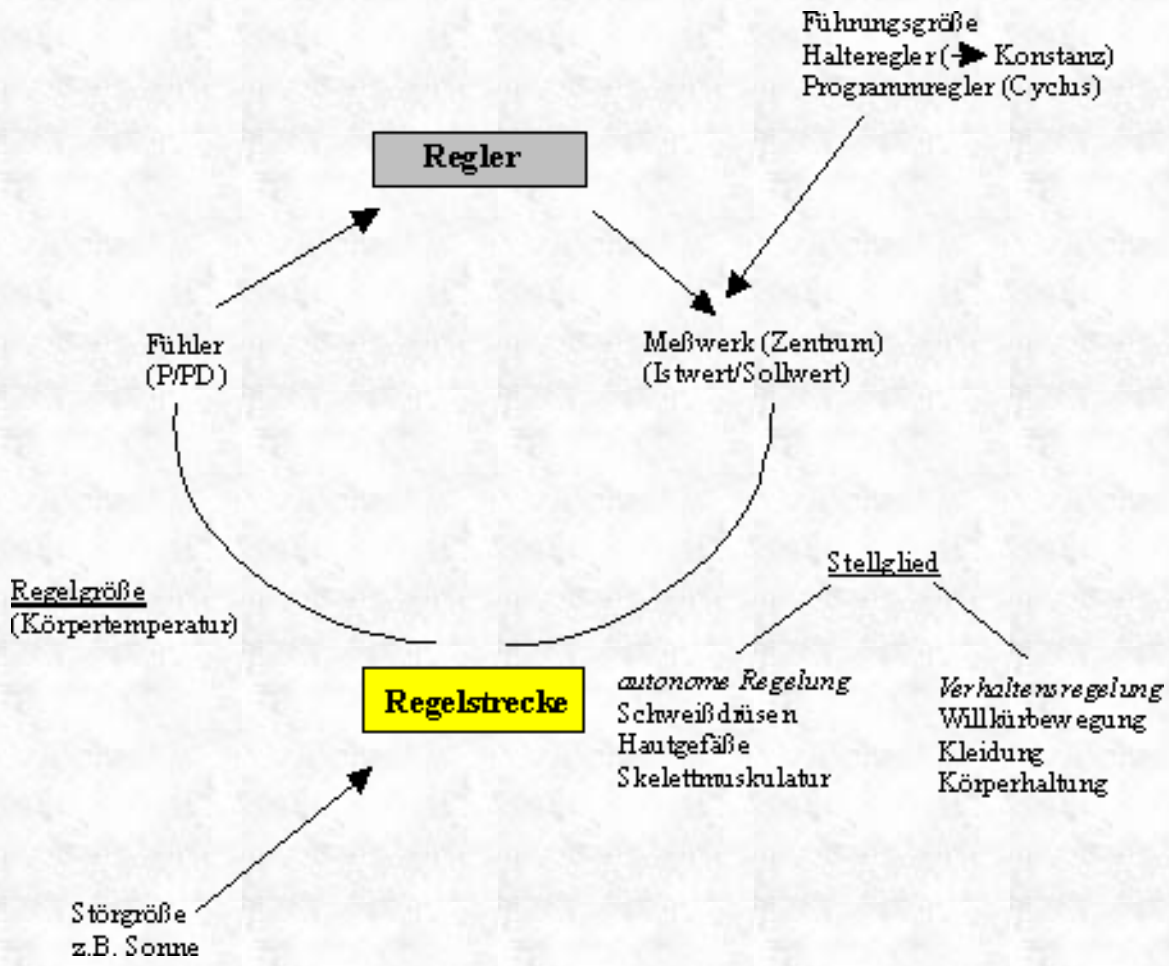
Gegenregulation bei *Abnahme* der Kerntemperatur

- ◆ bewußt : warmhaltende Kleidung
- ◆ willkürlich : Aktivierung des Bewegungsapparates
- ◆ unwillkürlich : Kältezittern
- ◆ vegetativ : Drosselung der Hautdurchblutung, zitterfreie Wärmebildung im braunen Fettgewebe

Gegenregulation bei *Zunahme* der Kerntemperatur

- ◆ bewußt : leichtere Bekleidung, Schattensuche, etc.
- ◆ vegetativ : Zunahme der Hautdurchblutung (aktive, an Schweißsekretion gekoppelte Vasodilatation, u.U. durch Bradykinin verursacht), gesteigerte Schweißproduktion (sympathisch cholinerg)

7.2.4 Regelkreis



Beispiele für die Anpassungsreaktion

- ◆ Änderung der Lufttemperatur
- ◆ Sauna - Belastung
 - Hyperthermie
 - Herzbelastung
- ◆ Körperliche Arbeit
 - Wirkungsgrad $\leq 25\%$ (i.e. $\geq 75\%$ Wärme)
 - u.U. Hyperthermie

7.2.5 Besonderheiten der Temperaturregulation beim Neugeborenen

Autonome thermoregulatorische Reaktionen von Geburt an (auch bei "Frühchen" von ≥ 1000 g).

