

FORMELSAMMLUNG



RLT-ANLAGEN

by Marcel Laube

FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Volumenstromermittlung	6
Aus der Heizlast	6
Zuluftmassenstrom	6
Zuluftvolumenstrom	6
Zulufttemperatur	6
Aus der Kühllast (nur trockene Kühllast)	6
Zuluftmassenstrom	6
Zuluftvolumenstrom	6
Anfallende Wasserdampfmenge	7
Absolute Feuchte der Zuluft (Zuluftzustand)	7
Aus der Kühllast (trockene und feuchte Last)	7
Randmassstab des h-x-Diagrammes	7
Zuluftmassenstrom	7
Zuluftvolumenstrom	7
Kontrolle der Raumlufttemperatur ohne Kühleinrichtung	8
Aus der Feuchtelast	8
Zuluftmassenstrom	8
Zuluftvolumenstrom	8
Verdunstete Wassermenge (offene Wasserfläche)	8
Verdunstungszahl	8
Aus der Schadstoffbelastung	9
Schadstoffanfall	9
Aussenluft-Volumenstrom	9
Raumüber- Raumunter- und Raumgleichdruck	9
Fugendurchlässigkeit über den Türumfang	9
Über die Fugendurchlässigkeit	9
Aussenluftrate	9
Pettenkofer-Massstab	9
Typische Werte für CO ₂ Gehalt	10
CO ₂ -Ausatmung	10
Aussenluftrate pro Person anhand des Pettenkofermassstabes	10
Empfohlene Aussenluftraten pro Person	11
Luftwechsel	11
Wirksamkeit einer RLT-Anlage	11
Die möglichen „Systeme“	11
Nominale Zeitkonstante	11
Verweilzeit	12
Luftaustauschwirkungsgrad	12
Lüftungswirksamkeit	12
Umsatzzeit	12
Schadstoffkonzentration im Raum	12
Schadstoffkonzentration in der Abluft	12
Lüftungswirksamkeit	13
Ventilation Efficiency (Lüftungswirkungsgrad)	13
Belastungsgrad	13
Meteorologie	13
Temperatur in einer bestimmten Höhe ü. M. (Normatmosphäre)	13

Luftdruck der Normatmosphäre	14
Luftdruck nach der barometrische Höhenformel (physikalisch hergeleitet)	14
Reduktion des Barometerdruck auf Meereshöhe	14
Lufttemperatur zu einer bestimmten Tagesstunde	14
Heizgradtage (HGT)	15
Lüftungsgradtage (LGT)	15
Lüftungsgradstunde	15
Lüftungswärmebedarf	16
Luftfeuchtigkeit	16
Relative Luftfeuchtigkeit	16
Absolute Feuchte	17
Tagesverlauf der Feuchte	17
Darstellung im h-x-Diagramm als Muschelkurven	18
Sonneneinstrahlung	19
Begriffe aus der Himmelsmechanik	19
Breitengrade / Längengrade	20
Definition der Sonnenposition	20
Höhen- oder Elevationswinkel h_s	20
Sonnenazimut γ_s	21
Deklination δ	22
Ortszeit und Sonnenzeit	24
Mittlere Sonnenstunde	24
Universelle Zeit UT	24
Ortszeit	24
Sonnenzeit	24
Wahre Sonnenzeit in $^\circ$	24
Beliebig geneigte und orientierte Flächen	25
Neigungswinkel β	25
Azimut γ	25
Einfallswinkel Θ	25
Direktstrahlung	26
Sonnenazimut	26
Himmelstrahlung	26
Totalstrahlung	27
Reflexstrahlung	27
Diffusstrahlung	27
Globalstrahlung	27
Trübung	27
Windstärke	28
Heiz- und Kühllastberechnungen	28
Temperaturen von unbeheizten Räumen	28
Raumtemperatur	29
Mittlere Oberflächentemperatur	29
Die einzelnen Oberflächentemperaturen	29

Der Aufenthaltsbereich	29
Berechnung der Heizlast	29
Bei Raumüberdruck	30
Bei Raumunterdruck	30
Transmissionswärme	30
k-Wert	30
Berechnung der Kühllast	30
Feuchtebilanz	30
Wärmebilanz	30
Gesamte Kühllast	30
Randmasstab	31
Speicherwirksame Masse	31
Innere Lasten	32
Histogramme (Tagesfahrplan)	32
Personenwärme	32
anfallende Wassermenge im Raum	33
Beleuchtungswärme	33
Wärmeanfall durch Apparate, Geräte und Maschinen	33
Bei Motoren	33
Transmission bei Innenwänden	34
Offene Wasserflächen	34
Verdunstungszahl	34
Zusammenhang zwischen Verdunstungszahl und Wärmeübergangszahl	34
Äussere Last	34
Transmission durch Aussenwände nach SIA 382/2	34
Transmission durch Aussenwände nach VDI	34
Äquivalente Temperaturdifferenz	35
Sonnenlufttemperatur	35
Transmission durch Fenster	35
Sonneneinstrahlung durch Fenster	35
Grundlagen der Physiologie und der Hygiene	36
Der Wärmehaushalt des Menschen	36
Der Energiestoffwechsel	36
Die Körpertemperatur	36
Die Wärmeproduktion	37
Die Wärmeabgabe	38
clo-Wert	39
Luftbedarf des Menschen	39
Gerüche	40
Anzahl Unzufriedene in Funktion zur empfundenen Luftqualität	40
Anzahl Unzufriedene in Funktion zum Luftvolumenstrom	41
Minimaler Luftbedarf nach Geruchsmasstab	41
Belastung der Aussenluft	41
Behaglichkeit	42
Raumlufitemperatur	43
Temperatur der Umschliessungsflächen	43
Vereinfachte Variante	43
Bei verschiedenen Abständen	43

FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Raumtemperatur	44
Raumluftgeschwindigkeit	45
Turbulenzgrad	46
Luftfeuchte	46
Luftelektrizität	47
Mikroorganismen	47
Behaglichkeitsmassstäbe	47
Zusammenhang zwischen PMV- und PPD-Wert	47
PPD-Wert mit Berücksichtigung des Turbulenzgrades	48

Volumenstromermittlung

Aus der Heizlast

Zuluftmassenstrom

$$m'_{ZUL} = \frac{Q' \cdot 3600}{c_{pL} \cdot (t_{ZUL} - t_R)} \quad [\text{kg/h}]$$

Q' = Heizlast [kW]

c_{pL} = spez. Wärmekapazität [kJ/kg*K]

t_{ZUL} = Zulufttemperatur [°C]

t_R = Raumtemperatur [°C]

Zuluftvolumenstrom

$$V'_{ZUL} = \frac{Q' \cdot 3600}{\rho \cdot c_{pL} \cdot (t_{ZUL} - t_R)} \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

Q' = Heizlast [kW]

ρ = Dichte [kg/m³]

c_{pL} = spez. Wärmekapazität [kJ/kg*K]

t_{ZUL} = Zulufttemperatur [°C]

t_R = Raumtemperatur [°C]

Zulufttemperatur

$$t_{ZUL} = t_R + \frac{Q' \cdot 3600}{V'_{ZUL} \cdot \rho \cdot c_{pL}} \quad [^\circ\text{C}]$$

Aus der Kühllast (nur trockene Kühllast)

Zuluftmassenstrom

$$m'_{ZUL} = \frac{Q' \cdot 3600}{c_{pL} \cdot (t_R - t_{ZUL})} \quad [\text{kg/h}]$$

Q' = Heizlast [kW]

c_{pL} = spez. Wärmekapazität [kJ/kg*K]

t_{ZUL} = Zulufttemperatur [°C]

t_R = Raumtemperatur [°C]

Zuluftvolumenstrom

$$V'_{ZUL} = \frac{Q' \cdot 3600}{\rho \cdot c_{pL} \cdot (t_R - t_{ZUL})} \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

Q' = Heizlast [kW]

ρ = Dichte [kg/m³]

c_{pL} = spez. Wärmekapazität [kJ/kg*K]

t_{ZUL} = Zulufttemperatur [°C]

t_R = Raumtemperatur [°C]

FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Anfallende Wasserdampfmenge

$$\Delta m'_D = m'_{ZUL} (x_R - x_{ZUL}) \quad [\text{kg/h}]$$

m'_{ZUL} = Zuluftmassenstrom [kg/h]
 x_R = absol. Feuchte im Raum [kg/kg]
 x_{ZUL} = absol. Feuchte der ZUL [kg/kg]

Absolute Feuchte der Zuluft (Zuluftzustand)

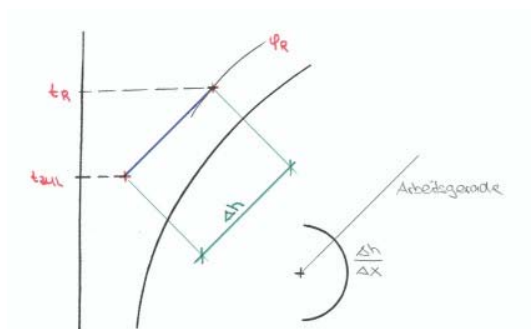
$$x_{ZUL} = x_R - \frac{\Delta m'_D * 1000}{\rho * V'_{ZUL}} = x_R - \Delta x \quad [\text{kg/kg}]$$

x_R = absol. Feuchte im Raum [kg/kg]
 $\Delta m'_D$ = Wasserdampfmenge [kg/h]
 ρ = Dichte [kg/m³]
 V'_{ZUL} = ZUL-Volumenstrom [m³/h]

Aus der Kühllast (trockene und feuchte Last)

Randmassstab des h-x-Diagrammes

$$\frac{\Delta h}{\Delta x} = \frac{Q'_S + Q'_L}{\Delta m'_D}$$



Δh = Enthalpiedifferenz
 Δx = Absol. Feuchte-Differenz
 Q'_S = Sensible Last [kW]
 Q'_L = Latente Last [kW]
 $\Delta m'_D$ = Wasserdampfmenge [kg/s]

Zuluftmassenstrom

$$m'_{ZUL} = \frac{Q' * 3600}{\Delta h} \quad [\text{kg/h}]$$

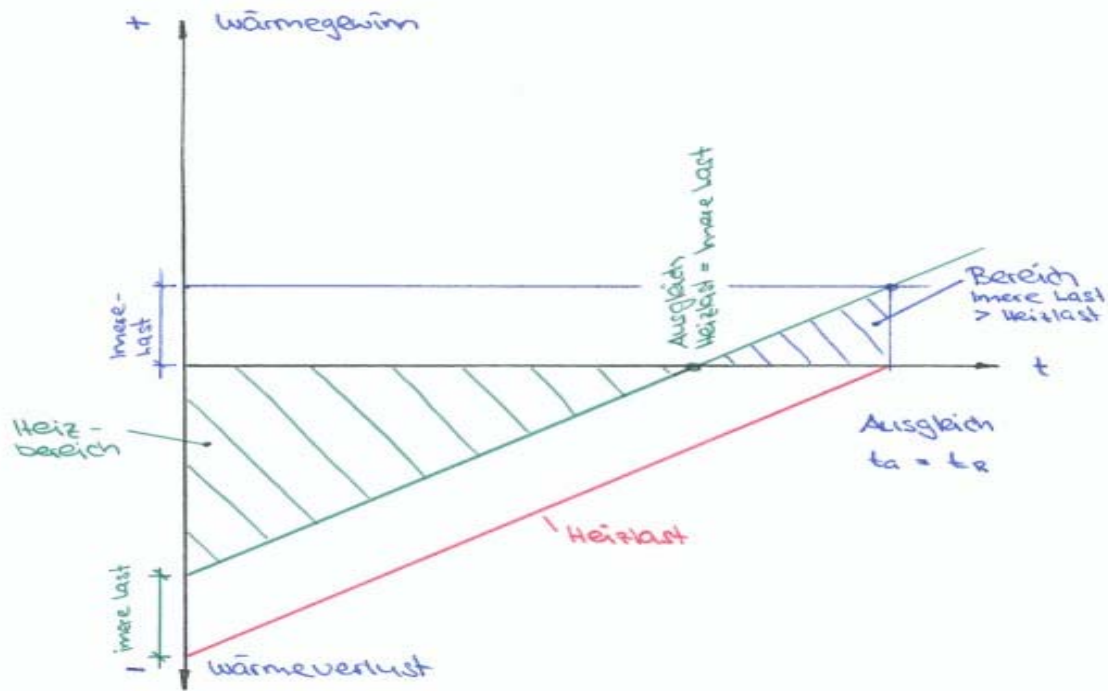
Q' = Gesamtkühllast ($Q'_S + Q'_L$) [kW]
 Δh = Enthalpiedifferenz

Zuluftvolumenstrom

$$V'_{ZUL} = \frac{Q' * 3600}{\rho * \Delta h} \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

Q' = Gesamtkühllast ($Q'_S + Q'_L$) [kW]
 ρ = Dichte [kg/m³]
 Δh = Enthalpiedifferenz

Kontrolle der Raumlufttemperatur ohne Kühleinrichtung



Aus der Feuchtelast

Zuluftmassenstrom

$$m'_{ZUL} = \frac{\Delta m'_D}{\Delta x} \quad [\text{kg/h}]$$

$\Delta m'_D$ = Wasserdampfmenge [kg/h]

Δx = absol. Feuchte-Differenz [kg/kg]

Zuluftvolumenstrom

$$V'_{ZUL} = \frac{\Delta m'_D}{\rho * \Delta x} \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

$\Delta m'_D$ = Wasserdampfmenge [kg/h]

ρ = Dichte [m³/h]

Δx = absol. Feuchte-Differenz [kg/kg]

Verdunstete Wassermenge (offene Wasserfläche)

$$m'_w = \partial * A * (x_s - x_R) \quad [\text{kg/h}]$$

∂ = Verdunstungszahl [kg/m²*h]

A = Wasserfläche [m²]

x_s = abs. Feuchte gesättigter Luft bei Wassertemperatur [kg/kg]

x_R = abs. Feuchte Raumluft [kg/kg]

Verdunstungszahl

$$\partial = 25 + 19 * w \quad [\text{kg/m}^2 * \text{h}]$$

w = Luftgeschw. über Wasser [m/s]

Aus der Schadstoffbelastung

Schadstoffanfall

$$K' = V'_{AUL} * k_{AUL} = V'_{FOL} * k_{FOL} \quad [m^3/h]$$

V'_{AUL} = Volumenstrom [m^3/h]
 k_{AUL} = Schadstoffkonzentr. [m^3/m^3]

Aussenluft-Volumenstrom

$$V'_{AUL} = \frac{K'}{MAK - k_{AUL}} \quad [m^3/h]$$

K' = Schadstoffanfall [m^3/h]
 MAK = MAK-Wert [m^3/m^3]
 k_{AUL} = Schadstoffkonz. AUL [m^3/m^3]

Raumüber- Raumunter- und Raumgleichdruck

Fugendurchlässigkeit über den Türumfang

$$\Delta V' = U * 18 \quad [m^3/h]$$

U = Umfang der Türe [m]

Über die Fugendurchlässigkeit

$$\Delta V' = a * l * \Delta p^{\frac{2}{3}} \quad [m^3/h]$$

a = Fugendurchlässigkeit [$m^3/m * hPa^{2/3}$]
 l = Fugenlänge [m]
 Δp = Über- oder Unterdruck [Pa]

Erfahrungswerte: $\Delta p^{2/3}$ ca. 2
a (bei Innentüre) 9
a (bei Fenstern) 0,6

Aussenluftrate

Pettenkofer-Massstab

... ist der Grenzwert, ab dem die Luft nicht mehr als frisch und hygienisch einwandfrei empfunden wird. Die Pettenkoferzahl richtet sich nach der CO_2 Konzentration in der Luft.

