

Thermischer Komfort:

Wenn „natürliche“ Kühlmaßnahmen nicht mehr ausreichen

Dipl.-Ing. Thomas Zelger

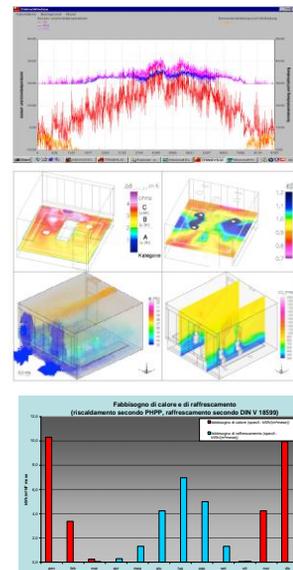
Wiener Stiftungsprofessor

für energieeffiziente und nutzerInnenfreundliche Gebäude und Quartiere

Institut für erneuerbare Energie

FH Technikum Wien

- Thermisches Komfortempfinden des Menschen - die Konstante
- Rahmenbedingungen Klima und Anforderungen Klimaschutz
- „natürliche“ Kühlmaßnahmen und deren Grenzen
- Temperieren mit erneuerbarer Energie und mit hohem Komfort



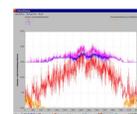
Bewertung thermischer Komfort

2 konkurrierende Konzepte:

1. ÖNORM EN ISO 7730:

Thermischer Komfort gemäß Fanger, abhängig von:

- Aktivität
- Raumlufttemperatur
- Strahlungstemperatur
- Luftgeschwindigkeit
- Relative Feuchte
- Bekleidung



2. ÖNORM EN 15251: [Nicol und Humphreys 2010]

Anpassung des menschlichen Körpers an heiße Perioden.

Als noch angenehm empfundene Temperaturen hängen vom gleitenden Mittelwert der Außenlufttemperatur ab.

Anwendbar auf Gebäude ohne aktive Kühlung.

Komfort Einflussgrößen ÖNORM EN ISO 7730

- Lufttemperatur
- Strahlungstemperatur
- Luftgeschwindigkeit
- Kleidung
- Relative Feuchte
- Aktivität
- Kleidung

PMV („Predicted Mean Vote“)

PPD ("Predicted Percentage of Dissatisfied")

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,036M} + 0,028)((M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3}(5733 - 6,99(M - W) - p_D) - 0,42((M - W) - 58,15) - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M(5867 - p_D) - 0,0014 \cdot M(34 - \theta_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl}(\theta_{cl} + 273)^4 - (\bar{\theta}_r + 273)^4) - f_{cl} \cdot \alpha_k(\theta_{cl} - \theta_a)$$

$$\theta_{cl} = 35,7 - 0,028(M - W) - f_{cl}(3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl}(\theta_{cl} + 273)^4 - (\bar{\theta}_r + 273)^4) + f_{cl} \cdot \alpha_k(\theta_{cl} - \theta_a)$$

$$\alpha_k = 2,38(\theta_{cl} - \theta_a)^{0,25} \text{ für } 2,38(\theta_{cl} - \theta_a)^{0,25} \geq 12,1 \sqrt{v_{rel}}$$

$$\alpha_k = 12,1 \sqrt{v_{rel}} \text{ für } 2,38(\theta_{cl} - \theta_a)^{0,25} < 12,1 \sqrt{v_{rel}}$$

$$f_{cl} = 1,00 + 1,290 I_{cl} \text{ für } I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2\text{K/W}$$

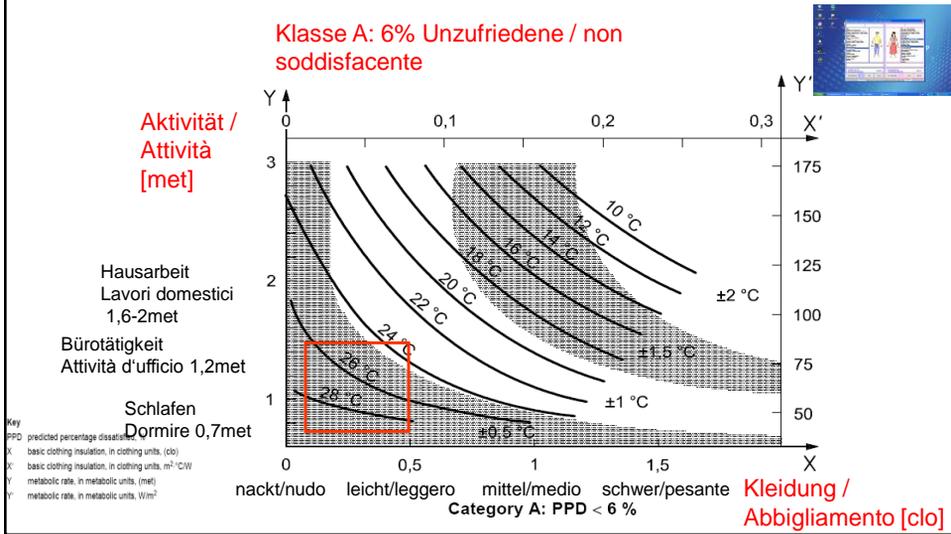
$$f_{cl} = 1,05 + 0,643 I_{cl} \text{ für } I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Einfluss von lokalem Diskomfort

