Thermische Anlagen II

Lehrveranstaltung im Lehrgang “Zertifizierter Energietechniker“
an der HTL Wiener Neustadt und am Studien- & Technologie Transfer Zentrum Weiz

Sommersemester 2022

Autor und Vortragender:

©Meister Forstwirtschaft Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Biermayr
ENFOS® Energie und Forst – Forschung und Service

Im Rahmen des Interreg-Projektes REBE II

Inhalt

1. Überblick und Typologie von Systemen zur Wärmebereitstellung
2. Auswahlkriterien
3. Auslegung
4. Wärmepumpen
5. Thermische Solaranlagen
6. Biomasseheizungen
7. Wärmeverteilsysteme
8. Übungsaufgaben

1. Typologie

Unterscheidungsmerkmale von Systemen zur Wärmebereitstellung

1. Nach der Art des genutzten Energieträgers:

- Heizöl (S, L, EL)
- Gas (Erdgas, Flüssiggas)
- Kohle (Steinkohle, Koks, Briketts)

} fossile Energie

- Fernwärme
- Strom ("Tagstrom", "Nachtstrom")

} Energiemix?

- Holz (Scheitholz, Hackschnitzel, Pellets, Briketts)
- Umgebungswärme (aus Luft, Erde, Wasser)
- Solare Wärme

} erneuerbare Energie

ENFOS®

1. Typologie

REBE II ATHU 26

Unterscheidungsmerkmale von Systemen zur Wärmebereitstellung

2. Nach dem Grad der Zentralisierung:

- Einzelofenheizung
- Etagenheizung
- Zentralheizung
- Nahwärme
- Fernwärme

3. Nach der Art der Wärmebereitstellung:

- Kessel
- Wärmetauscher (Wärmeübergabestation)
- Wärmepumpe mit Wärmequellensystem
- Thermische Solaranlage
- Elektroheizung (Speicheröfen o. "Infrarotheizung")

Unterscheidungsmerkmale von Systemen zur Wärmebereitstellung

4. Nach der Art der Wärmeverteilung:

- Wandheizung
- Fußbodenheizung
- Deckenheizung
- Heizleistenheizung
- Niedertemperaturradiatoren (T_{VL}<45°C)
- Hochtemperaturradiatoren (T_{VL}>55°C)
- Hypokaustenheizung (natürliche Konvektion)
- Luftheizung (allgemein, auch forcierter Luftstrom)
- Strahlungsheizung (z.B. Kachelofen)

Unterscheidungsmerkmale von Systemen zur Wärmebereitstellung

5. Nach der Art der Wärmequelle:

- chemische Umwandlung eines festen, flüssigen o. gasförmigen Endenergieträgers
- Außenluft
- Erdreich
- Grundwasser
- Sonnenstrahlung (solar passiv, thermische Kollektoren, Photovoltaik
- Abluft (allgemein: Abwärme, auch aus “inneren Gewinnen“)

6. Nach der Betriebsart:

- monovalent
- bivalent
- multivalent

1. Typologie

Erneuerbare Energie für die Wärmebereitstellung

- Solarenergie → Lichtstrahlung
  - Fotosynthese
  - Verdunstung
  - Umweltwärme
  - Wind
- Erdwärme → Geothermie
- Gravitation → Gezeiten

2. Auswahlkriterien

Nach Nutzeraspekten:

- Behaglichkeit (Strahlungs- vs. Konvektionswärme)
- Bequemlichkeit (Betriebs- und Bedienungsaufwand)
- Automatisierbarkeit (Regelung, Fernsteuerung,...)
- Brennstoffpräferenzen

Nach technischen Aspekten:

- Leistungsfähigkeit (p_{HZ} vs. p_{WW})
- Arbeitsfähigkeit (HWB, HEB)
- Vorlauftemperaturbedarf (T_{VL} bei T_{na})
- Verfügbarkeit der Energieträger

Nach Umweltaspekten:

- fossile Energie, Energiemix, erneuerbare Energie
- CO_2-Emissionen und Primärenergiebedarf im Betrieb
- Graue Energie der Systeme

Nach Wirtschaftlichkeit:

- Investitionskosten + Betriebskosten + Re-Investitionen

2. Auswahlkriterien

Eingrenzung durch das Gebäude und dessen Nutzung

Energieeffizienzklasse laut Energieausweis

A++	Passivhäuser	≤ 10
A+	Niedrigstenergiehäuser	≤ 15
A		≤ 25
B	Niedrigenergiehäuser	≤ 50
C	Bauordnung bis 2008	≤ 100
D	Alte, unsanierte Gebäude	≤ 150
E		≤ 200
F		≤ 250
G		> 250

Energiekennzahl in kWh/(m²*a)
(=spezifischer Heizwärmebedarf unter Normbedingungen)

2. Auswahlkriterien

EKZ = 250 kWh/m²a
Gebäude aus den 70er-Jahren mit Außenwänden aus 30 cm Hohlziegel. Bei Häusern der 50er-, 60er- & 70er-Jahre kommen auch Werte bis zu 400 kWh/m²a vor!
Heizlast: *33 kW (entspricht ca. 43 rm Weichholz oder 5.000 l Heizöl pro Jahr)*

Außenwände im Winter kalt, Schimmelgefahr hoch, unbehaglich, sehr hohe Heizkosten

EKZ = 100 kWh/m²a
Gebäude der 80er-Jahre. Das typische 38er-Ziegel-Massivhaus oder die 12 cm dicke Holzriegelwand beim Fertigteilhaus.
Heizlast: *13 kW (entspricht ca. 17 rm Weichholz oder 2.000 l Heizöl pro Jahr)*

Schimmelgefahr gering, Behaglichkeit im Winter durch entsprechenden Heizeinsatz, hohe Heizkosten

Quelle und Bildnachweis: eNu (2019), Leitfaden Heizung

2. Auswahlkriterien

EKZ = 42 kWh/m²a
Niedrigenergiehaus der neuen Generation. Bei Gebäudesanierungen sollten Werte unter 50 kWh/m²a angestrebt werden.
Heizlast: *5,5 kW (entspricht ca. 7 rm Weichholz oder 850 l Heizöl pro Jahr)*

Außenwände im Winter warm, behaglich, moderate Heizkosten

EKZ = 10 kWh/m²a
Das ist Top-Qualität – man spricht vom Passivhaus. Ein solcher Wert wird durch perfekte Dämmung, luftdichte Bauweise und kontrollierte Wohnraumlüftung erreicht.
Heizlast: *1,5 kW (entspricht ca. 2 rm Weichholz oder 200 l Heizöl pro Jahr)*

Außenwände im Winter warm, sehr behaglich, geringste Heizkosten

Quelle und Bildnachweis: eNu (2019), Leitfaden Heizung

ENFOS®

2. Auswahlkriterien

REBE II ATHU 26

Achtung bei Aussagen zur Wirtschaftlichkeit!

- **Investitionskosten**
  - Planungskosten für Heizsystem und Hilfseinrichtungen
  - Anschaffungskosten des Kessels / des WVS
  - Anteiliges Gebäudevolumen für Heizsystem (Heizraum)
  - Errichtung / Sanierung eines Zuluftsystems
  - Errichtung / Sanierung eines Abgas / Abluftsystems
  - Installation des Kessels / des WVS
  - Inbetriebnahme, Systemprüfung und Einregulierung
- **Betriebskosten**
  - Brennstoffkosten inkl. Frachtkosten, Einbringungskosten etc.
  - Brennstoffadditive und alternative Brennstoffe
  - Antriebsenergie von Hilfsaggregaten
- **Wartung und Instandhaltung**
  - Rauchfangkehrergebühren
  - Gesetzliche Überprüfungen / Abgasgutachten etc.
  - Serviceintervalle (Eigenleistung vs. ext. Dienstleistung)
- **Reparaturen bzw. Komponententausch**
- **Individuelle Diskontraten und Energiepreisszenarien**

2. Auswahlkriterien

Eingrenzung durch die Aufgabenstellung

- Ausschließlich Kesseltausch
- Ausschließlich Sanierung des WVS
- Kesseltausch + Gebäudesanierung
- Kesseltausch + Gebäudesanierung + Sanierung/Erneuerung des WVS
- Kompletter Neubau

Bildnachweis: eNu (2019), Leitfaden Heizung

2. Auswahlkriterien

KLIMAAKTIV HEIZUNGS-MATRIX FÜR DAS EIN- UND ZWEIFAMILIENHAUS	Passiv-haus[1]	Niedrigst-energie-haus[1]		Niedrig-energie-haus	Altbau < 20 Jahre oder saniert	Altbau > 20 Jahre un- oder teilsaniert	Warmwasseraufbereitung empfohlen mit		
Haupt-Heizsysteme für Raumwärme und Warmwasser	HWB_{SK}[2]: HeizWärmeBedarf am Standort des Gebäudes in kWh pro m² und Jahr						Solarthermie	Wärmepumpe in Kombination mit Photovoltaik	Flexible Nutzung von Wind-/Sonnenstrom (Smart Grid ready)
	≤ 10 (A++)	≤ 15 (A+)	≤ 25 (A)	≤ 50 (B)	≤ 100 (C)	> 100 (D)			
Passivhaussystem Komfortlüftung mit Luftheizung		Alleinige Luftheizung unter Komfortbedingungen nicht möglich					+	++	
Kombigerät Komfortlüftung mit Niedertemperatur-Wasser-Wärmeverteilung bis 35° C					Leistung des Heizsystems nicht ausreichend		+	++	++
Erdreich-Wärmepumpe[3] mit Niedertemperatur-Wasser-Wärmeverteilung bis 35° C							+	++	++
Grundwasser-Wärmepumpe[3] mit Niedertemperatur-Wasser-Wärmeverteilung bis 35° C							+	++	++
Außenluft-Wärmepumpe mit Niedertemperatur-Wasser-Wärmeverteilung bis 35° C							+	++	++

Empfehlungen: (Kriterien sind CO_2, Investitionskosten, Heizkomfort):
sehr empfehlenswert — empfehlenswert — weniger empfehlenswert — nicht empfehlenswert — technisch nicht sinnvoll

Quelle und Bildnachweis: eNu (2019), Leitfaden Heizung

2. Auswahlkriterien

KLIMAAKTIV HEIZUNGS-MATRIX FÜR DAS EIN- UND ZWEIFAMILIENHAUS	Passivhaus[1]	Niedrigstenergiehaus[1]		Niedrigenergiehaus	Altbau <20 Jahre oder saniert	Altbau >20 Jahre un- oder teilsaniert	Warmwasseraufbereitung empfohlen mit: Solarthermie	Wärmepumpe in Kombination mit Photovoltaik	Flexible Nutzung von Wind-/Sonnenstrom (Smart Grid ready)
Haupt-Heizsysteme für Raumwärme und Warmwasser	HWB_{SK}[2]: HeizWärmeBedarf am Standort des Gebäudes in kWh pro m² und Jahr								
	≤ 10 (A++)	≤ 15 (A+)	≤ 25 (A)	≤ 50 (B)	≤ 100 (C)	> 100 (D)			
Pellets-Zentralheizung mit Pufferspeicher							++	++	
Stückholzvergaser-Zentralheizung mit Pufferspeicher							++	+	
Nahwärme/Fernwärme auf Biomassebasis							+	++	
Kaminofen (Stückholz/Pellets) oder Kachelofen-Ganzhausheizung mit Pufferspeicher					Leistung des Heizsystems nicht ausreichend		++	+	
Kaminofen- oder Kachelofen-Ganzhausheizung ohne wassergeführtem Wärmeabgabesystem					Leistung des Heizsystems nicht ausreichend		+	++	
Elektro-Direktheizung (z.B. Infrarotheizung) mit Solaranlage							++	++	

Empfehlungen: (Kriterien sind CO_2, Investitionskosten, Heizkomfort):

sehr empfehlenswert | empfehlenswert | weniger empfehlenswert | nicht empfehlenswert | technisch nicht sinnvoll

Quelle und Bildnachweis: eNu (2019), Leitfaden Heizung

3. Auslegung

Dimensionierung von Wärmebereitstellungsanlagen

Die Nennleistung einer Wärmebereitstellungsanlage P_{HZ} ist:

$$P_{HZ} = P_H * f_{ÜK}$$

$f_{ÜK}$ ... Überdimensionierungsfaktor der Heizungsanlage [1]
Wertebereich: ..1,2..1,5... ➔ Teillastbetrieb? Jahresnutzungsgrad?
P_H ... Heizlast des Gebäudes [W, kW, MW]

Unsicherheitsfaktoren der Dimensionierung:

- Heizlast ist unsicher (z.B. da die U-Werte der Bauteile unsicher sind)
- Nutzerverhalten unsicher (P_H gilt für T_i=20°C! $T_{i,real}$ oft bis 24°C!)
- Außentemperatur sinkt auch unter T_{na}
- Degradation der Leistung und des Wirkungsgrades der Heiztechnik über die Lebensdauer (z.B. sinkender Kesselwirkungsgrad)

Die Auslastung von Wärmebereitstellungsanlagen Volllaststunden (VLS)

Definition: Anzahl von Stunden, die eine Anlage pro Jahr (=8760 Stunden) mit der Nennleistung arbeitet. Die VLS sind ein Kriterium für die Wirtschaftlichkeit von energietechnischen Anlagen.

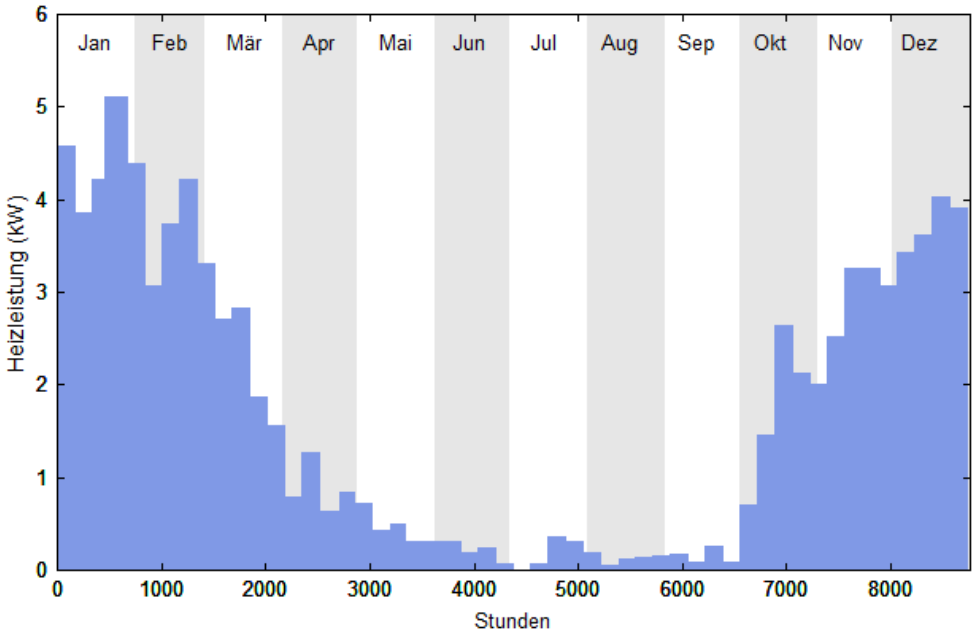
$$VLS = \frac{Q_{ges,a}}{P_n}$$

$Q_{ges,a}$ ... insgesamt pro Jahr bereitgestellte Energie
P_n ... Nennleistung der Anlage

Beispiel: Ein Kessel mit 3 MW_{th} produziert pro Jahr 7,5 GWh Wärme. Die Anlage weist folglich 2500 Volllaststunden auf.

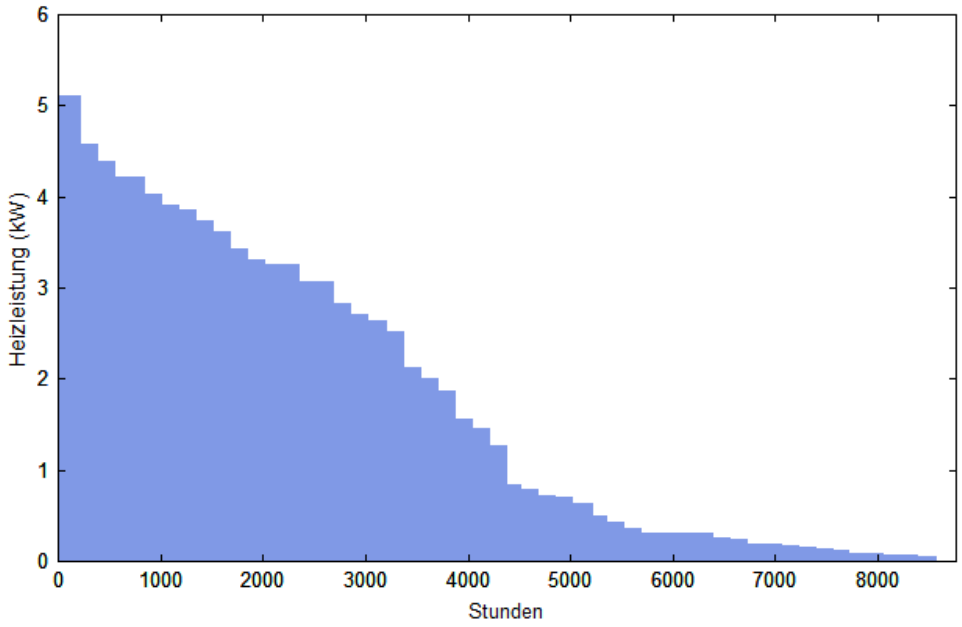
Planung von Wärmebereitstellungsanlagen die Jahresdauerlinie als Planungsbasis

Schritt 1: erforderliche Heizleistung über das Jahr (im Diagramm: Heizlast eines NE-EFH)

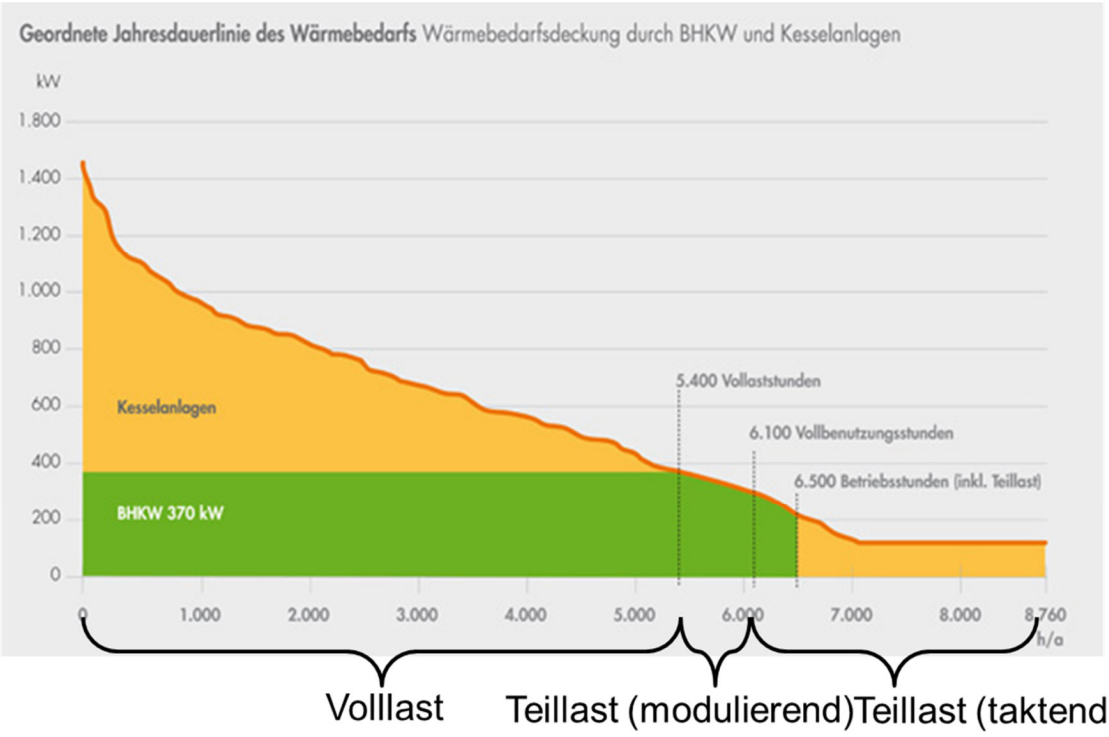


Planung von Wärmebereitstellungsanlagen die Jahresdauerlinie als Planungsbasis

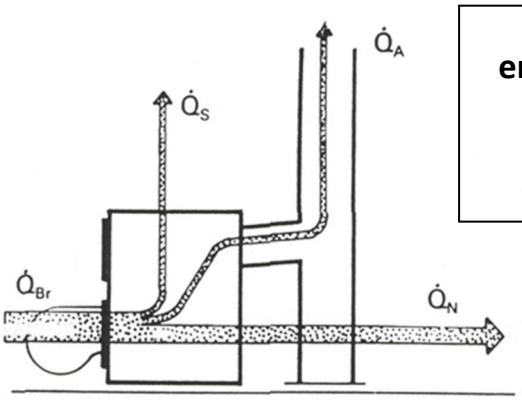
Schritt 2: Nach Leistung sortierte Heizleistung über das Jahr (im Diagramm: Heizlast eines NE-EFH)



Planung von Wärmebereitstellungsanlagen die Jahresdauerlinie als Planungsbasis



Der Kesselwirkungsgrad η_K:



ergibt sich zu: $\eta_K = \frac{P_{Br} - P_S - P_A}{P_{Br}}$

oder: $\eta_K = 1 - (q_A + q_S)$

Achtung:
wo sind meine Systemgrenzen?

P_N ... Nutzwärmestrom (= **Kesselleistung**)
P_S ... Verlust-Wärmestrom Kesselauskühlung (Standby Verluste?!)
P_A ... Verlust-Wärmestrom Abgas (zeitweiser Verlust bei Brenner "Ein")
P_{Br} .. Mit dem Brennstoff zugeführter Wärmestrom (= **Brennerleistung**)
q_A ... prozentueller Abgasverlust
q_S ... prozentuelle Strahlungsverluste

Der Jahresnutzungsgrad des Systems η_N:

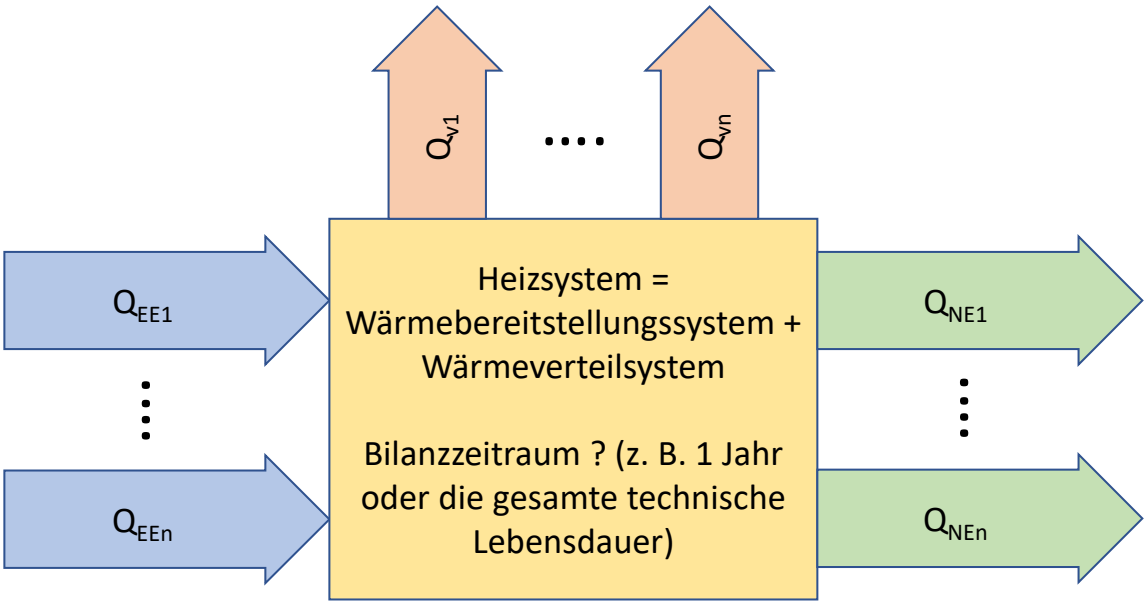
$$\eta_N = \frac{Q_{Nutz,ges}}{Q_{EE,ges}}$$

$Q_{Nutz,ges}$ ... gesamte, in einem Jahr genutzte Wärmemenge [kWh]
(schwierig messbare Größe)
$Q_{EE,ges}$ .... gesamte, in einem Jahr eingesetzte Endenergiemenge [kWh]
(z.B. Summe aller Heizenergieträger; i.A. messbare Größe)

Systemgrenzen müssen sauber definiert werden:

- Raumheizung?
- Brauchwassererwärmung?
- Einzelgeräte oder gesamtes Inventar?
- Welche Anteile der Kesselverluste sind in letzter Konsequenz doch wieder Nutzenergie q_A, q_S)?