Pettenkoferzahl	1000 ppm CO_2 für Büros 1500 ppm
-----------------	---------------------------------------

FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Typische Werte für CO₂ Gehalt

0,022%	Vor ca. 18'000 Jahren Luftanteilmenge im Gletschereis	0,7%	Maximalwerte in Kino nach Vorstellung
0,026%	Vor 1850 weltweit in vorindustrieller Zeit	2,0%	Physiologischer kurzzeitiger Toleranzwert
0,033%	Heutige „reine Naturluft“, ca. 0,5ppm pro Jahr steigend	2,5-%	Rauschzustände bei Tauchern (evtl. Kombi-Effekt?)
0,04%	Beginnende Beschwerden in Räumen: Kopfdruck, Stickgefühl	3,0-4,0%	Zunehmende Atembeschwerden
0,07	Stadtluftwerte im Freien gemessen	4,0-5,2%	Ausatmungsluft
0,08%	Zunehmende Geruchsempfindlichkeit	5,0%	Zusammen mit 95% Sauerstoff (O ₂) in Beatmungsgeräten
0,1%	Maximalwert nach Pettenkofer 1858	6,0-8,0%	Curareähnliche Lähmungserscheinungen
0,14%	Stadtluft in Wohnungen, Grenzwert von Büroräumen	8,0-10,0%	Tödliche Dosis bei längerzeitiger Einatmung
0,3%	Bunkerluft: Belegungsversuch Dortmund 64, Spitzenwerte	10%	Verlöschen einer Kerze
0,4%	Maximalwerte in Klassenzimmer nach Unterricht	+10%	Blutkonzentration bei Meeressäugern
0,5%	MAK-Wert für CO₂: 500ppm oder 9000mg/m³	+10%	Kurzzeitige Maximalwerte in künstlicher CO ₂ Badeluft tödliche Dosis schon bei kurzzeitiger Einatmung

CO₂-Ausatmung

Tätigkeit	CO ₂ Ausatmung
Ruhend	10 bis 12 l/h
Sitzend	12 bis 15 l/h
Leichte Büroarbeit	19 bis 24 l/h
Mittelschwere Arbeit, Gymnastik	33 bis 43 l/h
Tanzen, Tennis	55 bis 70 l/h

Bei Kindern liegen die Werte bei 70% bis 80% der oben aufgeführten Werte.

Aussenluftrate pro Person anhand des Pettenkofermassstabes

$$V'_{AUL} = \frac{K'}{k_{pet} - k_{AUL}} \quad [\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{Pers}]$$

K' = ausgeatmete CO₂ Menge [m³/h]

k_{pet} = Pettenkoferzahl [m³/m³]

k_{AUL} = CO₂ Konzentration der AUL [m³/m³]

FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Empfohlene Aussenlufttraten pro Person

Zur Vermeidung akuter Reizwirkung durch Tabakrauch

30 – 40 [m³/h*Pers]

Zur Vermeidung von Belästigungen

60 –70 [m³/h*Pers]

Nach SIA 382/1:

Rauchen	Empfohlen pro Person
Verboten	Für 0,15% CO ₂ 12 bis 15 m ³ /h
	Für 0,10% CO ₂ 25 bis 30 m ³ /h
Gestattet	30 bis 70 m ³ /h

Bei Räumen, in denen sich keine oder kaum Menschen aufhalten, wird ein Mindestaussenluftwechsel von **0,3 [h⁻¹]** empfohlen.

Luftwechsel

$$l = \frac{V'}{V} \text{ [h}^{-1}\text{]}$$

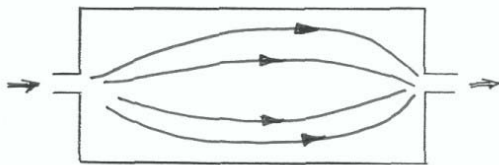
V' = Volumenstrom [m³/h]

V = Raumvolumen [m³]

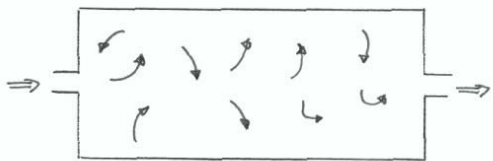
Wirksamkeit einer RLT-Anlage

Die möglichen „Systeme“

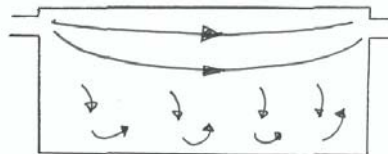
Die Verdrängungsströmung



Die ideale Mischströmung



Die Kurzschlussströmung



Nominale Zeitkonstante

... ist die kürzeste mögliche Verweilzeit von Luft in einem Raum

$$\tau_n = \frac{1}{l} \text{ [h]}$$

l = Luftwechsel [h⁻¹]

FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Verweilzeit

... ist die Zeit, die ein Luftteilchen zwischen Lufteintritt und Luftaustritt benötigt.

Für Verdrängungsströmung: $\tau_v = 1 \tau_n$ [h]

Für ideale Mischströmung: $\tau_v = 2 \tau_n$ [h]

Für Kurzschlussströmung: $\tau_v = n \tau_n$ [h]

Luftaustauschwirkungsgrad

... beschreibt die Güte des Luftaustausches

$$\eta_a = \frac{\tau_n}{\tau_v} \quad [-]$$

τ_n = Nominale Zeitkonstante

τ_v = Verweilzeit

In der Praxis werden folgende Werte erreicht:

- ideale Verdrängungsströmung

$\eta_a = 1$

- Praktisch realisierbare Verdrängungsströmung

$\eta_a = 0,5 - 1,0$

- Ideale Mischströmung

$\eta_a = 0,5$

- Kurzschlussströmung

$\eta_a = 0,5 - 0$

Lüftungswirksamkeit

Umsatzzeit

... ist die Zeit, welche Schadstoffmoleküle von der Quelle bis zum Abluftgitter benötigen.

$$\tau_t = \frac{M}{m'_s} \quad [s]$$

M = Schadstoffmenge im Raum [g]

m'_s = Schadstoffmassenstr. der Quelle [g/s]

Schadstoffkonzentration im Raum

$$k_R = \frac{M}{V} \quad [g/m^3]$$

M = Schadstoffmenge im Raum [g]

V = Raumvolumen [m³]

Schadstoffkonzentration in der Abluft

$$k_{ABL} = \frac{m'_s}{V'_{ABL}} \quad [g/m^3]$$

m'_s = Schadstoffmassenstr. der Quelle [g/s]

V'_{ABL} = Abluftvolumenstrom [m³/h]

FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Lüftungswirksamkeit

$$\varepsilon_v = \frac{k_{ABL}}{k_R} \quad [-]$$

k_{ABL} = Schadstoffkonz. ABL [g/m³]

k_R = Schadstoffkonz. Raum [g/m³]

oder

$$\varepsilon_v = \frac{\tau_n}{\tau_t} \quad [-]$$

τ_n = nominale Zeitkonstzante [s]

τ_t = Umsatzzeit [s]

einige Werte:

- vollständige Durchmischung: $\varepsilon_v = 1$
- Kurzschlussströmung: $\varepsilon_v < 1$
- Verdrängungsströmung: $\varepsilon_v > 1$

Ventilation Efficiency (Lüftungswirkungsgrad)

... ist das selbe wie der Lüftungswirksamkeit, jedoch wird im englischen Sprachraum diese Formel verwendet, damit Werte >1 vermieden werden können.

$$\eta_v = \frac{\varepsilon_v}{\varepsilon_v + 1} \quad [\%]$$

ε_v = Lüftungswirksamkeit [-]

Belastungsgrad

... ist der reziproke Wert der Lüftungswirksamkeit

$$\zeta = \frac{1}{\varepsilon_v}$$

ε_v = Lüftungswirksamkeit [-]

Meteorologie

Temperatur in einer bestimmten Höhe ü. M. (Normatmosphäre)

Gültig bis auf eine Höhe von 11km

$$t = t_0 - \frac{6,5}{1000}(h - h_0) \quad [^{\circ}\text{C}]$$

t_0 = Bezugstemperatur (mittlere
Jahrestemp. auf Meereshöhe)
15°C

h = Höhe über Meer [m]

h_0 = Meereshöhe **0[m]**

FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Luftdruck der Normatmosphäre

$$p = p_0 \left[1 - \frac{2,256}{100'000} (h - h_0) \right]^{5,256} \quad [\text{hPa}]$$

p_0 = Normdruck 1013 [hPa]
 h = Höhe über Meer [m]
 h_0 = Meereshöhe 0 [m]

Luftdruck nach der barometrische Höhenformel (physikalisch hergeleitet)

$$p = p_0 * e^{-\frac{\rho_0 * g * h}{p_0}} \quad [\text{Pa}]$$

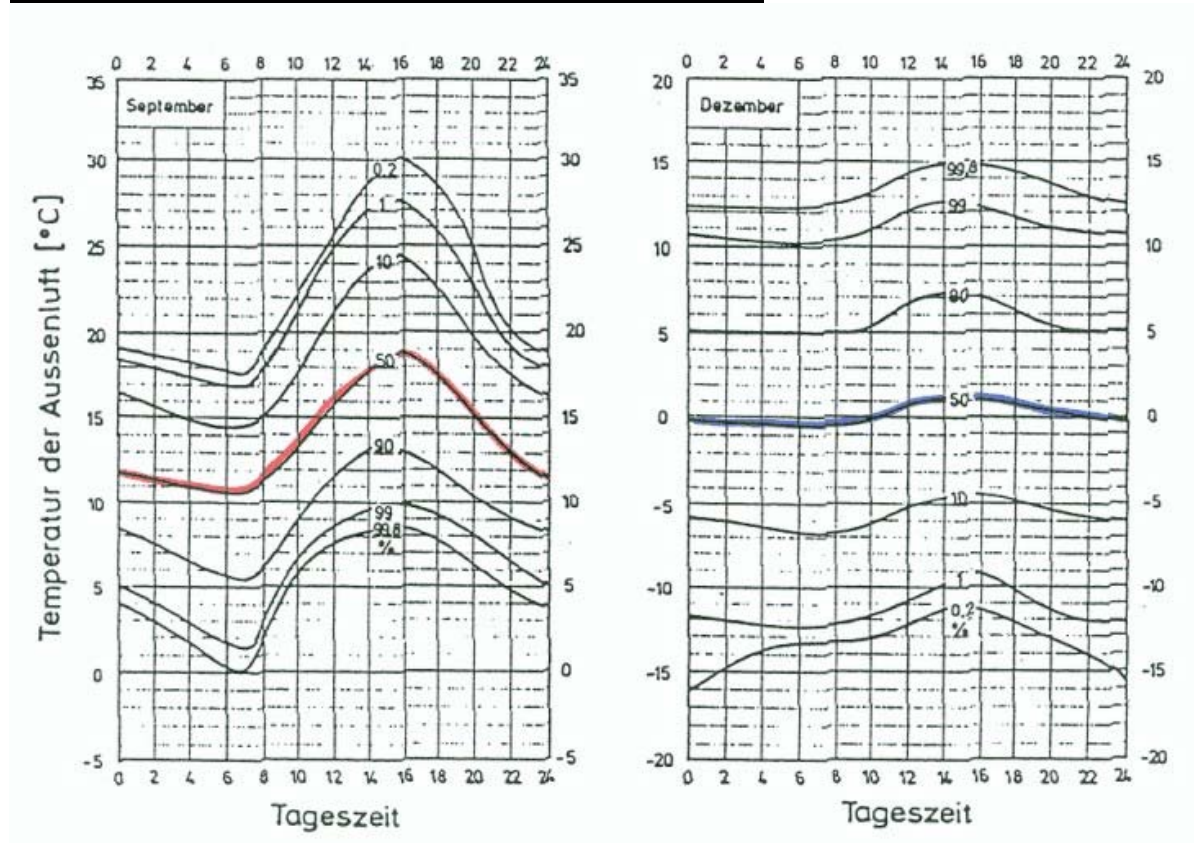
p_0 = Normdruck 101300 [Pa]
 ρ_0 = Normdichte v. Luft 1,293 [kg/m³]
 g = Erdbeschleunigung 9,81 [m/s²]
 h = Höhe über Meer [m]
 e = Eulersche Zahl

Reduktion des Barometerdruck auf Meereshöhe

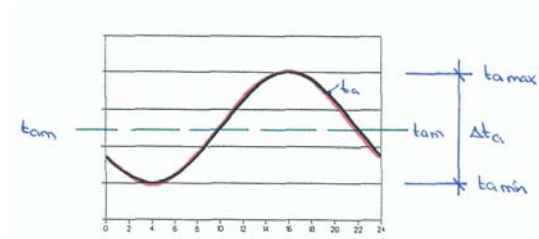
$$p_{b_0} = \frac{p_{bt}}{1 + \gamma_{HG} * t} \quad [\text{Pa}]$$

p_{bt} = Barometerdruck bei Temp. t [Pa]
 γ_{HG} = 182 * 10⁻⁶ [K⁻¹]
 t = Temperatur [°C]