- Strahlungsasymmetrie
- Vertikaler Temperaturgradient
- Kalter oder warmer Fußboden
- Turbulenzgrad der Luft

Empfindung	PMV	PPD
Sehr kalt	-3	99,1
kalt	-2	76,8
Wenig kalt	-1	26,1
neutral	0	5,0
Wenig warm	+1	26,1
warm	+2	76,8
Sehr warm	+3	99,1

Thermischer Komfort gemäß ÖNORM EN ISO 7730 **Klasse A**



Adaption des menschlichen Körpers ÖNORM EN 15251

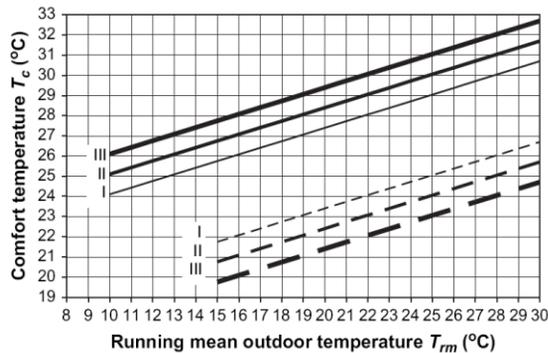
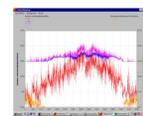
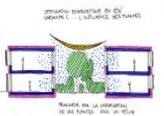
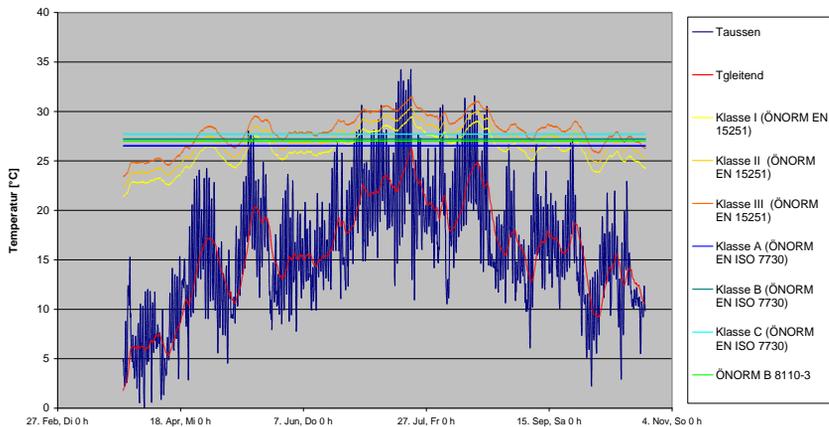


Fig. 1. Design values for the upper (continuous lines) and lower (dashed lines) limits for operative temperature in buildings without mechanical cooling systems (free-running) for the different categories of building as a function of the exponentially-weighted running mean of the external temperature (after EN 15251)

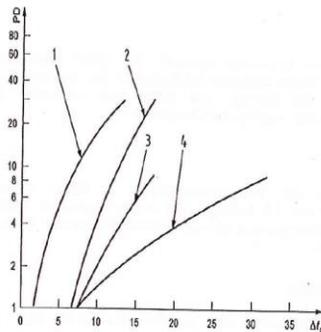


Grenzwerte Behaglichkeit Sommer

Zulässige empfundene Raumtemperaturen gemäß ÖNORM EN 15251 (Entwurf von Gebäuden ohne maschinelle Kühlanlagen), ÖNORM EN ISO 7730 (Büroaktivität, sehr leichte Kleidung 0.25 clo, Feuchte 55%, Luftgeschwindigkeit 0m/s), ÖNORM B 8110-3 ("eingeschwungen")



Grenzen Flächensysteme ÖNORM EN ISO 7730



Legende

- PD Prozentsatz an Unzufriedenen, %
 Δt_{pr} asymmetrische Strahlungstemperatur, °C
 1 warme Decke
 2 kühle Wand
 3 kühle Decke
 4 warme Wand

ÖNORM EN ISO 7730

- Heizdecken sollten nur bis zu einer Strahlungsasymmetrie von ca. 5 K (5% PPD) betrieben werden
- Unproblematisch sind Wandheizung oder Deckenkühlungen
- Die Strahlungsasymmetrie wird je nach Personensetting (sitzend, stehend) z.B. bei aktivierter Decke in einer waagrechten Fläche in 0,6, bzw. 1m Höhe berechnet, bzw. gemessen.
- Hinweis: In der Forschung z.T. umstritten zu Heizdecke, siehe Glück 1994

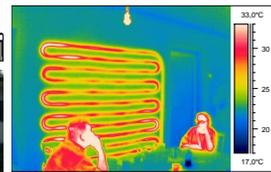
Regulierung des thermischen Komforts durch:

0. Aktivität



1. Kleidung

2. Bauweise Gebäude („Hülle“)

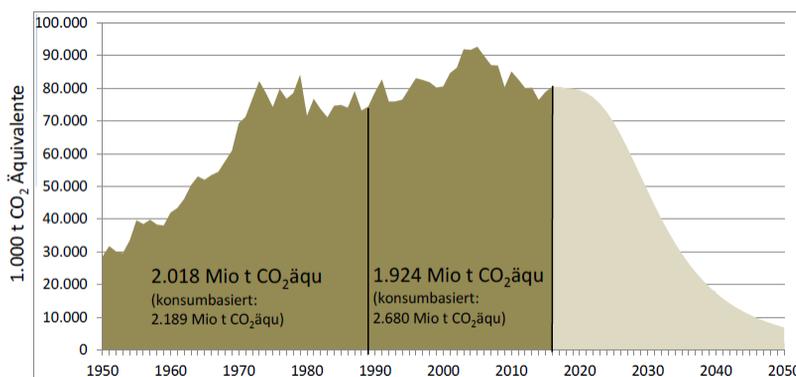


3. Gebäudetechnik

[Waltjen et al: Heizung im urbanen Raum, 2003]

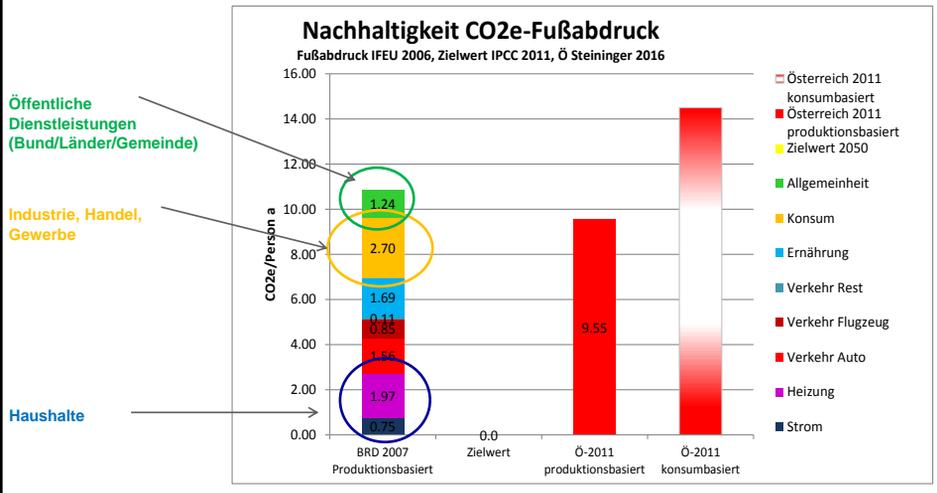
Ziel – und Grenzwerte

- Völkerrechtlicher Vertrag: Globale Erwärmung laut Klimakonferenz Paris 2015 auf 1,5, maximal jedoch 2 K im Vergleich zu vorindustrieller Zeit begrenzt werden, d.h. **bis 2050 muss global in etwa CO₂-Neutralität** erreicht werden. **Bis 2050 kann jede Person noch ca. 110 t CO₂equiv ausstoßen** („Selbstverbrennung“, [Schellnhuber 2015]), bzw. Treibhausbudget Österreich laut Abbildung [Meyer, Steinger 2017].



Gebäudeeffizienz - Carbon-Footprint

Zusammenhang persönlicher Fußabdruck und Energieeffizienz Gebäude anhand CO₂e



Hitzeperioden werden häufiger Und extremer

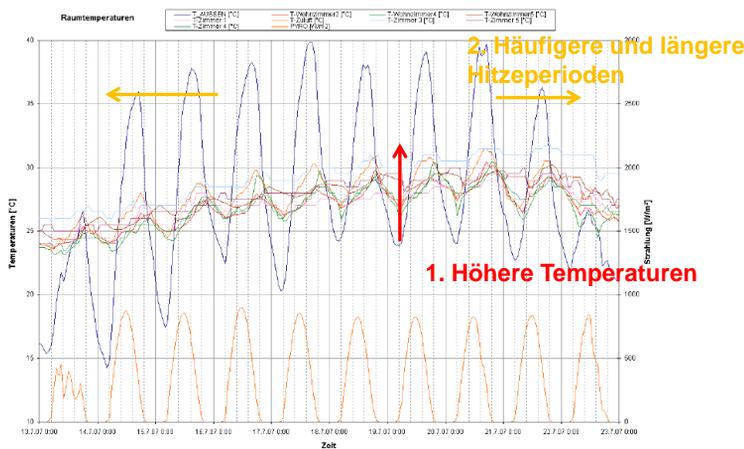
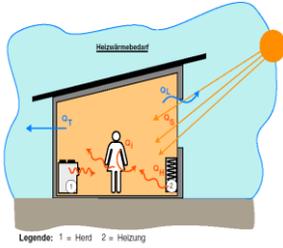


