Bemerkung zu den Texten und Bildern, die in der Vorlesung gezeigt wurden:

Aus urheberrechtlichen Gründen können die aus Büchern kopierten Abbildungen hier nicht eingeschlossen werden. Sie sind jeweils zitiert und sind aus folgenden Büchern entnommen:

G.S. Campbell An introduction to environmental Biophysics
Springer New York, 1977
D.C. Giancoli, Physics, Principles with applications
Prentice Hall, Englewood cliffs, 1980
H. Horvath Biologische Physik, HPT&BV, 2003
J. Schreiner Physik I, HPT&BV, Wien, 1982
Scientific American, monatlich erscheinende Zeitschrift
P.A. Tipler, Physik. Spektrum Verlag, Heidelberg 1991
H. Vogel, Gehrtsen Physik Springer Berlin, 1995

WÄRMEÜBERGANG: STRAHLUNG; LEITUNG; KONVEKTION

Vorerst: Wärme ist auch eine Energieform. Einheit wie in der Mechanik 1 Joule (alte Einheit: Kalorie)

Wärmezufuhr macht sich allgemein durch Temperaturerhöhung bemerkbar.

$$\Delta Q = c_p \cdot m \cdot \Delta T$$

$$[c_p] = J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1} \quad \text{Spezifische Wärme}$$

WÄRMEÜBERGANG durch TEMPERATURSTRAHLUNG:

Eigentlich schon bekannt: Warmer Körper strahlt zum kalten, kalter (weniger) zum warmen. Netto geht Wärme vom warmen zum kalten Körper, warmer kült ab, kalter erwärmt sich, $\longrightarrow$ nach einiger Zeit Ausgleich.

Wenn die Temperaturdifferenz erhalten bleiben soll muß dem warmen körper ständig Energie (Leistung) zugeführt werden, dem kalten entzogen werden.

Übertragene Leistung durch Wärmestrahlung ergibt sich aus $A \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)$.

Beispiel: Lebewesen, 32^oC Oberflächentemperatur in Umgebung 22^oC. Pro Tag?

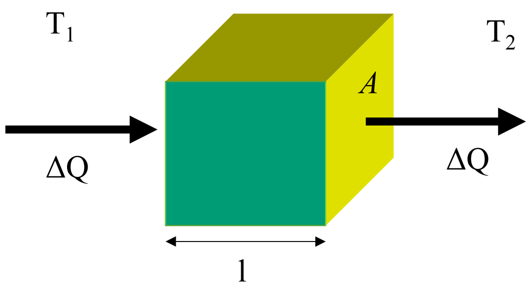
Verringerung der Ausstrahlung durch: (1) Verringerung des Absorptionsvermögen, z.B. verspiegeln, dadurch weniger Emission. (2) Senkung der Oberflächentemperatur durch Wärmeisolation (Umhüllen mit schlechtem Wärmeleiter).

Wärmestrahlung ist meistens der Hauptteil der Wärmeabgabe. Kein Medium für die Übertragung erforderlich. Wärmeübergang durch Strahlung erfolgt (netto) nur von höherer zu niedriger Temperatur.

WÄRMELEITUNG.

Übertragung von Wärme durch Materie (auch nur von höherer zu tieferer Temperatur). Übertragung von Schwingungsenergie der Moleküle. Wärmefluß ohne Materietransport.

Durch Leitung transportierte Wärme ist vom Stoff und den geometrischen Abmessungen abhängig.



$\Delta T = T_1 - T_2$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{l} \qquad [\lambda] = W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} \qquad \text{Wärmeleitvermögen(fähigkeit)}$$

Stoff	$\lambda [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
Cu	381
Al	205
Glas	
Ziegel	≈ 0.6
Hohlziegel	$\approx$0,2
Holz	$\approx 0,08$
Wasser	0,59
Haut	$0,2 \ldots 0,3$, schwach durchblutet
	$\approx 0,8$, stark durchblutet
0,8	Fett0,16
Luft	0,025
Wolle, Fell, Federn	0,0025

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{l}$$ (für ebene, parallele Flächen)

Falls andere geometrische Formen: Analoge Formeln, aber wenig Unterschied zu Ergebnissen bei ebenen Begrenzungen.