Lufttemperatur zu einer bestimmten Tagesstunde



$$t_a = t_{am} + \frac{\Delta t_a}{2} \sin[(z - z_0) * 15] \quad [^{\circ}\text{C}]$$

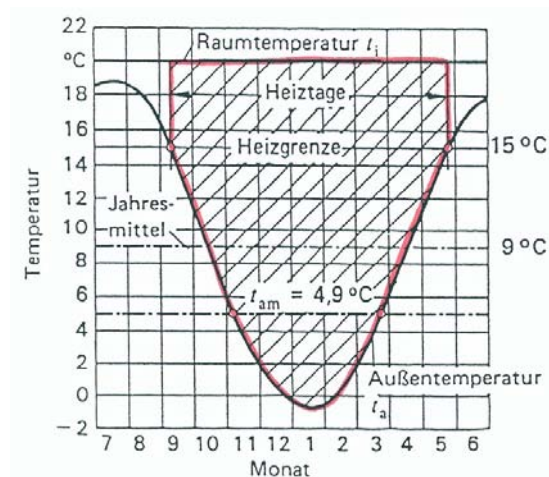


- t_{am} = Tagesmittelwert [$^{\circ}\text{C}$]
 - Δt_a = Doppelte Amplitude der Lufttemperatur [K]
 - z = Stunde des Tages
 - z_0 = Stunde des Tages bei der Temperatur und Tagesmittelwert übereinstimmen
- im Winter: 9**
im Sommer: 10

Heizgradtage (HGT)

$$HGT = \sum_1^n (t_R - t_{am})$$

- t_R = Raumlufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
- t_{am} = Tagesmitteltemperatur [$^{\circ}\text{C}$]



Lüftungsgradtage (LGT)

$$LGT = \sum_1^n (t_{ZUL} - t_{am})$$

- t_{ZUL} = Zulufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
- t_{am} = Tagesmitteltemperatur [$^{\circ}\text{C}$]

Lüftungsgradstunde

$$LGH = h_b (t_{ZUL} - t_{am})$$

- h_b = Betriebsstunden

FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Lüftungswärmebedarf

$$Q_a = \frac{V' \cdot \rho \cdot c_p \cdot LGH}{3600} \quad [\text{kWh/a}]$$

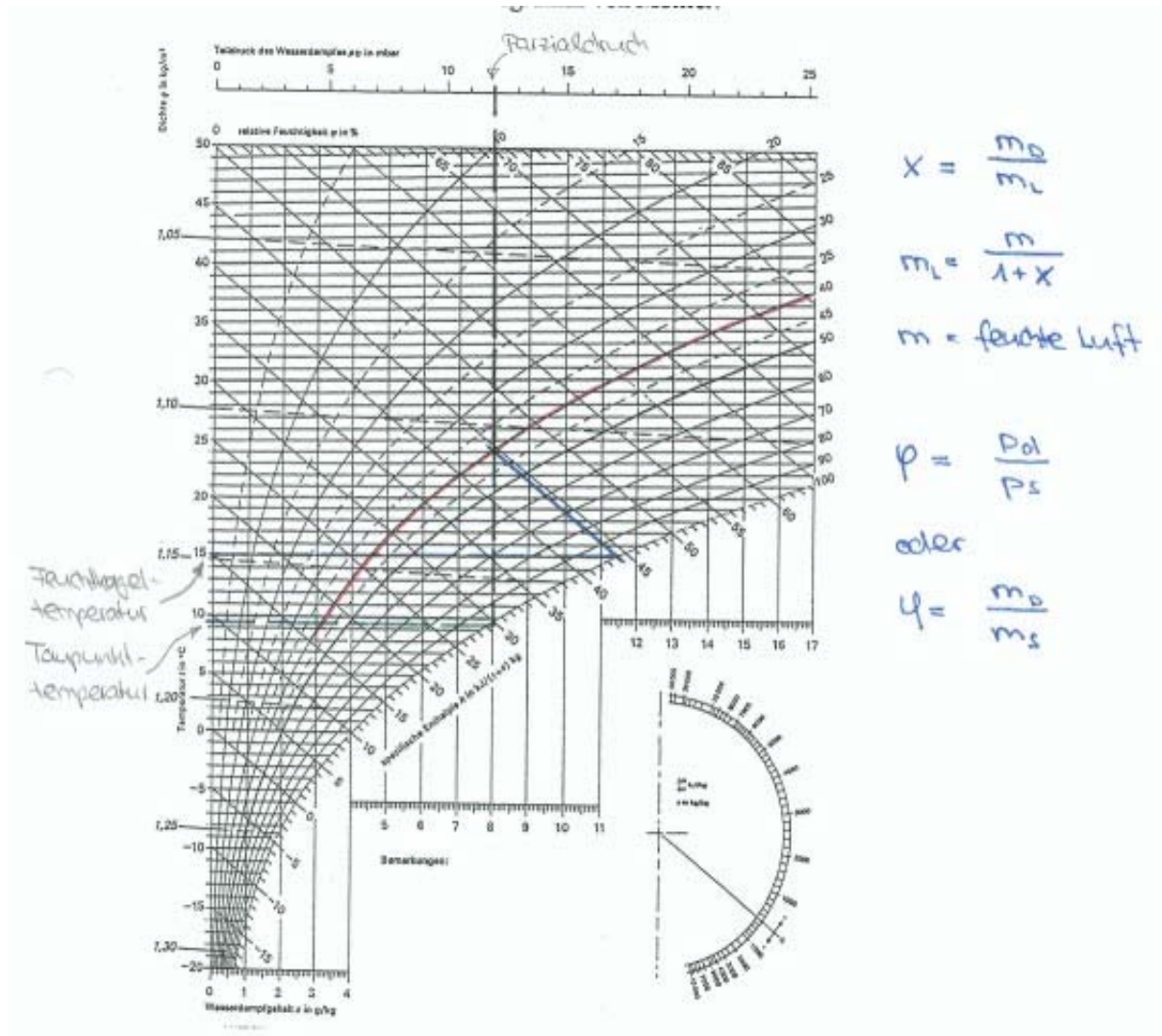
V' = Luftvolumenstrom ZUL [m^3/h]

ρ = Dichte der Luft [kg/m^3]

c_p = spez. Wärmekap. 1.006 [$\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$]

LGH = Lüftungsgradstunden

Luftfeuchtigkeit



Relative Luftfeuchtigkeit

= Das Verhältnis des in der Luft enthaltenen Wasserdampfes, zum maximal möglichen Gehalt an Wasserdampf bei Sättigung.

$$\phi = \frac{p_D}{p_s} \quad \text{oder} \quad \frac{m_D}{m_s} \quad [-] \quad [\%]$$

p_D = Partialdruck Wasserd. [mbar]

p_s = Wasserdampf-Druck bei Sättigung

FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Absolute Feuchte

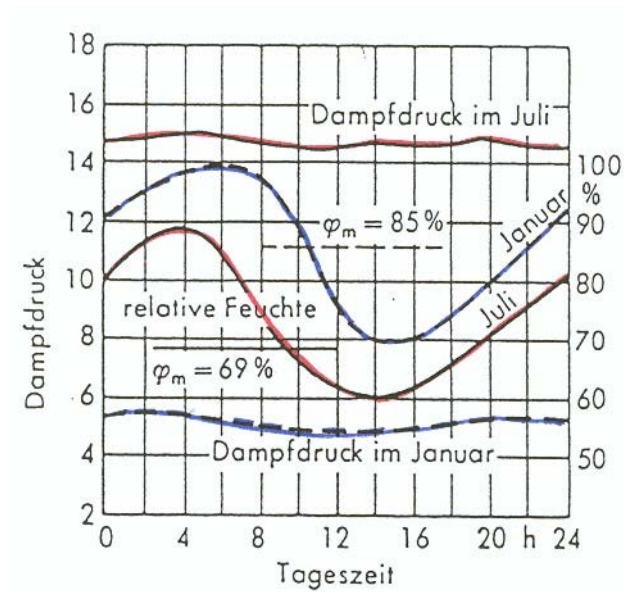
= Der Gehalt an Wasserdampf in g oder kg, pro 1 kg trockene Luft.

$$x = \frac{m_D}{m_L} \text{ [g/kg]}$$

m_D = Masse des Dampfes [g]

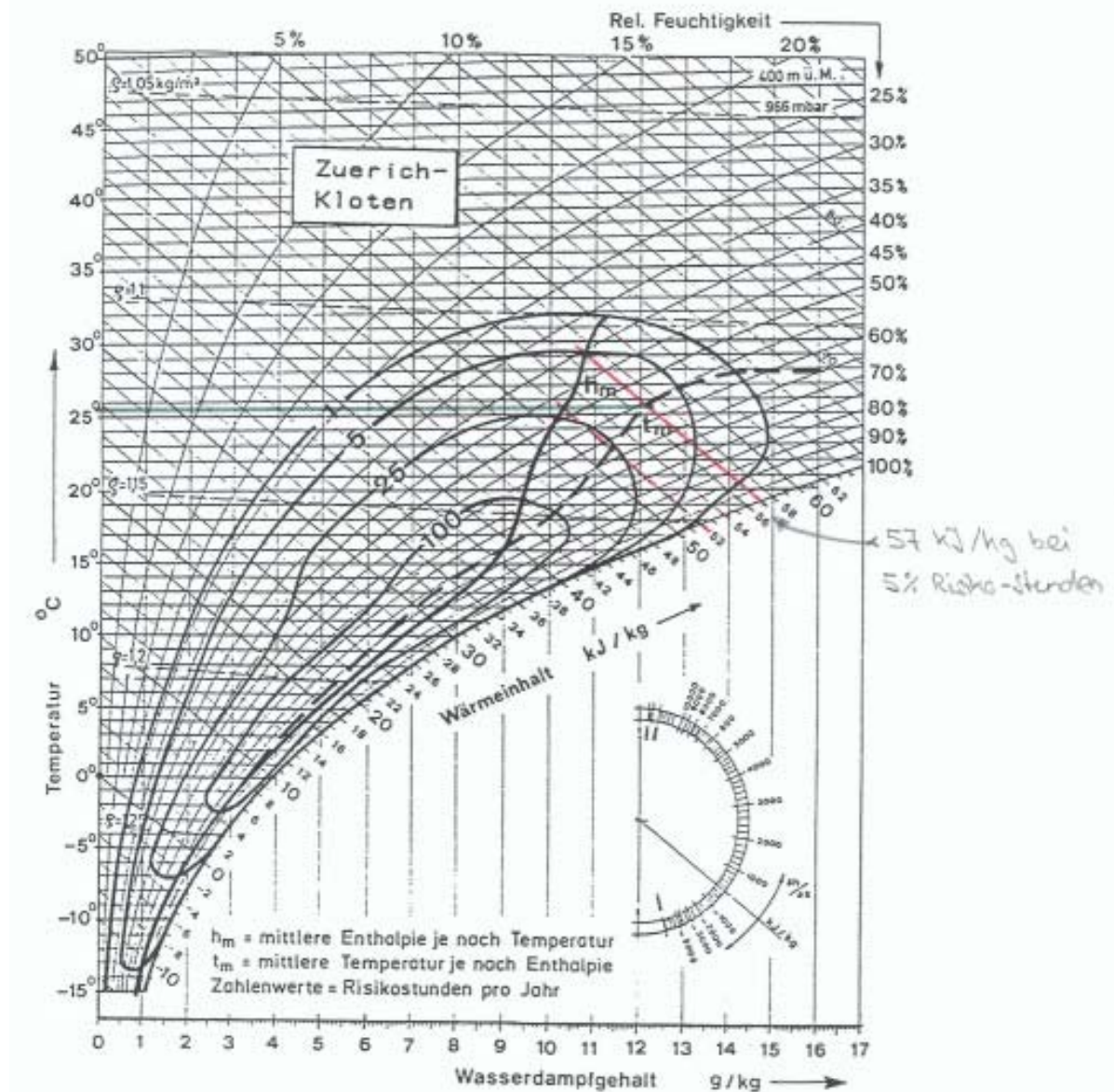
m_L = Masse der trockenen Luft [kg]

Tagesverlauf der Feuchte



FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Darstellung im h-x-Diagramm als Muschelkurven

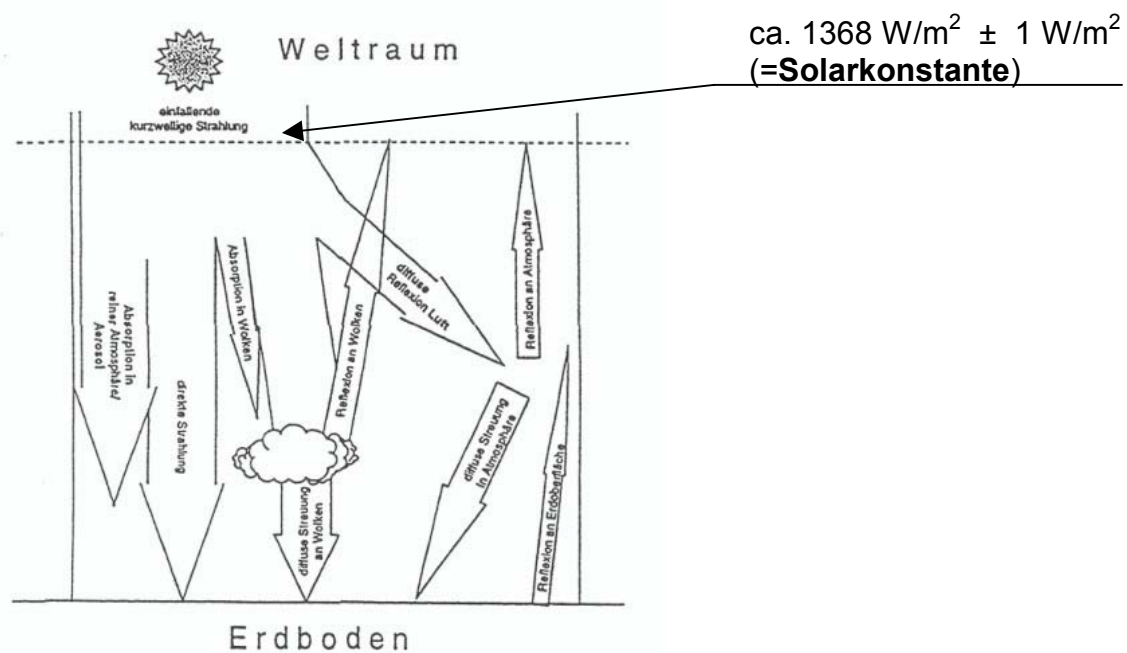


Bsp: Bei 5 Risikostunden pro Jahr beträgt die **spezifische Enthalpie**: 57 kJ/kg