Abbildung 22: Temperaturverläufe im Wohnraum und im Zimmer in der absolut heißesten Woche der letzten Jahrzehnte

Hitzeperiode Wien 1210, Sommer 2007, Mühlweg, Messung AEE

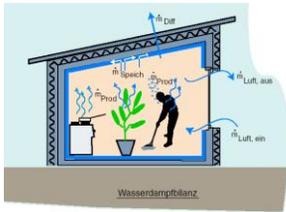
Bauphysikalischer Hintergrund



$C \cdot d_{\text{Raumtemp}}/d_t = Q_T + Q_V + Q_S + Q_I + Q_c + Q_h$
 d_{Raumtemp}/d_t : Änderung Raumtemperatur
 C : Speicherkapazität Luft und Einrichtung
 Q_T : Transmissionswärmeverluste
 Q_V : Lüftungswärmeverluste
 Q_S : Solare Gewinne
 Q_I : Innere Gewinne
 Q_h : Heizleistung
 Q_c : Kühlleistung

Wesentliche Kenngrößen Komfort:

- Raumluft- und Oberflächentemperaturen
- Relative bzw. absolute Feuchte
- Luftgeschwindigkeit



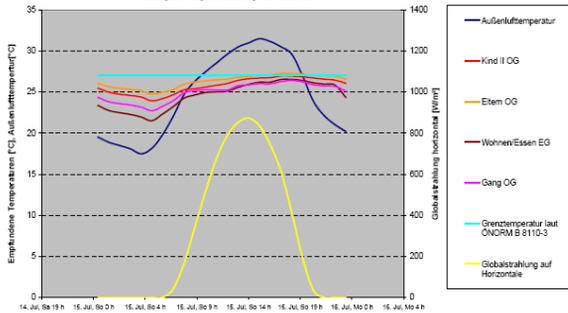
Maßnahmen zur Erhöhung Sommerkomfort:

- Solare und Innere Lasten reduzieren
- Transmissionswärmeverluste und Lüftungswärmeverluste erhöhen, wenn Außenlufttemperatur unter Raumtemperatur („natürliche Kühlung“)
- Zum „Ausweichen“ vor hohen Außentemperaturen Einsatz von Speichermasse zum „Verschieben“ der natürlichen Kühlung (z.B. Nachtlüftung)

Beispiel aktueller Nachweis gemäß ÖNORM B 8110-3



Sommertauglichkeit in Anlehnung an ÖNORM EN ISO 13791, Velux Demogebäude, Vart
 Bewertung nach Modell Güteklassen gemäß (Kree 2009), Güteklasse A
 Klima: Eingeschwungener Zustand gemäß ÖNORM B 8110-3



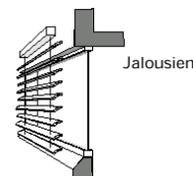
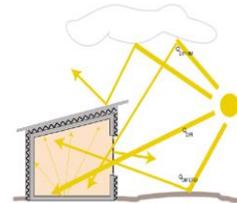
- Vereinfachter Nachweis mit Speichermassen nur mehr für Wohngebäude zulässig
- Beispiel Velux Demogebäude Güteklasse A fast für alle Räume erreichbar (Außenlufttemperatur ist um 1,5°C wärmer als für Gebäudeklasse B)

Empfundene Temperatur	Außenlufttemperatur	Kind II OG	Eltern OG	Wohnen/Essen EG
Durchschnitt	24.5	25.8	26.3	24.6
Maximum	31.5	27.0	27.3	26.6
Grenzwert		<= 27°C	>= 27°C	<= 27°C
Minimum	17.5	23.9	24.8	21.5

Nachweis gemäß ÖNORM B 8110-3		
gültige Fassung März 2010		
Bezeichnung Räume	Ist-Wert:	Soll-Wert
	$m_{W,I, vorh}$	$m_{W,I, erf}$
	[kg/m³]	[kg/m³]
Kind II	10467	2000
Eltern	6995	2000
Essen/Kochen EG	9903	2000
Freizeit	7369	2000

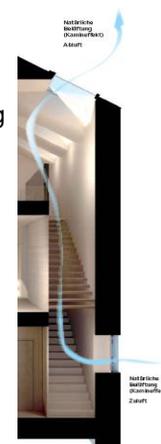
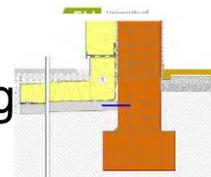
Optimierung: Minimierung solare und innere Gewinne

- Hochwertiger außenliegender Sonnenschutz der Fenster
- Laubbäume für Ost- und Westverglasungen günstig
- Fixverschattung im Süden sehr wirksam (Balkone, auch in der Sanierung)
- Hoher Wärmeschutz schützt solar stark belastete Bauteile sehr gut vor Sonneneintrag (Flachdächer, Dachschrägen nach Süden)
- Gut dimensionierte Hinterlüftung in warmen Klimaten an exponierten Flächen sinnvoll
- Effiziente Haushaltsgeräte
- Effiziente bedarfsgerechte Beleuchtung, Förderung Tageslichtnutzung (in Sanierung schwierig)
- Effiziente Arbeitshilfen (Computer, Drucker etc.)
- Hochwertige Dämmung von Warmwasserleitungen etc.