Beispiel: Schiffbrüchiger, in Wasser mit $10°C$, $1cm$ Fett, innen $37°C$ $1,5m^2$ Oberfläche. Ermittle Wärmeabgabe in 10 Stunden.

Wärmeleitung durch zwei Schichten:
Wärmefluß muß derselbe in beiden Schichten sein, d.h.

$$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_1 = \lambda_1 \cdot A \cdot \frac{(\Delta T)_1}{l_1} \quad \text{und} \quad \left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_2 = \lambda_2 \cdot A \cdot \frac{(\Delta T)_2}{l_2} \quad \text{ergibt}$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = A \cdot \frac{(\Delta T)_{gesamt}}{\frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \ldots}$$

Beispiel: Hungerndes Schaf: Angenähert als Zylinder mit $\Phi = 25cm$, $l = 60cm$, $2cm$ Wolle, $\Delta T = 20K$. Wieviel Fett ($38MJ/kg$) verbraucht es pro Tag, um die Körpertemperatur aufrecht zu erhalten.

ERMITTLE OBERFLÄCHE
ERMITTLE WÄRMEFLUSS
ERMITTLE den TAGESBEDARF an WÄRME
ERMITTLE FETTMENGE
ERMITTLE % VOM KÖRPERGEWICHT

Spitzmaus $5g$: $\Delta Q \propto m^{2/3}$

KONVEKTION:

Wärmeabgabe an der Oberfläche eines warmen Körpers, anliegende umgebende Luft erwärmt sich, und steigt auf, kältere Luft kommt an die Oberfläche, usw. $\longrightarrow$ Wärmetransport mit Materietransport kombiniert. Andere Variante: Luft wird weggeblasen.

FREIE KONVEKTION	ERZWUNGENE KONVEKTION
Tansport durch Erwärmung bedingt	Transport durch anderen Prozeß
Auskühlender Tee	Wärme vom Körperinneren durch das Blut

Wärmeabgabe durch Konvektion abhängig von:

— Strömungsgeschwindigkeit
— Zähigkeit
— Wärmeleitfähigkeit
— Oberfläche
— Temperaturunterschied
— Dichte
— Dichteunterschied bei ΔT=Ausdehnungskoeffizient: bestimmtdas Aufsteigen der Luft (Wasser)
— Schwerebeschleunigung
— Größe (Höhe oder Breite) des wärmeabgebenden Mediums.

Nicht alle Einflußgrößen gleichzeitig wichtig. Keine exakte mathematische Behandlung möglich, jedoch experimentell ermittelbar, und unter Verwendung dimensionsloser Zahlen auch auf andere Fälle übertragbar.

Bei Wärmeleitung $\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{l}$, bei Konvektion wird eine "virtuelle, effektive" Schichtdicke δ eingeführt und dieselbe Formel verwendet: $\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\delta}$,

wobei δ die Schichte des Konvektionsmediums ist, die bei Wärmeleitung dieselbe Wärmemenge überträgt. Diese Dicke hängt von vielen Faktoren unter anderem der charakteristischen Größe d (Höhe, Breite) ab. Wird meist durch die Nusselt Zahle Nu angegeben.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\delta} = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{d} \cdot Nu$$

$$Nu = \frac{d}{\delta} \ldots \text{Nusseltzahl}$$

Nusselzahl gibt das Verhältnis zwischen der charakteristischen Größe und der effektiven Schichtdicke für die Wärmeübertragung an.

ERZWUNGENE KONVEKTION:
nur zylindrische Objekte betrachtet: Charakteristische Größe ist der Durchmesser.
Dimensionslose Zahle die Reynoldszahl
$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\eta} = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Reibungskraft}}$
empirische Relation:
$Nu = 0,32 + 0,561 \cdot Re^{0,52}$ für $0,1 < Re < 10\,000$
$Nu = 0,24 \cdot Re^{0,6}$ für $10\,000 < Re < 50\,000$ Siehe Formelsammlung
$Nu = 0,024 \cdot Re^{0,81}$ für $50\,000 < Re < 400\,000$