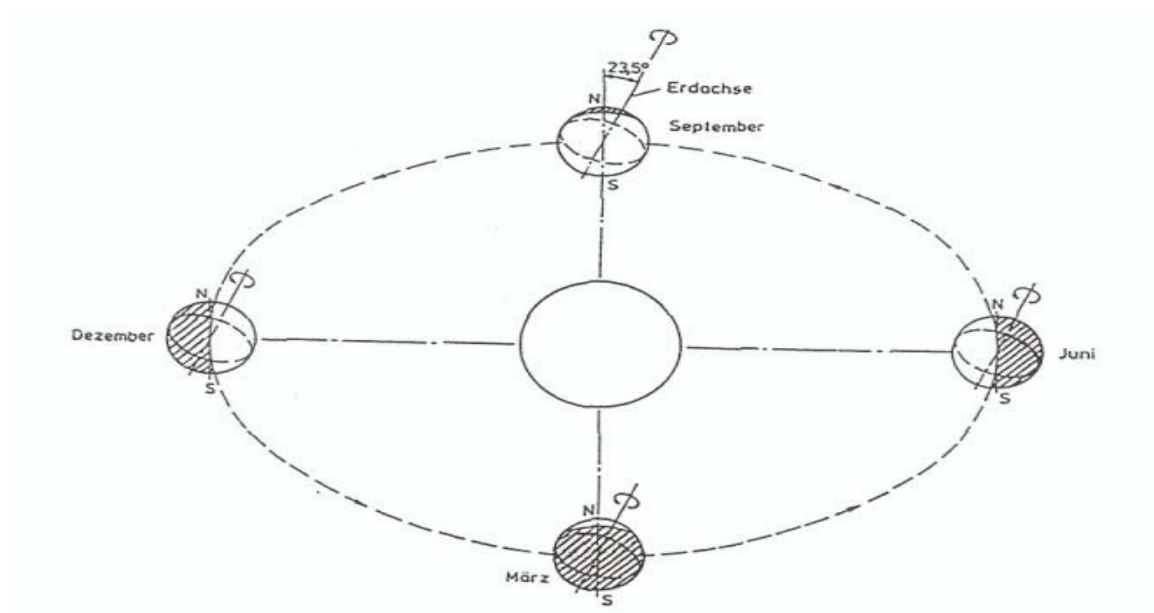
Die **mittlere Temperatur** beträgt dann 25.5 °C

Bei 25.5°C beträgt jedoch die **spezifische Enthalpie** nur 53 kJ/kg

Sonneneinstrahlung

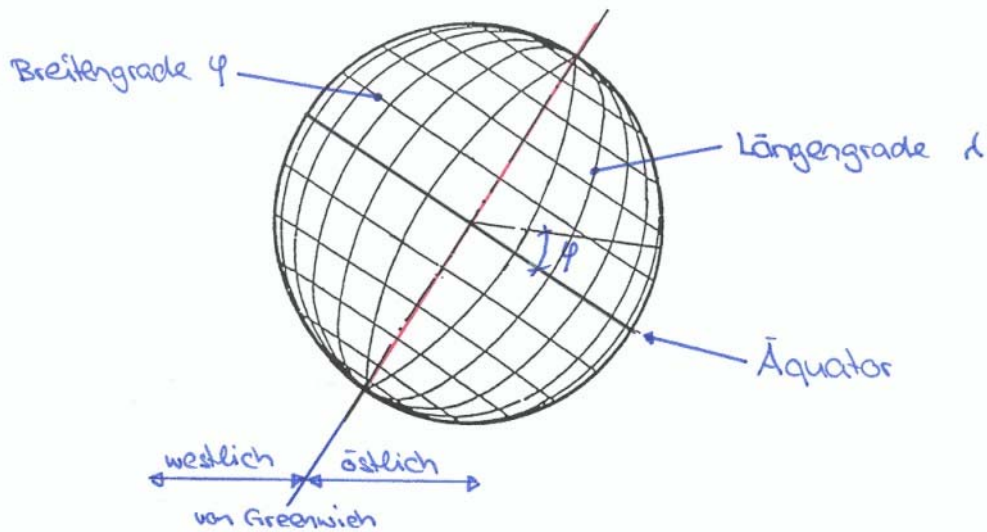


Begriffe aus der Himmelsmechanik



- Die Erde beschreibt in **ca. 365 Tagen** eine elliptische Bahn **um die Sonne**
- Die **Erdachse** ist zur **Ellipsenachse** um **23,5°** geneigt
- Die Erde dreht sich in **24 Stunden** um die eigene Achse

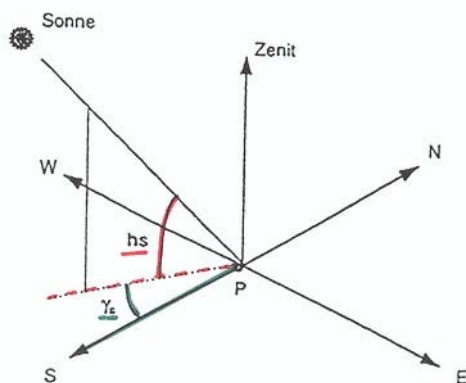
Breitengrade / Längengrade



Breitengrade φ : - Äquator ist $\varphi=0$
- nördliche und südliche Halbkugel ist jeweils in 90 Breitengrade unterteilt

Längengrade λ : - $\lambda=0$ geht durch Greenwich
(Meridiane) - gezählt wird in östliche und westlicher Richtung bis 180°

Definition der Sonnenposition



Höhen- oder Elevationswinkel h_s

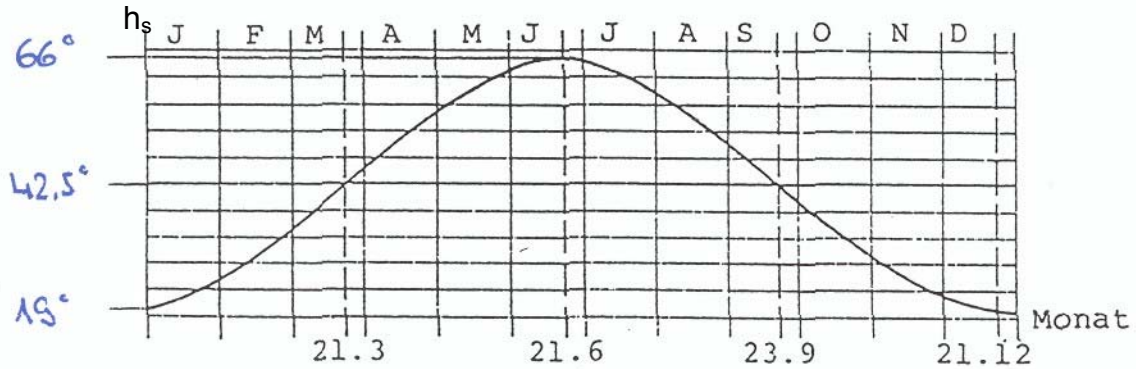
= Winkel zwischen einer horizontalen Ebene und der Verbindungslinie von der Erde zur Sonne.

FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Täglicher Höchststand:

$$h_s = 90^\circ - \varphi + \delta$$

φ = Breitengrad
 δ = Deklination



Höhenwinkel zu einer beliebigen Tageszeit

$$h_s = \arcsin(\sin \varphi * \sin \delta + \cos \varphi * \cos \delta * \cos \omega_s) \text{ [}^\circ\text{]}$$

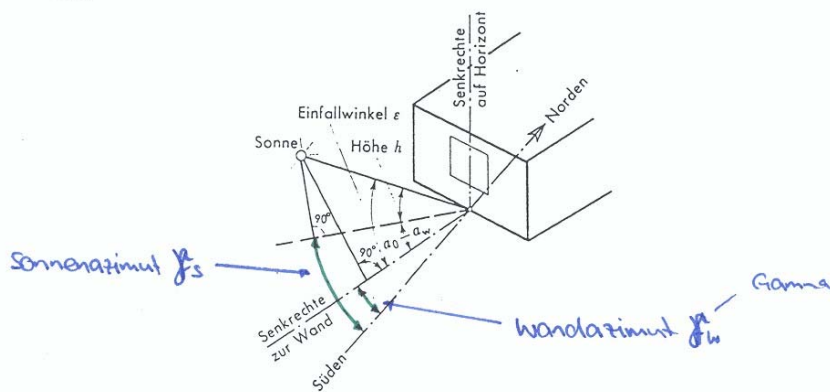
φ = Breitengrad [°]
 δ = Deklination [°]
 ω_s = wahre Sonnenzeit [°]

Sonnenazimut γ_s

= **Abweichung** der senkrecht auf die Horizontalebene projizierte **Verbindungsline** zur Sonne, von der **Südrichtung**.

$$\gamma_s = \arcsin \frac{\cos \delta * \sin \omega_s}{\cos h_s}$$

δ = Deklination
 ω_s = wahre Sonnenzeit
 h_s = Höhenwinke



FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Deklination δ

= Winkel zwischen der Äquatorebene und der Verbindungslinie von der Erd- zur Sonnenmitte.

Deklination zu einem beliebigen Tag

$$\delta = \arcsin \left[0.389 * \sin \left(360^\circ * \frac{d_y - e_q}{365.25} \right) \right]$$

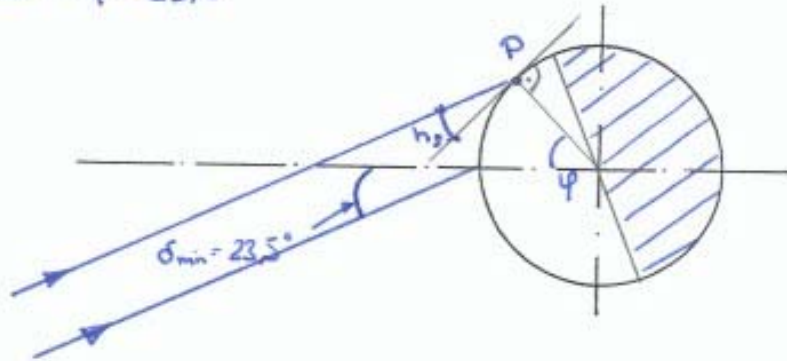
d_y = Tag des Jahres

e_q = Equinox Tagundnachtgleiche im Frühling

Werte für e_q :	Schaltjahr	79.00
	Schaltjahr +1	79.25
	Schaltjahr +2	79.50
	Schaltjahr +3	79.75

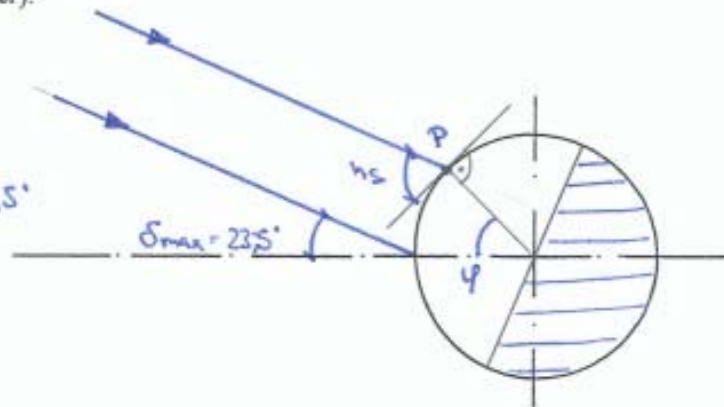
Am 21. Dezember (Winter).

$$h_s = 90^\circ - \varphi - 23,5^\circ$$



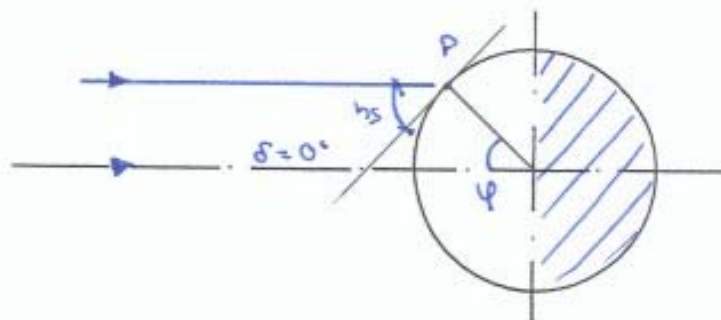
Am 21. Juni (Sommer).

$$h_s = 90^\circ - \varphi + 23,5^\circ$$



Am 21. März / 23. September (Tagundnachtgleiche).

$$h_s = 90^\circ - \varphi$$



δ = Deklination (Winkel Äquatoralebene und Verbindung Sonne Erde $-23,5^\circ < \delta < +23,5^\circ$)

FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Ortszeit und Sonnenzeit

Mittlere Sonnenstunde

= Verschiebung der Sonne in einer Stunde

$$\frac{360}{24} = 15^\circ$$

Universelle Zeit UT

UT = mittlere Sonnenzeit von Greenwich

Ortszeit

$$\text{Ortszeit} = \text{UT} \pm \frac{\text{Längengrad}}{15^\circ}$$

östliche Längengrade sind NEGATIV
westliche Längengrade sind POSITIV

Sonnenzeit

$$St = t + \Delta t_s + \Delta t_z - \frac{\lambda}{15} - UT + ET$$

t = auf der Uhr angezeigte Zeit
 Δt_s = Sommerzeit (Sommer=1h; Winter=0)
 Δt_z = Zeitzone
 λ = Längengrad (westlich: +; östlich: -)
UT = 12 h
ET = Abweichung nach der Zeitgleichung

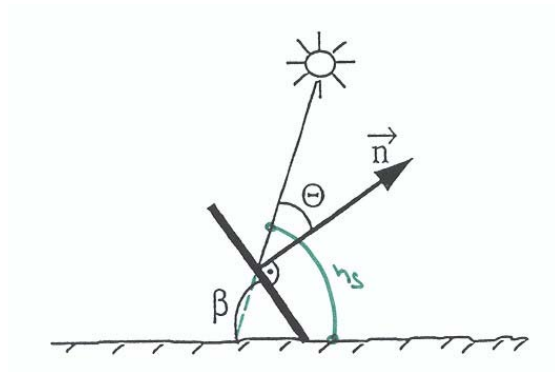
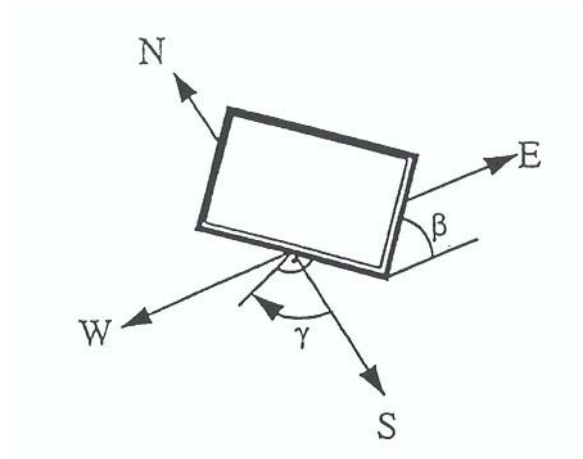
Wahre Sonnenzeit in °

$$\omega_s = (St - 12) * 15^\circ$$

St = Sonnenzeit

FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Beliebig geneigte und orientierte Flächen



Neigungswinkel β

β = Winkel zwischen der Fläche und der Horizontalen.