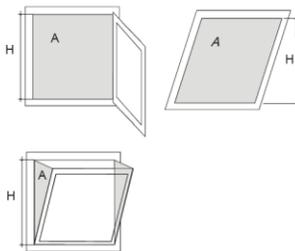


Optimierung: Maximierung „Natürliche oder sanfte“ Kühlung

- Wenn Außentemperatur kühler als Innentemperatur, dann Fenster möglichst weit öffnen
- In warmen Klimata Erdgeschoßräume thermisch an Erdreich oder Keller an koppeln, Schirmdämmung ausführen, um Bodenplatte/Erdreich möglichst an Erdreich anzukoppeln
- Aktivierung von Speichermassen, um Wirkung von Nachtkühlung auf möglichst langen Zeitraum wirken zu lassen. In Sanierung Rückbau von abgehängten Decken oder Vorsatzschalen, akustische Ausstattung auf Speichermassen Wirkung anpassen.
- Nutzung von Phasenumwandlungsspeichern (PCM)
- Eventuell Wärmeabfuhr über statische Kühlflächen (Fußboden, Wand, Decke), Entwärmung über Grundwasser oder Erdreich (z.B. Tiefenbohrung) „direct cooling“
- Schaffung lokaler Luftbewegung
- Pflanzen im Außenraum führen zu stärkerer Abkühlung (Verdunstungskühlung). Im Innenraum nicht sinnvoll, da das Schwülerisiko erhöht.



Fensterlüftung

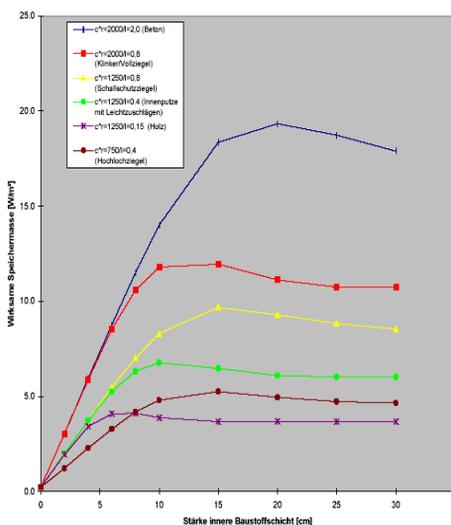


- Schlagregenschutz beachten, vor allem bei Nichtwohngebäuden
- Einbruchschutz beachten
- Querlüftungsmöglichkeiten, noch besser über mehrere Stockwerke (in Sanierung nur eingeschränkt realisierbar)

Maßnahmen:

- Große Lüftungsflächen (Kippen vor allem in warmen Perioden meist nicht ausreichend)
- Hohe Lüftungs/Fensterflügel, um thermischen Effekt bei einseitiger Lüftung möglichst effizient zu nutzen
- Lamellen fix oder variabel für Einbruch- und Schlagregenschutz
- Fixierung der Fenster vorsehen (z.B. 2 Stellungen)
- Information der NutzerInnen essentiell!

Parameter Speichermasse



Wirksame Speichermasse

Gipskartonplatte 12,5mm, MF	14.9	kJ/m²K
2-lagig Gipskartonplatten 25mm	25.4	kJ/m²K
1,5cm Lehmputz auf Schalung	68.5	kJ/m²K
Ziegelwand verputzt	91	kJ/m²K
Lehmvollziegelwand 12cm verputzt	130	kJ/m²K
Stahlbeton verputzt	200	kJ/m²K

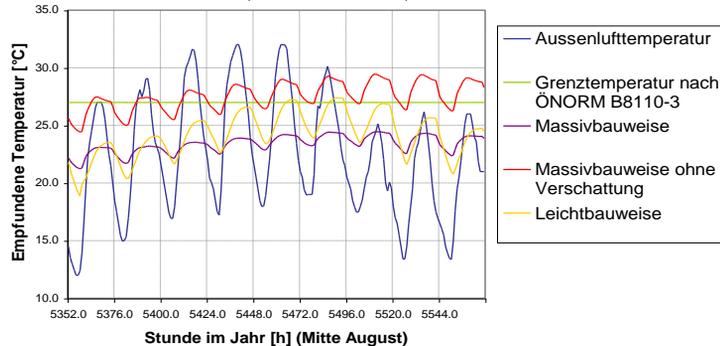
- Keine abgehängten Decken oder Vorsatzschalen, Teppiche, bzw. diese entfernen, wenn bauphysikalisch und bautechnisch möglich und dahinter Speichermasse vorhanden (Vollziegelwand, Betonwand etc.)
- Einsatz von gut speicherfähigen Platten im Innenraum (starke Lehmputze, Lehmplatten)
- Einsatz von PCM-Materialien