FREIE KONVEKTION
Zylindrische oder ebene Objekte betrachtet. Charakteristische Größe ist die Höhe des Objektes. Dimensionsleose Zahl die Gashofzahl
$Gr = \frac{\alpha \cdot g \cdot d^3 \cdot \Delta T \cdot \rho^2}{\eta^2} = \frac{\text{Auftriebs-}\times\text{Trägheitskraft}}{\text{Reibungskraft}^2}$
empirische Relation:
$Nu = 0,58 \cdot Gr^{0,25}$ für $10^4 < Gr < 10^9$ Siehe Formelsammlung
$Nu = 0,11 \cdot Gr^{0,33}$ für $10^9 < Gr < 10^{12}$

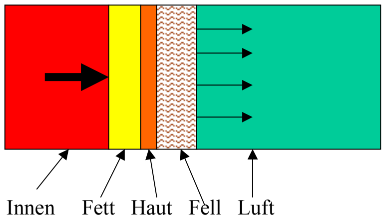
BEISPIEL: Konvektive Wärmeabgabe:. Zylindrisches Objekt mit $1,5m^2$ Oberfläche $1,6m$ Höhe und $0,298m$ Durchmesser. Oberflächentemperatur 32^oC, Umgebung 22^oC.
(a) Erzwungene Konvektion bei $v = 10m/s$, (b) freie Konvektion.

ART DER KONVEKTION
(1) DAZUGEHÖRIGE DIMENSIONLOSE ZAHL
(2) ERMITTLE NUSSELT ZAHL
(3) ERMITTLE δ
(4) ERMITTLE WÄRMEFLUSS
(5) ERMITTLE ENERGIEABGABE PRO TAG

WÄRMEABGABE im VERGLEICH:

Freie Konvektion	$3,87MJ$
Wärmestrahlung	$7,9MJ$
Erzwungene Konvektion	$51,3MJ$

WÄRMEABGABE eines LEBEWESENS:
Randbedingungen: Innentemperatur ($T_i = 37^oC$), Außentemperatur ($T_a = 15^oC$).



Von innen Wärmeleitung durch Fett, Haut und Wärmeisolation (Fell, Kleidung):
Temperatur der Oberfläche: T_o, Wärmemenge $\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_L$ durch Wärmeleitung
Von der Oberfläche: Wärmemenge durch Strahlung $\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_S$ und Konvektion $\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_K$ (Leitung vernachlässigbar, da $l \gg \delta$); Wärmemabgabe durch Verdunstung (Schweiß) nicht berücksichtigt.
Zur Oberfläche zufließende Wärme muß gleich der abfließenden Wärme sein.

$$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_L = \left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_S + \left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_K$$

Beispiel: Fett ($1cm$) - Haut ($1cm$) - Wolle ($1,5cm$); Strahlung als schwarzer Körper; freie Konvektion, $d = 1,6m$, Fläche 1,5 m^2

$$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_L = A \cdot \frac{(T_i - T_o)}{\frac{l_F}{\lambda_F} + \frac{l_H}{\lambda_H} + \frac{L_W}{\lambda_W}}$$

Strahlung: $\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_S = A \cdot \sigma(T_o^4 - T_a^4)$
Konvektion: $Gr = \frac{\alpha \cdot g \cdot d^3 \cdot \Delta T \cdot \rho^2}{\eta^2}$, $Nu = 0,11 \cdot Gr^{0,33}$

$$\longrightarrow \left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_K = A \cdot \lambda \cdot \frac{(T_o - T_a) \cdot 0,11 \cdot (\frac{\alpha \cdot g \cdot d^3 \cdot \Delta T \cdot \rho^2}{\eta^2})^{0,33}}{d}$$

daher:

$$A \cdot \frac{(T_i - T_o)}{\frac{\lambda_F}{l_F} + \frac{\lambda_H}{l_H} + \frac{\lambda_W}{l_W}} =$$

$$A \cdot \sigma(T_o^4 - T_a^4) +$$

$$A \cdot \lambda \cdot \frac{(T_o - T_a) \cdot 0,11 \cdot (\frac{\alpha \cdot g \cdot d^3 \cdot \Delta T \cdot \rho^2}{\eta^2})^{0,33}}{d}$$

Unbekannt ist nur T_o, durch Lösen der Gleichung ermittelbar: ABER: T_o kommt in 1, 4, und 0,33-ter Potenz vor $\longrightarrow$ graphisch oder tabellarisch:

WÄHLE BELIEBIGEN WERT VON T_o

ERMITTLE $\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_L$ und $\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_S + \left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_K$

FALLS $\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_L < \left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_S + \left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_K$ nehme kleinere T_o und probiere wieder

FALLS $\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_L > \left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_S + \left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_K$ nehme größere T_o und probiere wieder

FALLS $\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_L = \left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_S + \left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_K$ innerhalb eines kleinen Fehlers, Temperatur T_o gefunden.