Für Fassaden = 90°

Azimut γ

γ = Ausrichtung im Bezug auf die Südrichtung.

Einfallswinkel Θ

Θ = Winkel zwischen der Sonnenposition und der Flächennormalen.

Bei einer Horizontalen Wand = Höhenwinkel h_s

FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Direktstrahlung

... Ist die von der Sonne **direkt eintreffende Strahlung**.
(ca. 27% der an der äusseren Grenze der Atmosphäre ankommenden Energie)

$$I^* = \frac{G_h - D_h}{\sin h_s} * \cos \Theta \quad [\text{W/m}^2]$$

G_h = Globalstrahlung horizontal

D_h = Diffusstrahlung horizontal

h_s = Höhenwinkel

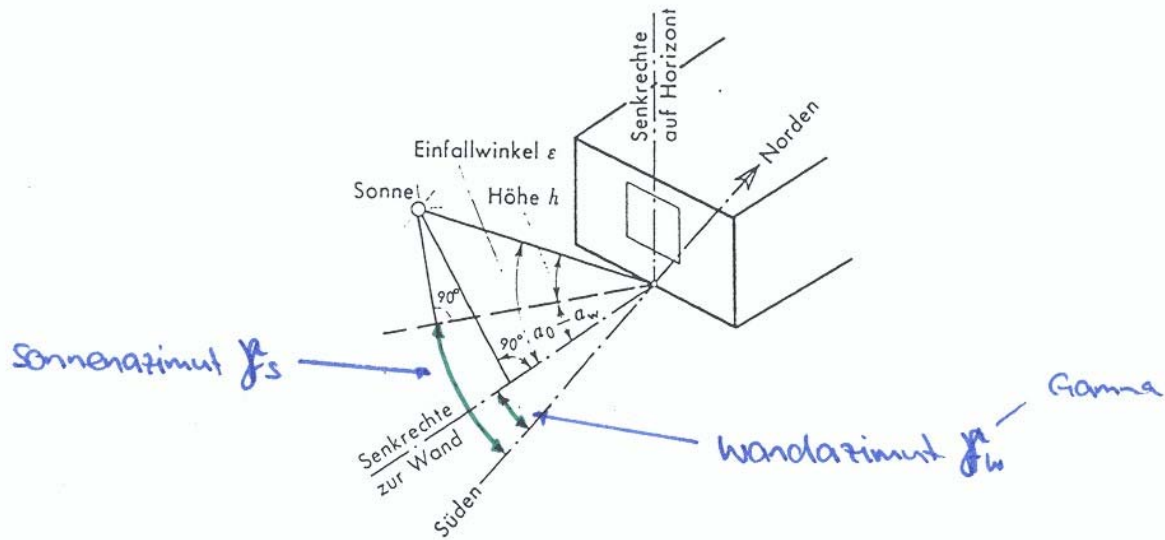
Θ = Einfallswinkel

γ_s = Sonnenazimut

γ_w = Wandazimut

$$I = I^* * \cos(\gamma_s \pm \gamma_w) \quad [\text{W/m}^2]$$

bei Südfassade: $I = I^*$



Sonnenazimut

$$\gamma_s = \arcsin \frac{\cos \delta * \sin \omega_s}{\cos h_s}$$

δ = Deklination

ω_s = wahre Sonnenzeit

h_s = Höhenwinkel

Himmelstrahlung

... Ist die in der Atmosphäre **gestreute Strahlung**. Sie trifft **aus allen Richtungen** ein.
(ca. 16% der an der äusseren Grenze der Atmosphäre ankommenden Energie)

$$D_{Him} = D_h * R_{diso} \quad [\text{W/m}^2]$$

wobei

$$R_{diso} = \frac{1 + \cos \beta}{2}$$

β = Neigungswinkel [°]

FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Totalstrahlung

= Direktstrahlung + Himmelstrahlung

...sie ist massgeblich für die Erwärmung der Erdoberfläche verantwortlich.

Reflexstrahlung

... ist die am Boden oder anderen Flächen reflektierte Strahlung.

$$D_{\text{Re.x}} = \alpha * G_h * R_{\text{riso}} \quad [\text{W/m}^2]$$

α = Albedo (Reflexvermögen der Erde)

$$R_{\text{riso}} = \frac{1 - \cos \beta}{2}$$

β = Neigungswinkel [°]

Diffusstrahlung

= Himmelstrahlung + Reflexstrahlung

$$D = D_{\text{Him}} + D_{\text{Re.x}} \quad [\text{W/m}^2]$$

Globalstrahlung

= Direktstrahlung + Diffusstrahlung

$$G = I + D_{\text{Him}} + D_{\text{Re.x}} \quad [\text{W/m}^2]$$

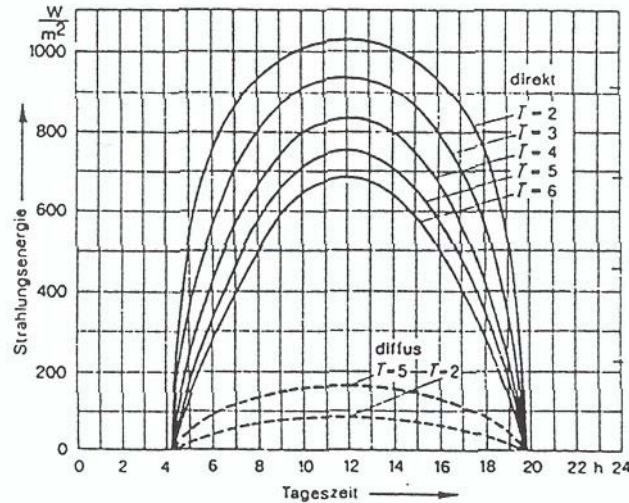
I = Direktstrahlung

D_{Him} = diffuse Himmelsstrahlung

$D_{\text{Re.x}}$ = diffuse Reflexstrahlung

Trübung

Die Trübung der Atmosphäre ist massgebend für die Intensität der Direkt- bzw. Diffusstrahlung.



Atmosphäre	Industrie	Grosstadt	Land
Maximale Trübung (Juli)	5,8	4,0	3,5
Minimale Trübung (Januar)	4,1	3,0	2,1
Jahresmittel	5,0	3,5	2,8

Windstärke

$$v = 2B - 1 \text{ [m/s]}$$

B = Wert der Beaufort Skala

Heiz- und Kühllastberechnungen

Temperaturen von unbeheizten Räumen

$$t = \frac{\sum t_i \cdot k_i \cdot A_i + t_a (\rho \cdot c_{pm} \cdot V' + \sum k_a \cdot A_a)}{\rho \cdot c_p \cdot V' + \sum k_i \cdot A_i + \sum k_a \cdot A_a} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

- t_i = Raumlufttemp. anliegender beheizter Räume [°C]
- t_a = Aussenlufttemperatur [°C]
- A_i = Wandfläche anliegender beheizter Räume [m²] (Breite x lichte Höhe)
- A_a = Aussenwandfläche [m²]
- k_i = k-Wert gegen anliegende beheizte Räume [W/m²*K]
- k_a = k- Wert Aussenwand [W/m²*K]
- ρ = Dichte der Luft [kg/m³]
- c_{pm} = mittlere spez. Wärmekapazität der Luft [J/kg*K]
- V' = Ausgetauschte Luftmenge [m³/s]

FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Raumtemperatur

$$t_R = \frac{t_i + t_{O_i}}{2} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

- t_i = Raumlufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
 t_{O_i} = mittl. Oberflächentemp der Wände [$^{\circ}\text{C}$]

Mittlere Oberflächentemperatur

$$t_{O_i} = \frac{\sum A * t_o}{\sum A} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

- A = Flächenteil [m^2]
 t_o = zugehör. Oberflächentemp. [$^{\circ}\text{C}$]

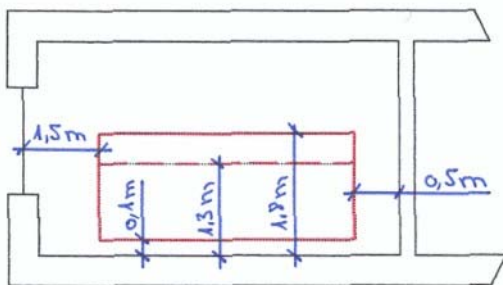
Die einzelnen Oberflächentemperaturen

$$t_o = t_i - \frac{k}{\alpha_i} (t_i - t_a) \quad [^{\circ}\text{C}]$$

- t_i = Raumlufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
 k = k-Wert der Wand [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]
 α_i = innerer Wärmeübergangskoeff [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]
 t_a = Aussenlufttemp. oder Raumlufttemp. des Nebenraumes [$^{\circ}\text{C}$]

Der Aufenthaltsbereich

(gem. SIA V 382/1)



- 1.3 m vorwiegend sitzende Tätigkeit
— 1.8 m vorwiegend stehende Tätigkeit

Berechnung der Heizlast

$$Q'_H = Q'_{Tr} + Q'_L - Q'_i \quad [\text{kW}]$$

- Q'_{Tr} = Transmissionswärme
 Q'_L = Lüftungswärme (natürl. Lüftung)
 Q'_i = Interne Wärmezufuhr (interne Kühllast)

FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Bei Raumüberdruck

$$Q'_H = Q'_{Tr} - Q'_i$$

Bei Raumunterdruck

$$Q'_H = Q'_{Tr} + \sum V'_U \cdot \rho \cdot c_{pm} \cdot \Delta t - Q'_i$$

Transmissionswärme

$$Q'_{Tr} = \sum A \cdot k \cdot \Delta t \quad [\text{kW}]$$

k-Wert

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_a} + \sum \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_i}} \quad [\text{kJ/m}^2 \cdot \text{K}]$$

Berechnung der Kühllast

Feuchtebilanz

$$m'_D = m'_L (x_2 - x_1) = m'_L \cdot \Delta x \quad [\text{kg/s}]$$

m'_L = Luftstrom (trocken) [kg/s]
 Δx = Feuchteänderung [kg/kg]

Wärmebilanz

$$Q' + m'_D \cdot h_D = m'_L (h_2 - h_1) = m'_L \cdot \Delta h$$

Q' = Wärmez- od. Abfuhr [W]
 $m'_D \cdot h_D$ = feuchte Last (= Q'_t)
 h_D = spez. Enthalpie des Wasserdampfes [J/kg]
 Δh = Enthalpiedifferenz [J/kg]

Gesamte Kühllast

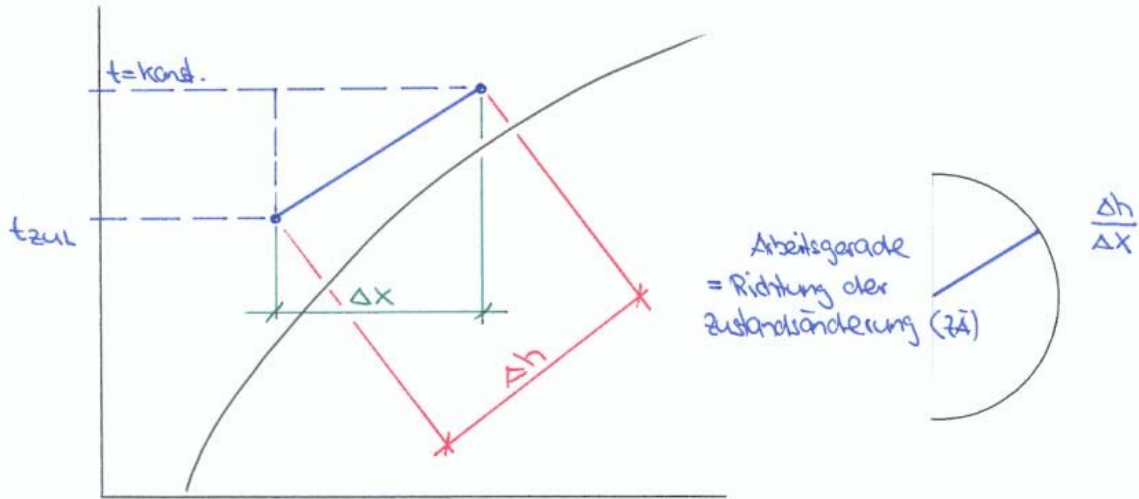
$$Q'_K = Q' + Q'_t \quad [\text{W}] \quad [\text{kW}]$$