Sommerliche Überwärmung

Überwärmung unterschiedliche Bauweisen (heiße Periode, Wien)

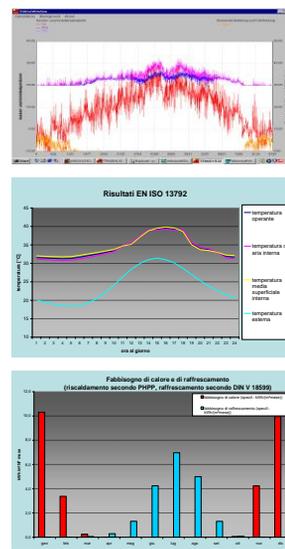
Dynamische Simulation Trnsys

Zimmer 4*4*2.5m, Fenster 30% südorientiert, aussenliegende Verschattung, nächtlicher Luftwechsel 4-fach, 1/2 Person anwesend, 2.1W/m² Licht/Geräte

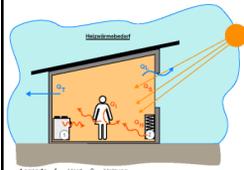


Grenzen „natürliche“ Kühlung

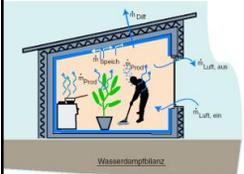
- Fensteröffnung nicht möglich z.B. durch Außenlärm, Sicherheit (vor allem Nichtwohngebäude)
- Hohe innere Abwärmen (z.B. Büro, Geschäfte, Schulen)
- Klimawandel: Außenlufttemperaturen in der Nacht sinken vor allem in hochverdichteten Stadtquartieren über längere Perioden nicht mehr wesentlich unter 25°C, dadurch geringe Wirksamkeit verstärkter Nachtluftwechsel



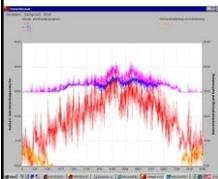
„Free floating“ – „Aktiv Konditioniert“ –oder „Hybrid: Weder/Noch --- Sowohl/als auch“



Legende: 1 = Hand 2 = Heizung



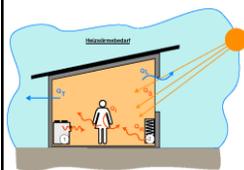
Wasserdampfpflanz



1. „Free Floating“ – „Frei schwingend“: Das Gebäude wird weder aktiv beheizt/befeuchtet noch gekühlt/entfeuchtet. Raum-temperaturen und –feuchten ergeben sich aus „natürlichen“ Wärmeflüssen und Speichermassen
2. „Aktiv Konditioniert“: Maximale und minimale Raumtemperaturen und –feuchten werden vorgegeben und aktive Heiz/Befeuchtungs- und Kühl/Entfeuchtungssysteme entsprechend Sollwerten dimensioniert
3. „Hybrid“-System: Aktive Heiz/Befeuchtungs- und Kühl/Entfeuchtungssysteme sind vorhanden, können allerdings Sollwerte nicht einhalten (z.B. Zuluftkonditionierung ohne Sollwert-Dimensionierung)

Hinweis: In Wohngebäuden Mitteleuropas ist im Winter eine Beheizung, im Sommer „Free Floating“ die Regel

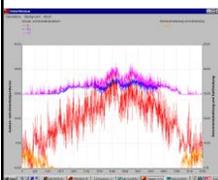
Voraussetzungen für eine klimaangepasste aktive Kühlung



Legende: 1 = Hand 2 = Heizung



Wasserdampfpflanz



1. „Natürliche“ Kühlmaßnahmen werden soweit möglich jedenfalls gesetzt
2. Der Kühlbedarf (Nutzenergie, d.h. Wärme, die dem Raum entzogen werden muss) sollte durch obige Maßnahmen jedenfalls unter dem Passivhausgrenzwert von $15 \text{ kWh/m}^2_{\text{NF a}}$ liegen. Für Wohngebäude kein Problem, für Büros etc. nur mit hocheffizienter Beleuchtung und Arbeitshilfen etc. erreichbar.
3. Ein niedriger Kühlbedarf geht meist mit niedrigen Kühlleistungen einher, d.h. es ist meist möglich, mit Flächenkühlungen zu arbeiten, bzw. bei konvektiven Systemen mit geringeren Luftvolumenströmen, damit leichter hoher Komfort erreichbar
4. Kühlung dann in Betrieb nehmen, wenn erneuerbare Energie verfügbar, z.B. Solarstrom

Wärmesenken erneuerbar I



- **Direct cooling (Nutzung Umwelt“Kälte“) ohne Kältemaschine:**
Kühle Außenluft über Lüftungsanlage (TSPF (Total Seasonal Performance Factor: Kältenergie/elektrische Energie inkl. Hilfsantriebe etc.) > 10) oder indirekt über Rückkühler/Flächenkühlung (TSPF > 20) bei effizienter Auslegung. Alternativ über Grundwasser oder Erdreich (TSPF > 20). Achtung keine Entfeuchtung möglich
- **Abkälte** aus Gewerbe- oder Industrieprozessen, je nach Temperaturniveau direkt oder mit Wärmepumpe
- **Kompressionskälte:** Klassische Kälteerzeugung mit hocheffizienten Geräten, hohe Vorlauftemperaturen (Flächenkühlung) und niedrige Temperaturen Wärmesenken erhöhen Effizienz je nach Typ deutlich über 5. Arbeitsmittel mit geringem CO₂equiv
- Übertrag Raumwärme **Erdreich** mittels Tiefensonden, Graben- oder Flächenkollektoren, Kompressionskältemaschine für Kühlung und Entfeuchtung (TSPF ca. 5 bis >10)
- Übertrag Raumwärme **Grundwasser** über Saug- und Schluckbrunnen, Kompressionskältemaschine für Kühlung und Entfeuchtung (TSPF ca. 4 bis >8)
- Übertrag Raumwärme **Außenluft** über Rückkühler, Kompressionskältemaschine für Kühlung und Entfeuchtung (TSPF ca. 3 bis >6)
- **Adiabate Kühlung** bei vorhandener Lüftung mit WRG (einspritzen Wasser in Abluft)

Achtung: Erdreich/Grundwasser müssen saisonal regeneriert werden

Wärmesenken erneuerbar II



Erneuerbar teilweise am Grundstück oder in unmittelbarer Nachbarschaft:

- **Stromversorgung für Kältemaschinen aus Sonnen-, Wind-, Wasserkraft etc.:** Photovoltaik 1000kWh/kWp, 5-7m²/kWp, da Hitzeperioden meist mit hoher Sonneneinstrahlung gekoppelt ist, kann der lokal produzierte Sonnenstrom direkt genutzt werden. Alternativ Kleinwindkraft (400 bis 1000 Volllaststunden)
- **Absorptionswärmepumpen direkt (DEC-Anlagen) oder indirekt mit erneuerbaren Energiequellen (Temperaturen >70°C), z.B. Sonnenenergie über Solarthermie:** Flachkollektoren, Vakuumröhrenkollektoren, Hybride Paneele ... (ca. 250 bis 600 kWh/m² Wärme Kollektorfläche), **Abwärme** aus Gewerbe- oder Industrieprozess oder Stromproduktion, **Fernwärme** (JAZ ca. 0,6 thermisch, sehr geringer Strombedarf)
- Für **Entfeuchtung der Zuluft** oder der Raumluft sind Vorlauftemperaturen von 6°C erforderlich, zudem meistens eine Nachheizung bei höheren Komfortbedingungen. Diese kann entweder über einen Doppelrotationswärmetauscher passiv erfolgen oder mit Solarenergie etc. erneuerbar

Stromzukunft 2030

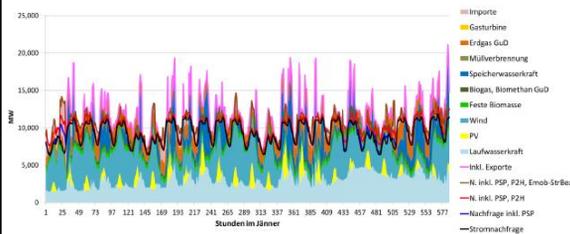


Abbildung 23: Stromerzeugung in Österreich im Jänner für das Szenario RES 2030. (Quelle: HIREPS)

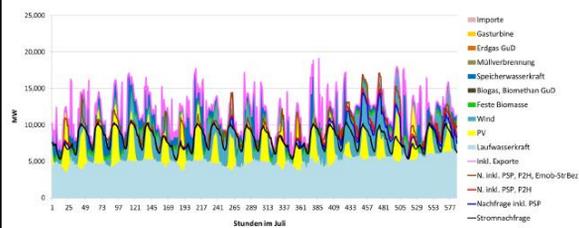


Abbildung 24: Stromerzeugung in Österreich im Juli für das Szenario RES 2030. (Quelle: HIREPS)

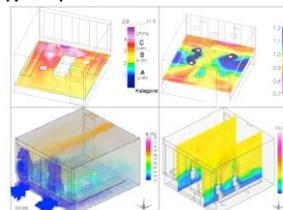
Lettnner et al 2017

- Aufnahme von Überschussstrom vor allem aus Wind- und Solarkraft (lokal und überregional)
- Niedertemperaturabgabesysteme (Betonkernaktivierung, Fußbodenheizung/kühlung, PCM-Heiz/Kühldecken)
- Wirksame Speichermasse in Gebäuden wichtig, gut zugänglich
- Speicher thermisch und elektrisch lokal