Beispiel:
Lebewesen $1,5m^2$, Wärmeabgabe durch Konvektion und Strahlung.

Temperatur $[^oC]$	Leitung $[W]$	Strahlung $[W]$	Konvektion $[W]$	Strahlung + Leitung $[W]$
15.00	47.4	.0	.0	.0
16.00	45.3	8.2	2.1	10.3
17.00	43.1	16.4	5.3	21.7
18.00	41.0	24.8	9.0	33.8

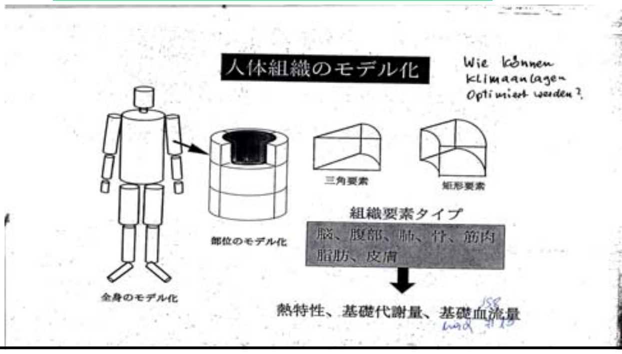
Temperatur $[^oC]$	Leitung $[W]$	Strahlung $[W]$	Konvektion $[W]$	Strahlung + Leitung $[W]$
18.10	40.8	25.6	9.4	35.0
18.20	40.5	26.4	9.8	36.2
18.30	40.3	27.3	10.2	37.5
18.40	40.1	28.1	10.6	38.8
18.45	40.0	28.5	10.9	39.4
18.50	39.9	29.0	11.1	40.1
18.55	39.8	29.4	11.3	40.6
18.60	39.7	29.8	11.5	41.3
18.70	39.5	30.7	11.9	42.6
18.80	39.2	31.5	12.3	43.8
18.90	39.0	32.3	12.8	45.2
19.00	38.8	33.2	13.2	46.4
20.00	36.7	41.7	17.8	59.5
21.00	34.5	50.3	22.7	73.0
23.00	30.2	67.8	33.3	101.1
25.00	25.9	85.6	44.8	130.4

Abgegebene Wärme z.B. aus

$$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_L = A \cdot \frac{(T_i - T_o)}{\frac{l_F}{\lambda_F} + \frac{l_H}{\lambda_H} + \frac{L_W}{\lambda_W}}$$

ermittelbar. Daraus Temperaturabnahmen in den einzelnen Medien wermittelbar.

Temperaturgefälle am größten in Stoffen mit kleiner Wärmeleitfähigkeit.



WÄRMEAUSTAUSCHER, WÄRMETAUSCHER

Übertragen Wärme von einem Medium auf ein anderes: Autokühler, Zentralheizkörper, Elefantenohr.

Prinzip: Gleichstrom, Gegenstrom, Kreuzstrom, Kombination mit Speicherung der Wärme (Feuchte).

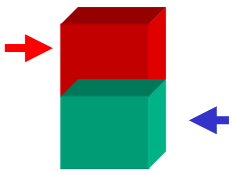
Gegenstromwärme-
austauscher

Schmid Nielsen, scientific American 5/81

Gleichstromwärme-
austauscher

Kreuzstromwärme-
austauscher

Am einfachsten Kreuz und Gleichstrom, am effektivsten Gegenstrom.



Betrachte ein kleines Stück des WT. Fläche ΔA, oben und unten gleiche Flüssigkeitsmenge, Massenfluß $\dot m$. Oben T_o und Abkühlung um ΔT_o, unten T_u, Erwärmung um ΔT_u. Wärme wird von oben nach unten geleitet, führt zu einer Abkühlung des oberen Mediums und einer Erwärmung des unteren Mediums: Es ist $\dot Q = \dot m \cdot c_p \cdot \Delta T_o$ (*). Diese muß gleich der Aufnahme unten sein $\longrightarrow \Delta T_u = \Delta T_o \longrightarrow$ Temperaturanstieg und -abnahme parallel.