Q' = trockene oder sensible Last
 Q'_t = feuchte oder latente Last

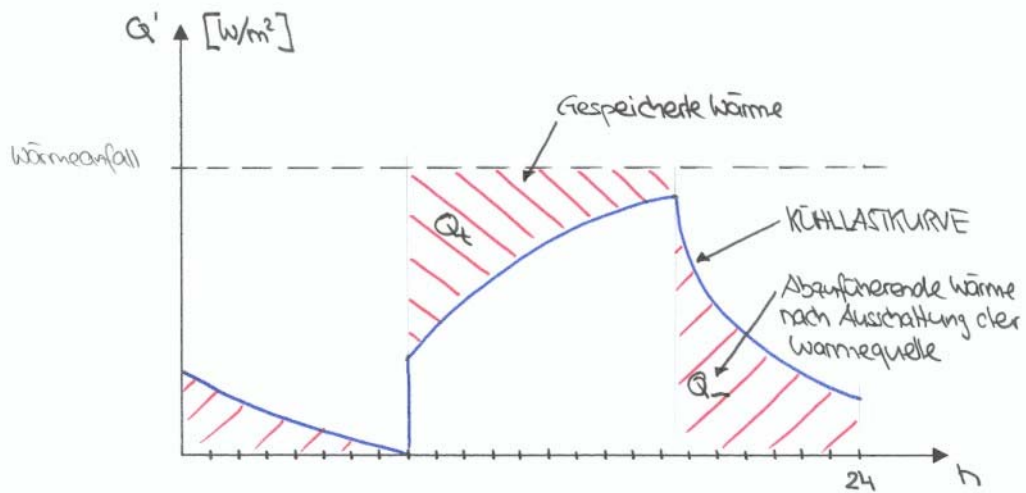
FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Randmassstab

$$\frac{\Delta h}{\Delta x} = \frac{Q' + Q'_t}{m'_D} = \frac{Q'_K}{m'_D}$$



Speicherwirksame Masse



$$Q_t = Q_u$$

$$m = \frac{\sum(A \cdot M)}{A_B} \quad [\text{kg/m}^2]$$

- A = Fläche des Bauteiles [m²]
- M = speicherwirksame Masse eines Bauteiles [kg/m²]
- A_B = Nettobodenfläche [m²]

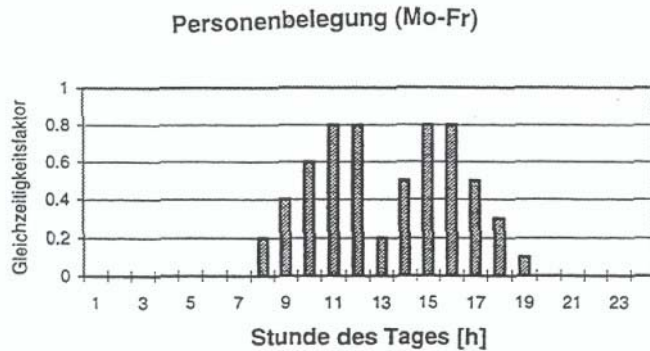
Leichte Bauweise $m \leq 300 \text{ kg/m}^2$
 Mittlere Bauweise $m = 300 \text{ bis } 400 \text{ kg/m}^2$
 Schwere Bauweise $m > 400 \text{ kg/m}^2$

Innere Lasten

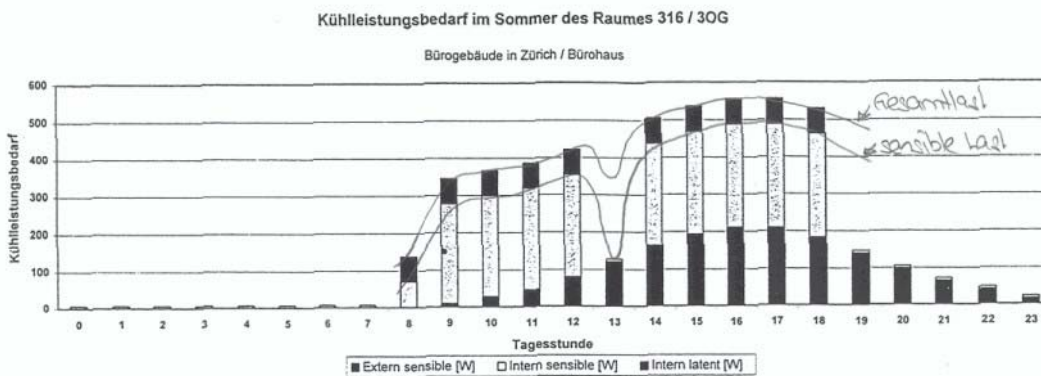
Histogramme (Tagesfahrplan)

In den Histogrammen wird die unterschiedliche Belegung/Nutzung der einzelnen Räume berücksichtigt.

Bsp:



Wenn man mit diesen Histogrammen nun die Teilkühllasten errechnet, so ergibt sich der Kühlleistungsbedarf:



Personenwärme

$$Q'_P = q' * P * g_P \quad [W]$$

q' = Wärmeabgabe pro Person [W]
 P = Anzahl Personen [-]
 g_P = Gleichzeitigkeitsfaktor

Richtwerte für den Gleichzeitigkeitsfaktor:

Büro	0.75 – 0.9
Hotel	0.4 – 0.6
Warenhäuser	0.8 – 0.9
Schulräume	0.85 – 0.95

FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

anfallende Wassermenge im Raum

$$m'_W = \frac{Q'_{Pl}}{h''}$$

- Q'_{Pl} = latente Last [kW]
 h'' = spez. Enthalpie des Wasserdampfes [kJ/kg] **2564** [kJ/kg]

Beleuchtungswärme

$$Q'_B = p_B * A_B * g_B * \mu_B * s_B \quad [W]$$

- p_B = Spez. Anschlussleistung [W/m²]
 A_B = Nettobodenfläche [m²]
 g_B = Gleichzeitigkeitsfaktor [-]
 μ_B = Raumbelastungsgrad bei Abluftleuchten gem. Tab. 6.4 [-]
 s_B = Speicherfaktor gem. Tab. 6.5a und 6.5b (aus SIA 382/2)

Wärmeanfall durch Apparate, Geräte und Maschinen

$$Q'_G = P_G * g_G \quad [W]$$

- P_G = Geräteleistung [W]
 g_G = Gleichzeitigkeitsfaktor [-]

In der SIA 382/2 sind Geräteleistungen von Bürogeräte zu finden (Tab. 6.6)

Bei Motoren

$$Q'_M = \frac{P_N * f_M * a}{\eta_M} \quad [W] \text{ od. } [kW]$$

- P_M = Nennleistung (auf Leistungsschild) [w] od. [kW]
 a = Belastungsfaktor bei Teillast
 η_M = Motorwirkungsgrad [-]

Richtwerte für den Belastungsgrad a:

Leistungsangabe in % von P_N	Belastungsfaktor a
1.0	1.0
0.75	0.76
0.5	0.57
0.25	0.41

Richtwerte für Wirkungsgrad η_M :

Nennleistung	0.2	0.5	0.8	1.1	1.5	2.2	3.0	5.5	7.5	15	kW
Wirkungsgrad	63	70	73	77	79	80	81	85	86	89	%

FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Transmission bei Innenwänden

$$Q'_{iF} = A_{iF} * k * \Delta t \quad [W]$$

A_{iF}	=	Wandfläche gem. SIA 382/2 [m ²]
k	=	Wärmedurchgangskoeff. [W/m ² K]
Δt	=	Temperaturdifferenz [K]

Offene Wasserflächen

$$m'_W = \delta * A * (x_s - x_R) \quad [kg/h]$$

δ	=	Verdunstungszahl [kg/m ² h]
A	=	Wasseroberfläche [m ²]
x_s	=	abs. Feuchte gesättigter Luft bei Wassertemp. [kg/kg]
x_R	=	abs. Feuchte der Rauml. [kg/kg]

Verdunstungszahl

$$\delta = 25 + 19 * w \quad [kg/m^2h]$$

w	=	Luftgeschwindigkeit [m/s]
-----	---	---------------------------

Zusammenhang zwischen Verdunstungszahl und Wärmeübergangszahl

$$\frac{\delta * c_{pm}}{\alpha} = 1$$

δ	=	Verdunstungszahl [kg/m ² s]
c_{pm}	=	mittl. Spez. Wärmekapazität feuchte Luft [kJ/kg*K]
α	=	Wärmeübergangsz. [kW/m ² K]

Äussere Last

Transmission durch Aussenwände nach SIA 382/2

$$Q'_{Tr} = A * k * \Delta t_{KL} \quad [W]$$

A	=	Wandfläche gem SIA 384/2
k	=	Wärmedurchgangskoeff. [W/m ² K]
Δt_{KL}	=	Kühllasttemperaturdiff. [K]

Transmission durch Aussenwände nach VDI

$$Q'_{Tr} = A * k * \Delta t_{\dot{a}q} \quad [W]$$

A	=	Wandfläche [m ²]
k	=	Wärmedurchgangskoeff. [W/m ² K]
$\Delta t_{\dot{a}q}$	=	äquivalente Temperaturdiff. [°C]

FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Äquivalente Temperaturdifferenz

$$\Delta t_{\ddot{a}q} = (t_{sm} - t_i) + f(t_s - t_{sm}) \quad [^{\circ}\text{C}]$$

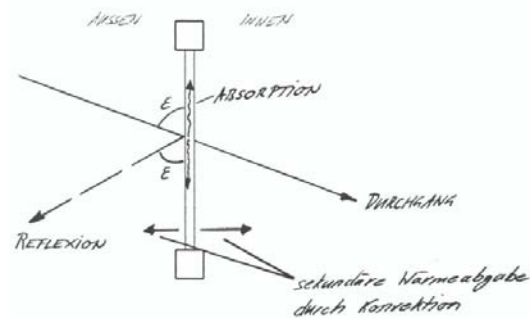
- t_{sm} = mittlere Sonnenlufttemp. [$^{\circ}\text{C}$]
 t_i = Raumlufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
 f = Abminderungsfaktor
 (Verkleinerung der Amplitude)
 t_s = Sonnenlufttemp. zur um die
 Phasenverschiebung frühere
 Zeit [$^{\circ}\text{C}$]

Sonnenlufttemperatur

$$t_s = t_a + \frac{a_0 * G}{\alpha_a} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

- t_a = Aussenlufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]
 a_0 = Absorptionskoeff. der Wand
 G = Globalstrahlung auf Wand [W/m^2]

Transmission durch Fenster



$$Q_F = A_F * k_F (t_a - t_i) \quad [\text{W}]$$

- A_F = Mauerlichtmass [m^2]
 k_F = Wärmedurchgangskoeff. [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
 t_a = Aussenlufttemp. zur
 massgebenden Stunde [$^{\circ}\text{C}$]
 t_i = Raumlufttemp. [$^{\circ}\text{C}$]

Sonneneinstrahlung durch Fenster

$$Q'_{FS} = G/D * A_F * f_r * g * s_F \quad [\text{W}]$$

- G/D = Global-od. Diffusstrahlung [W/m^2]
 A_F = Mauerlichtmass [m^2]
 f_r = Glasanteil der Fläche [-]
 g = Gesamtenergiedurchlassgrad
 für Verglasung und Sonnen-
 schutzeinrichtung [-]
 s_F = $g = \tau_e + q_i$
 Speicherfaktor

Grundlagen der Physiologie und der Hygiene

Physiologie = Lehre von den Lebensvorgängen
Hygiene = Wissenschaft von der Gesundheit

Der Wärmehaushalt des Menschen

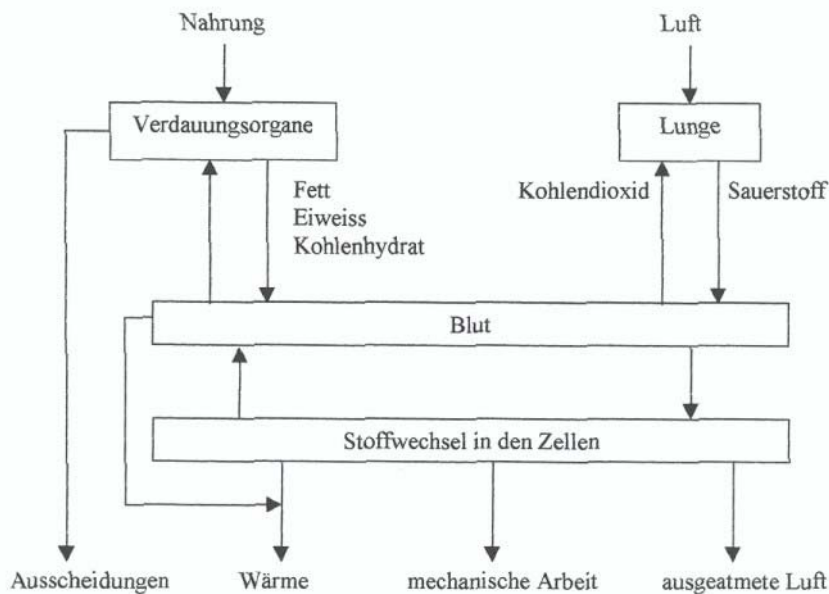
Der Energiestoffwechsel

Wichtig ist eine Aufrechterhaltung eines **Gleichgewichtes** zwischen der **inneren Wärmeproduktion eines Menschen** und der **Wärmeabgabe an die Umgebung**.