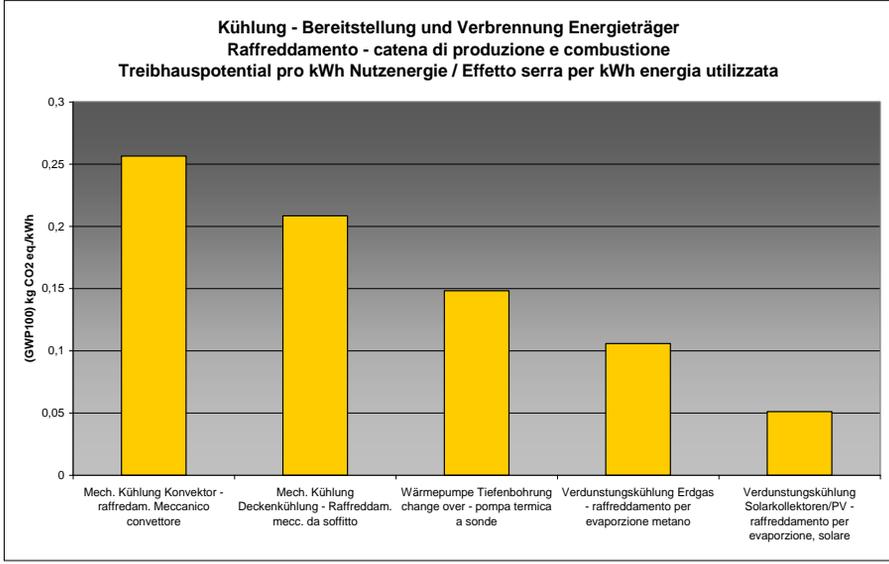
Wärmeentzug Raum

Erneuerbar teilweise am Grundstück oder in unmittelbarer Nachbarschaft:

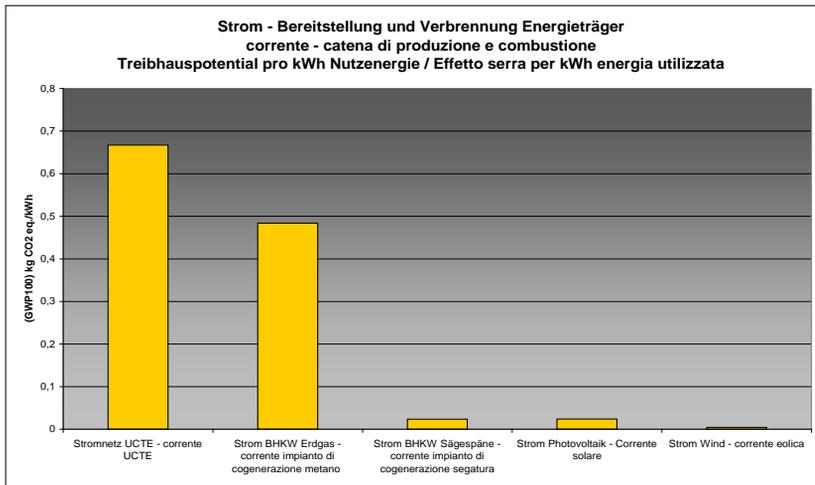
- Deckenkühlung durch Bauteilaktivierung in Stahlbetondecke oder Aufputz, alternativ Kühlsegel, bzw. in Bauplatten eingelegt
- Kühlung der Wände („Wandheizung“)
- Kühlung Fußboden (Nassestrich, Trockenstrich)
- Kühlung über Lüftungssystem, je nach Luftwechsel geringe (Wohnnutzung) bis höhere Kühlleistungen (Büro, Schulen) erzielbar
- Konvektive Abgabe im Raum über Decken- oder Wandkonvektoren: Damit auch Entfeuchtung möglich, auf niedrige Schallpegel achten und insbesondere Komfort (Zugluft, Turbulenzgrad) achten
- Siehe IBO Handbuch für Komfort



Treibhauseffekt unterschiedlicher Kälteversorgungsvarianten



Treibhauseffekt unterschiedlicher Stromquellen



Empfehlungen



- Natürliche Kühlmaßnahmen ausschöpfen: Reduktion innere und solare Lasten, Optimierung wirksame Speichermasse, Nachtlüftung
- Wenn nicht ausreichend, für Temperierung Wärmesenken Grundwasser, Erdreich oder Gewässer direkt nutzen. Die Rückkühlung in Außenluft ist weniger energieeffizient und mit Geräuschentwicklung verbunden
- Elektrische Energie aus lokalen Photovoltaikpaneelen direkt nutzen: Hitzeperioden sind meist mit hoher solarer Einstrahlung verbunden, d.h. Kühlbedarf und erneuerbares Angebot gehen häufig synchron.
- Wärmesenken im Raum über Bauteilflächen deutlich energieeffizienter und mit höherem Komfort verbunden als konvektive Systeme (Decken-, Wandkonvektoren, bzw. Lüftung). Allerdings keine Entfeuchtung möglich.
- Aus Komfortgründen ist die Kühlung über die Decke von Vorteil, bei nicht zu hohen inneren Lasten (Wohnnutzung, hocheffiziente Büros) kann aber auch sehr gut über Wand oder Fußboden temperiert werden