Durch die Trennwand gehende Wärmemenge ergibt sich aus der Temperaturdifferenz und dem Wärmewiderstand: $\dot Q = \frac{\lambda \cdot \Delta A \cdot (T_o - T_u)}{d}$ (**)
$\longrightarrow$ gut wärmeleitendes Material, dünn, große Fläche.

Effektiver Wärmetauscher: $T_o - T_u$ klein, Wärme wird gut ausgenützt: (*) = (**)
$\longrightarrow T_o - T_u = \frac{d \cdot \Delta T_o \cdot c_p \cdot \dot{m}}{\lambda} \longrightarrow$ kleiner Massenfluß.

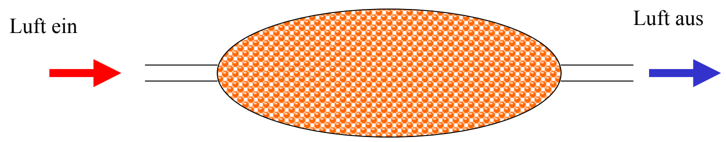
Aber: effektiver Wärmetauscher, wenn $\dot{Q}$ groß, $\longrightarrow \dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T_o$ (*) $\longrightarrow \dot{m}$ groß.

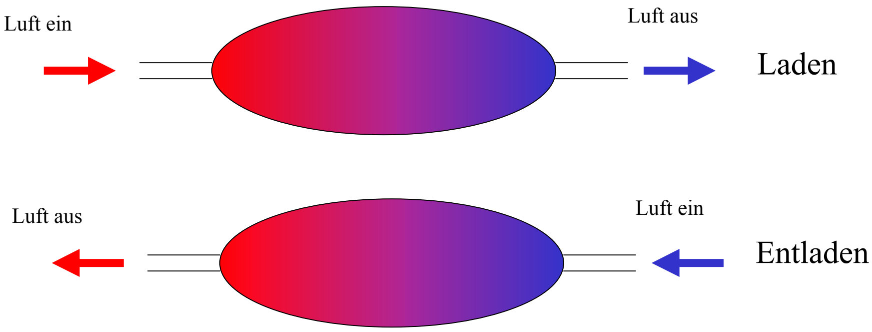
Idealer Wärmetauscher?? Nein! Aber für die spezielle Anwendung der optimale.

Biologische Wärmetauscher: Unterarm, Füße von Vögeln, Delphin,..

Schmid Nielsen, scientific American 5/81

WÄRMETAUSCHER mit WÄRMESPEICHER KOMBINIERT: Z.B. Sonnenergiespeicher mit Warmluft:





Kommt auch beim Atmen vor: im Nasenraum Wärme und Feuchtespeicher:

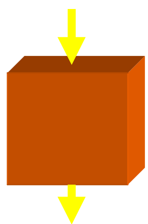
Schmid Nielsen, Scientific American, 1995

Schmid Nielsen, scientific American 5/81

wichtig nach Kehlkopfoperationen "Wellaluminium".

G.S. Campbell, Environmental Biophysics, Fig. 7.3

TEMPERATURWELLEN in der ERDE:
Tages- und jahreszeitliche Schwankungen an der Erdoberfläche führen zur Leitung der Wärme in die (oder aus der) Erde:



Betrachte Volumselement ΔV in der Erde: $\dot{Q}_o$ von oben, $\dot{Q}_u$ nach unten. Falls $\dot{Q}_o - \dot{Q}_u > 0$ Temperaturzunahme (Erwärmung) $\longrightarrow$ nach Erwärmung mehr Leitung nach unten $\longrightarrow$ Temperaturmaximum verzögert sich und wird geringer, da Wärme im Erdboden "stecken bleibt".