Wärmebildung regulativ v.a. durch zitterfreie Thermogenese im braunen Fettgewebe (Kältezittern tritt erst bei extremer Kältebelastung auf).

Thermische Neutralzone liegt höher (32-34°C) als beim Erwachsenen, da

- ◆ Oberflächen-Volumen-Quotient hoch (3x)
- ◆ dünne subkutane Fett- (Isolier-) Schicht
- ◆ Regelbereich enger

7.2.6 Akklimatisation (*in Tagen bis Monaten*)

Hitzeanpassung

- ◆ gesteigerte Schweißsekretion (2 l/h und mehr)
- ◆ verminderte Schwellentemperatur zum Schwitzen
- ◆ verminderter Elektrolytgehalt des Schweißes (Aldosteronwirkung)
- ◆ vergrößertes Blutplasmavolumen
- ◆ vermehrte Wasseraufnahme

Kälteanpassung

- ◆ (wenig ausgeprägt)
 - ◆ Gewöhnung (Habituation) auf ZNS-Ebene
 - ◆ Zitterschwelle gesenkt → Hypothermie
-

7.3 Pathophysiologie

7.3.1 Hypothermie

passive Unterkühlung: Umsatz ↓ , HF ↓ , Atemfrequenz ↓ , Hb O₂-Affinität ↑ , Hypoxie, Kammerflimmern, Hirnschaden

Sollwertverstellung: (im Alter 1-2°C ↓), bei Bewußtlosigkeit, Narkose, Schlafmittelvergiftung, (geringe Wärmebildung, da Muskeltonus ↓)

Körperkerntemperatur: < 30-32°C → Bewußtseinsverlust
< 25-27°C → Herzflimmern, Azidose

(künstliche Hypothermie zu chirurgischen Eingriffen ≤ 20°C, dabei pharmakologische Hemmung der thermoregulatorischen Gegenregulationen)

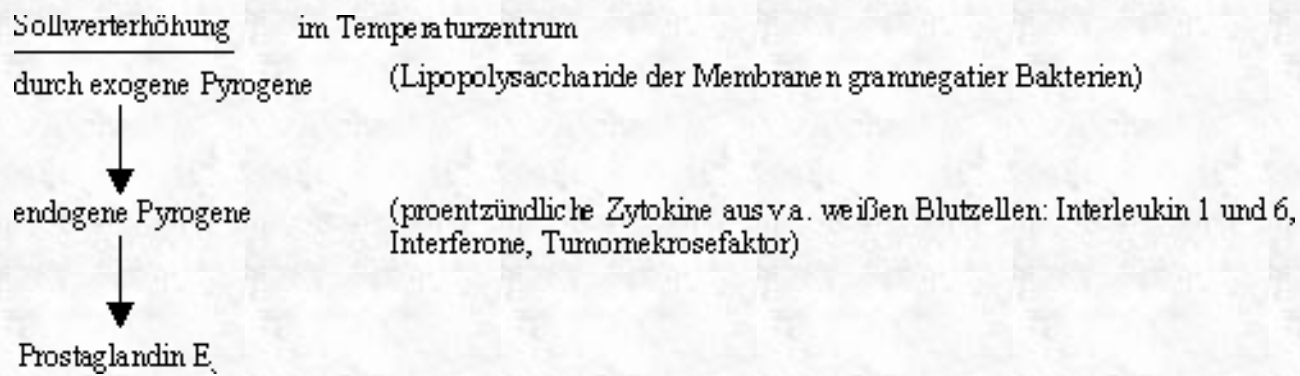
7.3.2 Hyperthermie

(passive Überwärmung, Sollwert nicht verstellt; belastet Organismus mehr als Fieber, da Stellglieder maximal aktiviert (z.B. Daueraufenthalt bei 60°C in trockener Luft)

Hitzekollaps (z.B. bei körperlicher Arbeit; BD-Regelkreis und Temperaturregelkreis haben gemeinsames Stellglied = Hautgefäße)

"Hitzschlag" : Körperkerntemperatur anhaltend ≥ 40°C = lebensbedrohliche Gehirnschädigung, Delirium, Krämpfe, Ausfall thermoregulatorischer Reaktionen

7.3.3 Fieber



◆ → Stoffwechselsteigerung

Abnahme der Hautdurchblutung
 Schüttelfrost (Muskelzittern)
 Subjektives Frieren
 Herzfrequenz \uparrow ($10 \times \text{min}^{-1} \times \text{°C}^{-1}$)
 Atemfrequenz \uparrow
 Salz- und Wasserverlust

→ bei Fieberabfall dagegen Vasodilatation, Schwitzen, Hitzegefühl (fiebersenkende Medikamente = Antipyretika)

Übungsfragen

Prüfen Sie bitte folgende Aussagen zum Wärmehaushalt!

Welche Aussage ist richtig?

1. Unbekleidet kann der Mensch durch Strahlung Wärme verlieren (= negative Bilanz der Strahlungswärme), auch wenn die Lufttemperatur höher als seine Hauttemperatur ist.
2. Bei schwerer körperlicher Arbeit ist die Wärmeproduktion, nicht aber die Wärmeabgabe erhöht.
3. Zwischen Körperschale und Körperkern liegt die thermische Neutralzone.
4. Durch Kälteeinwirkung auf die Haut kann es zu einer direkt ausgelösten Dilatation der Hautgefäße kommen.
5. Durch Kälteeinwirkung auf die Haut kann es zu einer reflektorisch ausgelösten Konstriktion der Hautgefäße kommen.

Welcher der folgenden Mechanismen ist **nicht** am äußeren Wärmestrom beteiligt?

1. Konduktion (= Wärmeleitung)
2. Konvektion mit dem Umgebungsmedium (Luft, Wasser)
3. Wärmetransport mit dem Blut (Hautdurchblutung)
4. Evaporation (= Verdunstung) über die Haut und Atemwege
5. Strahlung

Welche Aussage trifft zu?

1. Die Verdampfung von 1 l Schweiß auf der Haut entzieht dem Körper 1200 KJ (ca. 280 kcal).
2. Beim Tauchen im Wasser, dessen Temperatur oberhalb der Indifferenz-Temperatur liegt, ist Schwitzen die einzige Möglichkeit der Wärmeabgabe.
3. Die Schweißabgabe wird durch den Filtrationsdruck der Hautgefäße bestimmt.
4. Die maximale Schweißabgabe bei starker Muskelarbeit in trockener, heißer Luft liegt bei 0,5 l/h.
5. Keine der Aussagen trifft zu.

Welche der folgenden Aussagen über die Thermoregulation trifft zu?

1. Beim erwachsenen Menschen ist die zitterfreie Wärmebildung im braunen Fettgewebe der bedeutendste Mechanismus der Thermoregulation.
2. Der thermoregulatorische Regelkreis sorgt bei äußerer Abkühlung der Haut für eine konstante Hauttemperatur durch Steigerung der Durchblutung.
3. Das Neugeborene setzt vorwiegend Kältezittern als Mechanismus der Wärmebildung zur Regelung seiner Körpertemperatur ein.
4. Bei körperlicher Arbeit in Indifferenztemperatur kann die Hauttemperatur aufgrund der Schweißverdunstung erniedrigt sein, obwohl die Körpertemperatur ansteigt.
5. Durch Wasserverdunstung werden in Ruhe etwa 80%, bei körperlicher Arbeit etwa 20% der gebildeten Wärme des Menschen abgegeben.

Welche Aussage über das Fieber trifft **nicht** zu?

1. Bei raschem Fieberanfall wird häufig Schweißausbruch beobachtet.
2. Bei rasch einsetzendem Fieber tritt häufig Kältezittern auf.
3. Eine Erhöhung der Körperkerntemperatur über den Normalbereich hinaus ist immer ein krankhaftes Ereignis.
4. Bei Fieberanstieg ist die Hautdurchblutung in der Regel vermindert.
5. Fieber bei Infektionskrankheiten beruht auf einer Erhöhung des Temperatur-Sollwertes.

Nach Hitzeakklimatisation bei körperlicher Arbeit

1. beginnt die Schweißsekretion bei einer höheren Körperkerntemperatur
2. besteht nach Produktion der gleichen Menge Schweißes ein geringeres Durstgefühl
3. ist bei gleicher Hitzebelastung und ausreichender Trinkmenge die Herzfrequenz höher
4. wird bei gleicher Hitzebelastung mehr Schweiß abgesondert
5. ist der Schweiß weniger hypoton