Bei Aufrechterhaltung dieses Gleichgewichtszustandes beträgt der zur Aufrechterhaltung des Lebens notwendige **Mindestenergieumsatz (Grundumsatz)**:

Liegend	≅	45 W/m ²
Sitzend	≅	60 W/m ²

Ablauf des Energiestoffwechsels:



Die Körpertemperatur

Die Körpertemperatur wird über ein körpereigenes Temperaturregelsystem konstant gehalten ($37^{\circ}\text{C} \pm 0.8^{\circ}\text{C}$). Die Temperaturfühler sind die in der Haut liegenden Nerven. Diese Fühler beeinflussen:

Innere Wärmeproduktion = chemische Temperaturregelung
Äussere Wärmeabgabe = physikalische Temperaturregelung

FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Die Wärmeabgabe vom Körper an die Umgebung erfolgt durch:

- Konvektion an die Luft
- Wärmestrahlung an die Umgebungsflächen
- Wasserverdunstung
- Atmung
- Ausscheidung, Einnahme von Speisen (sehr geringer Einfluss)

Die Wärmeproduktion

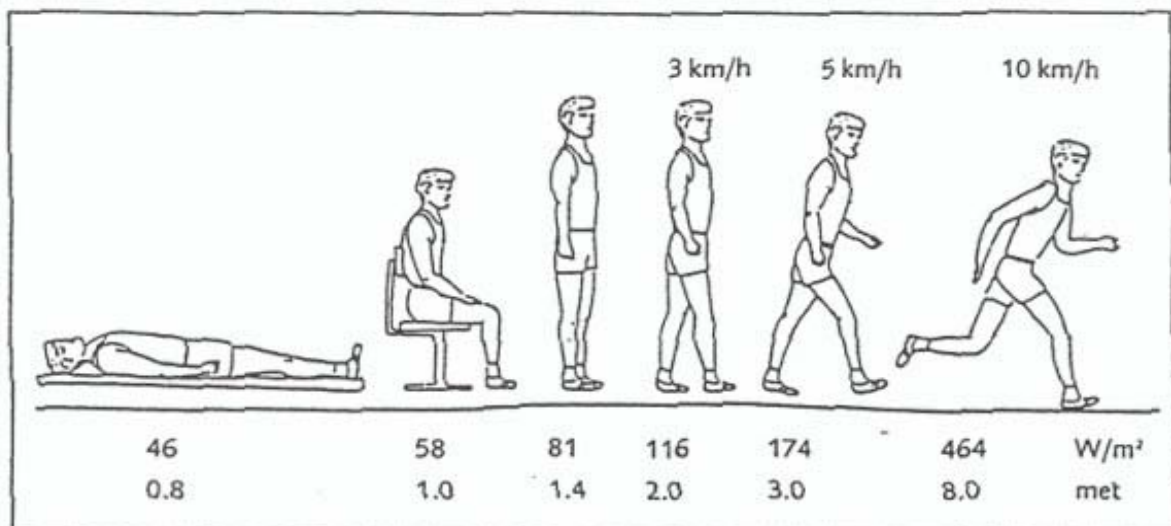
Sie ist hauptsächlich eine **Funktion der ausgeübten Tätigkeit**. Weitere Einflussfaktoren sind: Grösse, Alter, Geschlecht, Umgebungstemperatur, usw.

Durchschnittswerte für die Wärmeproduktion (gem. DIN 1946, Teil 2)

Aktivitätsgrad Nach DIN	Tätigkeit	Wärmeproduktion pro Person sensibel + latent
	Grundumsatz	79 W
I	Sitzende Tätigkeit, wie Lesen oder Schreiben	100 W
II	Leichte Arbeit, wie Maschinenschreiben, Laborarbeit usw.	150 W
III	Mässig schwere körperliche Tätigkeit	200 W
IV	Schwere körperliche Tätigkeit	>250 W

Gemäss **ISO-Norm 7730** wird die Tätigkeit durch die **Metabolic Rate (Stoffwechselrate)** ausgedrückt:

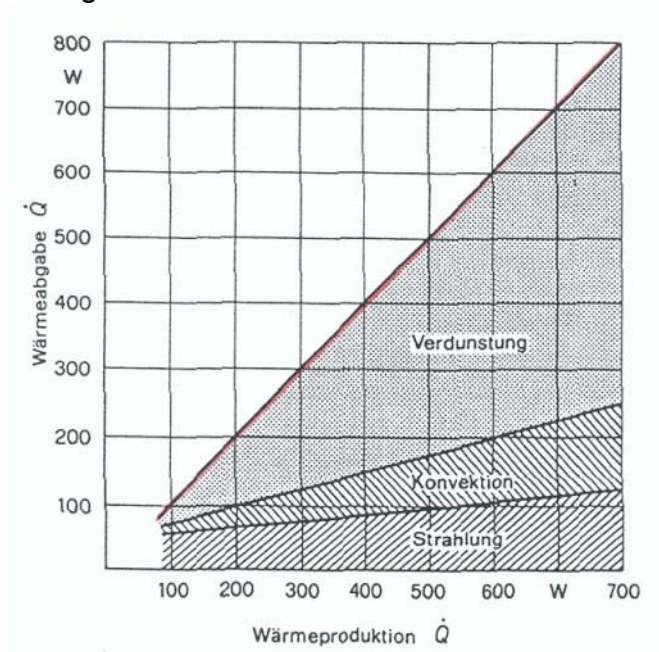
$$1 \text{ met} = 58 \text{ W/m}^2$$



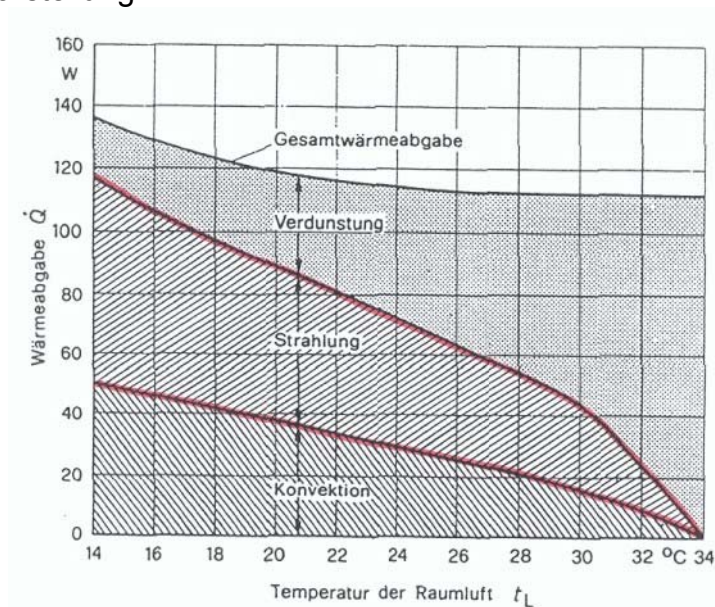
Die Wärmeabgabe

Je grösser die Wärmeproduktion ist, desto grösser muss auch die Wärmeabgabe an die Umgebung sein.

Den **Zusammenhang zwischen Wärmeproduktion und Wärmeabgabe** zeigt die nachfolgende Darstellung:



Für die Auslegung der RLT-Anlage ist es jedoch massgebend, wie **die Wärmeabgabe bezogen auf die Raumtemperatur** reagiert. Dies zeigt die nachfolgende Darstellung:



FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

clo-Wert

Einen wesentlichen Einfluss auf den Wärmeaustausch hat die Bekleidung (ebenso auf die Behaglichkeit). Man hat deshalb den thermischen Widerstand von Kleidern definiert:

$$1 \text{ clo} = 155 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Bei angepasster Kleidung ergibt dies:

Im Winter: ca. 1 clo
Im Sommer: ca. 0.5 clo

Einige Thermische Isolationswerte von Bekleidungen zeigt die nachfolgende Tabelle:

Bekleidung	clo-Wert	Wärmedurchlasswiderstand [m ² K/kW]
Nackt	0	0
Shorts	0.1	0.015
Slip, Shorts kurzärmeliges Hemd, Sandalen	0.3	0.045
Slip, leichte Hose, kurzärmeliges Hemd, leichte Socken und Schuhe	0.5	0.08
Leichte Unterwäsche, langärmeliges Baumwollhemd, Arbeitshose, Socken und Schuhe	0.7	0.11
Unterwäsche, langärmeliges Hemd, Hose, Pullover mit langen Ärmeln, Socken und Schuhe	1.0	0.16
Traditionelle mitteleuropäische Stadtbekleidung mit Anzug	1.5	0.23
Übliche Arbeitskleidung	1.5	0.23

Luftbedarf des Menschen

In der Luft beträgt die Sauerstoffkonzentration ca. 21 Vol%. Beim Durchgang durch die Lunge erfolgt eine Reduktion von ca. 21% auf 16%. Ungefähr 4 Vol% beträgt der Kohlendioxidgehalt der ausgeatmeten Luft.

Das Verhältnis Kohlendioxidabgabe zum Sauerstoffverbrauch bezeichnet man als:

RQ (Respiratorischer Quotient)

Dieser Wert ist bei einem gesunden Menschen bei ca. 0.85. Er hängt jedoch stark von der Zusammensetzung der Nahrungsmittel ab.

Aktivitätsgrad nach DIN	Atemluftvolumenstrom in m ³ /h	Kohlendioxidabgabe in l/h	Sauerstoffverbrauch in l/h
Körperliche Ruhe	0.300	12	14
I	0.375	15	18
II	0.575	23	27
III	0.750	30	35
IV	>0.750	>30	>35

FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Gerüche

Es gibt zwei Methoden zur Geruchsbestimmung:

- Die **VDI Methode** nach den Richtlinien 3881 (Olfaktometrie, Geruchsschwellenbestimmung) und 3882 (Bestimmung der Geruchsintensität). Diese Methode ist für die Geruchsbeurteilung **in Aufenthaltsräumen** in ihrer vorliegenden Form **nicht geeignet**, und wird daher vor allem bei grösseren Geruchskonzentrationen **im Freien angewendet**.
- In Räumen mit meist geringeren Geruchskonzentrationen ist die von P. Ole Fanger entwickelte **Olf-Methode** geeigneter. Bei dieser Methode beurteilen trainierte Personen die empfundene Luftqualität. Zum Training und zur Kalibrierung wird als Emissionsquelle Azeton verwendet.

Als Einheit steht:

1 olf (olfaction)

Definition:

1 olf = der Geruch eines Menschen mit den nachstehenden Eigenschaften:

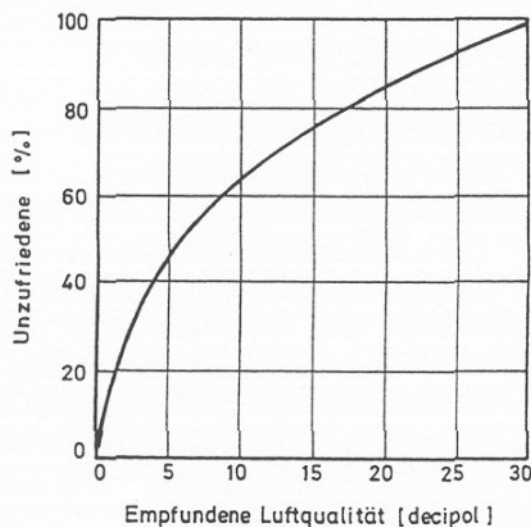
- Hautoberfläche	1.8 m ²
- Tätigkeit	1 met
- Duschen	0.7 x pro Tag
- Wäschewechsel	1 x pro Tag

Durch Versuche hat man festgestellt, dass bei einem Geruch von **1 olf** und einer Luftrate von **36 m³/h (10 l/s)** nur **15%** der Testpersonen **unzufrieden** waren.

Aufgrund dieser Werte wurde die Einheit für den **empfangenen Geruch** definiert:

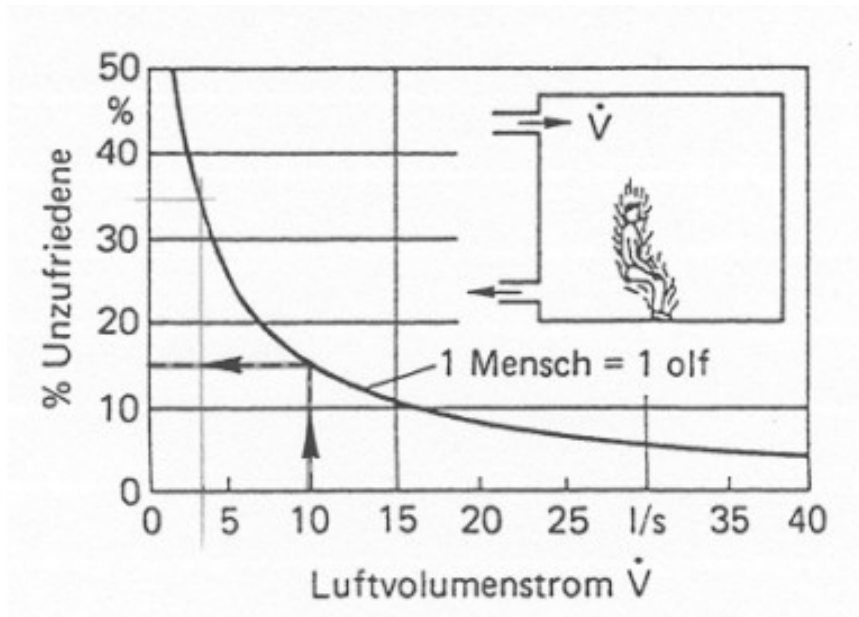
1 decipol (pollution) = 1olf pro 10 l/s

Anzahl Unzufriedene in Funktion zur empfundenen Luftqualität



FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Anzahl Unzufriedene in Funktion zum Luftvolumenstrom
(bei einem Geruch von 1olf)



Minimaler Luftbedarf nach Geruchsmassstab

Einige Werte aus dem „olf-Katalog“:

1 Person sitzend (1 met)	=	1 olf
1 Kind, 12-jährig	=	2 olf
1 Durchschnittsraucher	=	5 olf
1 Kettenraucher	=	25 olf
1 Wollteppich	=	0.2 olf / m ²
1 Kunstfaserteppich	=	0.4 olf / m ²
1 Raum + RLT Anlage	=	0.1 - 0.4 olf / m ²

Belastung der Aussenluft

Es gelten zur Zeit folgende decipol-Werte:

100 decipol	Abgase am Schornstein
10 decipol	sick building
1 decipol	gesundes Gebäude
0.1 decipol	Aussenluft einer durchschnittlichen (europäischen) Stadt
0.01 decipol	Aussenluft im Gebirge

FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Bei der Raumluft sind zusätzlich die **Anforderungen der LRV** zu beachten. Als Leitsubstanz dient das Stickstoffdioxid NO_2 .
Es gelten folgende Grenzwerte:

Immissionsgrenzwerte	Statische Definition
$30 \mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$	Jahresmittelwert (arithmetischer Mittelwert)
$100 \mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$	95% der $\frac{1}{2}$ -h-Mittelwerte eines Jahres $< 100 \mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$
$80 \mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$	24-h-Mittelwert, darf höchstens einmal pro Jahr überschritten werden

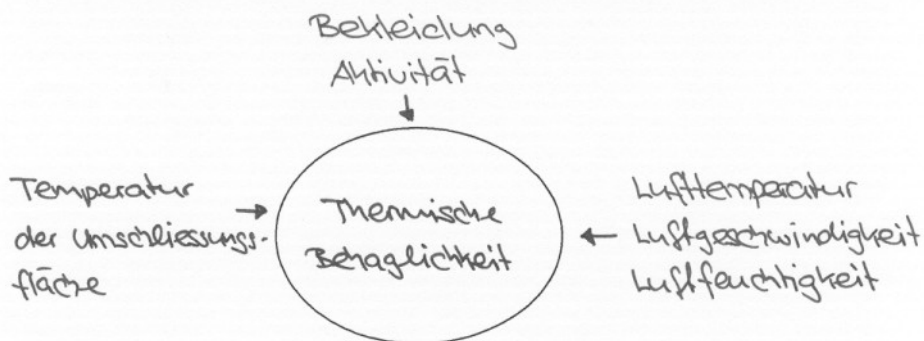
Behaglichkeit

= das **thermische Gleichgewicht** des Körpers bei **verschiedenen Umwelteinflüssen**.