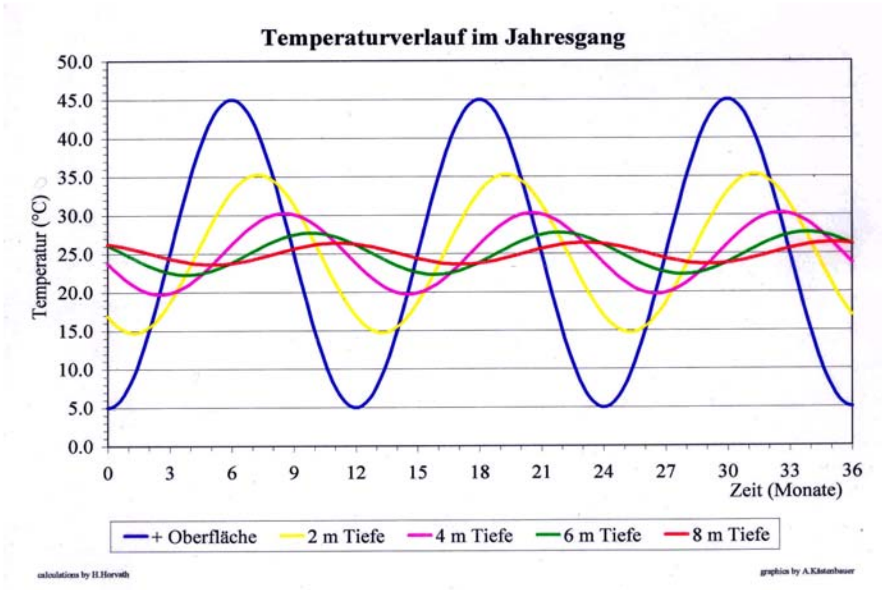
Falls an der Erdoberfläche

$$T(0,t) = \bar{T} + A(0) \cdot \sin \omega \cdot t \qquad \omega = \frac{2 \cdot \pi}{T}$$

mit $\bar{T} \ldots$ mittler Temperatur, $A(0) \ldots$ Temperaturamplitude und $T \ldots$ Periodenlänge ($24h$ für tägliche und $365d$ für jahreszeitiche Schwnkungen), so ist in der Tiefe z die Temperatur

$$T(z,t) = \bar{T} + A(0) \cdot e^{\frac{-z}{D}} \cdot \sin(\omega \cdot t - \frac{z}{D}) \quad \text{mit} \quad D = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{\rho \cdot c_p \cdot \omega}}$$

$D \ldots$ Dämpfungstiefe. Die Temperaturamplitude in der Tiefe $z = A(0) \cdot e^{-z/D}$. Für $z = D$ ist die Amplitude auf $e^{-1} = 0,37$ abgefallen. Zeitverschiebung aus $\sin(\omega \cdot t - \frac{z}{D})$ ermittelbar. Für $z = D$ ist das Argument $\omega \cdot t - 1$, es wird $\frac{1}{2 \cdot \pi}$ $(\approx \frac{1}{6})$ einer vollen Periode abgezogen, d.h. Schwankungen sind verzögert, gegenphasig für $z = \pi \cdot D$.



Einflußgrößen auf $D = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{\rho \cdot c_p \cdot \omega}} = \sqrt{\frac{\lambda \cdot T}{\rho \cdot c_p \cdot \pi}}$

— Wärmeleitfähighkeit λ: Gute Wärmleitung $\longrightarrow$ tiefes Eindringen mit geringer Verzögerung.

— Wärmespeicherfähigkeit $\rho \cdot c_p$ wenn groß dann geringe Eindringtiefe, große Verzögerung.

— Kreisfrequenz ω (Periodenlänge T): Große Periodenlänge $\longrightarrow$ tiefes Eindringen.

Einige Zahlenwerte:

Material	Dämpfungstiefe	
	$T = 24h$	$T = 365d$
Torf (40% Wasser)	0,06m	1,14m
Ton (40% Wassser)	0,12m	2,26m
Sand (40% Wasser)	0,14m	2,72m

Stärkste Temperaturschwankungen an der Oberfläche. Tägliche Schwankungen nach 15 cm gering.

Jährliche Schwankungen nach $5m$ gering (Amplitude auf $\approx e^{-2} = 0,135$ abgefallen). z.B falls 15^o Schwankung am Boden $\longrightarrow$ in $5m$ Tiefe $15^o \cdot 0,135 = 2,03^o$. Keller haben geringe Schwankungen um die mittlere Jahrestemperatur.

Schwankungen am größten auf unbedeckten Boden (Auslöser für Keimen mancher Samen). Schwankungen durch Beschatten verringerbar.

Mittler Temperatur im Boden erhöhbar durch Bedecken mit Stroh, Laub, Torf im Winter