Energie- und Umweltbilanzen von Heizsystemen



Zusätzlich bei **Lebenszyklusanalysen**: Graue Energie und energetischer Restwert am Ende der Lebensdauer

Energieverbrauch von Hilfsantrieben

- Ventilatoren (Lüftungsanlagen, Saugzugkessel,…)
- Brennstoffbeförderung (Förderschnecken und –bänder, Einblasanlagen,…)
- Kompressoren (Wärmepumpe)
- Pumpen (Wärmeverteilsysteme, Solepumpen, Warmwasser-Umwälzpumpen,…)
- Steuerungen und Regelungen

Achtung! Standby-Verluste (8760 h/a … 8,76 kWh/W)
Zumeist im Zusammenhang mit Elektronik (für Steuerungen, Regelungen, Fernüberwachungs- und Fernwirksysteme)

Leistungsbedarf für die Brauchwassererwärmung

Berechnungsgrundlagen:

Warmwasserdurchfluss (bei Gebrauchstemperatur; stark vom Leitungsdruck abhängig!):

- "Sparbrause": ca. 2,5 Liter/Minute (=150 Liter/h)
- rascher Badewanneneinlass: ca. 10 Liter/Minute (=600 Liter/h)

Temperaturen:

- Frischwassertemperatur (Winter): 5°C...10°C
- Gebrauchstemperatur (Dusche, Bad): 30°C...40°C
- Gebrauchstemperatur (Boilerhygiene): 60°C...70°C
- für Haushaltsgeräte (Waschmaschine, Geschirrspüler): 30°C...60°C

➔ ΔT = 25...65°C ; für Dusche/Bad typisch ΔT = 35°C

Leistungsbedarf für die Brauchwassererwärmung

Spezifische Wärmekapazität c in kJ/(kg*K)	
Aluminium	0,896
Eisen	0,452
Kupfer	0,382
Vollziegel	0,840
Beton	0,880
Granit	0,790
Gips	1,090
Fensterglas	0,840
Marmor	0,880
Holz (15% Feuchte)	1,700
Wasser (20 °C)	4,182
Luft (c_p)	1,005

$$P_{WW} = c_W * \dot{m} * \Delta T/3600$$

P_{WW} ... Leistungsbedarf auf Nutzenergieebene [kW]
c_W ... Spezifische Wärmekapazität von Wasser 4,18 kJ/(kg*K)
$\dot{m}$ ... Massenfluss [kg/h]
ΔT ... Temperaturdifferenz [K]

Bsp. **Sparbrause**:
$\dot{m}$ = 150 kg/h, ΔT = 35 K ➔ P_{WW} = **6,1 kW**

Bsp. **rasche Badewannenfüllung**:
$\dot{m}$ = 600 kg/h, ΔT = 35 K ➔ P_{WW} = **24,4 kW**

Fazit: der Leistungsbedarf für die Brauchwassererwärmung ist enorm!

Leistungsbedarf für die Brauchwassererwärmung

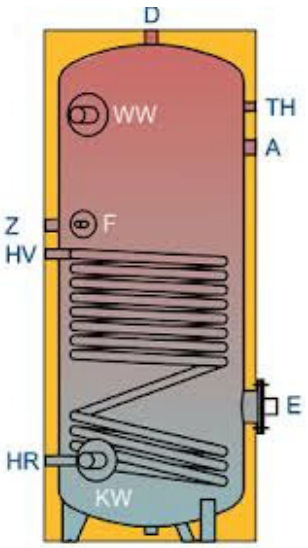
mögliche Lösungsansätze

- $P_{HZ} > P_{WW}$ ➔ Dimensionierung auf P_{HZ}, Durchlaufprinzip für Brauchwassererwärmung möglich;
- $P_{HZ} \cong P_{WW}$ ➔ Durchlaufprinzip für Brauchwassererwärmung möglich
- $P_{HZ} < P_{WW}$ ➔ Dimensionierung in der Regel auf P_{HZ}, Brauchwassererwärmung notwendiger Weise über Boiler (=Warmwasserspeicher)

Achtung! $P_{WW,Ges} = \sum_{i=1}^{n} P_{WW,i}$ z.B. 2 Bäder, Hotel,...

Speicherlösungen für die Brauchwassererwärmung

- Warmwasserspeicher (klassischer Boiler)



$$\Delta t = \frac{c_W * m * \Delta T}{P_{WW} * 3600}$$

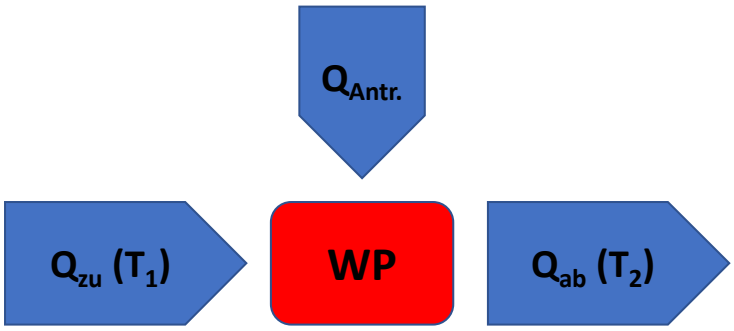
Δt ... Aufheizzeit (Verluste vernachlässigt) [h]
P_{WW} ... Heizleistung des Wärmetauschers [kW]
(Achtung! hier wurde P_{WW} konstant angenommen!)
c_W ... Spezifische Wärmekapazität von Wasser [kJ/(kg*K)]
m ... Masse des Speicherwassers [kg]
ΔT ... Temperaturdifferenz [K]

z. B: T_{kalt}=10°C, T_{warm}=65°C, P_{WW}=10 kW, Boilervolumen=500 Liter;
Boilermasse und Boilerverluste vernachlässigt
➔ Aufheizzeit Δt = 3,19 h

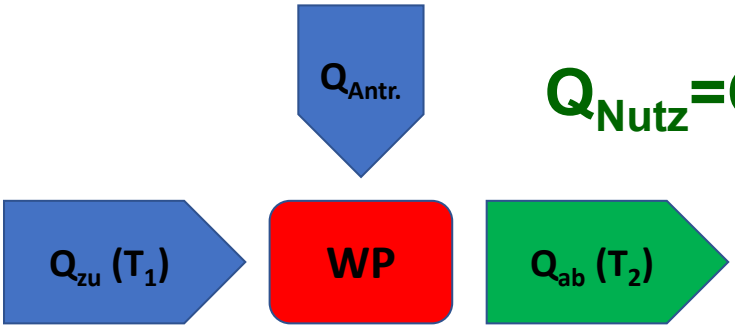
Prinzip der Wärmepumpentechnologie

Definition:

Eine Wärmepumpe ist eine Maschine, die Wärme mit einer bestimmten Temperatur aufnimmt ("kalte Seite") und diese nach Zufuhr von Antriebsarbeit auf einem höheren Temperaturniveau wieder abgibt ("warme Seite").

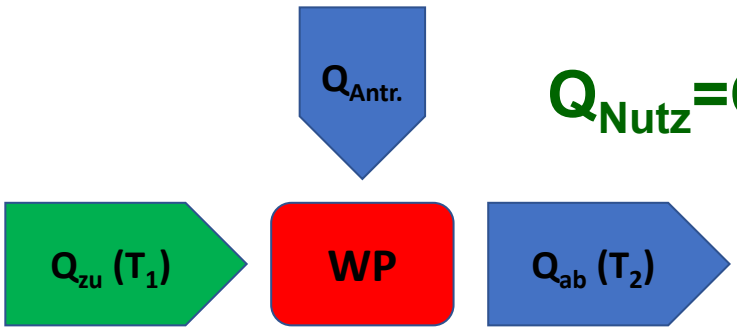


Heizen:



$Q_{Nutz}=Q_{ab}$

Kühlen:



$Q_{Nutz}=Q_{zu}$

Physikalisches Prinzip

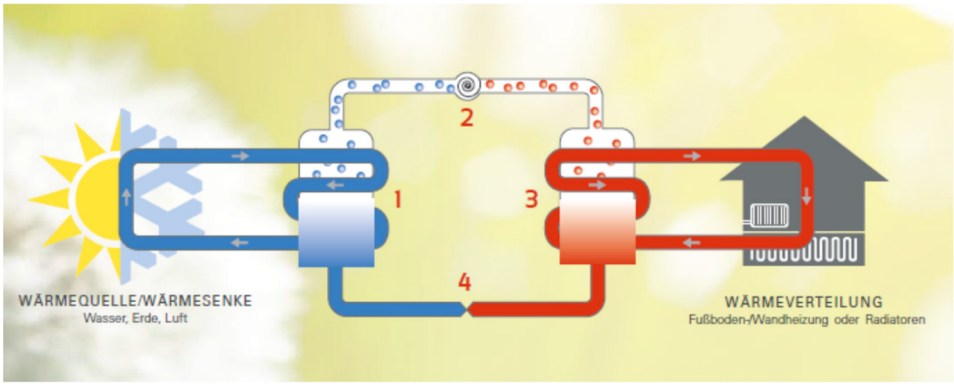
Temperaturanstieg bei Verdichtung eines realen Gases bzw. Temperaturabfall bei Expansion eines realen Gases (Wechselwirkungen zwischen den Molekülen, Joule-Thomson-Effekt).

Technische Umsetzungen

- **Kompressionsmaschine**
- **Absorptionsmaschine** (Absorption: Aufnahme eines Stoffes in einen anderen Stoff ohne chem. Reaktion, z.B. Lösung eines Gases in einer Flüssigkeit)
- **Adsorptionsmaschine** (Anreicherung eines Gases o. einer Flüssigkeit an der Oberfläche eines Festkörpers; z.B. Aktivkohlefilter)

Kreisprozess der Wärmepumpe

Quelle der Abbildung: Fa. Ochsner Produktkatalog



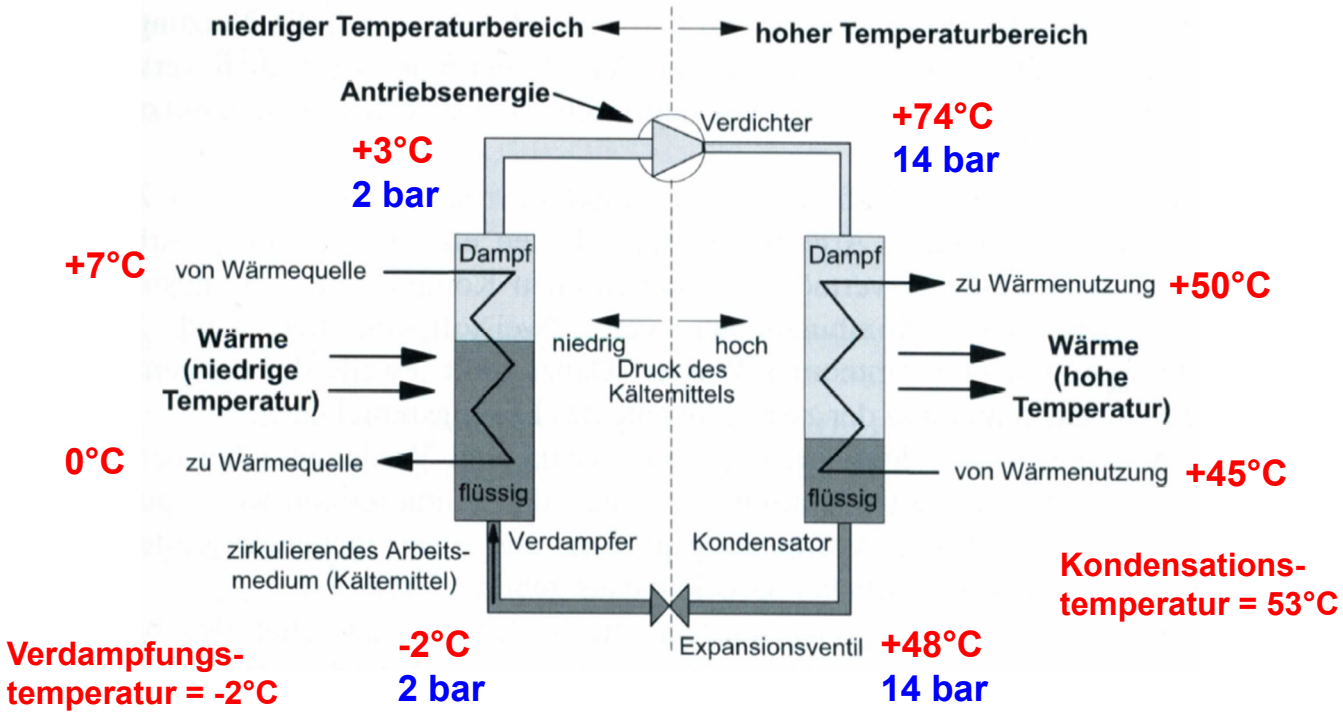
1. Verdampfen:
Mittels eines Wärmetauschers nimmt das flüssige Kältemittel Energie aus der Wärmequelle (z.B. Erde, Wasser oder Luft) auf und verdampft.

2. Verdichten:
Ein elektrisch angetriebener Kompressor verdichtet das kalte, dampfförmige Kältemittel, welches sich dadurch erhitzt.
Das Kältemittel verlässt als "Heißgas" den Verdichter.

3. Verflüssigen/Kondensieren:
Das Heißgas gibt im Verflüssiger Energie an das Heizsystem ab, kondensiert und verlässt als noch warmes, flüssiges Kältemittel den Kondensator.

4. Entspannen:
Im Expansionsventil wird der Druck des warmen, flüssigen Kältemittels schlagartig gesenkt. Die Temperatur des Kältemittels nimmt dadurch ohne Abgabe von Energie schlagartig ab. Das flüssige Kältemittel wird dem Verdampfer zugeführt und der Kreislauf beginnt von neuem.

Technische Parameter



Wärmepumpen - Kältemittel

- 1930 bis zum Anfang der 1990er Jahre: **Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW)**; Motiv: sehr günstige Dampfkurve, technisch pflegeleicht, aber: <u>sehr stark ozonschädigend</u>! Verbot in D/AT 1995
- Ersatz: **Fluorkohlenwasserstoffe (FKW)** schädigen nicht die Ozonschicht, sind jedoch stark treibhauswirksam (im Kyoto-Protokoll als umweltgefährdend erfasst)
- Ersatz: reine Kohlenwasserstoffe wie Propan, Propen, Butan oder Propylen (leicht entzündlich, als Luft-Gemisch explosiv etc.)
- Zusätzlich: anorganische, nicht brennbare Alternativen wie Ammoniak, Kohlendioxid, auch Wasser (speziell für industrielle Kühlanlagen)

Kompressionswärmepumpen-Aggregate

Kombianlagen für Raumheizung und Brauchwassererwärmung

typische Wärmeleistungen: (1 kW)... 4 kW ... 10 kW ... 20 kW ... 60 kW

Bild: www.heliotherm.com

Bild: www.weishaupt.de

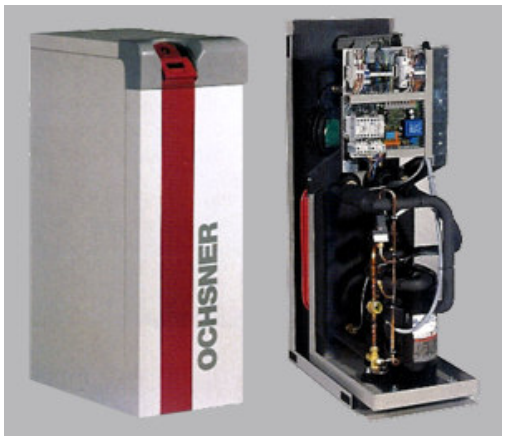


Bild: www.ochsner.com

Installationsbeispiel Kombianlage für Einfamilienhaus (Sole/Wasser)

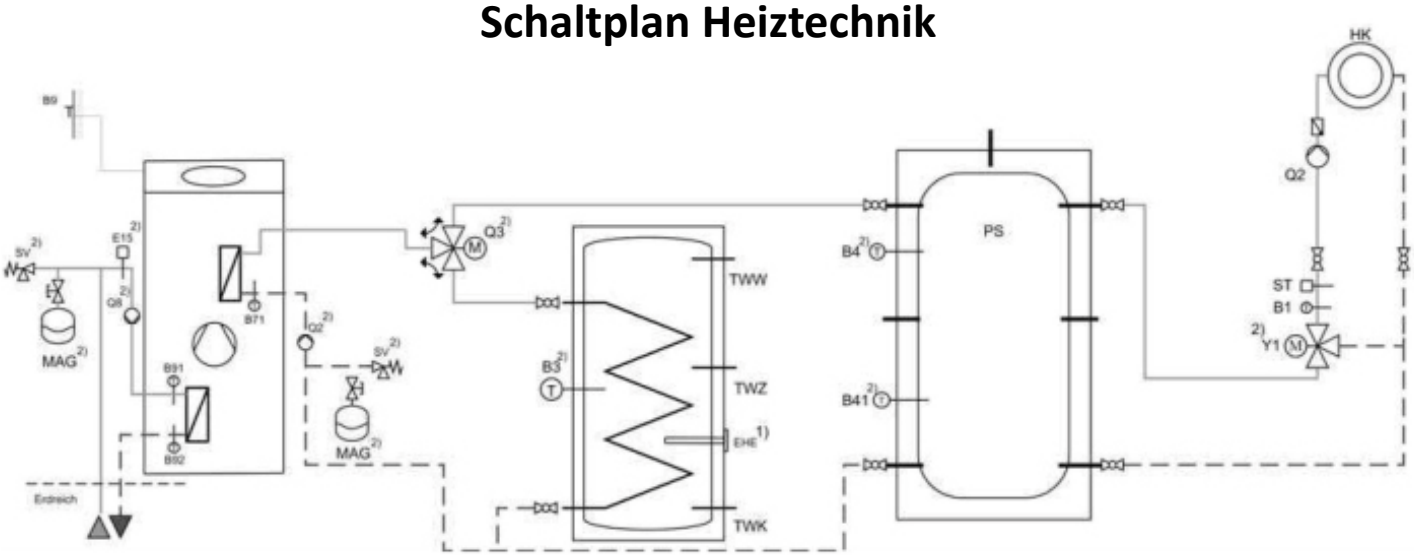
Bildnachweis: www.sba-alternativenergie.com/produkte/waermepumpen/

Industriewärmepumpen

thermische Leistungen bis in den MW-Bereich möglich

Bildnachweis: www.ochsner.com

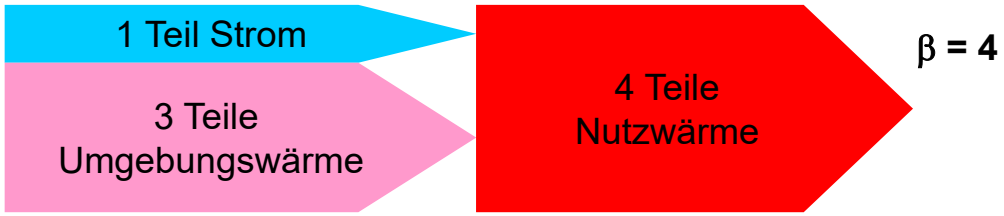
Schaltplan Heiztechnik



Legende:

B1	Vorlauf-Temperaturfühler Heizkreis 2)	N1	Wärmepumpenregler	
B3	Trinkwarmwasser-Temperaturfühler	Q2	Heizkreispumpe	230 V
B4	Pufferspeicher-Temperaturfühler oben	Q3	Umlenkventil	230 V
B41	Pufferspeicher-Temperaturfühler unten	Q8	Solepumpe	230 V/400 V
B71	Rücklauftemperaturfühler Wärmepumpe	Q9	Kondensatorpumpe	230 V
B9	Außentemperatur-Fühler	ST	Sicherheitsthermostat 2)	
B91	Sole Eintrittstemperatur-Fühler	SV	Sicherheitsventil	
B92	Sole Austrittstemperatur-Fühler	TWW	Trinkwasser	
MAG	Membranausdehnungsgefäß	Y1	Heizkreis-Mischer 2)	230 V
E15	Druckwächter	1)	Kraftschütz und Sicherung bauseitig.	
TKW	Kaltwasser	2)	Zubehör/bauseits	
EHE 1)	Elektroheizeinsatz TWW (6 kW) 400 V			

Energiebilanz von Wärmepumpen: die Jahresarbeitszahl



$$\frac{\text{jährliche Nutzwärme}}{\text{jährlich zugeführte elektr. Energie}} = \textbf{Jahresarbeitszahl } \beta$$

Jahresarbeitszahlen von neuen Wärmepumpen

Kennwerte für Anwendung im reinen Heizbetrieb:

	$T_{Vorlauf}$=35°C	$T_{Vorlauf}$=55°C
neue Wasser-Wasser Wärmepumpe:	β = 5,0	β = 3,1
neue Direktverdampfungs Wärmepumpe:	β = 5,6	β = 3,3
neue Sole-Wasser Wärmepumpe:	β = 5,1	β = 2,8
neue Luft-Wasser Wärmepumpe:	β = 3,5	β = 2,3

Kennwerte für Anwendung im Kombisystem (HZ+Brauchwasser):

	$T_{Vorlauf}$=35°C	$T_{Vorlauf}$=55°C
neue Wasser-Wasser Wärmepumpe:	β = 3,5	β = 3,4
neue Direktverdampfungs Wärmepumpe:	β = 3,9	β = 3,1
neue Sole-Wasser Wärmepumpe:	β = 3,3	β = 2,7
neue Luft-Wasser Wärmepumpe:	β = 3,1	β = 2,6

Quelle: Müller et al. 2010, Heizen 2050, ein Forschungsprojekt der TU-Wien, EEG, im Auftrag der FFG, KLIEN
Anmerkung: Dargestellt ist jeweils die JAZ einer neuen Wärmepumpe der Leistungsklasse 8kW thermisch.

Leistungszahlen von Wärmepumpen

Leistungszahl ε (oder auch "coefficient of performance" COP)
= am Prüfstand gemessener Momentanwert bei konstanten Bedingungen (gemäß der Norm EN 14511)

$$\varepsilon = \frac{Heizleistung}{Antriebsleistung} = \frac{Umweltwärmeleistung + Antriebsleistung}{Antriebsleistung}$$

Leistungszahl nach Carnot ε_C Bsp: Verdampfung -2°C, Kondensation 53°C

$$\varepsilon_C = \varepsilon_{\max} = \frac{T}{T - T_u} = \frac{T}{\Delta T} = \frac{(53+273)K}{(53+273)K - (-2+273)K} = 5{,}9$$

Achtung! $\beta < \varepsilon < \varepsilon_C$

Carnotscher Gütegrad

$$\eta_{WP} = \frac{COP}{COP_C}$$

η_{WP} ... Carnotscher Gütegrad;

in der Praxis werden Werte für den Carnotschen Gütegrad von 0,45 bis 0,55 erreicht.

d.h. ein realistischer COP im vorigen Beispiel würde 2,7 bis 3,2 betragen.

Nomenklatur und Systematik COP

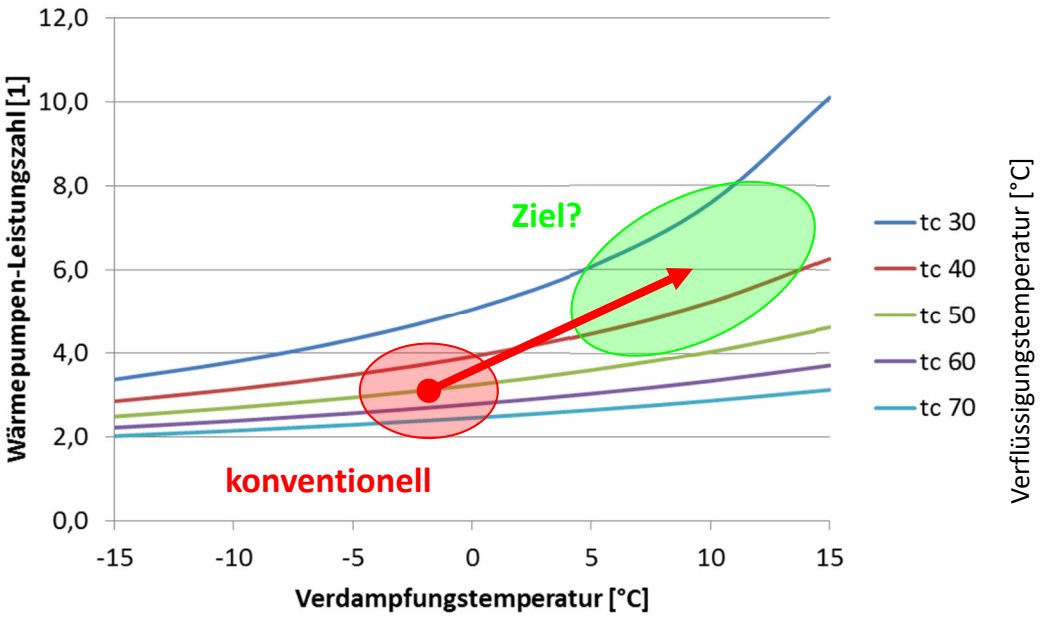
Beispiele gemessener COP-Werte (EN 14511):

W10/W50: COP = 4,5,
A10/W35: Heizleistung 8,8 kW; COP = 4,3
A2/W50: Heizleistung 6,8 kW; COP = 2,7
B0/W35: Heizleistung 10,35 kW; COP = 4,8
B0/W50: Heizleistung 9 kW; COP = 3,6
B10/W35: Heizleistung 13,8 kW; COP = 6,1

Bezeichnungen:
W: Water (Wasser)
A: Air (Luft)
B: Brine (Sole)

Quelle: Institut für Energiesysteme, Buchs, Schweiz

Leistungszahlen von Wärmepumpen



Annahme: Carnotscher Gütegrad = 0,5

Wärmepumpen zur Kühlung und Klimatisierung

der Kühlbedarf, klimatische Definitionen

- Hitzetag od. heißer Tag = Tagesmaximum über 30°C
- Tropennacht = niedrigste Tagestemperatur über 20°C
- Wüstentag = Tagesmaximum über 35°C
- Sommertag = Tagesmaximum über 25°C
- Hitzewellen = an drei aufeinander folgenden Tagen mindestens 30 Grad Tagesmaximum

Darstellung aus Recknagel/Sprenger/Schramek (2000)

Wärmepumpen zur Kühlung und Klimatisierung

Entwicklung des Kühlbedarfs

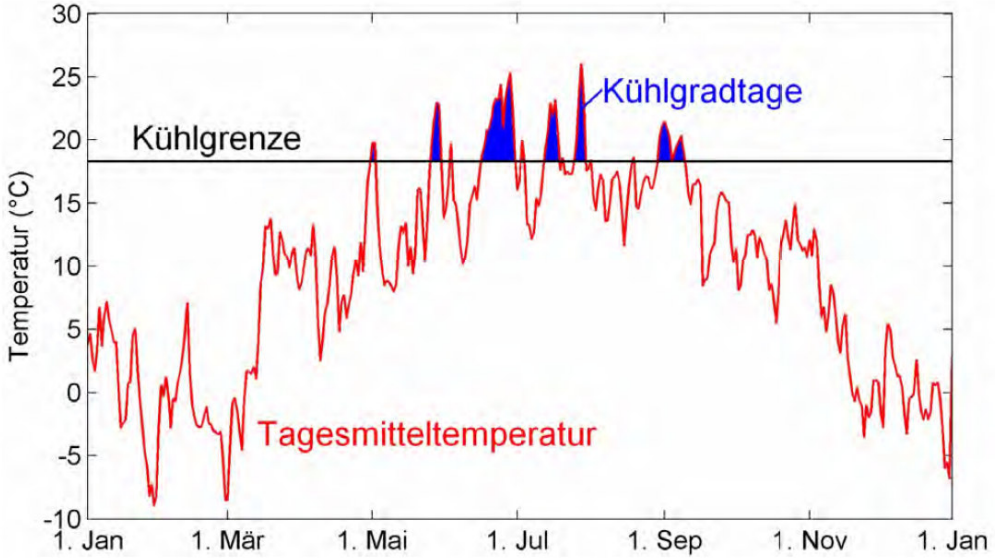
Zitat ZAMG, Mai 2019, www.zamg.ac.at:

„Die jährliche Mitteltemperatur in Europa ist von 1850 bis 2008 um 1,3°C gestiegen. Die 9 wärmsten Jahre dieses Zeitraums waren innerhalb der letzten 12 Jahre zu beobachten. Parallel dazu nahm die Zahl der warmen Nächte und heißen Tage deutlich zu. Auch die Vegetationsperiode weist einen positiven Trend von 3.6 Tagen pro Dekade auf. Nach Einschätzung des IPCC wird die Zunahme der Lufttemperatur mit hoher Wahrscheinlichkeit mit einer Zunahme von Hitzewellen einhergehen. Dies betrifft sowohl die Häufigkeit, als auch die Andauer dieser Ereignisse.“

Wärmepumpen zur Kühlung und Klimatisierung

Definition Kühlgradtage KGT

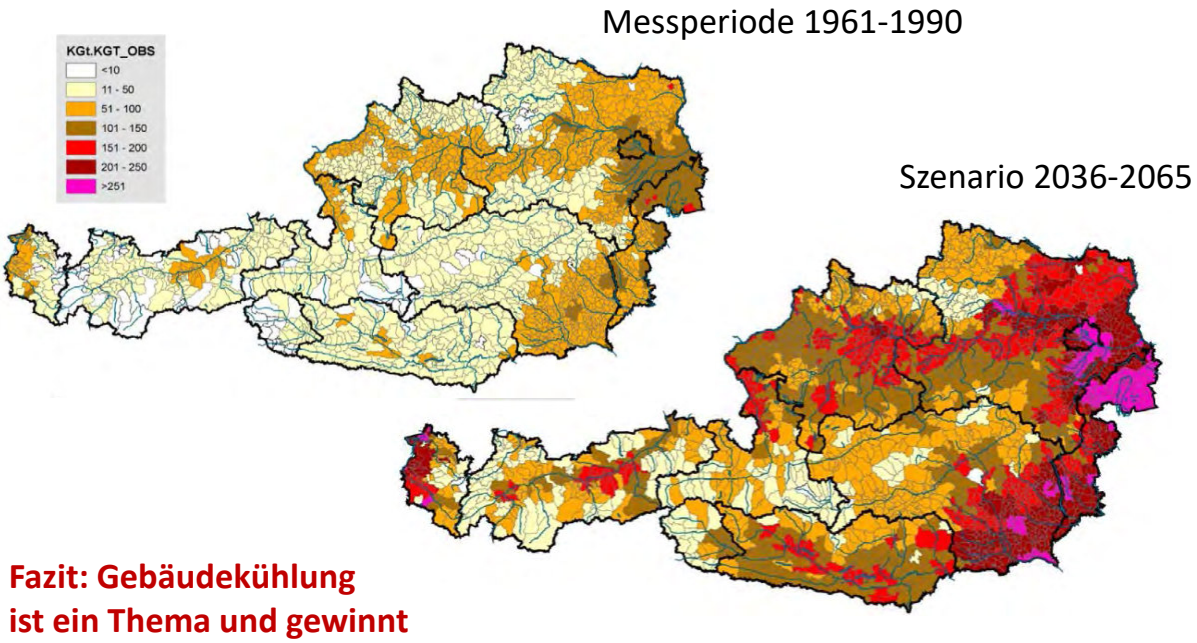
Bildnachweis: Wien Energie (2016)



Summe der täglichen Differenz zwischen der Tagesmitteltemperatur und der Kühlgrenztemperatur (18,3 °C) über alle Kühltage, wenn die Kühlgrenztemperatur am jeweiligen Tag überschritten wurde.

Wärmepumpen zur Kühlung und Klimatisierung

Voraussichtliche Entwicklung der KGT



Fazit: Gebäudekühlung ist ein Thema und gewinnt rasch an Bedeutung!

Bildnachweis: Wien Energie (2016)

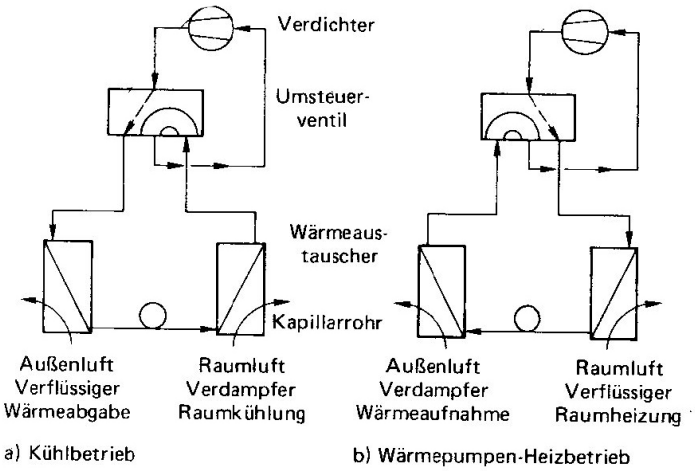
Kühlung und Klimatisierung mit Wärmepumpen

Klimaanlagen: Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit werden in einem Raum oder in einem ganzen Gebäude ganzjährig nach Sollwerten geregelt. Die Anlagen können heizen, kühlen, befeuchten und entfeuchten. Ein individueller Nutzereingriff in die Sollwerte ist meist nicht möglich.

Raumkühlgeräte: dienen nur zum Abtransport der Wärme aus einem oder mehreren Räumen. Die Geräte können zumeist individuell betrieben werden.

Kühlung und Klimatisierung mit Wärmepumpen

Schaltschema für den Kühlbetrieb



Umschaltung von Heizen auf Kühlen mit dem (elektronisch angesteuerten) “4-Wege-Umsteuerventil“. Der Kältemittelkreislauf kann damit umgekehrt werden.

Darstellung aus Recknagel/Sprenger/Schramek (2000)

Leistungszahlen von Kältemaschinen

$$[\varepsilon_K] = \frac{Nutzen}{Aufwand} = \frac{\dot{Q}_0}{P}$$

ε_K : *Kälteleistungszahl*

$\dot{Q}_0$: *Kälteleistung*

P : *Leistungsaufnahme*

t_o : *Verdampfungstemperatur*

t_c : *Verflüssigungstemperatur*

	to	tc	$\dot{Q}_0$	P	ε_K
Klima-Kälteanlage	+1 °C	+35 °C	10 kW	2.40 kW	4.16
Pluskühlanlage	–10 °C	+45 °C	10 kW	4.16 kW	2.40
Tiefkühlanlage	–35 °C	+40 °C	10 kW	7.09 kW	1.41

Quelle: friscaldo 1-2008

Leistungszahlen von Kältemaschinen

ε_K=EER (Energy Efficiency Ratio, Effizienz für den Kühlbetrieb)

Energie-effizenzklasse	Luftgekühlte Split- und Multisplit-Geräte im Kühl-betrieb
A	3.20 < EER
B	3.20 ≥ EER > 3.00
C	3.00 ≥ EER > 2.80
D	2.80 ≥ EER > 2.60
E	2.60 ≥ EER > 2.40
F	2.40 ≥ EER > 2.20
G	2.20 ≥ EER

Quelle: friscaldo 1-2008

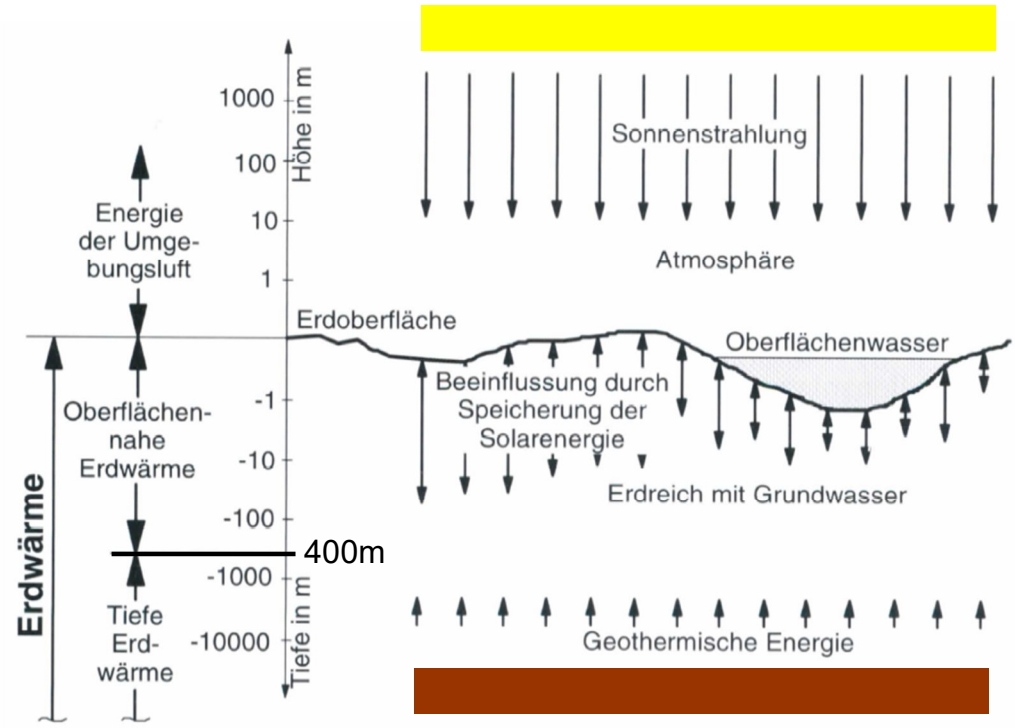
Kühlung und Klimatisierung mit Wärmepumpen
"Free Cooling"

- Kühlbetrieb von vertikalen Erdsonden im Sommer:
  - Regeneration der durch den Heizbetrieb im Winter ausgekühlten Umgebung der Sonde im Boden
  - Kühlbetrieb erfordert lediglich eine Umwälzung durch die Solepumpe; liefert ausgezeichnetes EER
  - Regelung der Kühlleistung (bzw. der Kühlkreis-Vorlauftemperatur) unter bauphysikalischen Gesichtspunkten

Einteilung der Wärmepumpensysteme nach Wärmequellensystem

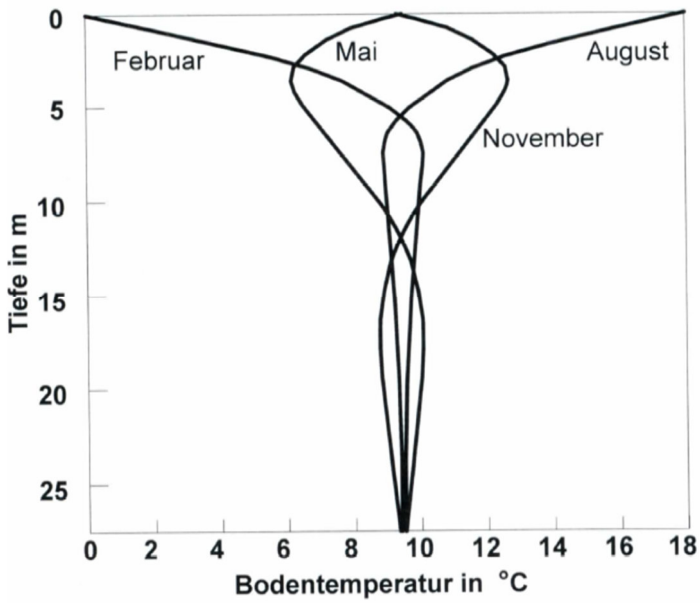
- Luft/Wasser
- Sole/Wasser
- Wasser/Wasser
- Direktverdampfer
- Luft/Luft

Umgebungswärme, Umweltwärme



Bodentemperaturen nach Monat und Tiefe

(Die Werte sind für Tieflagen in AT relevant)



Einflussfaktoren:

- Seehöhe des Standorts
- Solare Strahlungsverhältnisse
- Bodenbeschaffenheit (Wärmeleitfähigkeit)
- Niederschlagsaufkommen
- Grundwassersituation

Abb. aus Kaltschmitt/Streicher 2009 Regenerative Energien in Österreich

Außenlufttemperaturen nach Monat
(langjährige Stundenmittelwerte, für tiefe Lagen)

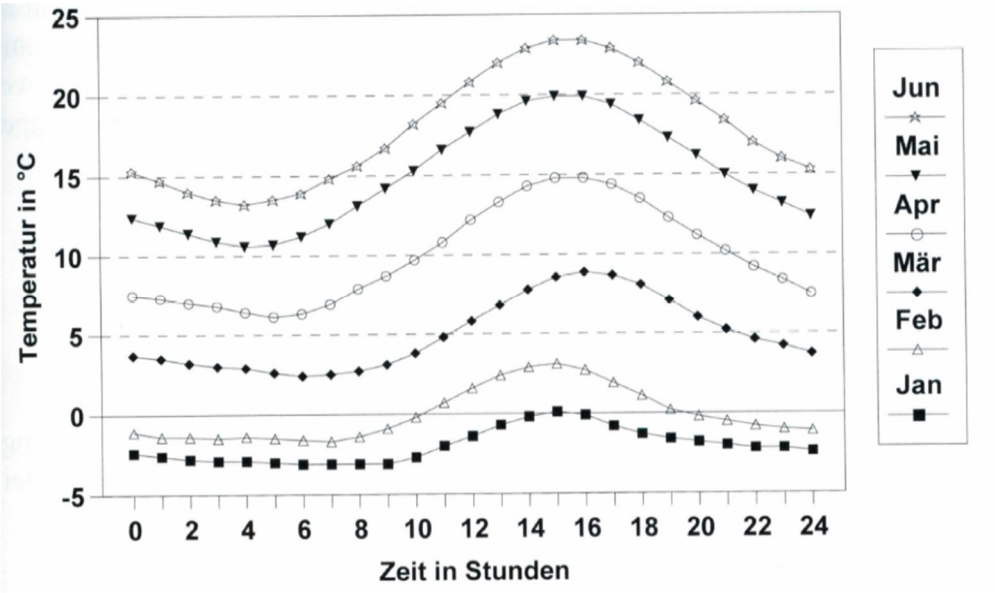


Abb. aus Kaltschmitt/Streicher 2009 Regenerative Energien in Österreich

Horizontale Erdkollektoren
Sole-Wasser oder Direktverdampfer-Wärmepumpen

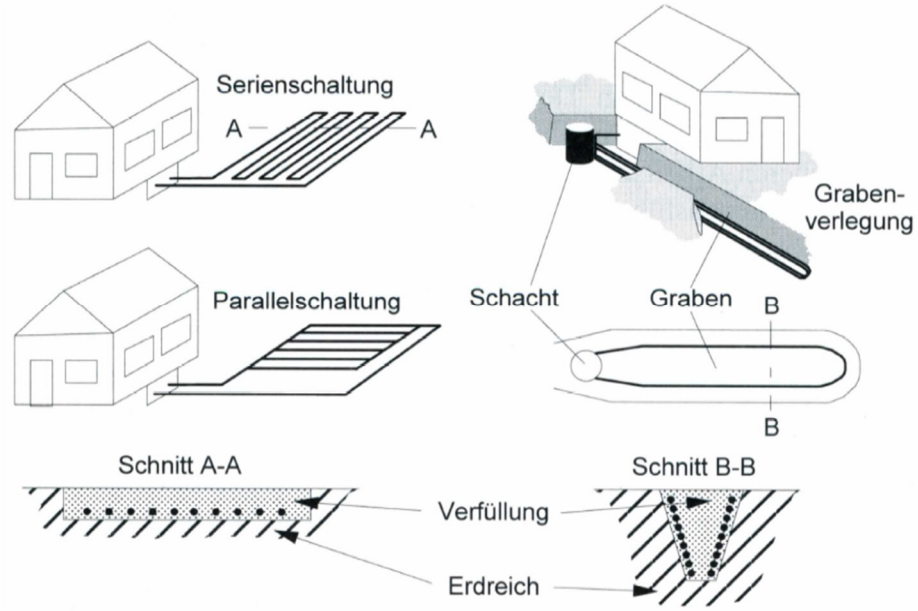


Abb. aus Kaltschmitt/Streicher 2009 Regenerative Energien in Österreich

Horizontale Erdkollektoren

Richtwerte für die durchschnittlich entziehbaren Wärmeleistungen aus dem Erdreich

Bodenart	Wärmeleistungen
Trockener sandiger Boden	10 – 15 W/m^2
Feuchter sandiger Boden	15 – 20 W/m^2
Trockener lehmiger Boden	20 – 25 W/m^2
Feuchter lehmiger Boden	25 – 30 W/m^2
Grundwasserführender Boden	30 – 35 W/m^2

Tabelle aus Kaltschmitt/Streicher (2009)

Herstellung von horizontalen Erdkollektoren
für Sole-Wasser oder Direktverdampfer-Wärmepumpen

Herstellung von horizontalen Erdkollektoren
für Sole-Wasser oder Direktverdampfer-Wärmepumpen

Herstellung von horizontalen Erdkollektoren
für Sole-Wasser oder Direktverdampfer-Wärmepumpen

Korbkollektor

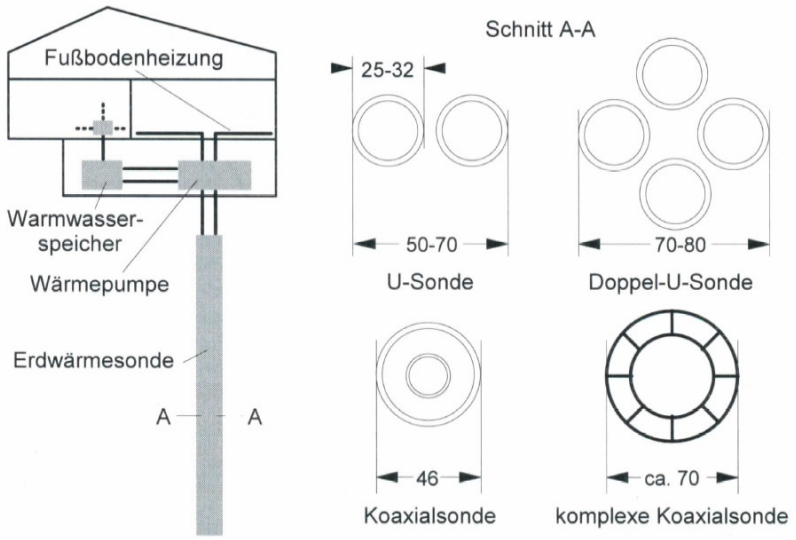
Grabenkollektor

Spiralkollektor

Korbkollektor

Vertikale Erdsonden für Sole/Wasser Wärmepumpen

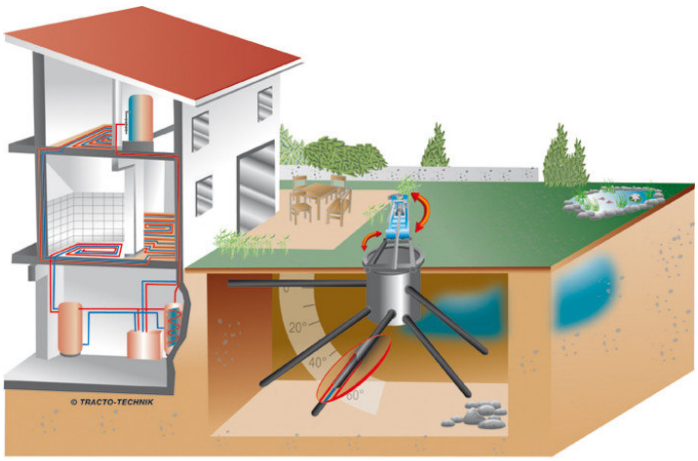
Tiefensonden ca. 60-120m



Erdsondentypen

Abbildung aus Kaltschmitt/Streicher (2009)

Vertikale Erdsonden für Sole/Wasser Wärmepumpen



Strahlenförmige Erdsonden

Vertikale Erdsonden für Sole/Wasser Wärmepumpen

Richtwerte für die entziehbare Wärmeleistung
pro Laufmeter Sondenlänge

Allgemeine Richtwerte	
Schlechter Untergrund (trockene Lockergesteine)	ca. 20 W/m
Festgesteins-Untergrund, wassergesättigte Lockergesteine	ca. 50 W/m
Festgestein mit hoher Wärmeleitfähigkeit	ca. 70 W/m
Einzelne Gesteine[a]	
Kies, Sand, trocken	< 20 W/m
Kies, Sand, wasserführend	55 – 65 W/m
Ton, Lehm, feucht	30 – 40 W/m
Kalkstein (massiv)	45 – 60 W/m
Sandstein	55 – 65 W/m
Saure Magmatite (z. B. Granit)	55 – 70 W/m
Basische Magmatite (z. B. Basalt)	35 – 55 W/m
Gneis	60 – 70 W/m
Kies und Sand (starker Grundwasserfluss)	80 – 100 W/m

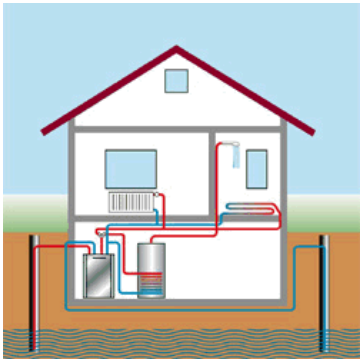
[a] die Werte können durch die Gesteinsausbildung wie Klüftung, Schieferung, Verwitterung erheblich schwanken

Tabelle aus Kaltschmitt/Streicher (2009)

Herstellung von vertikalen Erdsonden

Herstellung von vertikalen Erdsonden

Wärmequelle Grundwasser für Wasser/Wasser-Wärmepumpen



Grundwasser
Wasser-Wasser
Wärmepumpen

Gegrabener
Brunnenschacht, befestigt
mit Betonringen

Brunnenbohrung

Achtung auf:

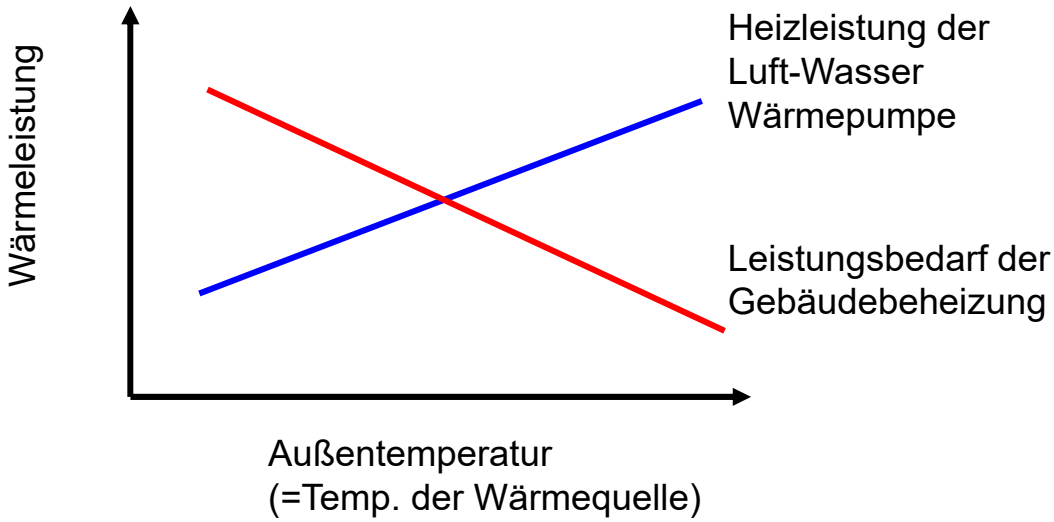
- Ausreichende Wassermenge (Pumpversuche)
- Wasserqualität (physikalisch/chemische Analyse)
- Wasserrechtliche Bewilligung
- Förder- und Schluckbrunnen erforderlich (Achtung auf hydr. Kurzschluss!)

Wärmequelle Luft für Luft/Wasser-Wärmepumpen

Luftkollektoren
Luft-Wasser Wärmepumpen
Achtung auf Problemfeld
Vereisung/Abtauen

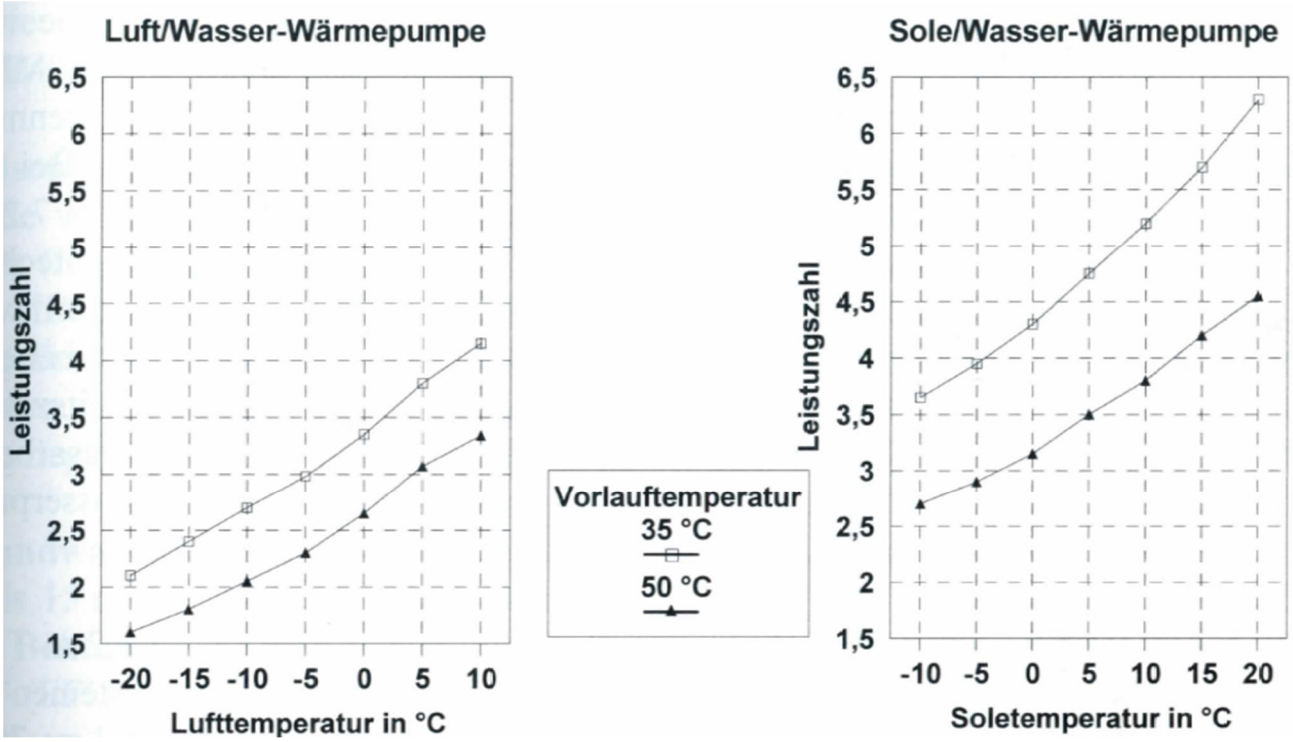
Lüftungswärmepumpen
(Kompaktanlagen im
Passivhaus)
Luft-Luft
Wärmepumpen

Strategisches Problem der Wärmequelle Außenluft



Dimensionierung der Wärmepumpe?
Bei hohem Vorlauftemperaturbedarf haben Luft/Wasser-Systeme geringe Jahresarbeitszahlen!

Leistungszahlen in Abhängigkeit der Wärmequellentemperatur

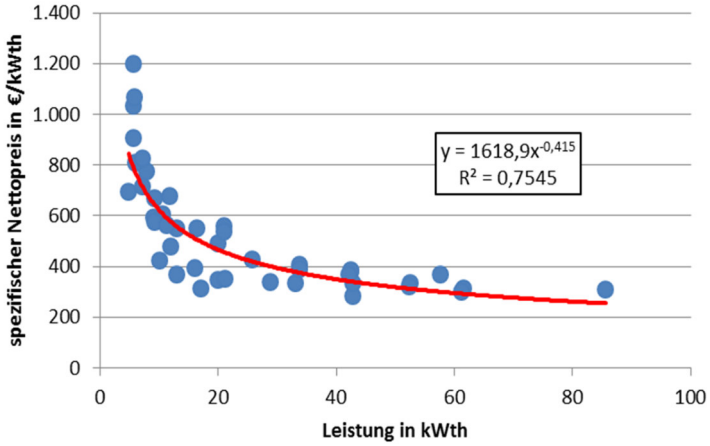


Abbildungen aus Kaltschmitt/Streicher (2009)

Eignungsfaktoren für den energieeffizienten Einsatz von Wärmepumpen zur Bereitstellung von Raumwärme und die Brauchwassererwärmung

- Gute Gebäudeenergiekennzahlen (<60kWh/m²a)
- Niedertemperatur-Wärmeverteilsystem
- = niedriger Heizungsvorlauftemperaturbedarf
- günstiges Verhältnis Heizwärme/Brauchwasserwärme
- hochwertige Wärmequelle
- Messung der Nutzwärme und der Antriebsenergie zur Verifizierung des COP und der JAZ zur Systemoptimierung

Investitionskosten
für das Wärmepumpenaggregat ohne Wärmequellensystem



Spezifische Preise von Sole-Wasser Wärmepumpenaggregaten in Abhängigkeit von der thermischen Leistung der Aggregate (ohne Wärmequellensystem, ohne Lieferung und Installation, exkl. Ust, Erhebung 2012). Quelle: Biermayr et al. (2013), Projekt GEOSOL

Investitionskosten
für vertikale Erdsonden und horizontale Erdkollektoren

Bohrungen im Spülbohrverfahren (älteres Verfahren): ca. 62.- €/m (exkl. Ust.)
Bohrungen im Trockenbohrverfahren: 40.- €/m bis 50.- €/m (exkl. Ust.)

Die spezifischen Preise gelten bis ca. 150 m Tiefe als konstant, bei tieferen Bohrungen überproportional höhere Preise pro Meter!

Horizontale Erdkollektoren: 10.- €/m² bis 25.- €/m² (exkl. Ust.)
große Bandbreite ergibt sich aus Standortqualitäten (Material des Untergrundes), Bedarf an Einsandung und Fremdmaterialien, Rahmenbedingungen der Material-logistik (Erdlagerung) etc.

Investitionskosten Wärmepumpensysteme

Beispiele für die Leistungsklasse 8kW$_{th}$

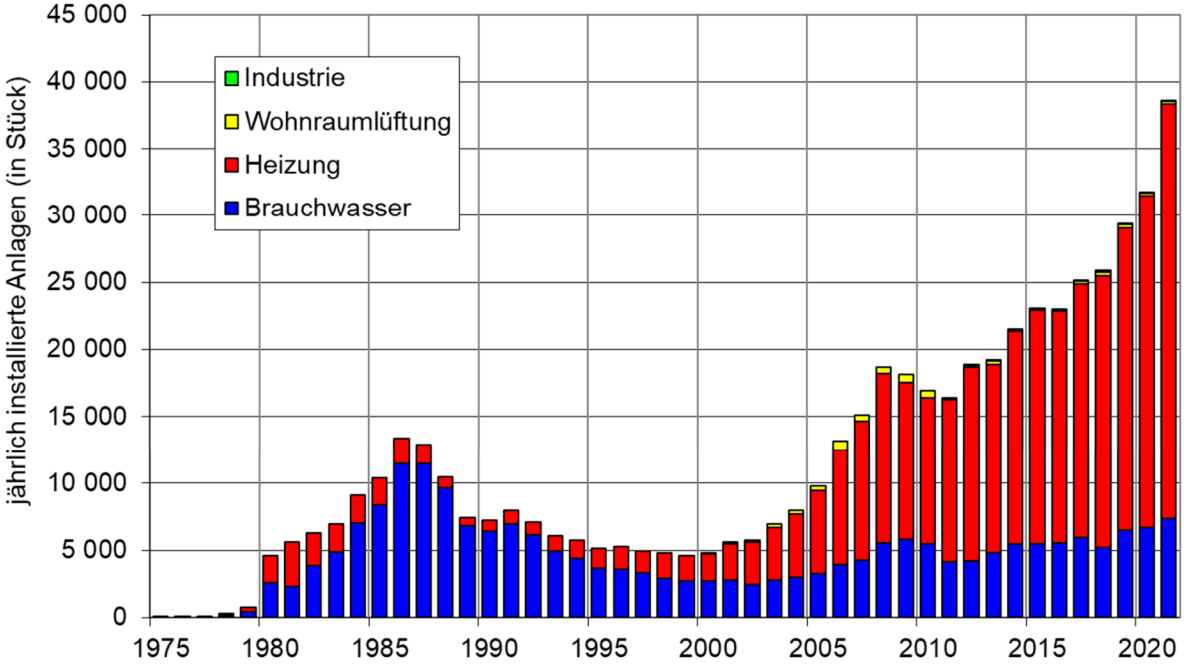
Endkundenpreise Kombianlagen exkl. Ust in Euro für Leistungsklasse 8 kW$_{th}$				
Kostenposition	Luft-Wasser	Wasser-Wasser	Sole-Wasser-Erdkollektor	Sole-Wasser-vertikale Sonden
Wärmepumpe	6390	5132	4841	4841
Wärmequelle	2940	2924	3300	6912
Installation etc.	4200	14500	5100	5100
Systempreis	**13530**	**22556**	**13241**	**16853**

Wärmepumpenmarkt - historische Entwicklung

- 1824: Carnot publiziert erste Grundlagen
- 1834: Perkins baut erste Kompressionskältemaschine
- 1852: Kelvin weist nach, dass dieses Prinzip auch für Heizanwendungen anwendbar ist
- 1919: Schweiz: wegen Brennstoffknappheit wird großflächiger Einsatz der WP-Technologie erwogen
- 1938: Erste große WP-Anlage in Zürich
- 1972: Waterkotte baut erste WP-Anlage in Deutschland
- 1990er: Die seit ca. 1930 eingesetzten FCKW Kältemittel werden durch Propan, Propylen, Ammoniak u. Kohlendioxid abgelöst.
- ab 2000: Durch die Errichtung von energieeffizienten Gebäuden wird ein breiter und energieeffizienter Einsatz von WP induziert.

Quelle: http://de.wikipedia.org

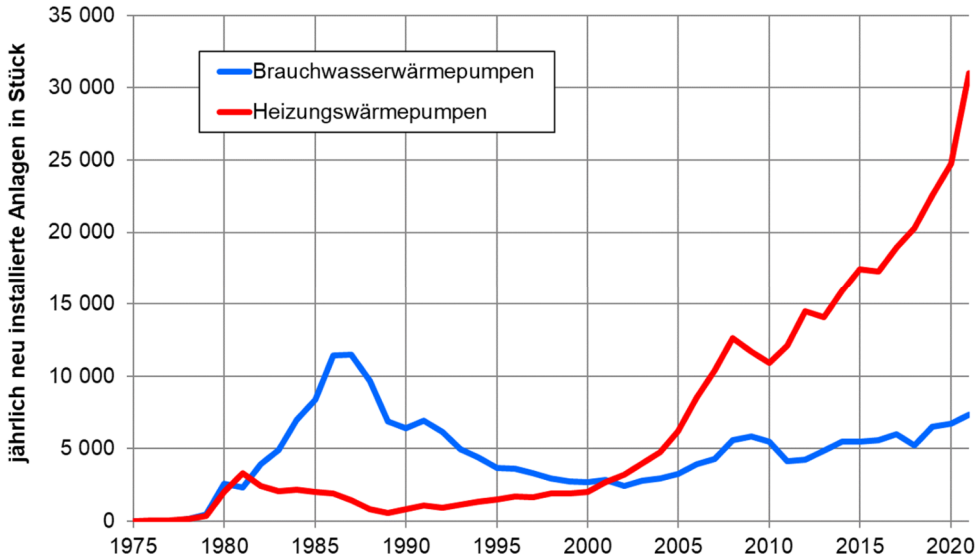
Wärmepumpenmarkt in Österreich



Quelle: Biermayr et al. (2022), Innovative Energietechnologien in Österreich

Wärmepumpen-Verkaufszahlen im Inlandsmarkt pro Jahr

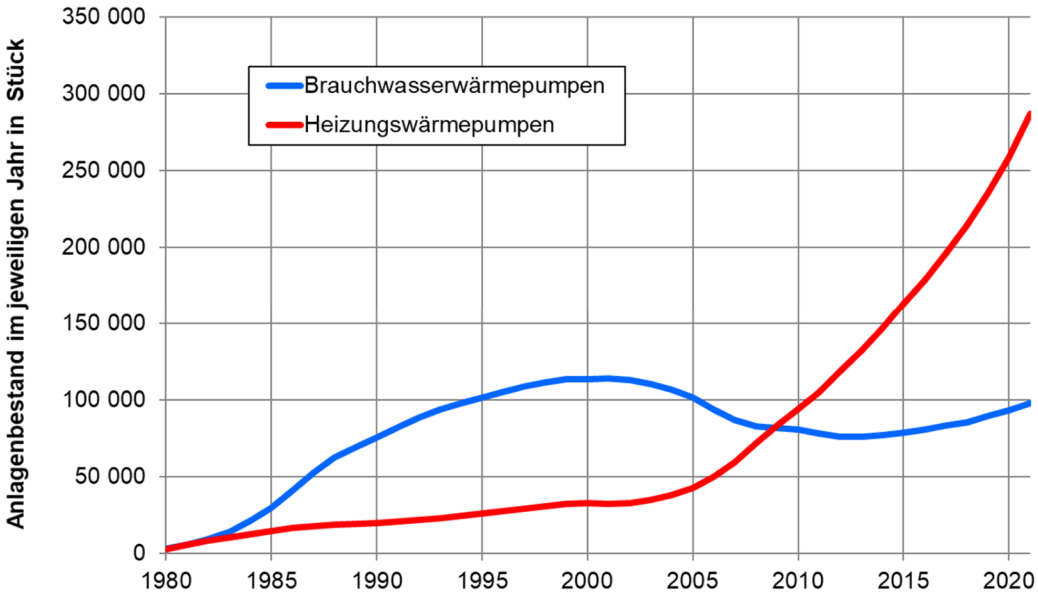
Heizungs- und Brauchwasserwärmepumpen



Quelle: Biermayr et al. (2022), Innovative Energietechnologien in Österreich

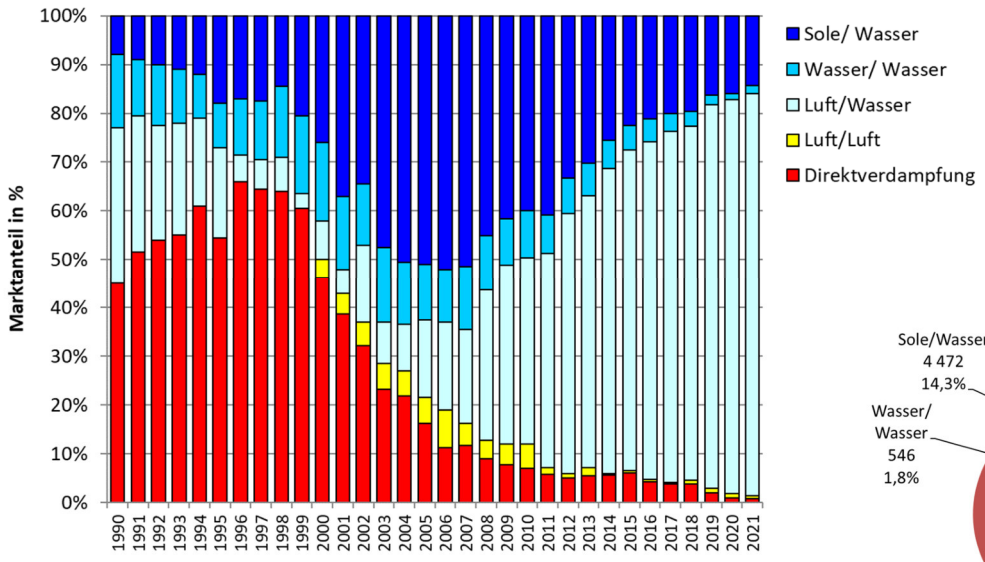
Wärmepumpen-Bestandszahlen (in Betrieb) in Österreich

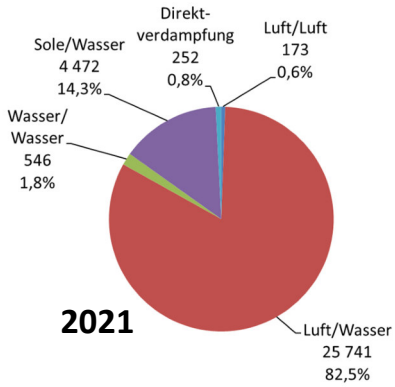
Heizungs- und Brauchwasserwärmepumpen



Quelle: Biermayr et al. (2022), Innovative Energietechnologien in Österreich

Wärmequellensysteme in Österreich





Quelle: Biermayr et al. (2022), Innovative Energietechnologien in Österreich

Thermal response Test

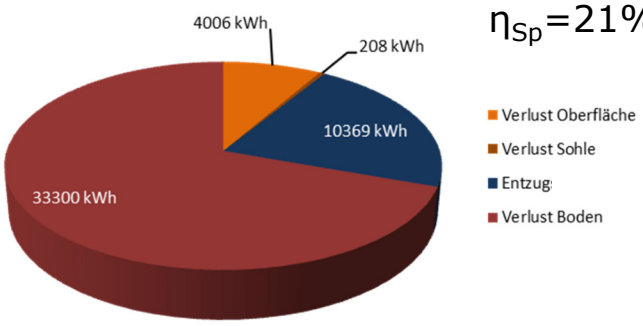
Thermal Response Test: Ist ein in situ Test zur Bestimmung der thermodynamischen Parameter des Untergrundes. Ein Fluid wird mit konstanter Temp. in den Vorlauf gepumpt, die Rücklauftemperatur wird als Funktion der Zeit gemessen. Rückschluss auf Wärmeübergangswiderstand, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität ist möglich. Nachteile: Kann erst an der fertiggestellten Sonde durchgeführt werden. Zweck: zur Optimierung der Anlage von Sondenfeldern.

Bildnachweis: Geologische Bundesanstalt (2013)

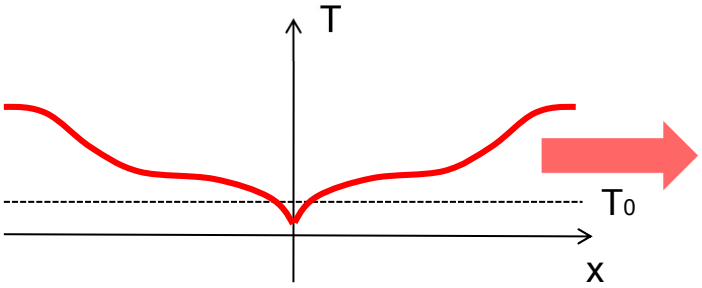
Vertikale Erdsonden als Wärmespeicher

Speicherwirkungsgrad einer Einzelsonde ist gering!

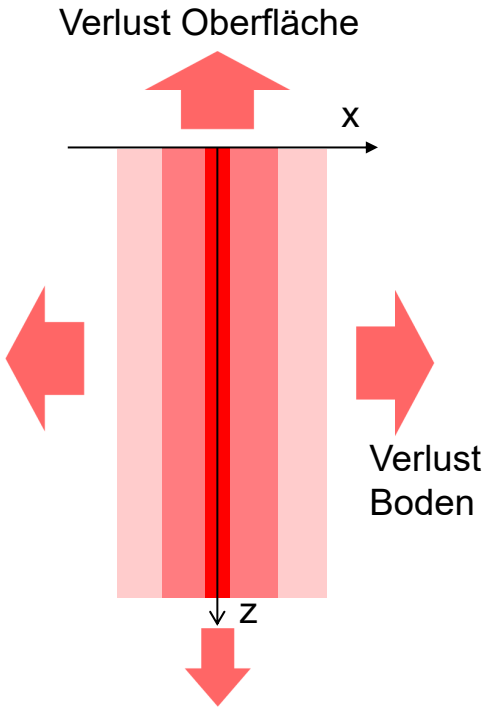
Bilanz: Simulationsjahr 5



$\eta_{Sp}=21\%$



ablaufende saisonale Wärmewelle

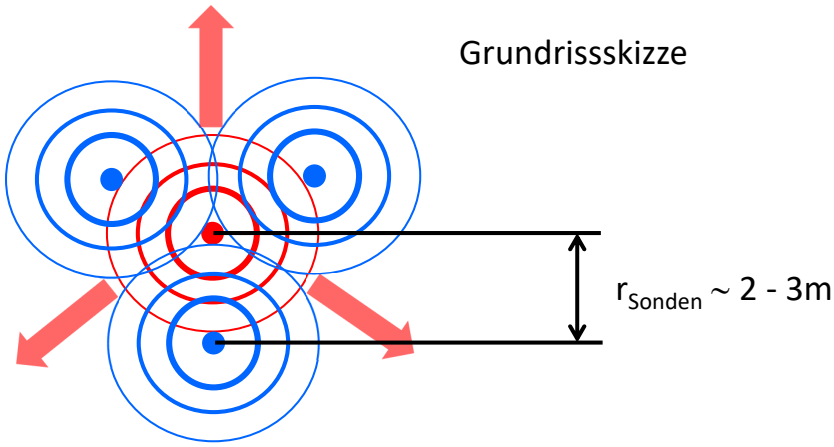


Vertikale Erdsonden als Wärmespeicher

Ansätze zur Steigerung des Speicherwirkungsgrades

Multiple Sonden
(Sondenfeld)

Grundrissskizze

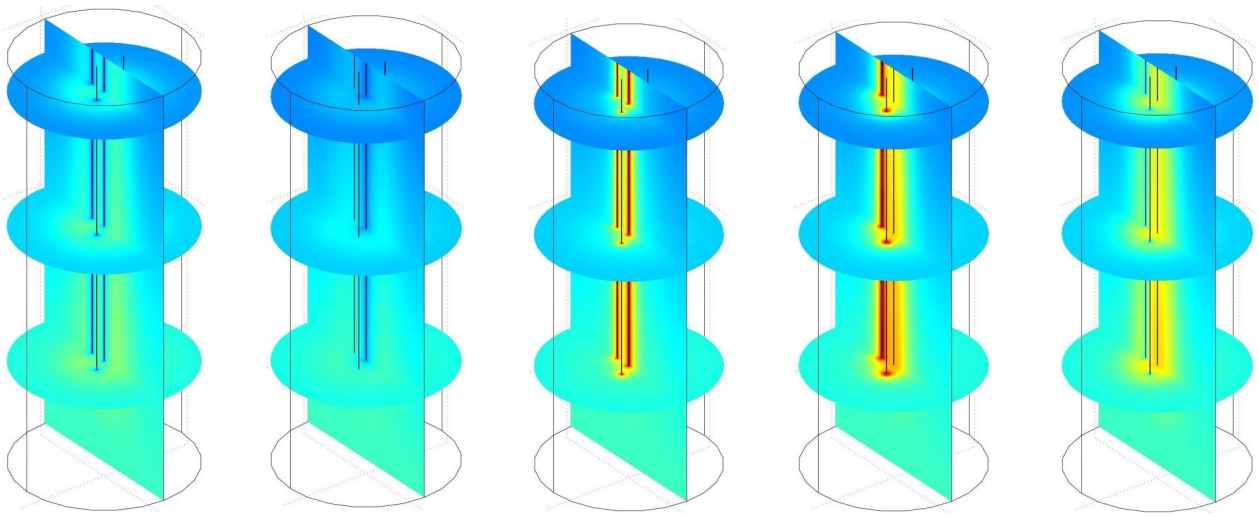


Ansätze:

- Verhältnis Lade- zu Entladesonden: ca. 1:3
- Optimaler Sondenabstand: ca. 2 - 3 Meter (materialabhängig)
- Hohes Potenzial in der Optimierung der Be- u. Entladestrategien
- Weitere Verbesserungen durch vertikale Geometrie und Isolation

Vertikale Erdsonden als Wärmespeicher

dynamische Simulation eines 4-Sonden Feldes



1. Jänner | 14. März | 26. Mai | 7. August | 19. Oktober

Vertikale Erdsonden als Wärmespeicher

Eignungsfaktoren

- Oberflächennaher Flachkollektor ist keine Option (Oberflächenverluste).
- Einzel-Vertikalsonden haben hohe Verluste.
- Fließendes Grundwasser ist KO – Kriterium.
- Die therm. Speicherladung ist unproblematisch, die Leistung der Entladung ist zu prüfen.
- Geringer Raumbedarf, Sondenabstand einzelne Meter.
- Starke Erwärmung des Untergrundes nur im unmittelbaren Sonden-Nahbereich
- Die technische Machbarkeit ist bei passenden Randbedingungen gegeben.

Übungsbeispiel: Die Heizwärmeversorgung eines neuen Mehrfamilienhauses mit Fußbodenheizung, einem spezifischen HWB von 35 kWh/(m^2*a) und einer Heizlast von 100 kW soll mittels Sole/Wasser Wärmepumpe mit vertikalen Erdsonden bewerkstelligt werden. Der Untergrund besteht aus Sandstein. Wie dimensionieren Sie die Sonde(n) für das Wärmequellensystem?

1. **Ermittlung der Leistungszahl der WP**: Für die Dimensionierung wird die Leistungszahl ε bei der maximalen Leistung benötigt, d.h. bei T_a=T_{na}. Die Vorlauftemperatur der Fußbodenheizung beträgt bei $T_{na} \rightarrow T_{VL}$=35°C (realistische Annahme für Fußbodenheizung). Die ungestörte Erdtemperatur beträgt für vert. Sonden in Tieflagen in AT T_{Erde}=9°C, siehe Folie 56. Die Soletemperatur beträgt aufgrund der saisonalen Vorbelastung und der erforderlichen Temperaturspreizung in der Sonde T_{Sole}=0°C. In diesem Betriebspunkt folgt aus dem Diagramm auf Folie 71, rechts → ε=4,3.
2. **Dimensionierung der Heizleistung**: Wahl des Überdimensionierungsfaktors $f_{ÜK}$=1,2 → P_{HZ}=P_H*$f_{ÜK}$ =120 kW
3. **Ermittlung der Wärmequellenleistung**: $P_{HZ} = P_{Umwelt} + P_{Antrieb}$

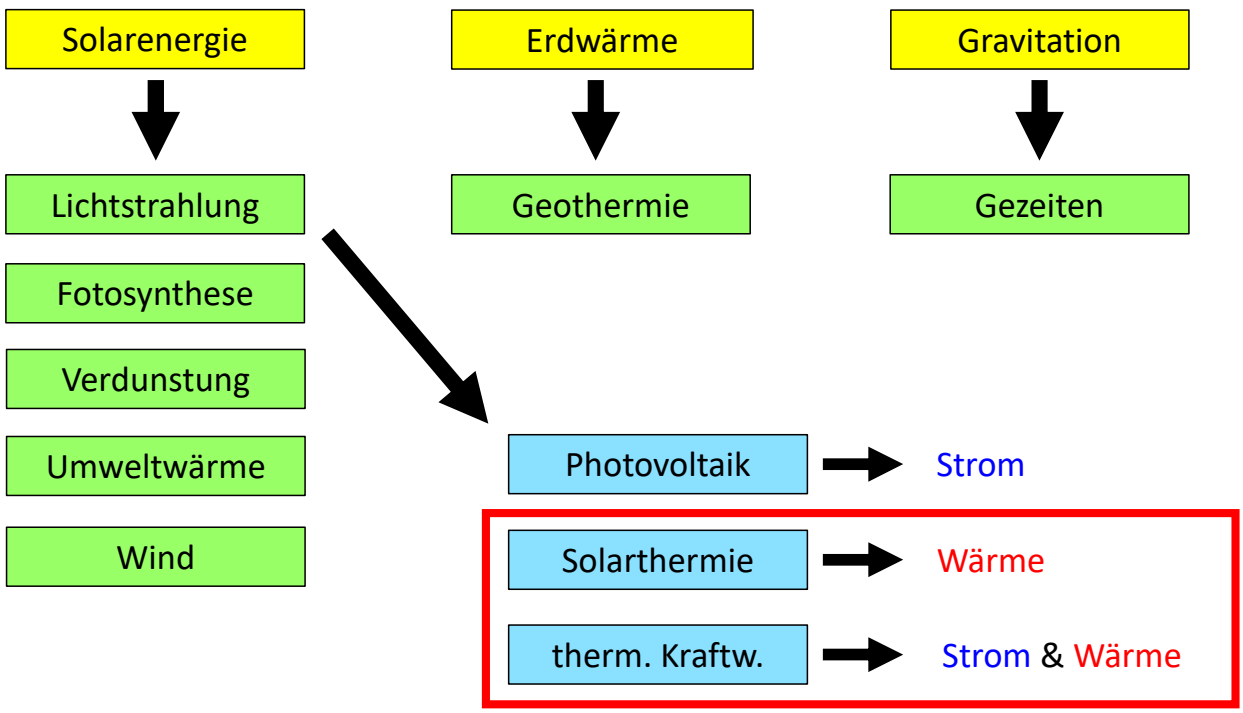
$$\varepsilon = \frac{P_{Umwelt} + P_{Antrieb}}{P_{Antrieb}} = \frac{P_{HZ}}{P_{Antrieb}} \qquad P_{Antrieb} = \frac{P_{HZ}}{\varepsilon} = \frac{120kW}{4{,}3} = 27{,}9kW$$

$$P_{Umwelt} = P_{HZ} - P_{Antrieb} = 120kW - 27{,}9kW = 92{,}1kW$$

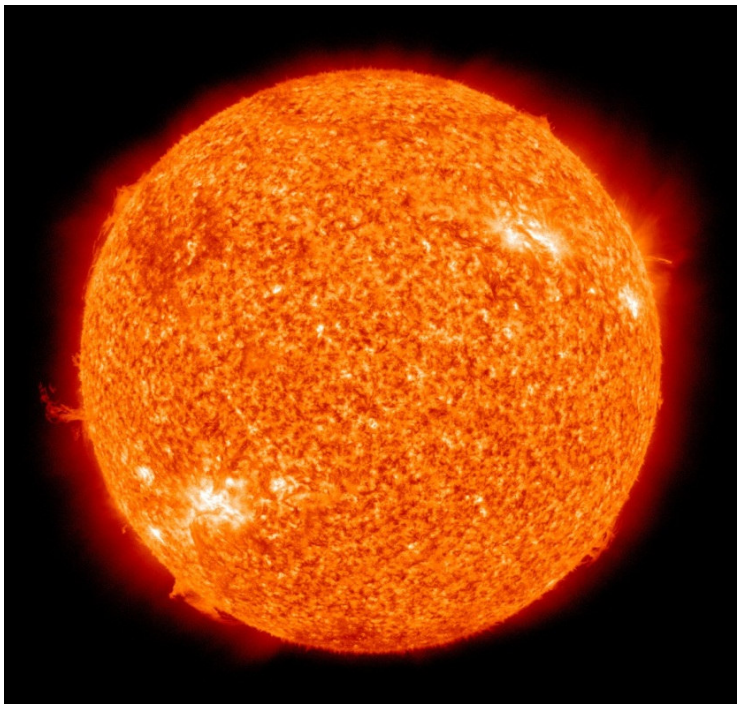
Übungsbeispiel Fortsetzung:

4. **Dimensionierung der Sonden**: Die Auslegungsleistung beträgt somit 92,1 kW; der Untergrund besteht aus Sandstein → der Erwartungswert für die spezifische Sondenleistung beträgt 60 W/m (siehe Tabelle auf Folie 65). Es resultiert somit eine erforderliche Gesamt-Sondenlänge von 92100 W/60 W/m = 1535 m. Bei einer wirtschaftlich günstigen Bohrtiefe von ca. 100 m pro Sonde ergibt dies eine Anzahl von 15 Bohrungen.
5. **Optimierung der Wirtschaftlichkeit**: Bei reinem Entnahmebetrieb sollte ein großzügiger Bohrlochabstand von >5 m realisiert werden, um eine Kommunikation der Sonden auszuschließen (z.B. Anordnung rund um das Gebäude). Steht dieser Platz nicht zur Verfügung, kann auch tiefer gebohrt werden, um die erforderliche Anzahl und damit den Flächenbedarf zu reduzieren. Ab 150 m Bohrlochtiefe muss jedoch mit nichtlinear steigenden Bohrkosten gerechnet werden. Weiters könnte ein Thermal Response Test durchgeführt werden, um einerseits die Leistungsfähigkeit des Sondenfeldes sicherzustellen und andererseits eine (teure) Überdimensionierung zu vermeiden.

Erneuerbare Energiequelle für die Solarthermie



Solarstrahlung



Boltzmannsches Strahlungsgesetz:

$P = \sigma * A * T^4$

$\sigma = 5{,}67 * 10^{-8}\ W/(m^2K^4)$

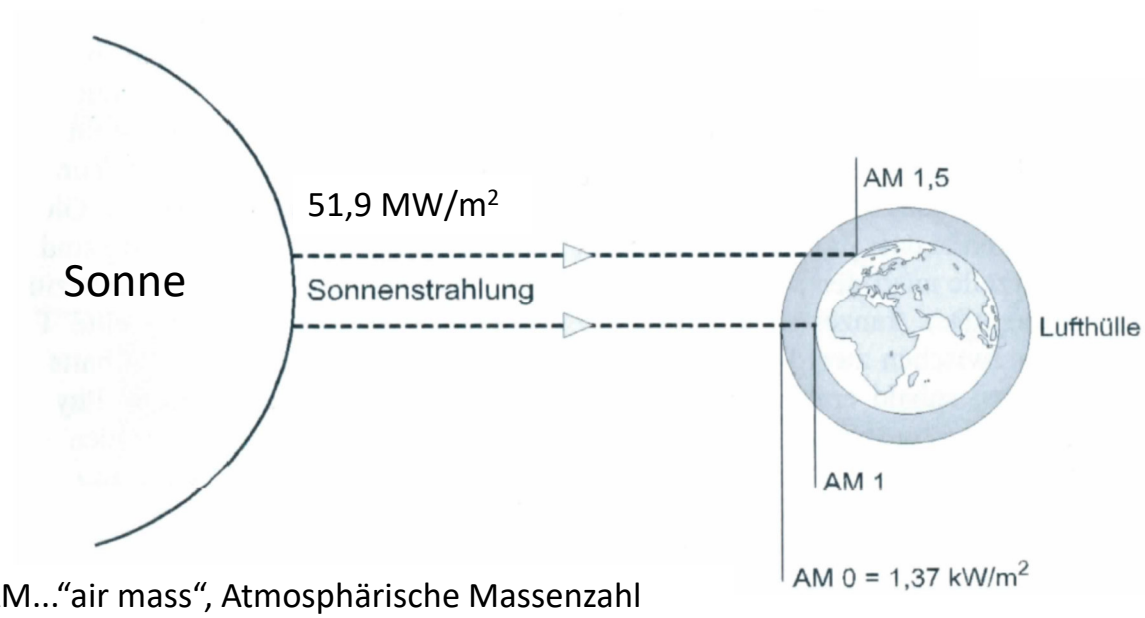
$T_{Sonne,innen}$ = ca. $15{,}6 * 10^6$ °C

$T_{Sonne,Oberfl.}$ = ca. 5.500 °C

$\Rightarrow P_{Sonne,\ spez.} = 51{,}9\ MW/m^2$

Extraterrestrische und terrestrische Solarstrahlung

Quelle: Geist (2011), adaptiert



AM..."air mass", Atmosphärische Massenzahl
AM 0 ... Weltraum
AM 1 ... senkrecht am Äquator auf NN=0m
AM 1,5 ... 41,5° Elevation auf NN=0m

Solarstrahlung, Solarkonstante

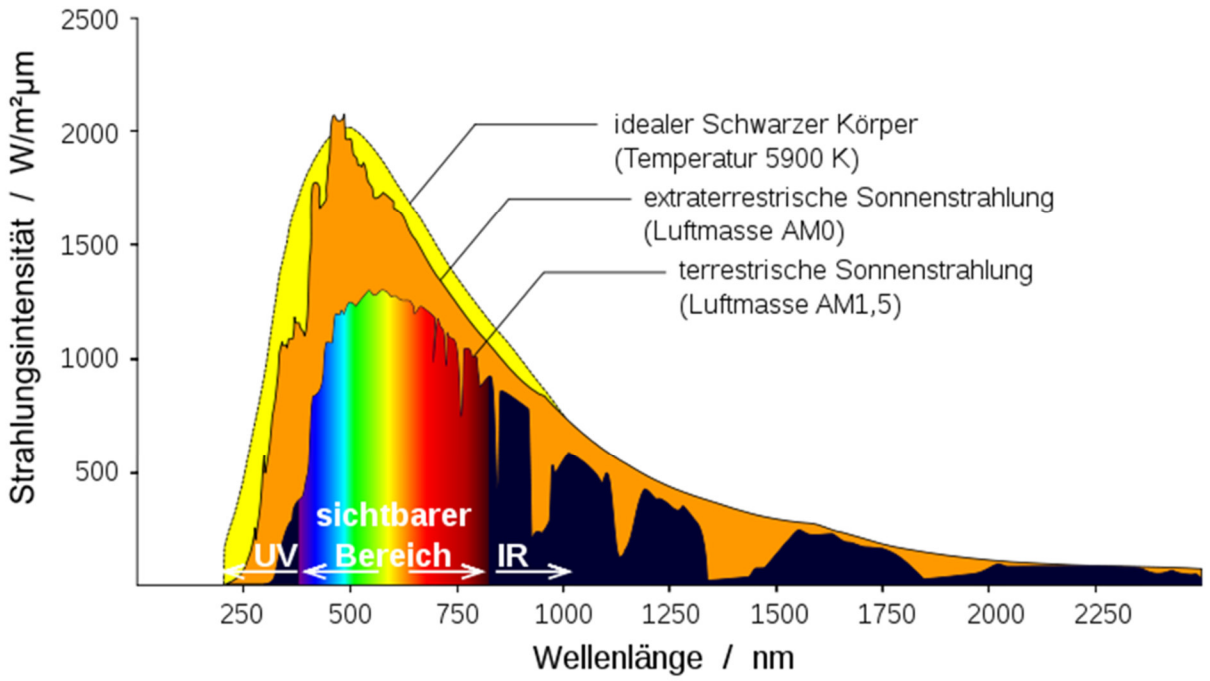
Solarkonstante E_0 = 1367 W/m^2
(langjährig gemittelte extraterrestrische Sonnenbestrahlungsstärke der Erde)

Strahlungsleistung auf die Erde PE = 174 PW
(=174*10^{15} W; vgl. 174 Mio. AKW mit 1 GW_{el})

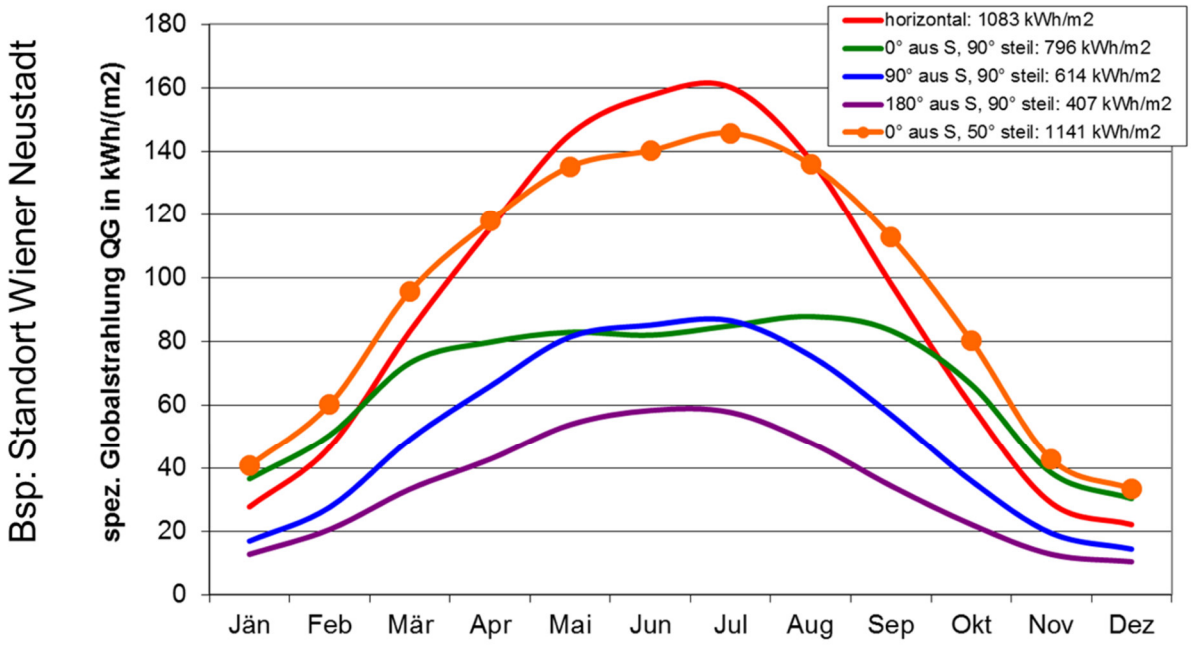
Globalstrahlung = Direktstrahlung + Diffusstrahlung

Globalstrahlungssumme Wr. Neustadt Q_G=1083 kWh/(m^{2}a)
(auf die horizontale Fläche)

Solarstrahlungsspektrum



Jahresgang der Globalstrahlung



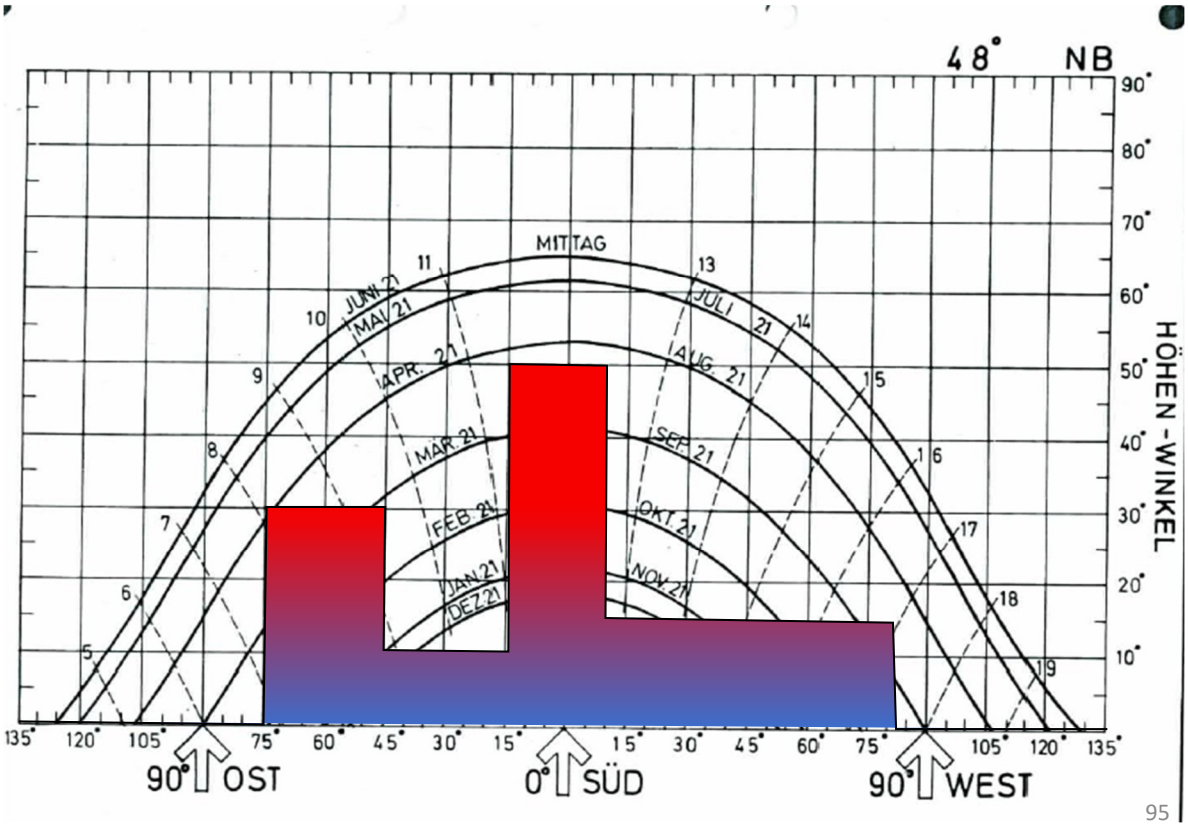
Jahresgang der Globalstrahlung

Bsp: Standort Wiener Neustadt

Monat	horizontal: 1083 kWh/m²	0° aus S, 90° steil: 796 kWh/m²	90° aus S, 90° steil: 614 kWh/m²	180° aus S, 90° steil: 407 kWh/m²	0° aus S, 50° steil: 1141 kWh/m²
Jän	27,7	36,6	16,9	12,7	40,7
Feb	46,7	50,4	27,6	20,5	60,2
Mär	83,2	73,2	49,1	33,3	95,7
Apr	115,6	79,8	65,9	42,8	117,9
Mai	145,4	82,9	81,4	53,8	135,2
Jun	157,6	82,0	85,1	58,3	140,3
Jul	160,2	84,9	86,5	57,7	145,8
Aug	137,2	87,8	75,5	48,0	135,8
Sep	98,1	83,4	56,9	34,3	112,8
Okt	59,9	66,5	35,9	22,2	80,3
Nov	28,9	38,4	19,4	12,7	42,8
Dez	22,1	30,3	14,4	10,4	33,4
Summen	**1082,6**	**796,1**	**614,5**	**406,7**	**1140,9**

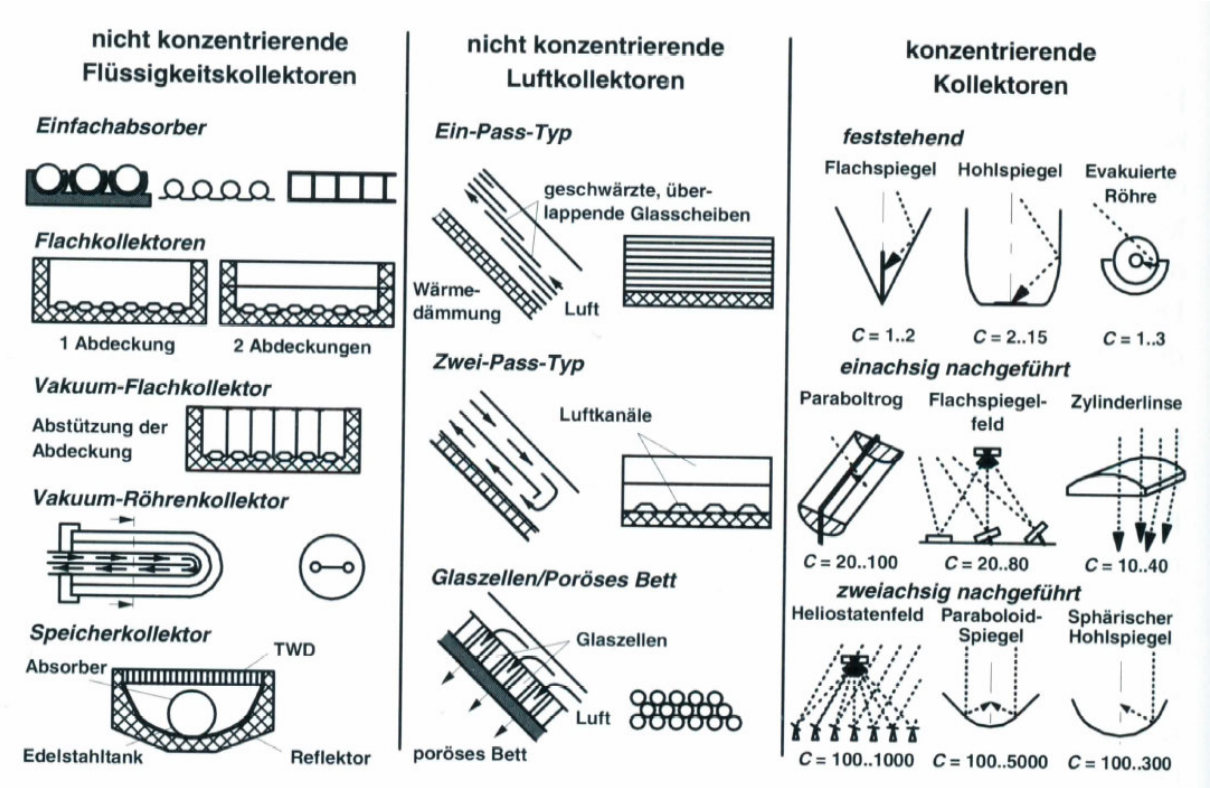
Sonnenwegdiagramm

Quelle: ÖNORM M 7701



Kollektortypologie

Quelle: Kaltschmitt et al. 2005 „Erneuerbare Energien“

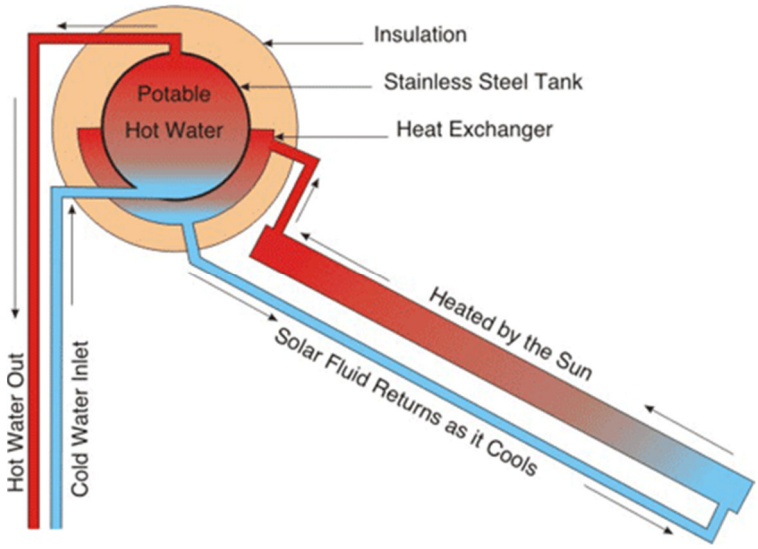


Nicht konzentrierende Flüssigkeitskollektoren

Thermosyphonanlage zur Warmwasserbereitung
(vor allem in warmen Klimaten)
3-6 m^2 Kollektorfläche

Aufdach-Flachkollektoren zur Warmwasserbereitung
(in kälteren Klimaten)
6-8 m^2 Kollektorfläche

Nicht konzentrierende Flüssigkeitskollektoren
Thermosyphonanlagen



Nicht konzentrierende Flüssigkeitskollektoren
Vakuumrohrkollektoren

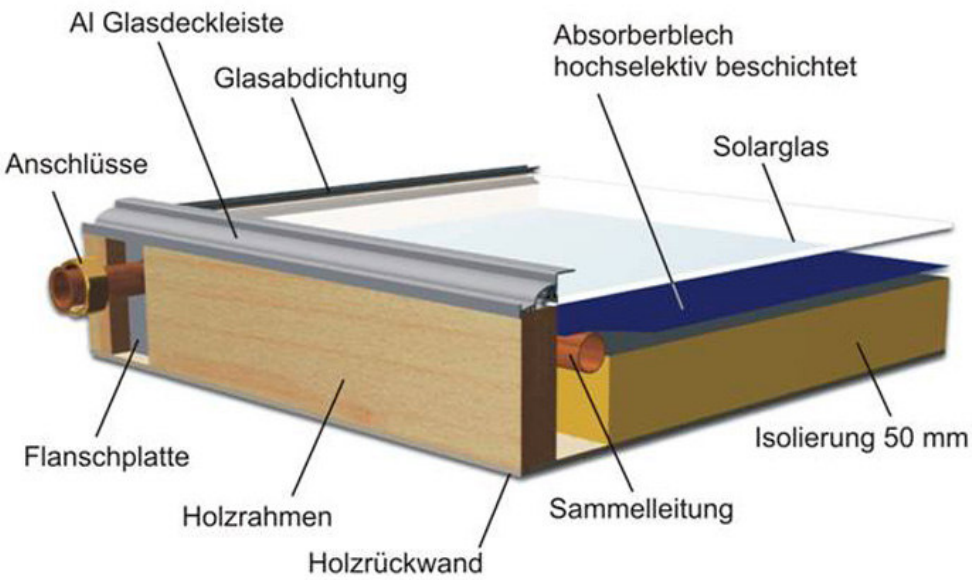
Bei hohem Temperaturbedarf
oder/und wenig Platz

Nicht konzentrierende Flüssigkeitskollektoren
Verglaste Flachkollektoren

Einfamilienhaus:
Brauchwassererwärmung: 6-10 m^2
+ teilsolare Heizung: 12 – 40 m^2

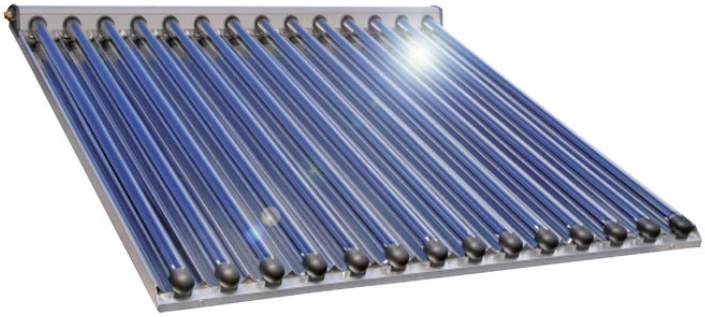
Mehrfamilienhaus:
je nach Anzahl der Wohneinheiten
und Heizlast

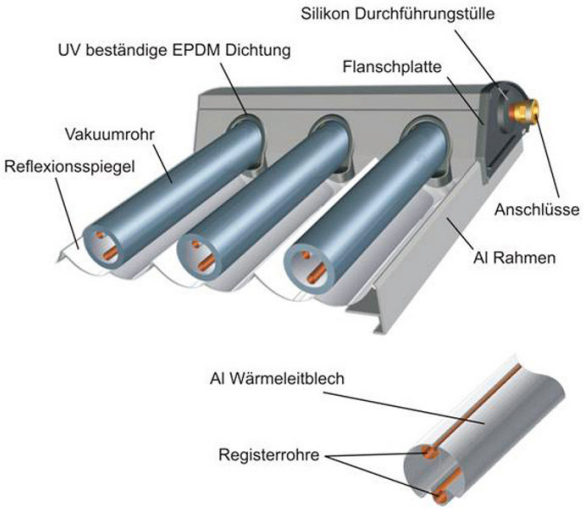
Nicht konzentrierende Flüssigkeitskollektoren
Verglaste Flachkollektoren



Bildnachweis: Greenonetec Wannenkollektor FK 5000 Serie

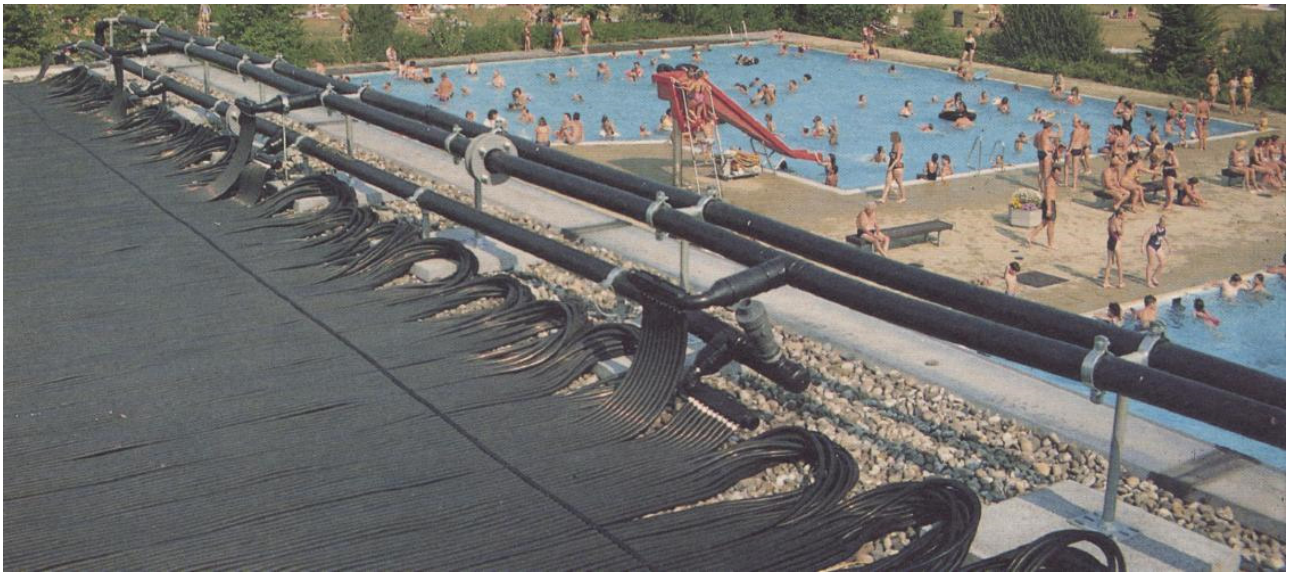
Nicht konzentrierende Flüssigkeitskollektoren
Vakuumrohrkollektoren





Bildnachweis: Greenonetec Vakuumröhrenkollektor VK 4000 Serie

Nicht konzentrierende Flüssigkeitskollektoren: Schwimmbadabsorber



Nicht konzentrierende Flüssigkeitskollektoren Kennwerte

Tabelle 4.3 Kennwerte verschiedener nichtstrahlungskonzentrierender Flüssigkeitskollektorbauarten (u. a. /4-1/, /4-2/, /4-4/)

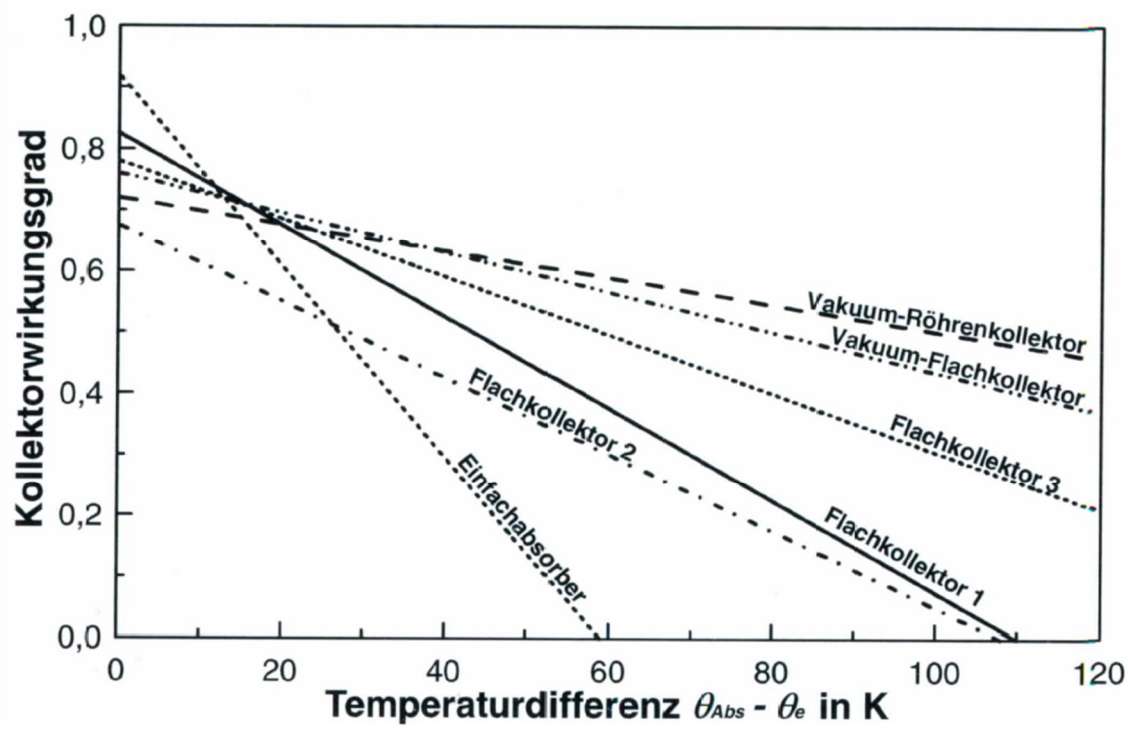
	Optischer Wirkungsgrad	Thermischer Verlustfaktor in W/(m² K)	Typ. Temperaturbereich[a] in °C	Aufwand für Herstellung	Typische Anwendung
Einfachabsorber[b]	0,92	12 – 17	0 – 30	klein	FB
Flachkollektor 1[c]	0,80 – 0,85	5 – 7	20 – 80	mittel	WW
Flachkollektor 2[d]	0,65 – 0,70	4 – 6	20 – 80	mittel	WW
Flachkollektor 3[e]	0,75 – 0,81	3,0 – 4,0	20 – 80	mittel	WW, RH
Vakuum-Flachkollektor	0,72 – 0,80	2,4 – 2,8	50 – 120	groß	WW, RH, PW
Vakuum-Röhrenkollektor	0,64 – 0,80	1,5 – 2,0	50 – 120	sehr groß	WW, RH, PW
Speicherkollektor[f]	ca. 0,55	0,55	20 – 70	sehr groß	WW

FB Freibad; WW Trinkwarmwasser; RH Raumheizung; PW Prozesswärme; [a] mittlere Arbeitstemperaturen; [b] schwarz, nicht selektiv, nicht abgedeckt; [c] nicht selektiver Absorber, einfache Abdeckung; [d] nicht selektiver Absorber, zweifache Abdeckung aus Glas und Unterspannfolie; [e] selektiver Absorber, einfache Abdeckung; [f] Prototyp ISE.

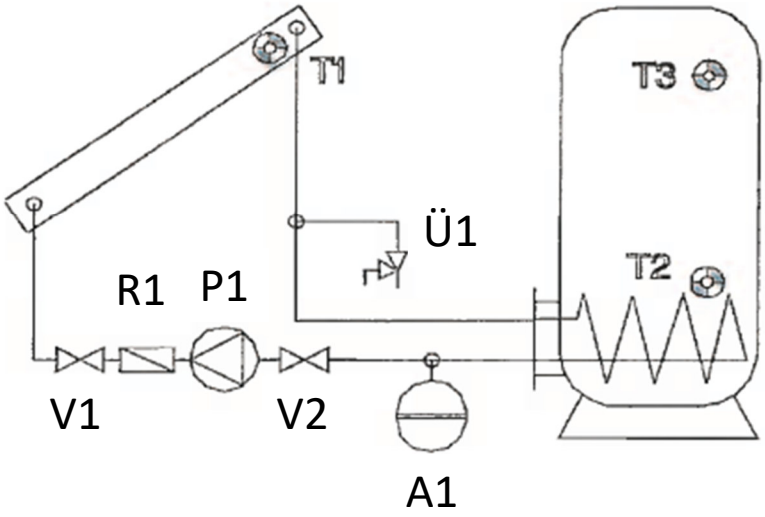
Quelle: Kaltschmitt et al. 2005 „Erneuerbare Energien“

Nicht konzentrierende Flüssigkeitskollektoren
Wirkungsgrade

Quelle: Kaltschmitt et al. 2005 „Erneuerbare Energien“



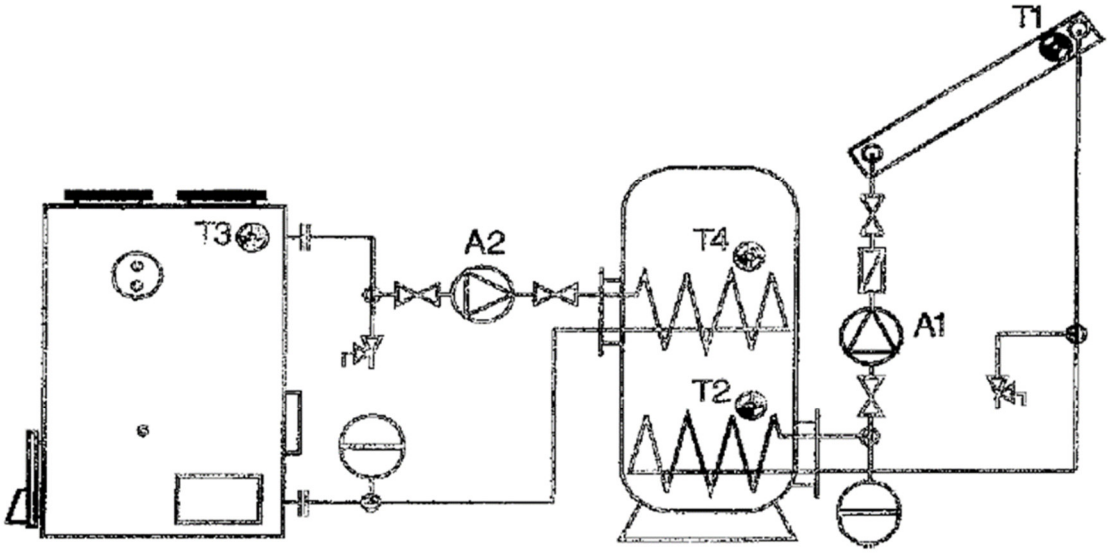
Nicht konzentrierende Flüssigkeitskollektoren
Grundschaltung Brauchwasser/Schwimmbad



T1: Kollektortemperatur
T2: Boilertemperatur unten
T3: Boilertemperatur oben
P1: Pumpe
V1: Absperrventil
V2: Absperrventil
A1: Ausdehnungsgefäß
R1: Rückschlagventil
Ü1: Überdruckventil

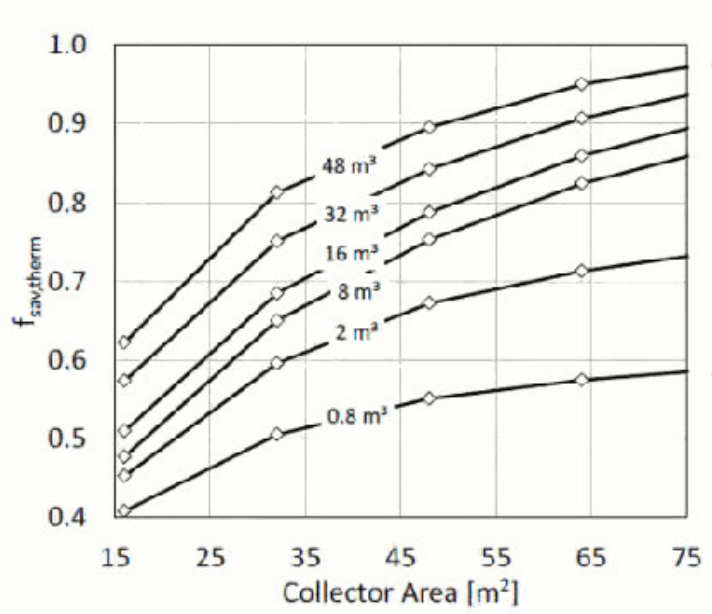
Bildnachweis: Technische Alternative

Nicht konzentrierende Flüssigkeitskollektoren
Grundschaltung Solaranlage u. Kessel auf Speicher



Kesselkreis Solarkreis

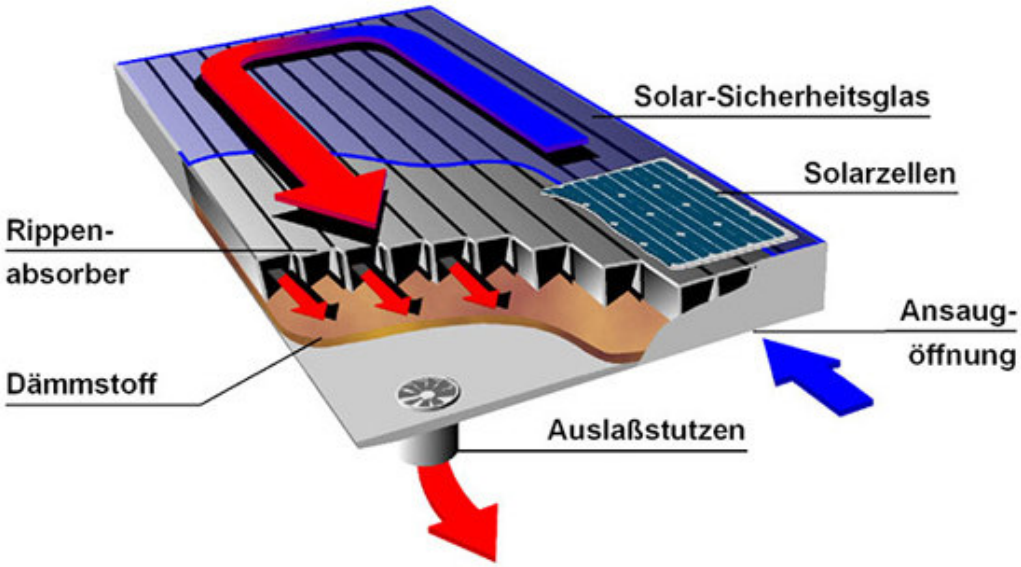
solarer Deckungsgrad einer ST-Kombianlage für Niedrigenergiehaus mit 30 kWh/m²a



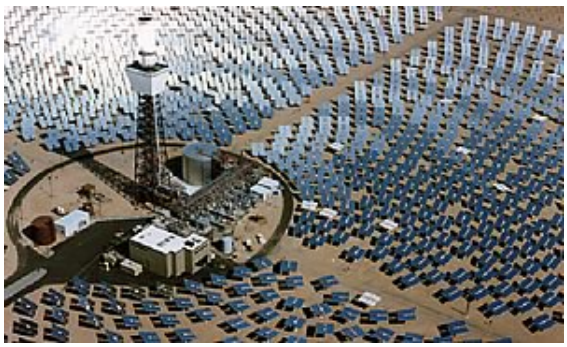
Volumen sensibler Wasser-Wärmespeicher (m^3)

Fazit: monovalente solar-thermische Wärmeversorgung in mitteleuropäischen Klimaten schwierig und auf Basis dezentraler Wasserspeicher unwirtschaftlich. Hoffnung: innovative saisonale Wärmespeicherung

Nicht konzentrierende Luftkollektoren
PV/ST Hybridkollektoren



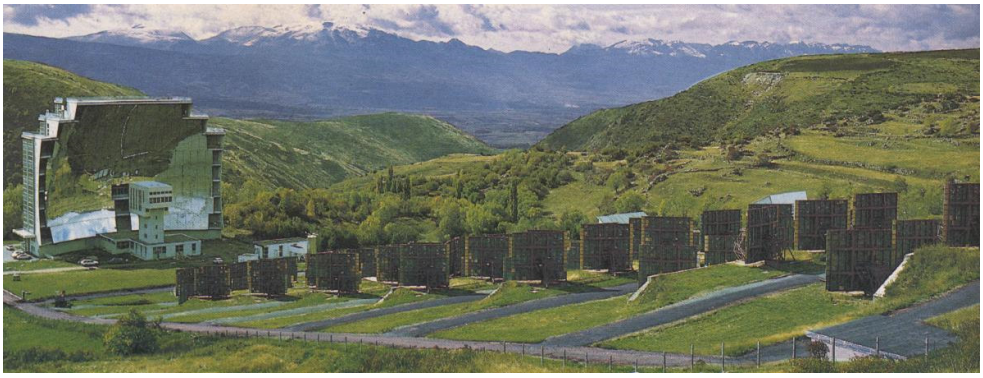
Konzentrierende Kollektoren
Prozesswärme und Kraft-Wärme-Kopplung



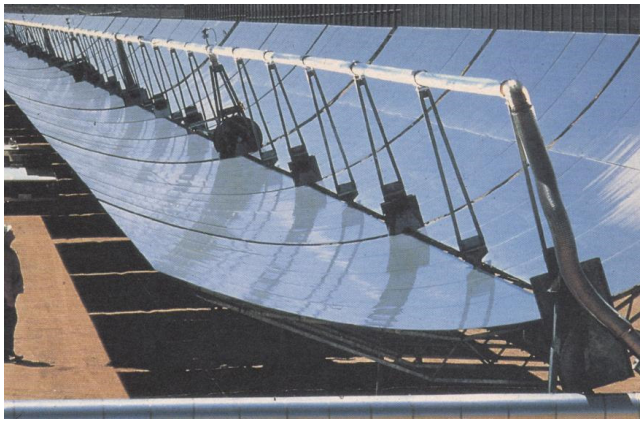
Turm-Solarkraftwerke
Gesamtwirkungsgrad = 13%-15%

Konzentrierende Kollektoren
Prozesswärme und Kraft-Wärme-Kopplung

Parabol-Solarkraftwerke
Gesamtwirkungsgrad = 15%-17%
(links: Stirlingmaschinen)

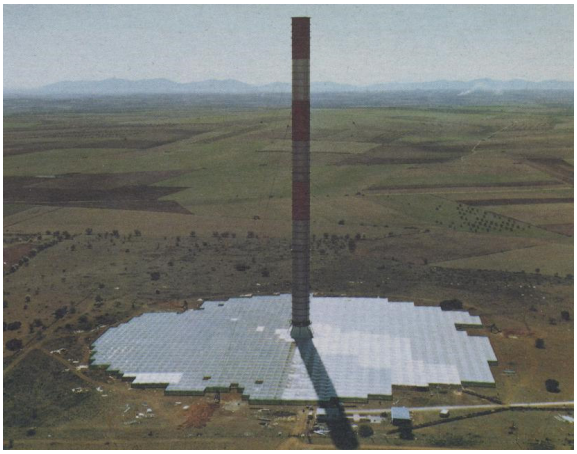


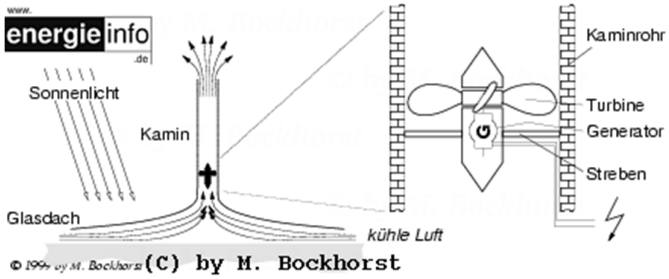
Konzentrierende Kollektoren
Prozesswärme und Kraft-Wärme-Kopplung



Parabol-Rinnen-Solarkraftwerke
Gesamtwirkungsgrad = 13%-15%

Konzentrierende Kollektoren: Aufwindkonzept zur Stromproduktion





Aufwind-Solarkraftwerk: Demonstrationsanlage Manzanares
Gesamtwirkungsgrad = 0,7%-1,2%

Normen zur Auslegung von solarthermischen Anlagen (Brauchwassererwärmung und teilsolares Heizen)

ÖNORM M 7700: Sonnenenergie (Definitionen)

ÖNORM M 7701: Sonnentechnische Anlagen

ÖNORM M 7703: Passive sonnentechnische Anlagen

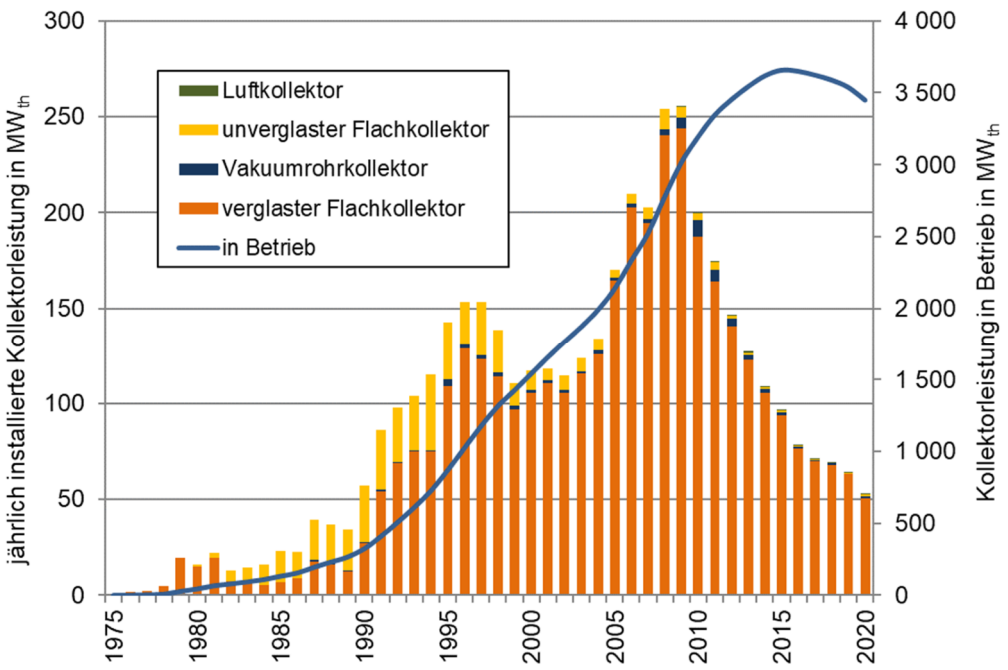
ÖNORM M 7710: Flachkollektoren zur Sonnenenergienutzung

Umrechnung: 1 m² Flachkollektor = 0,7 kW_{th}

Standortparameter für Thermische Solaranlagen

- Sonnenweg und Verschattung?
- Besondere Verschmutzung (Staub, anhaftende Partikel aus Verkehr, Industrie, Hausbrand,...)?
- Selbstreinigung der Anlagen durch Regenwasser oder manuelle/automatisierte Reinigung?
- Schneelasten und Schneeabwurf?
- Windlasten?
- Gebäudeintegration: Gesamtkonzept PV/Solarthermie – sinnvolle Nutzung des Gesamt-Flächenpotenzials

Marktentwicklung Thermische Solaranlagen in Österreich



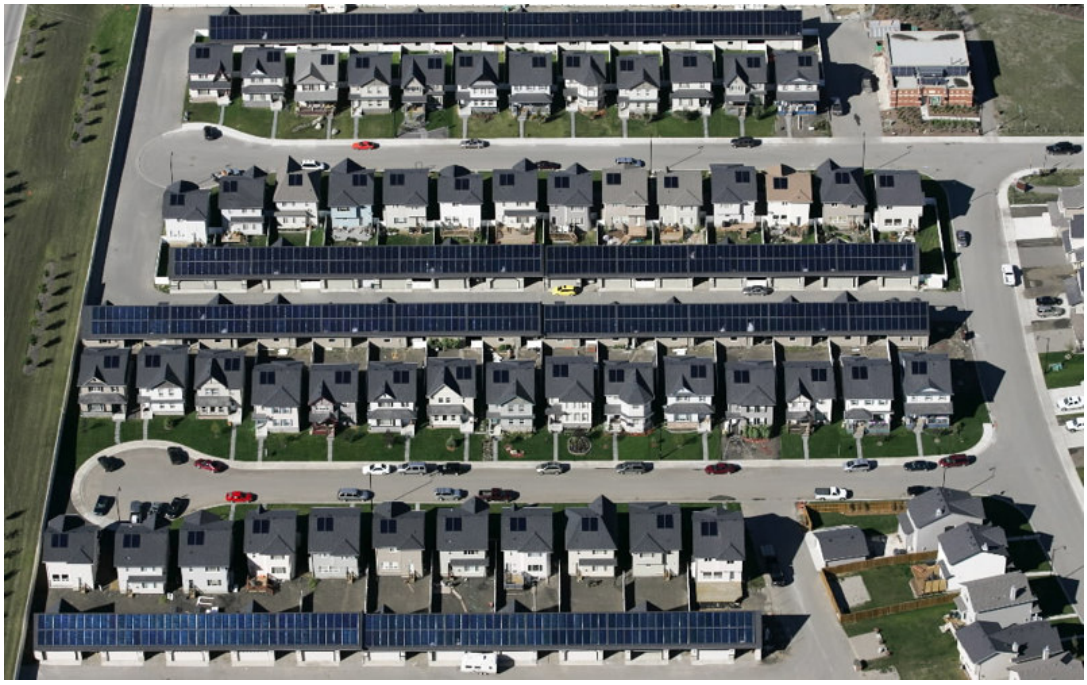
Quelle: Biermayr et al. (2021), Innovative Energietechnologien in Österreich

Der Marktrückgang von Thermischen Solaranlagen

- Finanz- und Wirtschaftskrise 2008 setzt Startpunkt.
- PV setzt sich im Wettbewerb aufgrund steiler ökonomischer Lernkurve und einfacher Systeme durch.
- Auch nach jahrzehntelanger F&E:
  - keine (wirtschaftlich machbaren) monovalenten ST-Lösungen; ST bleibt weiterhin ein zusätzliches System.
  - keine „plug and play“ Lösungen; die Installation erfordert weiterhin einen Pool an Gewerken inkl. Koordination etc.
  - keine für den Konsumenten sichtbare ökonomische Lernkurve.
- Die Zukunft der ST liegt möglicher Weise bei Großanlagen (Skaleneffekte, siehe Projekte in Dänemark)

Innovatives Beispiel: Drake Landing Solar Community, Canada

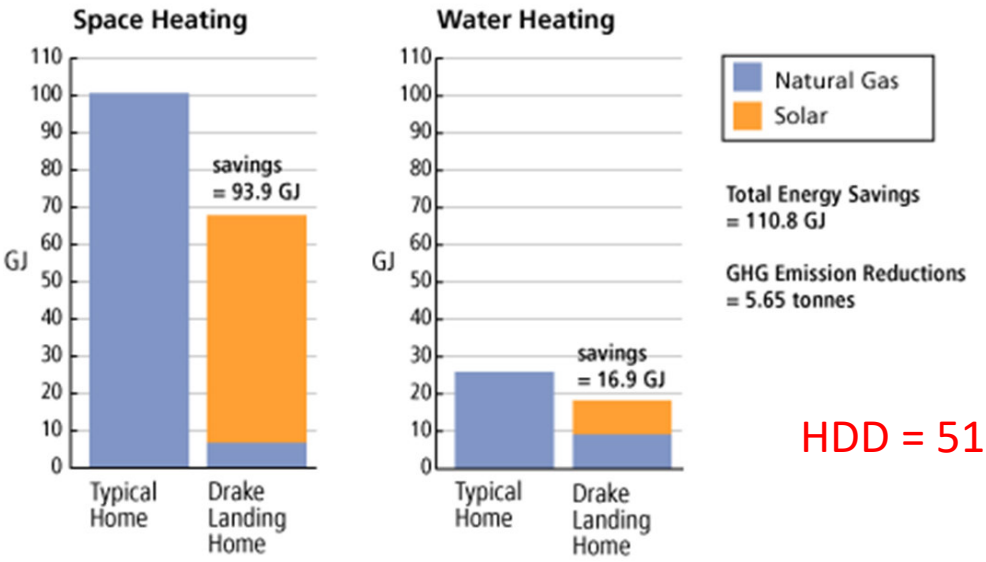
Siedlung mit 90% solaren Deckungsgrad des Wärmebedarfs



Quelle: http://www.dlsc.ca/

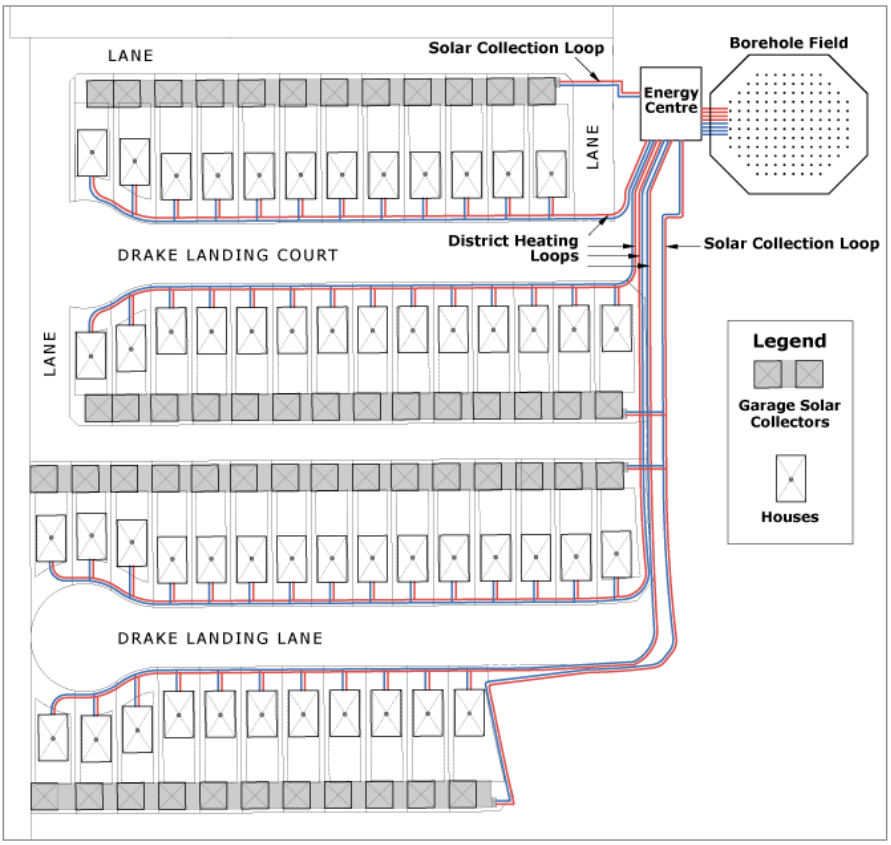
Drake Landing Solar Community, Canada

- Standort: Okotoks, Alberta, nahe Calgary
- Fertigstellung 2007
- World Energy Globe Award for Sustainability 2011



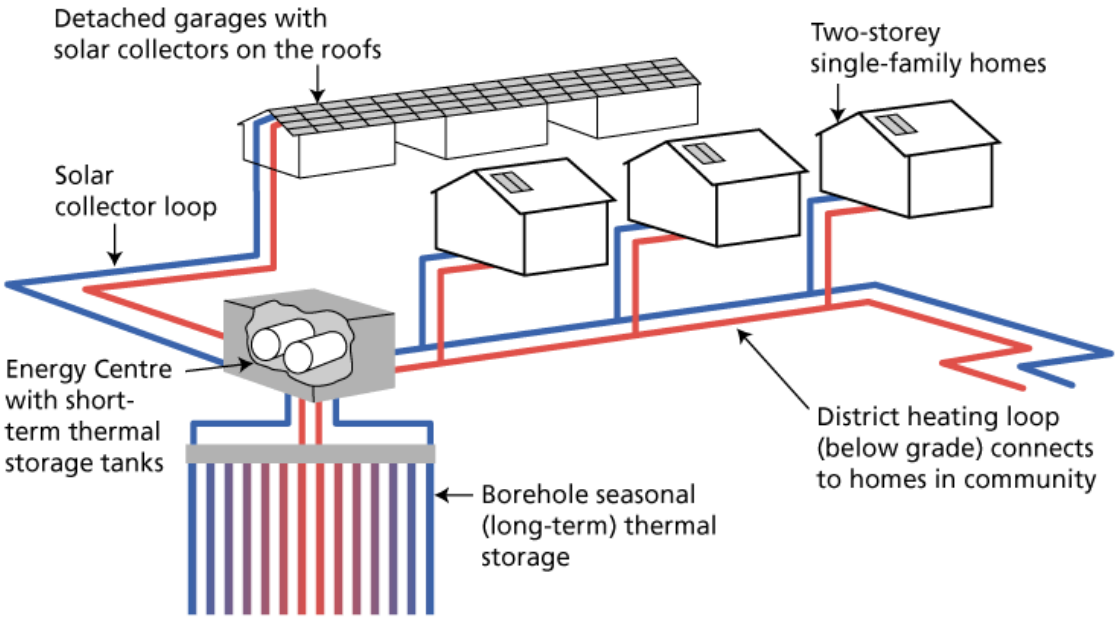
HDD = 5199 Kd !!!

Drake Landing Lageplan



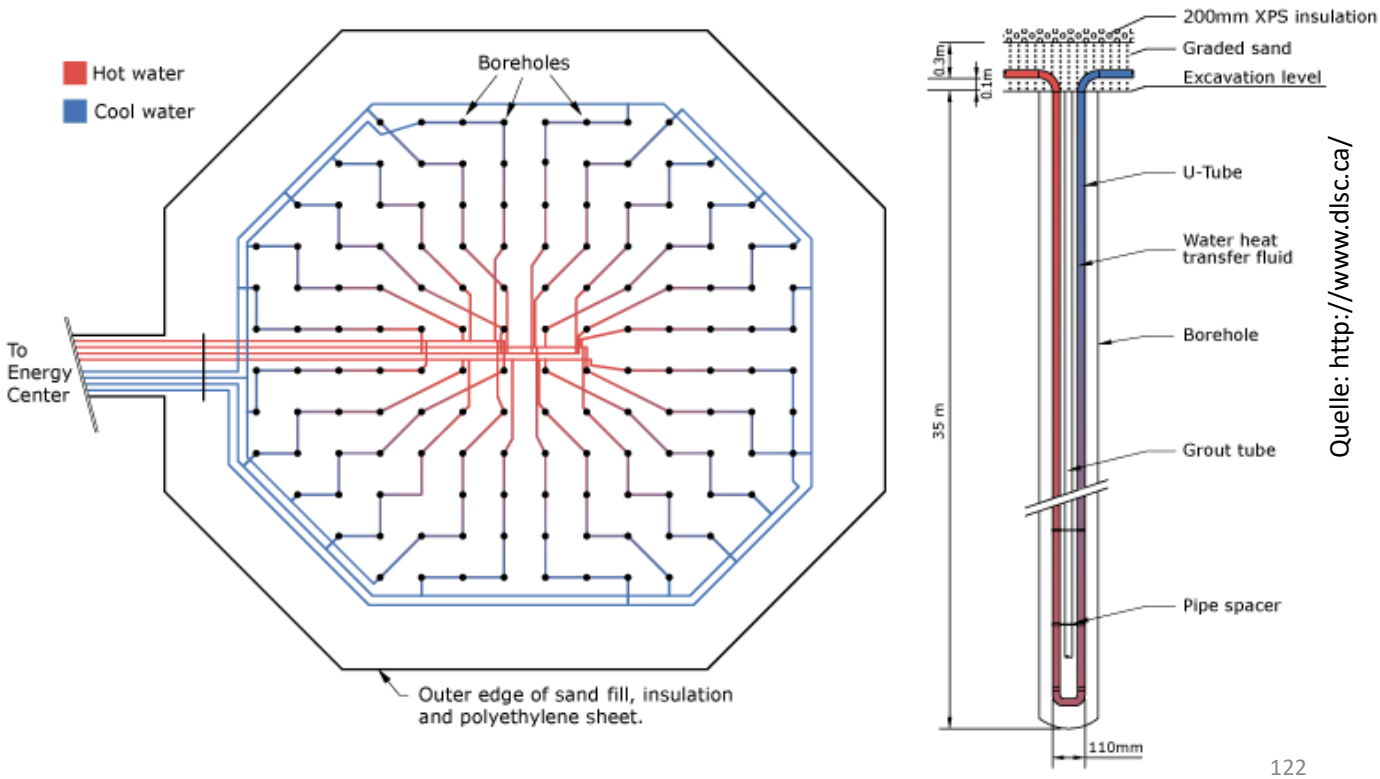
Quelle: http://www.dlsc.ca/

Drake Landing Konzept



Quelle: http://www.dlsc.ca/

Drake Landing Langzeit-Wärmespeicher (Sondenfeld)



Quelle: http://www.dlsc.ca/

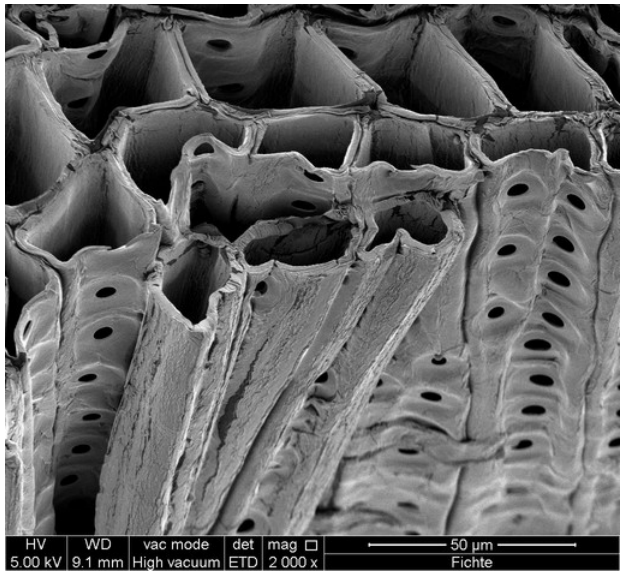
Definition von Biomasse

ÖNORM M 7101: "Unter dem Begriff Biomasse versteht man alle organischen Stoffe biogener, nicht fossiler Art und umfasst in der Natur lebende und wachsende Materie und daraus resultierende Abfallstoffe, sowohl von der lebenden als auch schon abgestorbener organischer Masse„

Andere Definition: Unter Biomasse wird sämtliches durch Photosynthese direkt oder indirekt erzeugtes organisches Material verstanden, das nicht über geologische Prozesse verändert wurde (im Gegensatz zu fossiler Biomasse – Erdöl, Kohle, Erdgas). Biomasse ist also chemisch gebundene Sonnenenergie.

Energieträger Holz

- Bildung im Kambium eines Baumes (zwischen Holz und Rinde)
- aufgebaut aus Holzzellen (Fasern bis 7,5 mm Länge)
- massive Zellwand (Lignin, Zellulose, Hemizellulose)
- porige Struktur für den Transport von Wasser, Nährstoffen, Assimilaten



Fichtenholz-Präparat; Löcher (Tüpfel) dienen dem Wasseraustausch zwischen den Zellen.

Bildnachweis: Johann Heinrich, www.proholz.at/zuschnitt/48/holz/

Wirkungsgrad der Assimilation (Theorie)

- theoretischer, chemischer Wirkungsgrad der Photosynthese: 29 % - 34 %
- Wirkungsgrad der Assimilation bezogen auf das eingestrahlte Sonnenlicht:

Gesamteinstrahlung:	100,0 %
Verluste durch Transmission und Reflexion:	50,0 %
Verluste durch Wandlung in Wärme:	48,4 %
Eigenverbrauch an Kohlehydraten (Atmung):	0,8 %
Nettoprimärproduktion von Zellmaterial:	0,8 %

- **Der Gesamt-Nettowirkungsgrad (Heizwert/Solarstrahlung) beträgt maximal 1 % bis 2 %**

Begriffe Wassergehalt und Holzfeuchte

$$\text{Wassergehalt } w\,[\%] = \frac{\text{Gewicht des Wassers [kg]}}{\text{Gewicht des feuchten Holzes [kg]}} \cdot 100$$

$$\text{Holzfeuchte } u\,[\%] = \frac{\text{Gewicht des Wassers [kg]}}{\text{Gewicht des trockenen Holzes [kg]}} \cdot 100$$

Wassergehalt in %	10	15	20	25	30	40	50
Holzfeuchte in %	11	18	25	33	43	67	100

Bildnachweis: FNR, www.fnr.de/basisdaten/bioenergie/festbrennstoffe.html

Phasen der Holzverbrennung

Die folgenden Phasen finden im Brennraum gleichzeitig statt:

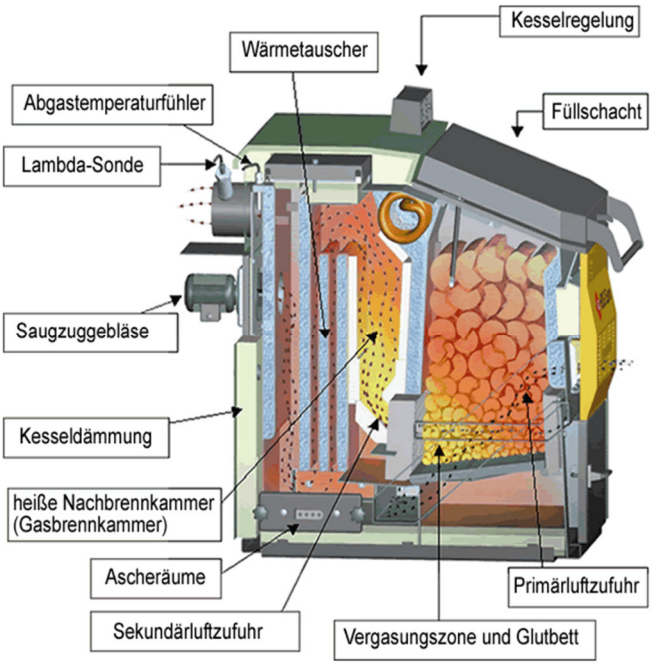
1. **Trocknung** (100-150°C): Verdampfung des im Brennstoff enthaltenen Wassers benötigt Energie aus der Verbrennung
2. **Pyrolyse** (Entgasung, 150-550°C): thermische Zersetzung des Brennstoffes, Entstehung von energiereichem Pyrolysegas; nach vollständiger Pyrolyse verbleiben ca. 15 % der Brennstoffmasse als Holzkohle; bei der Pyrolyse werden ca. 70 % des Heizwertes feigesetzt; Pyrolysegase bestehen aus CO_2, N, H_2, CO und höhere Kohlenwasserstoffe.
3. **Oxidation** (Verbrennung, ab 600-1300°C): Reaktion der Pyrolysegase und der Holzkohle mit Sauerstoff; es entsteht (im Idealfall) CO_2, H_2O und ca. 1 % Asche.

Typologie von biomassebasierten Wärmebereitstellungsanlagen

- Nach dem Brennstoff
  - Scheitholz
  - Hackschnitzel
  - Pellets
  - Sonderbrennstoffe (Sägenebenprodukte, Stroh etc.)
- Nach der Art der Wärmeauskopplung
  - Wassergeführte Systeme (Kessel)
  - Luftgeführte Systeme (Öfen und Herde)
  - Kombinierte Systeme
- Nach der Leistungsgröße
  - Für Ein- u. Zweifamilienhäuser (bis 50 kW)
  - Für Nahwärmeanlagen (einige 100 kW)
  - Für Nah- u. Fernwärme bzw. KWK (einige MW)

Holzvergaserkessel

für Scheitholz, Leistungsbereich 14 kW bis 40 kW



Vorteile:

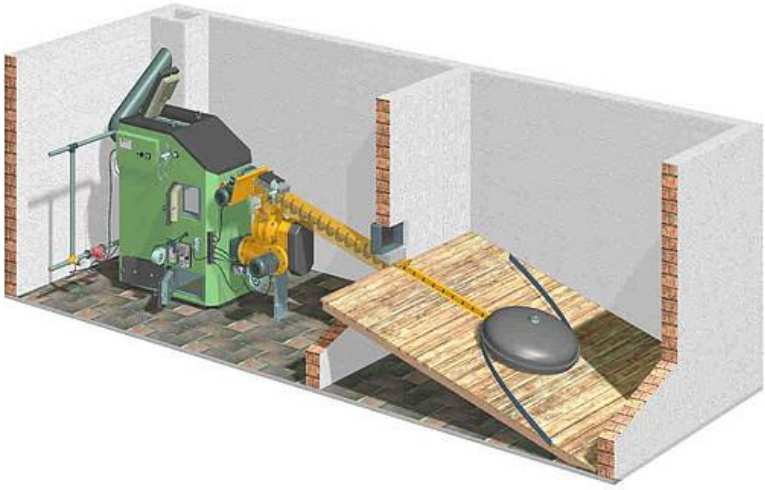
- geregelte Verbrennung
- geringe Emissionen
- Teilautomatisierung

Nachteile:

- große Kesselleistung
- kleiner Regelbereich
- Pufferspeicher (meist) erforderlich
- Stromverbrauch des Saugzuggebläses

Hackgutkessel

für Waldhackgut, Leistungsbereich 20 kW bis einige MW



geeignet für größeren Wärmebedarf,
z.B. landwirtsch. Betriebe, Mehrfamilienhäuser,
Wärmenetze, KWK-Anlagen

Pelletskessel

für Holzpellets, Leistungsbereich von <3 kW bis >30 kW

Holzöfen und –herde

für Holzpellets oder Scheitholz, Leistungsbereich 2 kW bis 8 kW
mit oder ohne wasserbasierte Wärmeauskopplung

Pelletofen (Strom erforderlich)

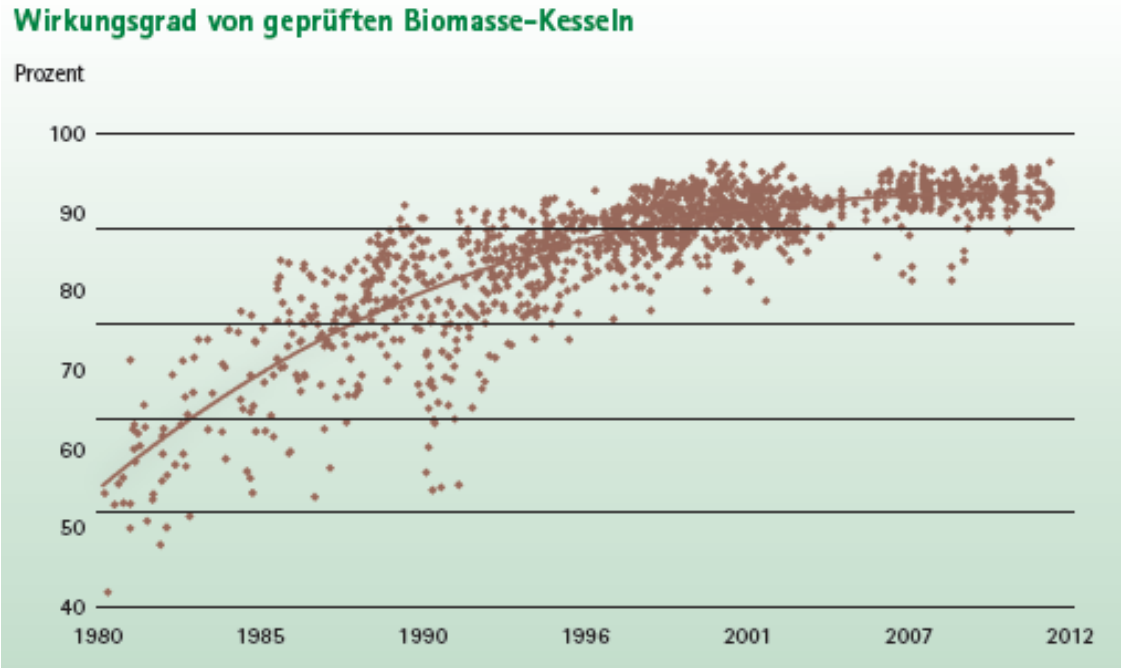
Scheitholz-kaminofen

Küchenherd

Kachelofen

Betrieb ohne Strom!

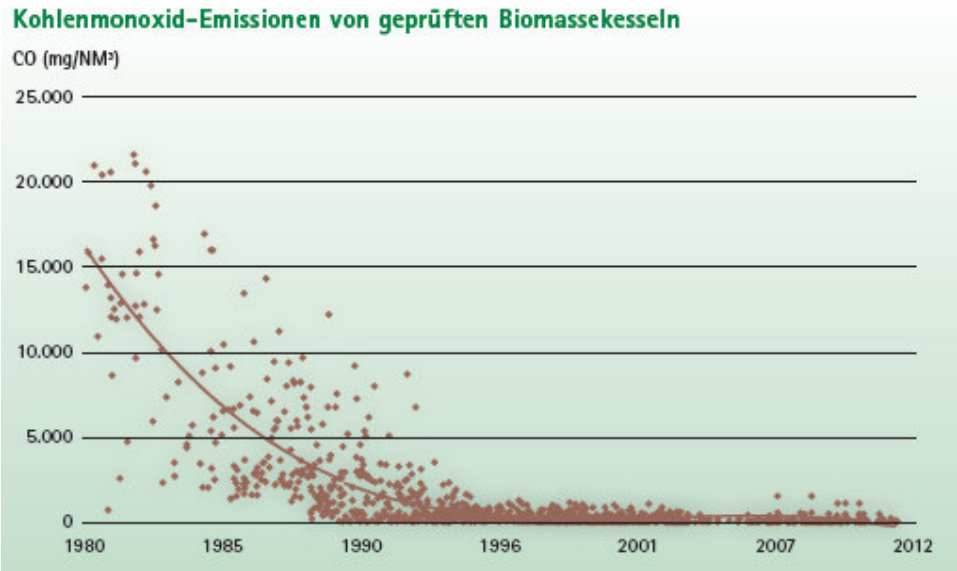
Praktische Wirkungsgrade von Biomasse-Kesseln



Bildnachweis: Haslinger Walter (2015)

Emissionsminimierung durch geregelte Verbrennung

- typengeprüfte Kessel haben geregelte Primär- u. Sekundär-luftzufuhr, Druckregelung (Saugzug) und Abgasregelung (Lamdasonde)



Bildnachweis: Haslinger Walter (2015)

Manueller Betrieb von Feuerungen

- Regelung der Verbrennung per Hand:
  - ausschließlich (luft)trockenes, sauberes Brennholz
  - günstige Druckverhältnisse sicherstellen
  - rasches Erreichen hoher Brennraumtemperaturen
  - hohe Temperaturen während Heizvorgang halten
  - ausreichend Primär- u. Sekundärluftzufuhr
  - Leistungsregelung nur über die Brennstoffmenge bzw. Heizdauer, niemals über die Verbrennungsluftzufuhr
  - Teillast nur wenn Brennraumtemperatur hoch bleibt
  - Selbstkontrolle: hellgraue Asche, saubere Schamotte, klare Sichtfenster, keine verbleibende Holzkohle, saubere und trockene Rauchrohre

Biomasse Kraft-Wärme-Kopplungen (KWK)

	Stirlingmotor	Dampfturbine	Dampfschrauben motor
P_{therm}	2,5…100kW	1…2.500MW	0,1…10MW
P_{el}	1,0…40kW	0,2…1.000MW	0,02…2MW
η_{Ges}	<0,85	<0,9	<0,85
η_{el}	0,1…0,3	0,15…0,25	0,1…0,25
Teillast	schlecht	gut	gut
Entwicklung	Kleinserie	Serie	Serie
Brennstoffe	alle	alle	alle

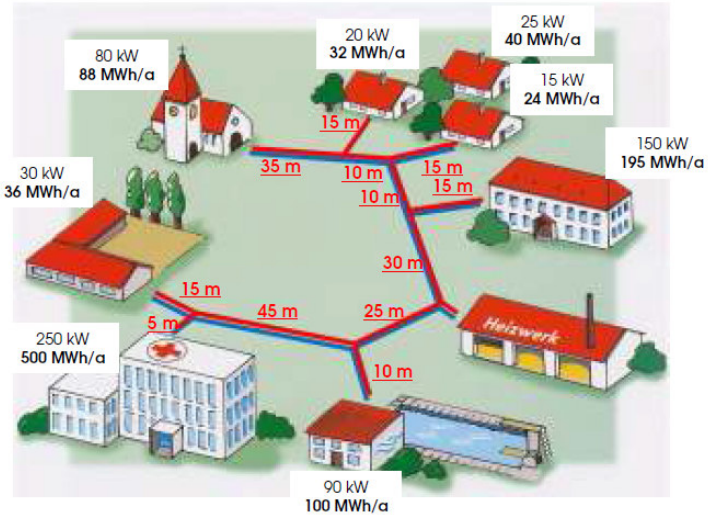
Biomasse-KWK Simmering

- Größte Biomasse KWK Österreichs
- Maximale Brennstoffwärmeleistung: 66 MW
- Maximale Leistung Strom: 24,5 MW
- Fernwärmeentnahme (KWK-Betrieb): 37 MW
- Gesamtwirkungsgrad: 82 %
- Frischdampfparameter: 120 Bar, 520°C
- Verbrauch: ca. 24 Tonnen Biomasse/Stunde
- ca. 680 kg Asche/Stunde (div. Fraktionen)
- ca. 7.500 Volllaststunden/Jahr
- Investitionssumme: ca. 45 Mio. Euro
- Ökostromerlöse laut Gesetz: 10,2 ct/kWh (für 13 Jahre)

Biomasse Nahwärmeanlagen, Wirtschaftlichkeit von Wärmenetzen

Erfolgsfaktoren (Kennzahlen):

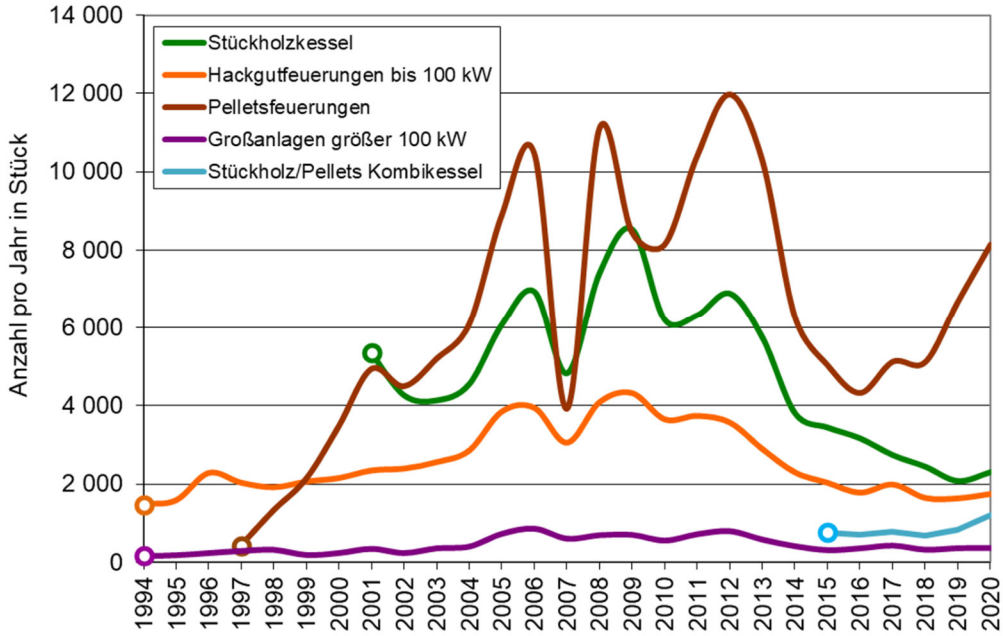
- Leistungsbelag (0,5)…>1 kW/m Netz-Leitungslänge
- Arbeitsbelag > 1,5 MWh/(m*a)



$$\frac{1007\ \text{MWh/a}}{230\ \text{m}} = 4{,}4\ \text{MWh/(m*a)}$$

Bildnachweis: Leuchtweis Christian (2010)

Biomasse-Kesselmarkt in Österreich



Quelle: Biermayr et al. (2021), Innovative Energietechnologien in Österreich

Wärmetauscher und Vorlauftemperaturen

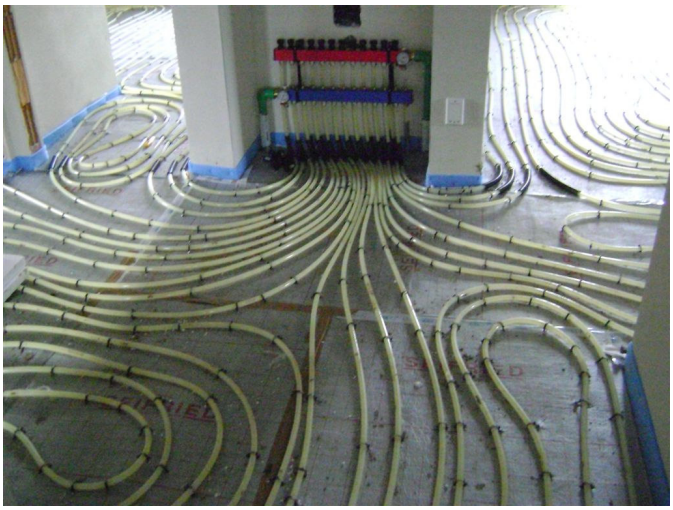
Vorlauftemperaturen sind abhängig von:

- Thermische Gebäudequalität
- Realisierbare Art und Fläche der Heizkörper
- Qualität der Fenster (kleiner Fensterkreislauf nötig?)
- Standort (T_{na})

Alte Hochtemperatur-radiatoren
60°C – 80°C

"Moderne" Mitteltemperatur-Heizkörper
40°C – 60°C

Wärmetauscher und Vorlauftemperaturen



Fußbodenheizung
25°C – 35°C
(Achtung: Physiologie!
Fußbereich, Wärmesensorik
des Menschen)

Wandheizung
25°C – 40°C
(Außenwand: Achtung:
hohe Verluste! nur bei exzellenter
Dämmung ≥ 20cm)

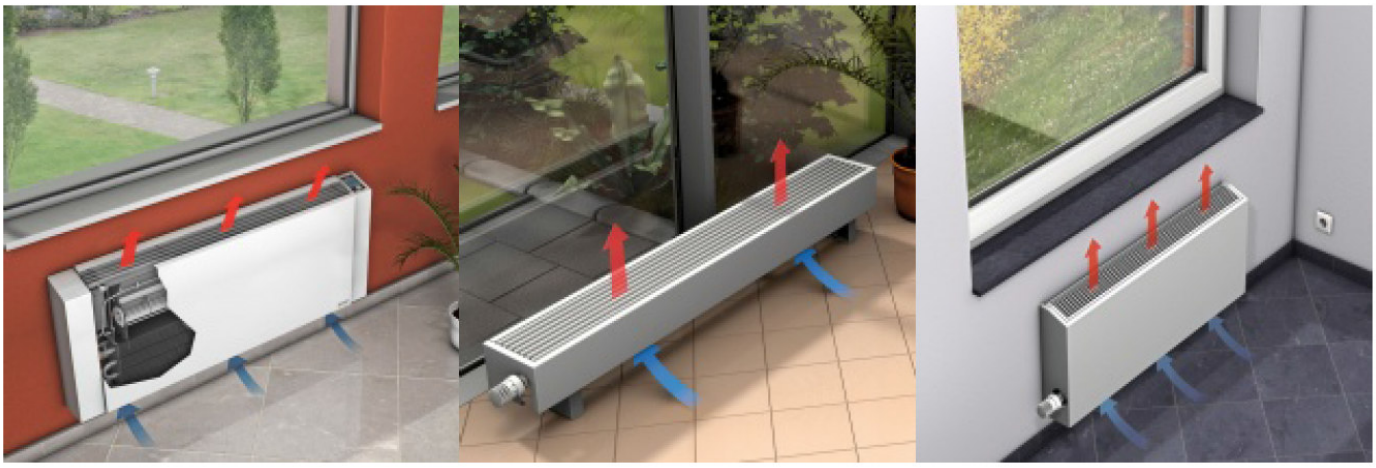
Wärmetauscher und Vorlauftemperaturen

Deckenheizung
25°C – 35°C
(Achtung auf Verluste
durch die Decke)

Deckenheizung
30°C – 45°C
(Achtung: Physiologie!
Wärmesensorik im Kopfbereich)

Wärmetauscher und Vorlauftemperaturen

Niedertemperatur-Wärmeverteilung
auf Basis forcierter, regelbarer Konvektion



Bildnachweis: www.kampmann.de

Beispiel 1: Wärmebereitstellungskonzept

Gesucht ist ein geeignetes Wärmeversorgungskonzept für folgendes Einfamilienhaus (qualitative Diskussion):

- Frei stehendes EFH, Neubau 2018, reine Wohnnutzung;
- BGF=450 m^2, EKZ=45 kWh/(m^2*a), P_H=13 kW, Massivbau;
- Standort: Baden bei Wien, sonnige Lage, kein Erdgas- o. Fernwärmezugang möglich;
- Nutzer = Eigentümer: Ärzteehepaar (40, 45) mit 2 Kindern (4, 6);
- Einstellung bezüglich erneuerbare Energie: indifferent;
- Wärmeverteilsystem: vollflächig Fußbodenheizung;
- Raumangebot für Wärmetechnik: großzügige Kellerräume verfügbar;

Beispiel 2: Wärmebereitstellungskonzept

Gesucht ist ein geeignetes Wärmeversorgungskonzept für folgende Gebäudesanierung (qualitative Diskussion):

- Zu sanierendes, frei stehendes 6-geschoßiges Gebäude des sozialen Wohnbaus, Baujahr 1960 (Plattenbau);
- BGF=3000 m^2, EKZ_{alt}=210 kWh/(m^2*a), $P_{H,alt}$=350kW, EKZ_{neu}=60 kWh/(m^2*a), $P_{H,neu}$=115kW;
- Standort: Wr. Neustadt, sonnige Lage, kein Erdgas- o. Fernwärmezugang möglich;
- Nutzer: 50 Wohnungen, sozial heterogene Mieterstruktur;
- Eigentümer: Stadt Wr. Neustadt
- Wärmebereitstellungssystem alt: Öl-Hauszentralheizung
- Wärmeverteilsystem: wassergeführte Hochtemperaturradiatoren
- Raumangebot für Wärmetechnik: bisheriger Heiztechnikraum und Öltankraum.

Beispiel 3: Wärmebereitstellungskonzept

Gesucht ist ein geeignetes Wärmeversorgungssystem für folgenden Hotelbetrieb (qualitative Diskussion):

- Denkmalgeschütztes, 5-geschoßiges Gebäude in der Wiener Innenstadt, Baujahr 1880;
- BGF=2500 m^2, EKZ=180 kWh/(m^2*a), P_H=280kW;
- Standort: Wien, 1. Bezirk, geschlossene Bauweise, durch Umgebung teilverschattet, Fernwärmeanschluss ist möglich;
- Nutzer: Hotel mit 50 Gästebetten
- Eigentümer: privat
- Wärmebereitstellungssystem alt: 2 Erdgas-Zentralheizungskessel mit zentralen Brauchwasserboilern und Ringleitung mit Umwälzung;
- Wärmeverteilsystem: wassergeführte Hochtemperaturradiatoren;
- Raumangebot für Wärmetechnik: bisheriger Heiztechnikraum

Beispiel 4: Wärmebereitstellungskonzept

Gesucht ist ein geeignetes Wärmeversorgungssystem für folgendes Bürogebäude (qualitative Diskussion):

- Frei stehendes, 7-geschoßiges Bürohaus, Neubau 2018;
- BGF=2800 m^2, EKZ=73 kWh/(m^2*a), P_H=130kW; hoher Glasanteil in der Fassade in allen Expositionen;
- Standort: Schwechat, sonnige Lage;
- Nutzer: Büromieter
- Eigentümer: Investorengruppe
- Wärmebereitstellungssystem: Erdgas- oder Fernwärmeanschluss wäre möglich;
- Wärmeverteilsystem: ist noch wählbar;
- Raumangebot für Wärmetechnik: nicht räumlich beschränkt, aber Opportunitätskosten;

Beispiel 5: Wärmebereitstellungskonzept

Gesucht ist ein geeignetes Wärmeversorgungssystem für folgende Gebäude (qualitative Diskussion):

- Ländliche Gemeinde im südlichen NÖ; 3 Gemeindegebäude in unmittelbarer Nachbarschaft:
- Gemeindeamtsgebäude: Baujahr 1970, BGF=500 m^2, EKZ=115 kWh/(m^2*a), teilsaniert, Strom-direkt dezentral beheizt
- Kindergarten: Baujahr 1995, BGF=400 m^2, EKZ=90 kWh/(m^2*a), Öl-Zentralheizung mit Hochtemperaturradiatoren
- Vereinshaus: Baujahr 1890, BGF=250 m^2, EKZ=280 kWh/(m^2*a), Strom-direkt beheizt, kein Denkmalschutz
- Standort: Gemeinde Hohe Wand, NÖ, sonnige Lage, SH=500m
- Nutzer: diverse lt. Widmung
- Eigentümer: Gemeinde
- Raumangebot für Wärmetechnik: bei Strom direkt aktuell nicht gegeben, sonst Kesselraum und Öltankraum;

Ende

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

www.enfos.at