Einflussbereiche sind:

- der Mensch
- der Raum
- die RLT-Anlage

Betrachtet man nur die **thermische Behaglichkeit** sind es die folgenden sechs Einflussgrößen:



Weitere Einflüsse, die das Wohlbefinden beeinflussen: (W.Frank)

Einflüsse der Menschen	Einflüsse des Raumes und der Anlage
Aktivitätsgrad	Lufttemperatur
Bekleidung	Temperatur der Umschließung
Alter	Luftgeschwindigkeit
Geschlecht	Luftfeuchte
Gesundheitszustand	Geräusche
Aufenthaltsdauer	Beleuchtung
Raumbelegung	Farbgestaltung
Akklimation	Raumgeometrie
Tagesrhythmus	Ausblick
Jahresrhythmus	Lufterneuerung
Ethnische Einflüsse	Luftqualität
Psychische Verfassung	Luftdruck
Betriebsklima	Elektrische und magnetische Felder
Adaption	Ionenkonzentration

FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Raumlufttemperatur

Die vom Menschen empfundene Temperatur entspricht nicht der gemessenen Lufttemperatur. Es wird unterschieden zwischen:

- Raumlufttemperatur
- Raumtemperatur

Raumlufttemperatur:

= mittlere Lufttemperatur gemessen mit einem strahlungsgeschützten Thermometer auf Kopfhöhe in mindestens 1m Entfernung von einer Wand oder einem Fenster.

Temperatur der Umschliessungsflächen

Umschliessungsflächen sind sämtlich Flächen, mit welchen der Mensch im Raum **im Strahlungsaustausch steht** (Wände, Fenster, Heizkörper, Möbelflächen...) Da nahezu 50% der Wärmeabgabe des Menschen durch Strahlung erfolgt, beeinflusst sie das Behaglichkeitsempfinden sehr wesentlich.

Vereinfachte Variante

Mittlere Oberflächentemperatur der Umschliessungsflächen (bezogen auf einen Punkt in Raummitte):

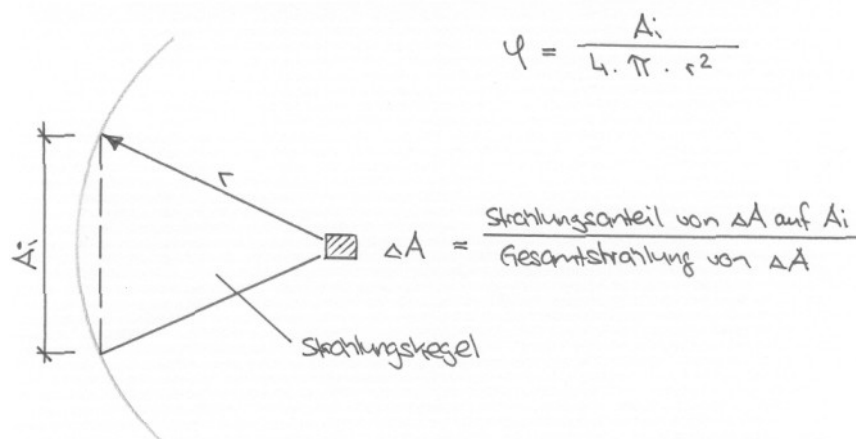
$$t_{am} = \frac{\sum (A_i * t_{ai})}{\sum A_i} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

t_{ai} = Temperatur der einzelnen

Ansichtsflächen [°C]

A_i = Einzelne Ansichtsflächen [m²]

Bei verschiedenen Abständen



$$t_{am} = \sum (\varphi_i * t_{oi}) \text{ [}^\circ\text{C]}$$

φ_i = Einzelstrahl (siehe Skizze) [-]

t_{oi} = Temp. der Ansichtsfläche [°C]

FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Raumtemperatur

= die gleichmässige Temperatur einer schwarz strahlenden Umschliessungsfläche, bei der die Wärmeabgabe durch Konvektion und Strahlung gleich ist, wie im tatsächlich vorhandenen Raum.

Sie auch bezeichnet als:

- empfundene Temperatur
- operative Temperatur (ISO 7730)

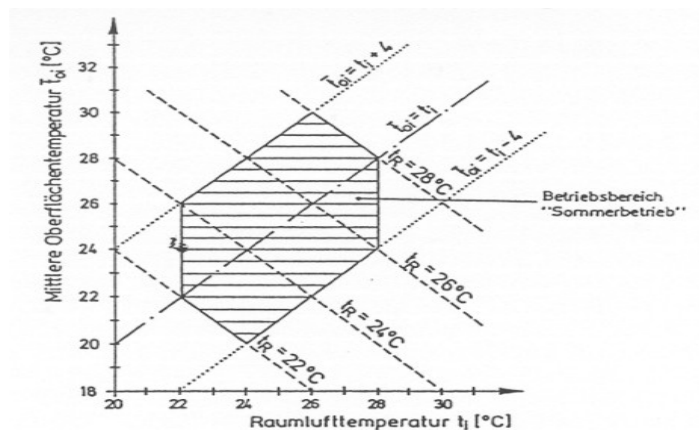
Sie kann **nicht direkt gemessen werden**.

Sie wird wie folgt berechnet (nach SIA):

$$t_e = \frac{t_R + t_{Om}}{2} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

t_R = Raumlufttemperatur [$^\circ\text{C}$]

t_{Om} = mittl. Oberflächentemperatur der Umschliessungsflächen [$^\circ\text{C}$]



Gemäss ISO-Norm 7730 wird die **operative Temperatur** (=Raumtemperatur) wie folgt berechnet. Hier wird auch die Raumluftgeschwindigkeit berücksichtigt:

$$t_e = a * t_{Om} + (1 - a) * t_R$$

für a gelten folgende Werte:

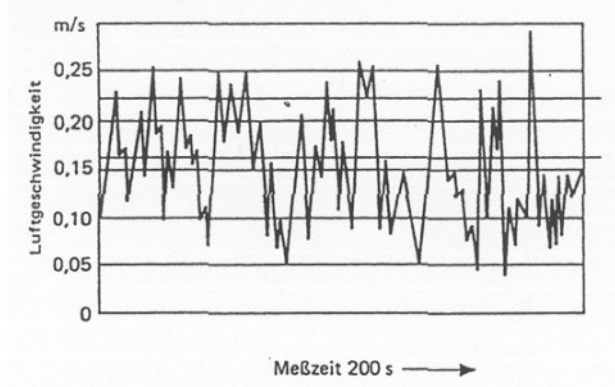
a	WR
0.5	<0.2m/s
0.6	0.2 – 0.6m/s
0.7	0.6 – 1.0m/s

FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Raumluftgeschwindigkeit

Hat die bewegte Luft in einem Raum eine geringere Temperatur als die Raumluft und trifft sie immer aus der selben Richtung auf, so spricht man von **Zugluft**.

Aufgrund des Einflusses von Temperaturunterschieden und Trägheitskräften **ändert** sich die **Luftgeschwindigkeit dauern in Richtung und Grösse**:

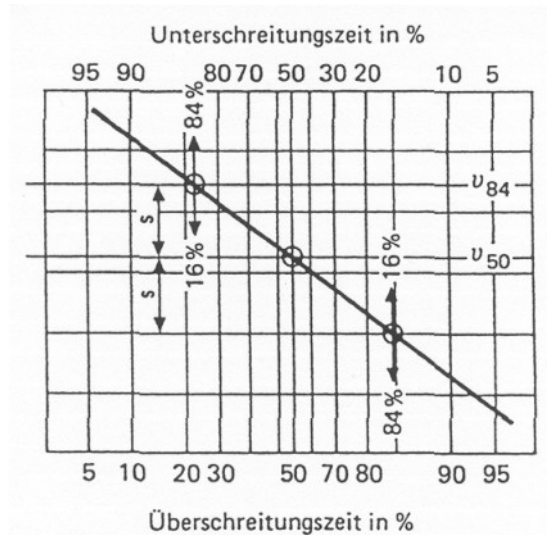


Aus einer solchen Messung werden die folgenden Werte ermittelt:

W_{50} = Mittelwert

W_{84} = Unterschreitung der Geschwindigkeit während 84% der Zeit

Diese beiden Werte erhält man auch beim Aufzeichnen der Geschwindigkeit in einem Wahrscheinlichkeitsnetz:



FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

Turbulenzgrad

Für das Behaglichkeitsgefühl ist nicht nur die Geschwindigkeit sondern auch der Turbulenzgrad massgebend:

$$Tu = \frac{w_{84} - w_{50}}{w_{50}} \quad [-]$$

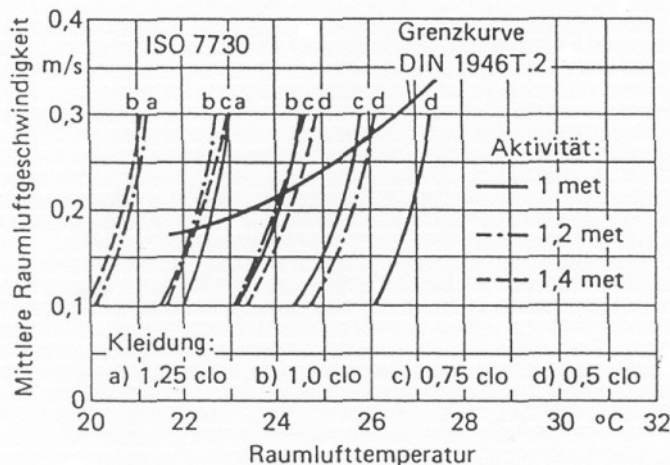
w_{50} = Mittelwert [m/s]

w_{84} = Unterschreitung der Geschwindigkeit während 84% der Zeit [m/s]

Gemäss SIA 382/1 gelten in Büros (1.2met) bei einem Turbulenzgrad von 0.3 – 0.6 folgende 50%-Zeitwerte:

Winterbetrieb (clo=1.0)	$w_{50} = 0.12$ m/s
Sommerbetrieb (clo=0.5)	$w_{50} = 0.15$ m/s

Gemäss ISO-Norm 7730 werden die Luftgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Bekleidung und der Aktivität angegeben (ohne Turbulenzgrad):



Luftfeuchte

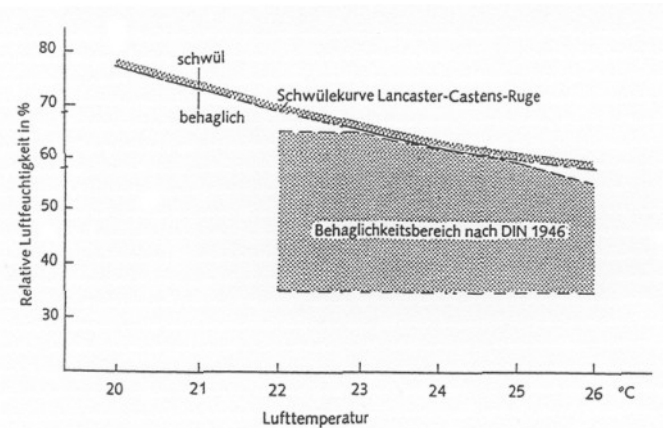
Weil die Wärmeabgabe des Menschen auch durch Verdunstung von Schweiß stattfindet, und die Stärke der Verdunstung vom Dampfdruckunterschied zwischen dem Wasser auf der Haut und dem Wasser in der Luft abhängt, ist auch die Luftfeuchte für die Behaglichkeit von Bedeutung.

Gemäss SIA 382/1 ist eine Bereich von

30% - 70% r.F.

zulässig. Dieser Wert darf gelegentlich auf 20% unterschritten und auf 80% überschritten werden.

Es ist allerdings eine **Mindestfeuchte von 35% r.F. anzustreben**, weil **darunter** eine **Austrocknung** von Teppichen, Kleidern usw. stattfindet, und sich die Teppiche **elektrisch aufladen**.



Winter: $t_R = 20 \dots 22^\circ\text{C}$ 35%...65%
 Sommer: $t_R = 26^\circ\text{C}$ max. 55%

Luftelektrizität

Mikroorganismen

Behaglichkeitsmassstäbe

Gemäss den Untersuchungen von ISO-Norm 7730 (O. Fanger) wird die Behaglichkeit nach den folgenden Einflussgrössen beurteilt:

- met-Wert
- clo-Wert
- Raumlufthtemperatur
- Mittl. Oberflächentemp. Der Umschliessungsflächen
- Raumlufthgeschwindigkeit
- Raumlufthfeuchte

Mit deren Hilfe lassen sich die folgenden Werte errechnen:

- predictet mean vote (vorhergesagtes mittleres Votum) PMV-Wert
- predictet percentage of dissatisfied (Anzahl Unzufriedene) PPD-Wert

Zusammenhang zwischen PMV- und PPD-Wert

$$PPD = 100 - 95 * e^{-\left(0.03353 * PMV^4 + 0.2179 * PMV^2\right)}$$

Einige Werte:

Subjektives Empfinden	Heiss	Warm	Leicht warm	Neutral	Leicht kühl	Kühl	Kalt
PMV-Wert	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3
PPD-Wert	90%	75%	25%	5%	25%	75%	90%

FORMELSAMMLUNG RLT-ANLAGEN

PPD-Wert mit Berücksichtigung des Turbulenzgrades

$$100PPD = (t_s - t_R) * (w - 0.05)^{0.6223} * (3.143 + 0.369 * w * 100 * Tu)$$

t_s	=	Hauttemperatur [°C]
t_R	=	Raumlufttemp. [°C]
w	=	Raumluftgeschwindigkeit [m/s]
Tu	=	Turbulenzgrad [-]

Die Hauttemperatur ist abhängig vom met- und vom clo-Wert. z.B:

1 met und 0.8 clo	=	34°C
1.2 met und 1.2 clo	=	30°C

Die nachstehende Abbildung zeigt die Anwendung dieser Formel für PPD=15%:

