



Methoden der Erdsonden-Regeneration

mit Sekundärnutzen oder
tiefen Wärmekosten

Schlussbericht

IMPRESSUM

Auftraggeberin:

Stadt Zürich,
Amt für Hochbauten,
Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik,
Amtshaus III, Lindenhofstrasse 21
8021 Zürich

Bearbeitung:

Kriesi Energie GmbH, Meierhofrain 42, 8820 Wädenswil
Ruedi Kriesi, Dr. sc. tech.
ruedi.kriesi@kriesi-energie.ch

Projektleitung:

Franz Sprecher
Roland Wagner (Stv.)
Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik,
Amt für Hochbauten

Download als pdf von
www.stadt-zuerich.ch/bauen2000watt
> Grundlagen und Studienergebnisse

Zürich, 2. März 2017

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	4
2	Vorwort	5
3	Eigenschaften des Referenzgebäudes	6
4	Regeneration durch Raumkühlung.....	7
4.1	Notwendige Fenstergrösse zur vollständigen Regeneration	7
4.2	Wärmegewinn zur Regeneration aus Aussenluftkühler.....	8
4.3	Fenstergewinn für passive Raumheizung und Regeneration mit Wärmegewinn aus Aussenluft.....	12
4.4	Raumverhalten bei für vollständige Regeneration genügendem Fenstergewinn	15
4.5	Erreichbare passive Raumkühlung mit Kühlboden	17
4.6	Folgerungen zur Regeneration durch Raumkühlung.....	21
5	Quartierstrasse als Sonnenkollektor	22
5.1	Konstruktion des Strassen- oder Asphaltkollektors	22
5.2	Verfügbarkeit der notwendigen Absorberflächen.....	24
5.3	Grobe Kostenschätzung der Strassenkühlung:	26
6	Gartenteich als Sonnenkollektor	28
6.1	Wärmebilanz	28
6.2	Kostenschätzung (ohne Teichkosten)	29
7	Vergleichskosten unverglaster Sonnenkollektor	30
8	Gesamtbewertung	31
9	Anhang	32
9.1	ANHANG I: Temperaturen und Leistungsverhältnisse zu Hydraulik Bild 4.1	32
9.2	ANHANG II: Erwartete COP der aktiven Aussenluftkühlung:	33
9.3	ANHANG III: Verhalten der massiven Raumbegrenzungsflächen an sonnigem Tag	34
9.4	ANHANG IV: Temperaturverhältnisse einer Fussbodenheizung im Kühlmodus.....	35
9.5	Literaturverzeichnis	36

1 Zusammenfassung

Bis heute ist immer noch unklar, bei welchem Anteil der Erdsonden sich während 50 Jahren problemlos Wärme wird entnehmen lassen, ohne dass deren Temperaturen deutlich unter den Gefrierpunkt absinken. Insbesondere wird bei älteren, gegenüber den Empfehlungen der SIA 384-6 teils noch weit höher belasteten Anlagen, ein beachtlicher unterkühlter Anteil vermutet. Mehr Klarheit werden die Messungen des Bundesamts für Energie an älteren Anlagen im Winter 2016/17 ergeben. Eventuell wird eine beachtliche Zahl bestehender Sonden bald eine Entlastung benötigen, wofür in vielen Fällen die Wärmeeinspeisung im Sommer die geeignetste Lösung sein wird.

Neue Sonden werden zwar weniger belastet, dafür nimmt aber in vielen Quartieren deren Dichte zu, und dies wird sich dank deren grosser Beliebtheit in den kommenden Jahren und Jahrzehnten weiter akzentuieren. Auch in diesen Situationen kann eine sommerliche Regeneration nötig werden, weil der natürliche Wärmezufuss nur von unten und oben auch bei geringer Belastung ungenügend ist.

Aber schon der Ansatz des SIA zur Auslegung von Erdsonden für eine Nutzungsdauer von 50 Jahren entspricht weder den Erwartungen der meisten Nutzer, noch den Interessen der kantonalen Energieplanung, noch den Versprechungen von deren Promotoren für eine nachhaltige Wärmeversorgung. Schon der Nachfolger des Sondenerstellers, der das gleiche Haus oder den Ersatzneubau wieder mit einer Sonde beheizen will, wird den Zeithorizont von 50 Jahren überschreiten. Die Forderung nach einer etwa vollständigen Regeneration muss also an allen Standorten zur Anwendung kommen, die nicht von einer horizontalen Wärmezufuhr durch eine Grundwasserbewegung profitieren, selbst für Einzelsonden. Da die Verhältnisse im Untergrund meist nur sehr ungenau bekannt sind, kann der Bedarf nach Regeneration aber nur durch Temperaturmessungen im Betrieb festgestellt werden. Hieraus folgt zwingend eine systematische Erfassung der minimalen Jahrestemperaturen aller bestehenden und neuen Erdsonden, um mit der Regeneration starten zu können, bevor das Erdreich stark unterkühlt ist und die Leistungsziffern schlecht werden.

Bisher standen für die Nachwärmung von Sonden primär Sonnenkollektoren im Vordergrund, verglast oder unverglast. Deren Kosten sind aber hoch und nicht immer stehen geeignete Flächen zu deren Anordnung zur Verfügung.

In dieser Arbeit werden deshalb neue Lösungen beschrieben, die entweder deutlich günstiger sind oder deren Kosten mindestens teilweise durch Nebennutzen amortisiert werden können. Das wird deren Akzeptanz verbessern. Im Vordergrund stand zu Beginn der Arbeit der Wärmebezug aus dem Innenraum durch aktive und passive Raumkühlung. Damit kann die sommerliche Raumtemperatur begrenzt werden. Die Erhöhung der Raumkühlung für einen maximalen Energiegewinn durch eine gesteuerte Beschattung der Fenster steht dann aber doch wieder im Widerspruch zur Maximierung des Innenraumkomforts.

Deshalb wird in dieser Arbeit eine vollständig neue Lösung vorgeschlagen, welche zusätzlich zur Raumkühlung mit der Bodenheizung die dem Wohnungslüftungsgerät zugeführte Aussenluft kühlt. Damit kann fast die Hälfte der zur vollständigen Regeneration nötigen Wärme der Aussenluft entzogen und – zur Komfortverbesserung – die Zuluft auch getrocknet werden. Allerdings ist dafür ein merklicher sommerlicher Strombedarf nötig.

Als weitere Alternative wird der Strassenkollektor vorgeschlagen, der sehr tiefe Wärmekosten verspricht, wenn gleichzeitig die Beläge und die Umgebung neu gestaltet werden müssen, primär also im Neubau. Hingegen ist sein Nebennutzen, die geringere Erwärmung des Strassenbelags und damit die geringere Bildung von Spurrinnen im Sommer, gering. Dies, weil hier schwere Lastwagen fehlen, die primär für die Beschädigung von Strassenbelägen verantwortlich sind.

2 Vorwort

Erdsonden eignen sich bestens als Wärmequellen für Wärmepumpen. Ihr Betrieb ist lautlos und ihre Temperatur ist während der ganzen Heizperiode etwa konstant und liegt üblicherweise immer über dem Gefrierpunkt. Dies erlaubt ganzjährig gute Leistungsziffern.

Erdsonden beziehen ihre Wärme aus dem umgebenden Erdreich. Der Zufluss von oben und unten ist v.a. bei tieferen Sonden gering. Die zunehmende Dichte an Erdsonden in Wohnquartieren mit einer grossen Sondenzahl lässt deshalb in Regionen ohne Grundwasserbewegungen erwarten, dass der seitliche Zufluss nicht mehr genügt und die Temperatur der Sonden jedes Jahr sinkt.

Um die Erdsonde in solchen Fällen trotzdem weiter betreiben und die Temperatur wieder anheben zu können, muss entweder der Bezug gedrosselt werden, indem der Wärmebedarf des Gebäudes reduziert, das Gebäude teils mit einer anderen Quelle beheizt, oder die Erdsonde im Sommer mit Wärme aus der Umgebung regeneriert wird.

Sonden für Geschäftsbauten sind meist weniger kritisch, weil sie im Sommer auch zur Kühlung der oft grösseren Abwärmemengen eingesetzt werden, was einer Teilregeneration entspricht.

Auch grosse Anlagen sind weniger kritisch, weil sich bei diesen die Wärme aus dem Abwasser rückgewinnen lässt. Für kleinere Siedlungen sind die Kosten dafür aber zu hoch. So betragen allein die Amortisationskosten einer Anlage zur Nutzung des Hallenbadabwassers mit $30\text{m}^3/\text{d}$ rund 5Rp./kWh [10], sind also ähnlich hoch wie die eines unverglasten Sonnenkollektors (sh. Kap. 7). Diese Abwassermenge entspricht aber bereits etwa 100 Wohnungen.

Bekanntere Methoden für die Regeneration in kleineren Siedlungen sind Sonnenkollektoren, verglast oder unverglast, oder Aussenlufttauscher. Nachteilig sind im Fall der Sonnenkollektoren die Kosten und im Fall des Aussenlufttauschers die Ventilatorgeräusche, die einen zentralen Vorteil der Quelle Erdsonde gegenüber Aussenluft zunichte machen.

Die in dieser Arbeit im Zentrum stehende Raumkühlung bietet dem Nutzer einen über die Energiegewinnung zur Regeneration hinaus gehenden Vorteil, indem sie eben im Sommer die maximale Raumtemperatur begrenzt und die Zuluft trocknet. Der Umfang der möglichen Raumkühlung ist jedoch eng begrenzt, wenn die Fenster im Sommer systematisch beschattet werden. Deshalb ist die Grenze zu suchen, bei der sich bei immer noch gutem thermischem Raumklima möglichst viel Sonneneinstrahlung sammeln lässt, d.h. auch, wie weit sich die Beschattung reduzieren lässt.

Diese Frage lässt sich technisch nicht beantworten. Die Prioritäten sind individuell und auch national-kulturell unterschiedlich. So kann sich ein typischer Amerikaner nicht vorstellen, mit Aussenstoren die Aussicht zu beeinträchtigen, auch wenn deshalb die Kühlung auf höchster Stufe laufen muss, was wiederum für einen Mitteleuropäer unverständlich ist.

3 Eigenschaften des Referenzgebäudes

Zur Verbrauchsrechnung wurde ein Haus der Null-Heizergesiedlung Boller in Wädenswil verwendet, zu der detaillierte Daten vorliegen [4]. Um die EBF gegenüber dem realen Gebäude mit 274m² auf einen typischeren Wert von 200m² abzusenken, wurde das UG nicht einbezogen, indem die Dämmung an die UG-Decke verlegt wurde.

Aus der jüngsten Untersuchung des BFE zum Wärmeverbrauch von Minergie-Häusern [5] ist bekannt, dass mit Wärmepumpen beheizte Mehrfamilienhäuser den Standardwert etwa einhalten. Mit einer geschätzten Jahresarbeitszahl von 4 für Wärmepumpen für Raumheizung und Warmwasser und dem Gewichtungsfaktor 2 für Elektrizität ergibt dies für einen Minergie-Neubau mit einem Grenzwert von 35kWh/m²a einen Wärmebedarf von

$$Q = 35\text{kWh/m}^2\text{a} / 2 \times 4 = 70\text{kWh/m}^2, \text{ womit ein Wärmebedarf aus der Erdsonde von } 70 \times 200 \times (\text{JAZ} - 1)/\text{JAZ} = 10'500\text{kWh/a resultiert.}$$

Hiervon wird angenommen WW: 20kWh/m² (= Standard gem. SIA 380/1), Heizung 50kWh/m²;

Der Verbrauch von 70kWh/m²a (total 14'000kWh/a) wurde bei den gegebenen Abmessungen und U-Werten (etwa entsprechend MuKEN) erreicht, indem die Infiltration auf 0.2/m²h und der Wärmebrückenfaktor auf 1.1 erhöht sowie der Wirkungsgrad der Lüftungsanlage auf 70% gesenkt wurden. Die Fensterflächen wurden mit den Fällen 1 bis 4 von 10 bis 30% der EBF variiert und die Faktoren für die Ausnützung der passiven Fenstergewinne in den 4 Fällen so eingestellt, dass der Heizenergiebedarf konstant 14'000kWh/a blieb (sh. Tabelle 3.2), also ein konstanter Wert des Wärmebedarfs von 70kWh/m² und einem Bedarf aus der Sonde von konstant 10'500kWh/a.

Tabelle 3.1: Variation der Fensterflächen und –ausrichtung mit Fällen 1 bis 4

	Fall 1	Fall 2	Fall 3	Fall 4
EBF, m ²	200	200	200	200
Fensterfläche S, m ²	10	15	20	30
Fensterfläche N, m ²	5	7.5	10	15
Fensterfläche E, m ²	5	7.5	10	15
Fensterfläche gesamt, m ²	20	30	40	60
Fensterfläche ges. pro EBF	10%	15%	20%	30%
Heizleist. Haus bei -8°C, kW	4	4.3	4.7	5.4
Jahreswärmebedarf, kWh/a*	14000	14000	14000	14000
Passiver Wärmegewinn*	2200	3500	5000	8400

Tabelle 3.2: Ausnutzungsfaktoren AF der Festereinstrahlung für die Passive Raumheizung und zugehörige spezifische Fenstergewinne in kWh/m²Mt für konstante Energiekennzahl von 70kWh/m²a:

Werte AF	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mae	Apr	Mai	Jun
Fall 1, AF	0.4	0.4	0.4	0.7	0.9	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.4	0.3
Spez. Fenstergew.	0.25	0.25	0.9	1.25	1.1	0.8	0.9	1.1	1.6	1.4	0.9	0.65
Fall 2, AF	0.4	0.4	0.4	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.7	0.8	0.4	0.3
Spez. Fenstergew.	0.4	0.4	1.3	2.15	1.6	1.2	1.4	1.65	2.35	2.8	1.35	1
Fall 3, AF	0.4	0.4	0.5	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.4	0.4
Spez. Fenstergew.	0.55	0.55	2.2	2.9	2.1	1.6	1.85	2.5	3.55	3.75	1.8	1.7
Fall 4, AF	0.4	0.4	0.5	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.6	0.4
Spez. Fenstergew.	0.95	0.95	3.55	4.6	3.4	2.5	2.95	4.05	5.75	6.15	4.55	2.95

Anteil Bodenheizung an EBF 80%
 Fenster mit Glasanteil 80% und g-Wert: 60%

4 Regeneration durch Raumkühlung

4.1 Notwendige Fenstergrösse zur vollständigen Regeneration

Das Ausmass der Raumkühlung und damit die für die Regeneration verfügbare Energie werden sehr weitgehend von der durch die Fenster erhaltenen Sonnenstrahlung bestimmt. Die Wärmegewinne durch die isolierte Hülle und auch durch den Stromverbrauch sind demgegenüber klein. Die Einstrahlung durch die Fenster muss zuerst die Verluste des Raumes decken, bevor Wärme über die Raumkühlung an die Sonde abgegeben werden kann. Welcher Anteil der nächtlichen Verluste tatsächlich durch die passiven Gewinne gedeckt werden kann, ist sehr unklar, weil er stark von der Speicherfähigkeit des Raumes und noch mehr vom Benutzerverhalten abhängig ist.

Tabelle 4.1: Wärmebedarf der Wohneinheit bei unterschiedlicher Ausnützung der passiven Gewinne:

Ausnützungsfaktor für monatliche Fenstergewinne	AF=1		AF70kWh/m ² (sh. Tabelle 3.2)		AF=0	
	kWh	kWh/m ²	kWh	kWh/m ²	kWh	kWh/m ²
Fall 1, Fensterfläche/EBF = 10%	12780	64	14000	70	16230	81
Fall 2, Fensterfläche/EBF = 15%	12670	63	14000	70	17600	88
Fall 3, Fensterfläche/EBF = 20%	12850	64	14000	70	19040	95
Fall 4, Fensterfläche/EBF = 30%	12720	64	14000	70	21790	109

Der Anteil der maximalen Fenstereinstrahlung, der für Raumheizung und Regeneration verfügbar ist, wird durch die Beschattung der Fenster resp. die Kühlung über offene Fenster bestimmt. Wird der Raum schon bei geringer Einstrahlung zu warm, wird sich der Nutzer auf eine der beiden Arten schützen. Daraus resultiert eine unterschiedliche Ausnützung der Fenstereinstrahlung. Deren Einfluss auf die resultierende maximale Differenz des Wärmebedarfs, der durch die Raumheizung gedeckt werden muss, bewegt sich zwischen 3450kWh/a bei kleinster Fensterfläche (Fall 1) bis zu 9070kWh/a bei grösster (Fall 4). Im Verhältnis zur aus der Erdsonde im Auslegungsfall bezogenen Wärmemenge von 10'500kWh ist die Art der Beschattung resp. die Speicherfähigkeit des Raums für die Verfügbarkeit von Überschusswärme damit insbesondere bei grösseren Fensterflächen höchst relevant.

Zur Vereinfachung wurden zur Festlegung der für die vollständige Regeneration notwendigen Fenstergrösse die passiven Gewinne zur direkten Raumheizung gem. Kap. 3 und Tabelle 3.2 so angenommen, dass die aus der Erdsonde zu beziehende Wärmemenge mit den unterschiedlichen Fenstergrössen konstant bleibt. In den Fällen 3 und 4 mit grösseren Fenstern sind damit bessere U-Werte der Hülle, ein besserer Wirkungsgrad der Lüftungsanlage, höhere Ausnützungsfaktoren oder bessere Nutzerverhalten notwendig als in den Fällen 1 und 2. Bei vollständiger Sonneneinstrahlung werden die Fenster ganzjährig nie beschattet.

Tabelle 4.2 zeigt, dass erstens eine grosse Fensterfläche, nämlich 30% der EBF, und zweitens ein hoher genutzter Strahlungsanteil, nämlich 1/1.11, also fast 90%, notwendig sind, wenn allein die durch die Fenster eingestrahlte Wärme für die Regeneration zur Verfügung steht.

Muss aber fast die gesamte Strahlung ungehindert in den Raum gelangen können, also auch am wolkenfreien Spätsommernmorgen mit fast senkrechtem Strahlungseinfall auf das Ostfenster, so ist der Komfort im Raum wegen der warmen Fensterinnenscheibe und der auf eine Person im Raum auftreffenden Strahlung unhaltbar, selbst wenn die Raumtemperatur dank aktiver Kühlung tief gehalten wird. Ein so hoher ausgenutzter Anteil der Fenstereinstrahlung ist deshalb keine realistische Annahme.

Zur Raumkühlung stehen Boden- oder Deckenheizung und Fan-Coils zur Verfügung. Deckenheizungen wären dank dem besseren Wärmeübergang im Kühlbetrieb gegenüber der Bodenheizung im Vorteil. Fan-Coils könnten mit hoher Stufe wegen der Geräuschemissionen nur dann laufen, wenn sich niemand im Raum befindet. Trotzdem wird niemand allein wegen der Erdsonden-Regeneration einen Systemwechsel mit höheren Kosten (Deckenheizung) resp. geringerem Komfort (Fan Coils) in Kauf nehmen. Eine zusätzliche Quelle neben den Fenstergewinnen ist für eine vollständige Regeneration also unabdingbar.

Tabelle 4.2: Mit den Ausnützungsfaktoren von Tabelle 3.2 verbleiben für die Regeneration, nach Abzug der passiven Gewinne für die direkte Raumheizung, folgende Fenstergewinne, ausgedrückt in Prozent der für die vollständige Regeneration notwendigen Jahresmenge:

Gewinnanteile, % (100% = 10500kWh/a)	Passive Gewinne für die Regeneration, nach Abzug der zur Erreichung der Heizwärme 50kWh/m ² und Warmwasser 20kWh/m ² notwendigen Menge, %
Fall 1, Fensterfläche/EBF = 10%	43
Fall 2, Fensterfläche/EBF = 15%	62
Fall 3, Fensterfläche/EBF = 20%	80
Fall 4, Fensterfläche/EBF = 30%	111

4.2 Wärmegewinn zur Regeneration aus Aussenluftkühler

Im Laufe dieser Arbeit ist ein völlig neuer Vorschlag entwickelt worden: Der Bedarf zur Regeneration der Sonden wird teilweise durch Kühlung und Trocknung der Aussenluft im Sommer gedeckt. Damit lässt sich der Bedarf an Raumkühlung deutlich reduzieren. Dazu wird ein Kühler in den Aussenluftstrom des Komfortlüftungsgeräts – also vor dem Wärme- resp. Enthalpietauscher - eingesetzt, der die Aussenluft immer auf minimal 5 bis 10°C abkühlt (Bild 4.1/4.2). Die sensible und die latente Wärme der Aussenluft erlauben bei einem üblichen Luftstrom der Komfortlüftung von 150m³/h die Lieferung von ca. 2500 bis 5200kWh/a an die Erdsonde, einschliesslich eines Anteils von 17% Elektrizität beim zu erwartenden COP von 6 bis 7 (sh. Anhang IV), entsprechend etwa 25 bis 50% des Regenerationsbedarfs. Das genaue Mass ist abhängig von der Lufttemperatur nach dem Kühler.

Dank dem auf den Kühler nachfolgenden Wärme- resp. Enthalpietauscher wird die Aussenluft durch die Abluft wieder fast auf Raumtemperatur angehoben. Die Zuluft hat also einen vernachlässigbar kleinen Kühleffekt auf den Raum, ausser dieser ist gewollt und wird durch Einsatz eines Bypass genutzt. Hingegen wird die Fortluft je nach relativer Feuchtigkeit auf 12 bis 15°C (AUL-Kühlung bis 10°C) resp. auf 8 bis 10°C (AUL-Kühlung bis 5°C) abgekühlt. Die Installation hat also die gleiche Wirkung wie ein Aussenluftkühler, ist dank der Integration in die Komfortlüftung aber geräuschlos und wird im Freien nicht sichtbar.

Tabelle 4.3: Aus dem Aussenluftstrom der Komfortlüftung in den Sommermonaten beziehbare sensible und latente Wärme durch Abkühlung auf 5 resp. 10°C:

Monat	Mittlere Aussen-temp. °C	Mittlere Feuchtigkeit g/kg	Beziehbare Wärme bei Abkühlung auf 10°C (abs. Feuchte 7.5g/kg, JAZ=7) kWh/Mt			Beziehbare Wärme bei Abkühlung auf 5°C (abs. Feuchte 5.5g/kg, JAZ=6) kWh/Mt		
			sensibel	latent	gesamt	sensibel	latent	gesamt
Apr	8.4	5				122		122
Mai	13.4	7	122		122	302	134	437
Jun	16.2	10.5	223	268	491	403	447	850
Jul	18.4	10.5	302	268	571	482	447	930
Aug	18.4	10.5	302	268	571	482	447	930
Sep	14	10.5	144	268	412	324	447	771
Okt	9.9	5				176	134	311
Summe			1094	1073	2167	2293	2057	4350
Summe, inkl. Antriebsstrom der WP (JAZ 7, 10°C, resp. 6, 5°C)					2529			5220
In Prozent des Regenerationsbedarfs					24%			50%
Strombedarf für die Regeneration, kWh					362			870
Spez. Strombedarf für die Regeneration, kWh/m ²					1.8			4.4
Spez. Strombedarf für die Regeneration zu ME-Standard, %					10 (gew.)			25 (gew.)

Der Aufwand an Elektrizität für diese Aussenluftkühlung bis 10°C beträgt 1.8kWh/m²a (=362kWh/200m²), gewichtet 3.6 kWh/m²a oder 10% des Minergie-Standards. Einerseits sinkt durch die Regeneration auch der Strombedarf im Winter dank höherer Sondentemperatur etwas (ca. 10% bei einem Anstieg um 3 bis 4K), andererseits wird die Aussenluftkühlung nur im Sommer betrieben, wenn Strom zu tiefem Preis und hohem erneuerbarem Anteil verfügbar sind.

Diese Aussenlufttrocknung hat dank dem Komfortaspekt zudem einen wichtigen Sekundärnutzen. Insbesondere bei zusätzlicher Verwendung von aktiver oder auch nur passiver Raumkühlung gibt es ohne Trocknung einige stickige Sommertage mit sehr hoher relativer Feuchtigkeit. Bei nur noch

7.5g/kg Wassergehalt nach dem Kühler liegt die relative Feuchtigkeit der Zuluft von 23°C bei angenehmen ca. 42%. Ein nachgeschalteter Enthalpietauscher wird die Wirkung der Zulufttrocknung für den Raum zwar dämpfen, aber nach wie vor spürbar werden lassen. Die Wirkung der Nachwärmung und –befeuchtung durch das Lüftungsgerät lässt sich zudem in den Sommermonaten durch dessen Bypass dämpfen, so dass den Räumen kühlere und trockenere Luft zugeführt wird.

Wird die Aussenluft von Mai bis September bis 5 statt nur bis 10°C gekühlt, so steigt der Anteil am Regenerationsbedarf dank längerer Kühlperiode und höherer Wärmemenge pro m³ Aussenluft auf 50%. Allerdings sinkt dadurch das COP von ca. 7 auf ca. 6 (sh. Anhang IV). Das bedeutet einen höheren Strombedarf zur Luftkühlung von 4.4kWh/m²a (= 870kWh/200m²), gewichtet 8.7kWh/m²a, oder 25% des Minergie-Standards. Wie erwähnt steht diesem Sommergebrauch des Kühlers ein reduzierter Winterstromverbrauch der Wärmepumpe dank Regeneration um ca. 10% oder eine kürzere Sonde gegenüber.

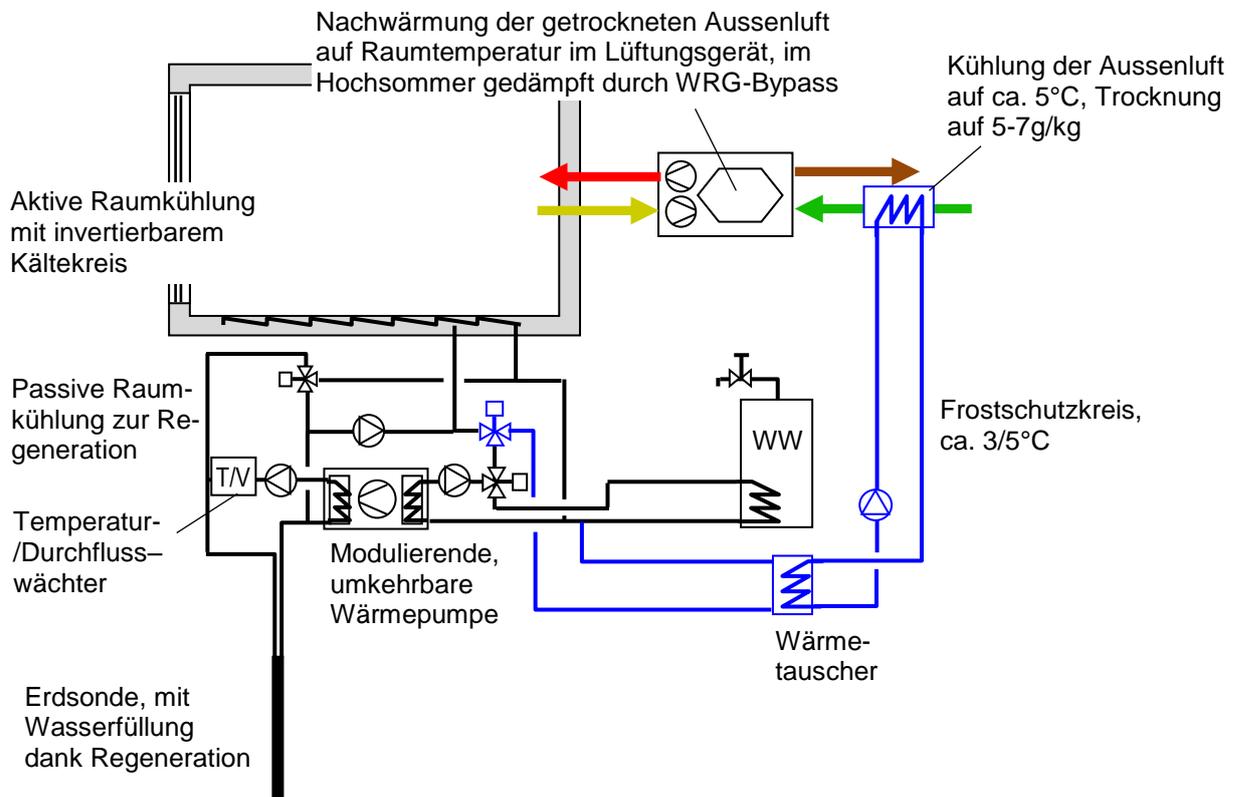
Im EFH ist für diese Art der Aussenluftkühlung ein umkehrbarer Kältekreis, kombiniert mit einem Kaltwasserspeicher, wohl die einfachste Lösung. Allerdings bedeutet ein solches Umkehrventil einen zusätzlichen Druckverlust für das Kältemittel und einen Wärmeverlust zwischen heissem und kaltem Teil des Kältemittelkreises. Zahlen von 5 bis 10% werden genannt (<http://machineryequipmentonline.com/hvac-machinery/heat-pumpsreversing-valve-and-solenoid/>).

Zum Vergleich der Energieverbrauchszahlen der verschiedenen Hydraulikvarianten in Bildern 4.1 und 4.2 sh. Tab. 4.9 in Kap. 4.5, Erreichbare passive Raumkühlung mit Kühlboden.

Gegenüber einem im Freien aufgestellten Aussenluftkühler hat diese neue Methode den Vorteil, dass zusätzliche Geräusche auf den Technikraum beschränkt und ein Teil der Installationen, nämlich die Luftführung und –förderung, mit der Komfortlüftung bereits vorhanden sind.

Bild 4.1: Hydraulisches Schema Wärmepumpen-Heizung und -Kühlung mit Aussenlufttrockner mit Wärmepumpe mit Umkehrventil im Kältekreis, mit Möglichkeit zur aktiven und passiven Bodenkühlung mit Kältekreis-Umkehrventil (in blau die zur Aussenluft-Kühlung notwendigen Teile):

Das Verhältnis zwischen erforderlicher Heiz- und Kühlleistung entspricht etwa den realen Verhältnissen der umkehrbaren Wärmepumpe (sh. Anhang I). Die Kühlung der Aussenluft während der WW-Bereitung ist mit dieser Schaltung nicht möglich. Der Unterbruch der Kühlung während der kurzen Zeit der WW-Bereitung wird die beziehbare Wärme aus der Aussenluft nur wenig reduzieren. Die passive Raumkühlung hingegen funktioniert auch während der Aussenluft-Kühlung. (Nur kalte Leitungen in blau; Temperaturverhältnisse sh. Anhang I)



Nachteil dieser einfachen Schaltung ist der – kleine - Wirkungsgradverlust durch das Umkehrventil im Kältekreis. Das in Ländern mit grosser Verbreitung der Raumkühlung, wie USA oder Italien, standardmässig eingesetzte Ventil bewirkt einen zusätzlichen Druckverlust auf der Saugseite des Kältekreises und zudem einen Verlust durch Wärmeleitung zwischen heissem und kaltem Kreis. Schliesslich kann das Ventil durch Undichtigkeiten auch ein Überströmen von Heissgas auf die Saugseite bewirken, v.a. in älteren Anlagen mit spröder Dichtung. Eine einzige Schätzung von 5 bis 10% Wirkungsgradverlust wurde gefunden (<http://machineryequipmentonline.com/hvac-machinery/heat-pumpsreversing-valve-and-solenoid/>). Ein wissenschaftlicher Artikel, „Effects of reversing valves on heat pump performance“, wurde als zu wenig relevant nicht studiert (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014070079190081Q>).

Bild 4.1A: Schema von Kältemittelkreis mit Umkehrventil:

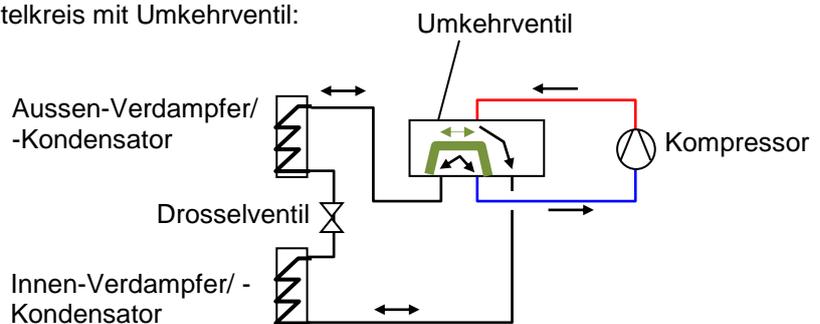


Bild 4.2. Hydraulisches Schema Wärmepumpen-Heizung und -Kühlung mit Aussenlufttrockner mit Wärmepumpe ohne Umkehrventil im Kältekreis, mit Möglichkeit zur aktiven und passiven Bodenkühlung und Direktkühlung der Aussenluft während Warmwasser-Bereitung. Die starke Komplikation gegenüber der Schaltung in Bild 4.1 wird durch den reduzierten Elektrizitätsverbrauch kaum je zu rechtfertigen sein.

(Nur kalte Leitungen in blau, nur warme in rot)

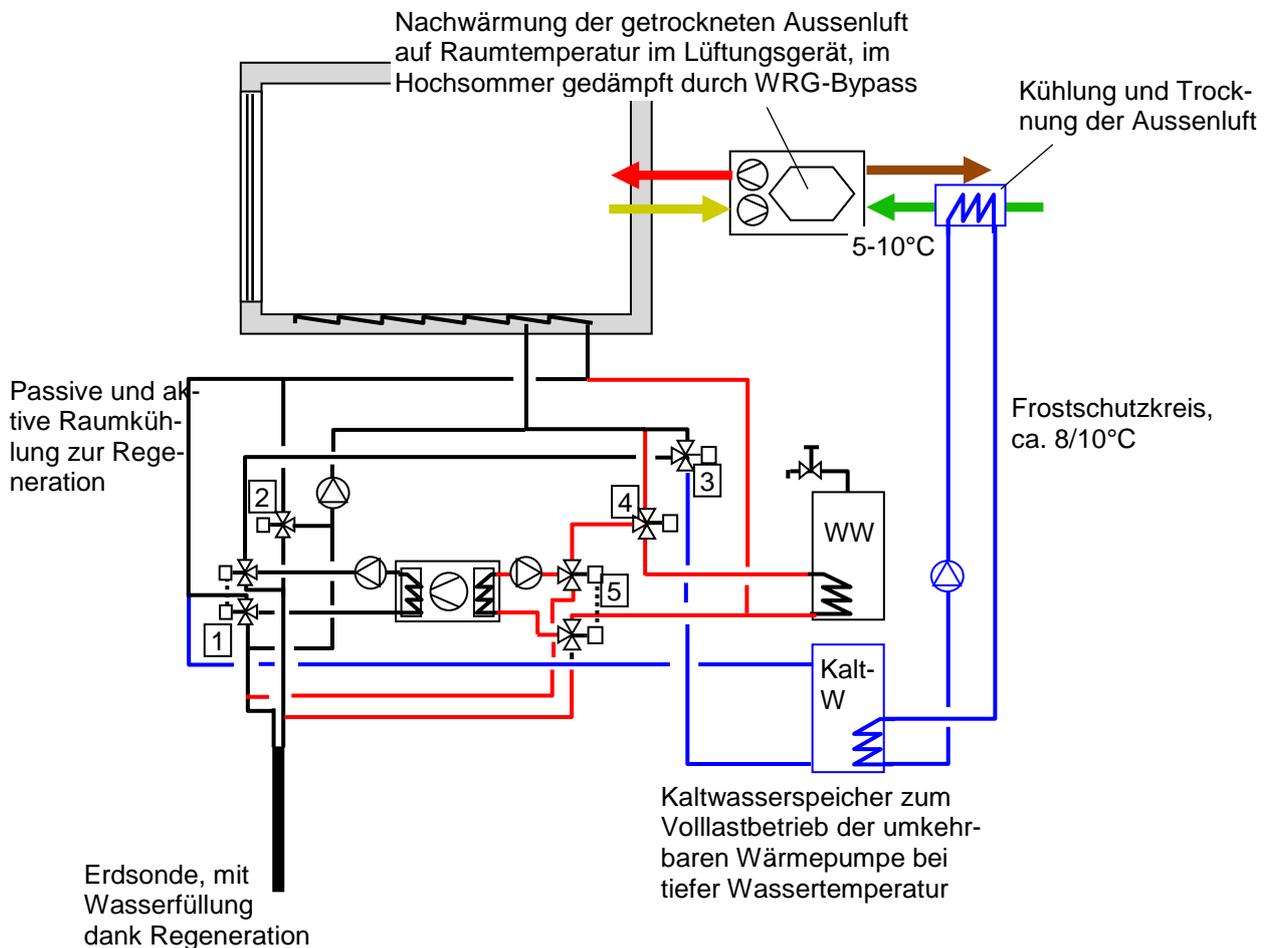


Bild 4.2A: Beispiel für Doppelventil (Nr. 5) für 1 Antrieb von Belimo:



Mögliche Betriebszustände:

	Doppelventil 1	Ventil 2	Ventil 3	Ventil 4	Doppelventil 5
1. Raumheizung	Sonde	beliebig	beliebig	heizen	heizen
2. Warmwasserbereitung	Sonde	beliebig	beliebig	WW	heizen
3. Passive Raumkühlung	beliebig	Mischen	beliebig	beliebig	beliebig
4. Kaltw. für AUL-Kühler	Sonde	beliebig	AUL-Kühler	beliebig	kühlen
5. KW zu AUL-K./WW-Bereit.	aktiv kühlen	Sonde	AUL-Kühler	WW	heizen
6. Aktive Raumkühlung	aktiv kühlen	Sonde	Bodenheizung	beliebig	Sonde
7. Akt. Raumkühl./WW-Bereit.	aktiv kühlen	Sonde	Bodenheizung	WW	heizen

4.3 Fenstergewinn für passive Raumheizung und Regeneration mit Wärmegewinn aus Aussenluft

In Kapitel 4.1 wurde gezeigt, dass vollständige Regeneration allein mit Raumkühlung nur mit fast vollständiger, ganzjähriger Nutzung der Einstrahlung durch die unbeschatteten Fenster möglich wäre. Unangenehme Temperaturen im Raum wären unvermeidlich. Dank dem grossen möglichen Wärmebezug aus der Aussenluft sinkt der Bedarf an Fenstergewinn zur vollständigen Regeneration aber stark ab, wie in Tabelle 4.4 gezeigt. In diesem Kapitel wird auch gezeigt, dass die maximale Strahlungsintensität zur Erreichung genügender Raumkühlung für die vollständige Regeneration nur noch bescheiden und mit der Art der Beschattung nochmals stark beeinflussbar ist.

Tabelle 4.4: Verfügbare Fenstergewinne (nach Abzug der passiven Gewinne für die direkte Raumheizung) in Kombination mit einem Aussenluftkühler in Relation zur für vollständige Regeneration notwendigen Menge:

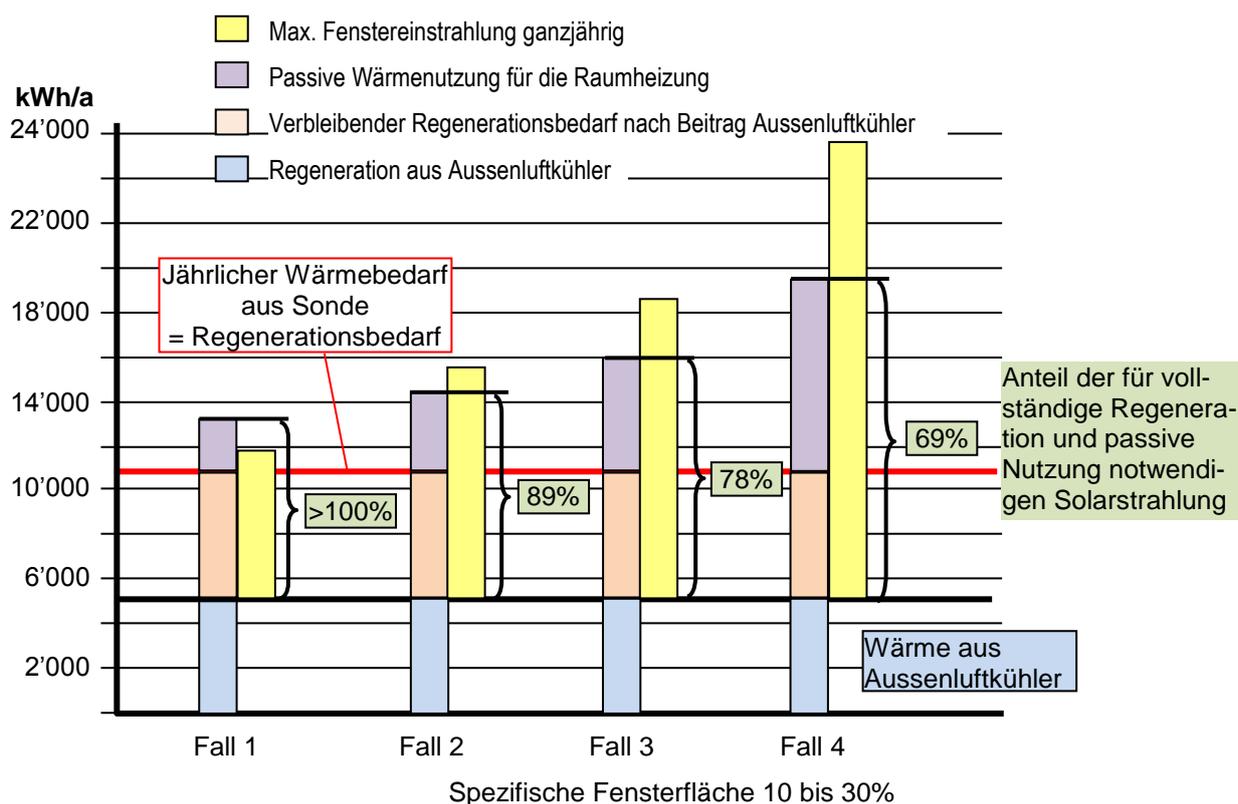
Gewinnanteile, % (100% = 10500kWh/a)	Anteile der maximalen Wärmegewinne an notwendiger Menge für passive Raumheizung und vollst. Regeneration bei Heizwärmebedarf 50kWh/m ² a		
	Ohne AUL-Kühler (Tab. 4.3)	mit AUL-Kühler bis 10°C	mit AUL-Kühler bis 5°C
Fall 1, Fensterfläche/EBF = 10%	43	67	93
Fall 2, Fensterfläche/EBF = 15%	62	86	112
Fall 3, Fensterfläche/EBF = 20%	80	104	130
Fall 4, Fensterfläche/EBF = 30%	111	135	161

Für die vollständige Regeneration und die passive Raumheizung sind damit nur noch die Anteile der maximalen Einstrahlung gemäss Tabelle 4.5 notwendig. Möglichst tiefe Anteile sind aus Komfortgründen von grossem Interesse, damit die Fenster bei hoher Einstrahlung beschattet werden können.

Tabelle 4.5: Anteil der Einstrahlung für passive Raumheizung und Regeneration im Verhältnis zur maximalen jährlichen Fenstereinstrahlung, %

Gewinnanteile, %	Notwendige Anteile an maximalen Wärmegewinnen zur passiven Raumheizung und zur vollständigen Regeneration bei Heizwärmebedarf 50kWh/m ² a		
	Ohne AUL-Kühler	mit AUL-Kühler bis 10°C	mit AUL-Kühler bis 5°C
Fall 1, Fensterfläche/EBF = 10%	>100	>100	>100
Fall 2, Fensterfläche/EBF = 15%	>100	>100	89
Fall 3, Fensterfläche/EBF = 20%	>100	96	78
Fall 4, Fensterfläche/EBF = 30%	90	74	69

Bild 4.3: Anteil des Wärmebezugs aus der Sonneneinstrahlung für Raumheizung und Erdsondenregeneration. Dank dem grossen möglichen Wärmebezug aus der Aussenluft ist der Bedarf an Fenstergewinn zur vollständigen Regeneration stark reduziert. Damit können in den Fällen 2 bis 4 mit grösseren Fensterflächenanteilen Aussenstoren den Raum an Tagen mit übermässiger Einstrahlung beschatten. Im Fall 4 werden nur noch knapp 70% der im Raum maximal anfallenden Strahlung gebraucht für passive Raumheizung und vollständige Regeneration. Nur noch im Fall 1 mit kleinstem Fensterflächenanteil genügt die Einstrahlung nicht zur vollständigen Abdeckung des passiven Gewinns für die Raumheizung und zur Speisung der Raumkühlung zur vollständigen Regeneration.

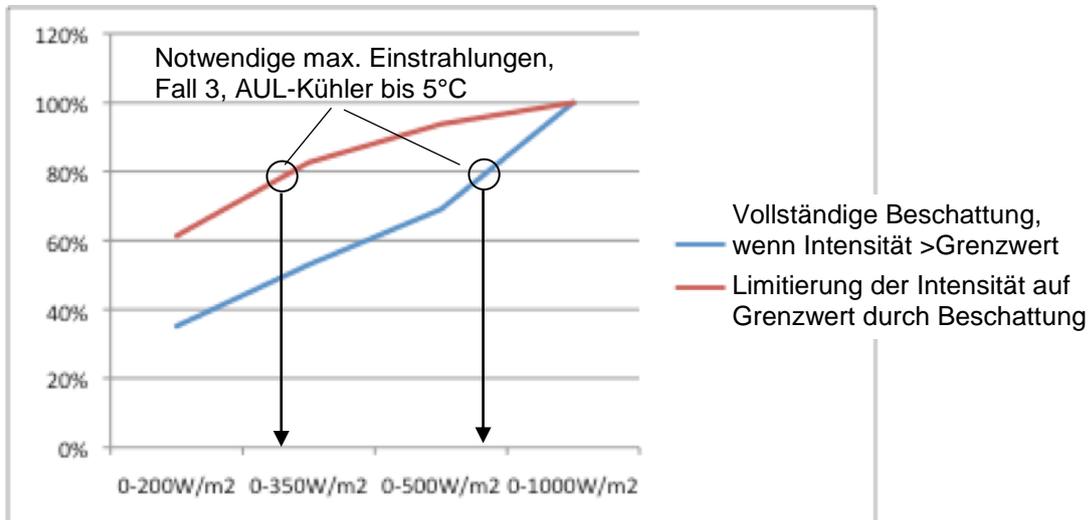


Als Basis für diese Arbeit wurde von Meteotest eine spezielle Auswertung der Meteonorm für die Stadt Zürich erstellt. Es wurden die Anteile der Globalstrahlung auf die Vertikalflächen der 4 Himmelsrichtungen je für die maximalen Intensitäten 200, 350, 500W/m² und Maximum sowie die zugehörigen Stundenzahlen ermittelt.

Um möglichst viel Sonneneinstrahlung bei trotzdem tiefer Strahlungsleistung zu erhalten, darf die Sonne nicht vollständig abgeschattet werden, wenn sie stark scheint. Vielmehr muss während den Stunden mit höherer Einstrahlung als einem Grenzwert durch nur teilweise Abschattung weiterhin Solarstrahlung in den Raum gelangen können. Dazu müssten die Storen so gesteuert werden, dass sie bei hoher Einstrahlung nicht vollständig schliessen, sondern die Strahlung auf dem vom Raum ohne Überheizen absorbierbaren Wert beschränken. Der nutzbare Anteil der Strahlung wird durch

diese partielle Beschattung sehr spürbar erhöht, wie in Bild 4.4 anhand der verfügbaren Werte für die vier Intensitäten gezeigt.

Bild 4.4: Werden die Fenster vollständig beschattet, wenn die Einstrahlung eine bestimmte Intensität überschreitet, so sinkt die jährlich eingestrahlte Energiemenge in Abhängigkeit der maximalen Strahlungsintensität auf die jeweilige Fensterfläche auf den %-Satz gemäss blauer Linie. Werden die Fenster hingegen partiell beschattet, d.h. nur so weit, dass die Einstrahlung während den Stunden höherer Intensität auf dem jeweiligen Grenzwert limitiert wird, so sinkt die Summe der eingestrahlten Energiemengen mit abnehmender maximaler Einstrahlungsintensität sehr viel langsamer (rote Linie).



Mit diesem Diagramm lässt sich nun die maximale Einstrahlung bestimmen, die für vollständige Regeneration notwendig ist. Mit einer Aussenluftkühlung bis 5°C muss im Beispiel von Fall 3 ein Anteil von 77% der Gesamteinstrahlung genutzt werden. Werden die Fenster vollständig beschattet, wenn die Intensität den Grenzwert erreicht, so müssen alle Intensitäten bis über 500W/m² genutzt werden. Werden die Fenster aber jeweils nur bis zum Grenzwert beschattet, die Einstrahlung in den Stunden höherer Einstrahlung aber trotzdem bis zum Grenzwert genutzt, so sind nur Intensitäten bis knapp 350W/m² notwendig.

Tabelle 4.6: Max. Strahlungsintensitäten auf die Südfassade, die zusammen mit dem Beitrag des Aussenluftkühlers (Abkühlung bis 5°C) für vollständige Regeneration notwendig sind, für verschiedene spezifische Fensterflächen und je mit vollständiger und partieller Beschattung Abschattung bei Erreichen des Grenzwerts der Strahlungsintensität.

Gewinnanteile, %	Notwendige Anteile an maximalen Wärmegewinnen und max. Strahlungsintensitäten zur passiven Raumheizung und vollständigen Regeneration bei Heizwärmebedarf 50kWh/m ² a, mit AUL-Kühler bis 5°C		
	%-Anteil	Max. Strahl.-Intensität mit vollst. Beschattung, W/m ²	Max. Strahl.-Intensität mit partieller Beschattung, W/m ²
Fall 1, Fensterfläche/EBF = 10%	>100	-	-
Fall 2, Fensterfläche/EBF = 15%	89	Nahe Maximum	ca. 400
Fall 3, Fensterfläche/EBF = 20%	77	>500	ca. 330
Fall 4, Fensterfläche/EBF = 30%	62	ca. 450	ca. 200

4.4 Raumverhalten bei für vollständige Regeneration genügendem Fenstergewinn

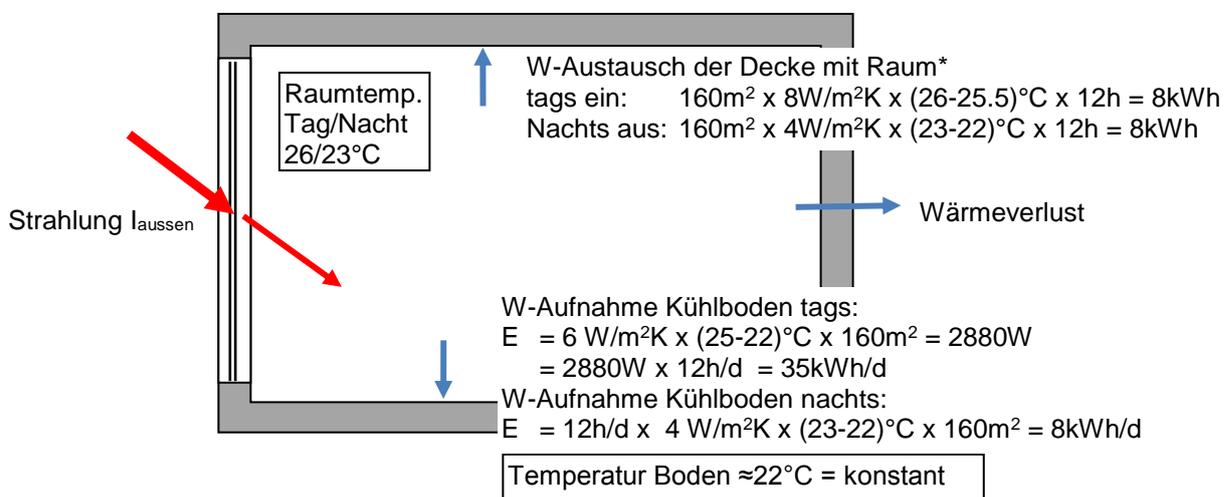
(mit dank Aussenluftkühler reduziertem Wärmebedarf)

Die tagsüber eingestrahelte Wärme erhöht die Raumtemperatur. Ein Teil wird durch den Kühlboden abgeführt. Ein kleiner Teil fließt in die Raumumschließungsflächen, primär die Betondecke. Diese Wärme wird nachts wieder an den Raum abgegeben, womit die nächtlichen Verluste nach aussen und die nächtliche Wärmeaufnahme des Kühlbodens gedeckt werden. Durch grobe Betrachtung der mit akzeptablen Temperaturverhältnissen möglichen Wärmeströme im Raum lässt sich die Limite der eingestrahelten Wärmemenge für üblichen Komfort abschätzen. Genauigkeit ist hierzu nicht gefragt, weil die Realität durch kleine, nicht vorhersehbare Änderungen sehr stark verändert wird, wie durch mobile Teppiche, Möbel, Bilder und – noch stärker - das Nutzerverhalten, z.B. das Bedürfnis, sich selbst und Einrichtungen durch Beschatten vor der Sonnenstrahlung zu schützen oder mit offenen Fenstern den Kontakt zur Umwelt zu suchen, womit Überschusswärme weggelüftet wird.

In einem ersten Schritt wird anhand Bild 4.5 die maximale, mit Temperaturen im Komfortbereich vom Raum absorbierbare Energiemenge bestimmt. In einem zweiten Schritt werden mit den Bildern 4.6 und 4.7 die für vollständige Regeneration anfallenden Energiemengen mit den zwei Beschattungsarten gem. Kapitel 4.3 anhand des Falls 3, mit 20% Fensterflächenanteil, betrachtet.

Durch die Trägheit des Kühlbodens kann dessen Oberflächentemperatur im Tagesverlauf nur wenig variieren. Die Variation der Leistungsaufnahme muss also durch die Raumtemperaturschwankung geschehen, die aus Komfortgründen auf etwa 23 bis 26°C, also 3K, begrenzt ist. Sie beträgt damit maximal rund $6\text{W/m}^2\text{K} \times 3\text{K} \times 160\text{m}^2 = 2880\text{W}$ oder 35kWh/d bei 12 h/d. Mit je ca. $\frac{1}{4}$ der Temperaturdifferenz kann zudem die Decke tags Wärme aufnehmen und nachts abgeben, also ca. 8kWh/d ($\frac{1}{4}$: Die für den Wärmeaustausch verfügbaren 3K müssen die Wärme zwischen Raumluft und Decke in beiden Richtungen tauschen, die Wärmeleitung in der Decke antreiben und die Temperaturschwankung der Decke erlauben, sh. auch Bild 4.5). Diese unbedeutende Wärmemenge deckt den nächtlichen Verlust des Raums ins Freie oder wird - an heißen Sommertagen - nachts durch die Bodenkühlung im Umfang von rund $12\text{h/d} \times 4\text{W/m}^2\text{K} \times (23^\circ\text{C} - 22^\circ\text{C}) \times 160\text{m}^2 = 8\text{kWh/d}$ an die Erdsonde abgeführt (für den Wärmeübergang durch Strahlung von der warmen Decke zum kühlen Boden wird von einem reduzierten Koeffizienten von $4\text{W/m}^2\text{K}$ ausgegangen).

Bild 4.5: Raummodell zur Bestimmung der durch den Boden täglich maximal abgeführten Wärmemenge bei Annahme einer als noch komfortabel erachteten täglichen Schwankung der Raumlufttemperatur von 23 bis 26°C: Damit die Deckenoberfläche um 1.5K* schwanken kann, bleibt für den Wärmeaustausch zwischen Oberfläche und Raum nur eine kleine Temperaturdifferenz von ca. 0.5K tags und 1K nachts übrig. Mit diesen Annahmen erreicht die ausgetauschte Menge etwa die Speicherkapazität der Decke. (Tatsächlich wird die Kapazität der Decke höher sein, weil ein wesentlicher Teil von deren Wärmeaufnahme durch indirekte Strahlung und nicht durch den – schlechten - Wärmeübergang zwischen Luft und Decke erfolgt, wie in Anhang III gezeigt). Der Wärmeverlust des Raums nach aussen erhöht die maximale Einstrahlung für komfortable Raumtemperaturen aber nur durch ihren Anteil tags. Wärmeverluste nachts reduzieren lediglich die Wärmeabfuhr von der Decke zum Kühlboden. Bei hoher Einstrahlung wird die Aussentemperatur tags zwischen Mai und September aber selten $<20^\circ\text{C}$ betragen. Der Effekt wird also vernachlässigt und für die weitere Rechnung von einem maximalen Wert von $35 + 8 = 43\text{kWh/d}$ ausgegangen, mit dem die Komfortbedingungen als immer noch eingehalten erachtet werden.



* Zur Bestimmung der Wärmespeicherkapazität der Decke im Tagesrythmus muss die Eindringtiefe im Beton in 12h betrachtet werden. Bei einem Amplitudenabfall auf 37% des Anstiegs an der Oberfläche beträgt sie 10cm. Bei einer mittleren Temperaturänderung dieser äussersten 10cm von 0.6 mal Amplitude der Oberfläche und einer Schwankung der Oberflächentemperatur von 1.5K ergibt dies eine Kapazität der Decke von

$$E = \rho \times c (\text{Beton}) \times 0.1\text{m} \times 0.6 \times \text{Oberflächenamplitude} \times \text{Deckenfläche} \\ = 640 \text{ Wh/m}^3\text{K} \times 0.1\text{m} \times 0.6 \times 1.5\text{K} \times 160\text{m}^2 = 9\text{kWh} (\approx \text{mit Raum ausgetauschte } 8\text{kWh})$$

Bild 4.6: Max. erhaltene Energie/d mit Fall 3 bei vollständiger Beschattung bei hohen Intensitäten. Mit der gem. Tabelle 4.6 notwendigen max. Einstrahlung von 500W/m^2 wird die Komfortgrenze des Kühlbodens, d.h. die maximale Wärmemenge, die im Raum gespeichert und aus dem Raum abgeführt werden kann, erreicht:

$$E_{\text{Str}} = \text{Gleichzeitig bestrahlte Fensterfläche} \times \text{Strahlungsintensität} \times \text{Glasanteil} \times \text{g-Wert} \times 8\text{h/d} \\ = 20\text{m}^2 \times 500\text{W/m}^2 \times 0.8 \times 0.6 \times 8\text{h/d} = 38\text{kWh/d}$$

$$E_{\text{tot}} = \text{E-Strahlung} + \text{tags anfallender Anteil (E-Elektro + E-Personen)} \\ = 38\text{kWh} + 0.5 \times (10+3)\text{kWh} = 44\text{kWh}.$$

Die mit komfortablen Temperaturen maximal mögliche abzuführende Wärmemenge von 43kWh/d wird also erreicht.

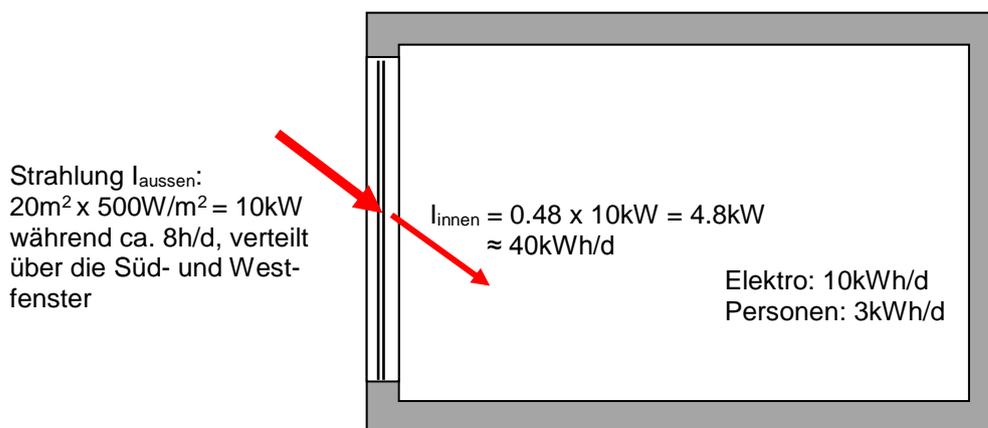
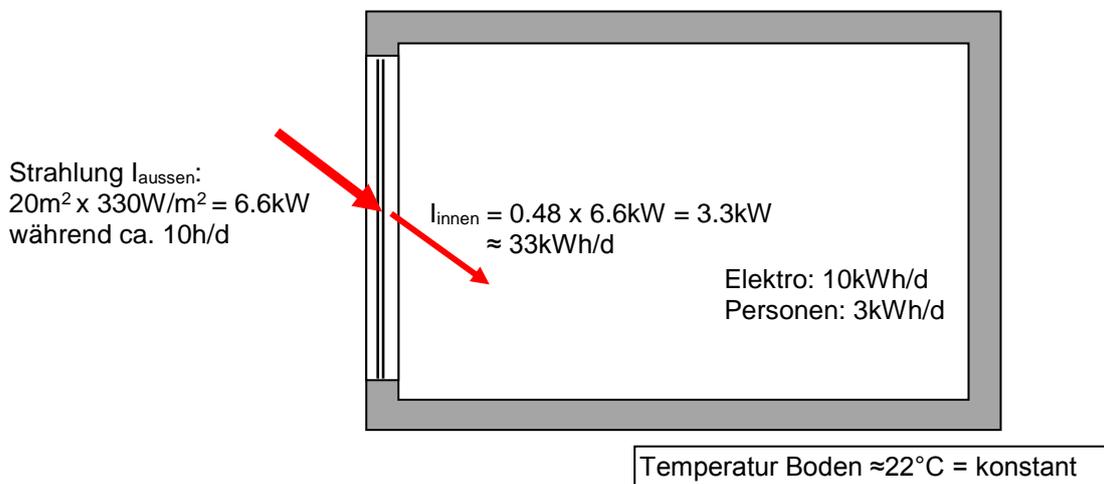


Bild 4.7: Max. erhaltene Energie/d mit Fall 3 bei partieller Beschattung bei hohen Intensitäten. Mit der gem. Tabelle 4.6 notwendigen max. Einstrahlung von 330W/m^2 wird die Komfortgrenze des Kühlbodens, d.h. die maximale Wärmemenge, die im Raum gespeichert und aus dem Raum abgeführt werden kann, deutlich unterschritten.

$$E_{\text{Str}} = \text{Gleichzeitig bestrahlte Fensterfläche} \times \text{Strahlungsintensität} \times \text{Glasanteil} \times \text{g-Wert} \times 10\text{h/d} \\ = 20\text{m}^2 \times 330\text{W/m}^2 \times 0.8 \times 0.6 \times 10\text{h/d} = 32\text{kWh/d}$$

$$E_{\text{tot}} = \text{E-Strahlung} + \text{tags anfallender Anteil (E-Elektro + E-Personen)} \\ = 32\text{kWh} + 0.5 \times (10+3)\text{kWh} = 38\text{kWh}.$$

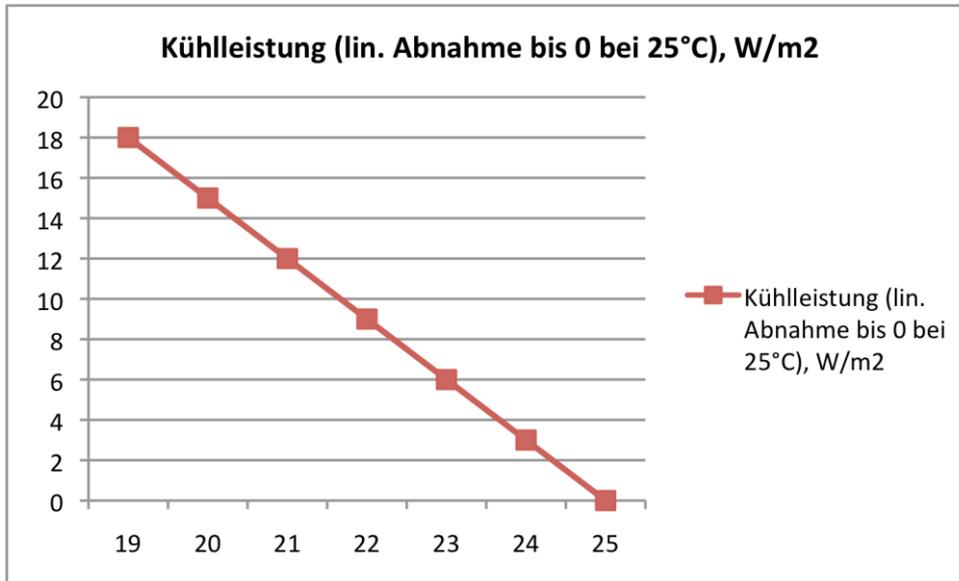
Die mit komfortablen Temperaturen maximal mögliche abzuführende Wärmemenge von 43kWh/d wird also deutlich unterschritten.



4.5 Erreichbare passive Raumkühlung mit Kühlboden

Der Kühlboden kann die geforderte Kühlleistung von 2880W gem. Bild 4.5 nur erreichen, wenn die Wassertemperatur aus der Erdsonde tief genug ist. Bei höherer Sondentemperatur sinkt die Leistung der Bodenheizung bei gleicher Raumtemperatur ab, wie in Bild 4.7 dargestellt.

Bild 4.8: Leistung des Kühlbodens in Abhängigkeit der Temperatur des aus der Sonde zufließenden Wassers. Unterhalb 19°C erreicht sie die gem. Bild 4.5 erforderlichen 18W/m² oder 2880W mit 160m² aktiver Fläche. Angenommen sind eine Spreizung von 3K, ein Rohrabstand von 100mm und ein Fliesenboden (sh. auch Anhang IV).



Zur Ermittlung der erwarteten Sondentemperaturen bei Rücklieferung der für vollständige Regeneration notwendigen Wärmemenge hat die Geowatt Engineering AG eine Studie erstellt [6]. Darin werden die für eine vollständige Regeneration notwendigen Sondenrücklauftemperaturen mit Sondenbelastungen im Heizbetrieb von 25, 35 und 45 W/m bei 1500 und 2000 Volllaststunden angenommen, mit Rücklieferungen ausschliesslich im Sommerhalbjahr resp. einem kleinen Anteil auch in den Wintermonaten. Die wichtigsten 2 Diagramme daraus, mit 2000 resp. 1330 Stunden Rücklieferung allein im Sommerhalbjahr, sind in Bild 4.9 für eine Wärmeentnahme von 2000 Volllaststunden und 35W/m dargestellt.

Die Fälle mit ausschliesslicher Rücklieferung im Sommerhalbjahr werden als Basis verwendet, weil der dominante Anteil der Raumkühlung zur Regeneration im Sommer stattfindet, wenn der Raum bereits bei schwacher Einstrahlung einen Überschuss an Wärme erhält, und zudem auch der Aussenluft-Kühler nur von April bis Oktober in Betrieb sein wird.

Gemäss Bild 4.9 liegt die EWS-Austrittstemperatur bei einer Rücklieferung von 2000h/a während des ganzen Sommers unter 19°C (bei üblichen 35W/m und 2000 Jahresvolllaststunden für die Wärmeentnahme). Mit 3K Spreizung ist also eine ganzjährige passive Bodenkühlung möglich.

Sinkt die Rücklieferzeit aber auf 1300h/a mit entsprechend 50% grösserer Leistung zur vollständigen Regeneration, so steigt die Sondaustrittstemperatur während mindestens 2 Monaten über 19°C an, womit ein Teil der Raumkühlung aktiv bereitgestellt werden müsste.

Die Bedingung der Regeneration während 2000h/a wäre mit reiner Raumkühlung kaum einzuhalten. Typische Jahresbetriebsstunden für die Raumkühlung in der Schweiz sind eher 1000 und eine Ausdehnung etwa durch eine Speicherung der Überschusswärme im Raum zur nächtlichen Abfuhr ist nur sehr beschränkt möglich, wie in Bild 4.5 gezeigt, in dem nachts nur 8 von insgesamt 43kWh/Tag weggekühlt werden. Nachdem aber die Hälfte der Wärmemenge mit der Aussenluftkühlung während ca. 4000h/a (Tabelle 4.4) abgegeben werden und nur die andere Hälfte der Raumkühlung mit ca. 1000h/a, sind die Verhältnisse zur passiven Regeneration deutlich günstiger. Insbesondere wird es mit der maximal halben Leistung der Raumkühlung einfacher sein, die sehr wichtige Spreizung von Bodenheizungs- und Sondenkreis bei nur 3K zu behalten. Zudem wird helfen, dass dank der Regeneration die Sonde mit Wasser betrieben werden kann, womit der Wärmetauscher zwischen Bodenheizung und Sonde mit seinem zusätzlichen Temperaturverlust entfallen kann.

Variiert die spezifische Belastung der Sonde von 35W/m gemäss Bild 4.9 auf 25 resp. 45W/m gemäss Bild 4.10 bei weiterhin 2000h/a für Wärmebezug und -rücklieferung, so sinken resp. steigen die Sondentemperaturen um 2K. Mit der kleineren Sondenbelastung erlaubt dies eine ganzjährige passive Kühlung zur Sondenregeneration bei sogar 4K Spreizung des Bodenheizungs-/Erdsonden-

kreises. Bei der höheren Sondenbelastung von 45W/m ist hingegen auch mit nur 3K Spreizung während 2 bis 3 Monaten pro Jahr eine aktive Kühlung nötig.

Bild 4.9: Verlauf der Sontentemperatur bei Wärmebezug mit 35W/m und 2000 Vollaststunden, Wärmeeintrag mit 2000h/a (oben) und mit 1333h/a (unten). Die um 50% höhere Leistung des jährlich gleichen Wärmeeintrags wirkt sich mit einer rund 5K höheren Vorlauftemperatur sehr stark auf die notwendige Eintragstemperatur aus. 2K hiervon sind allerdings das Resultat der von 4K auf 6K erhöhten Spreizung. Aber auch die EWS-Austrittstemperatur steigt während den Rücklieferungen um etwa 2.5K an.

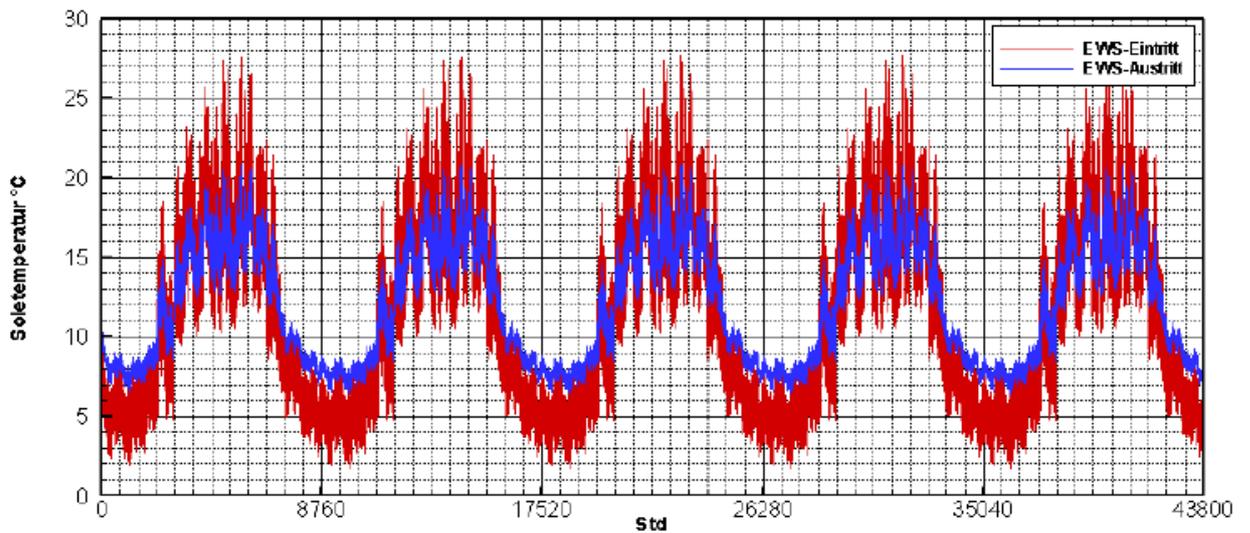
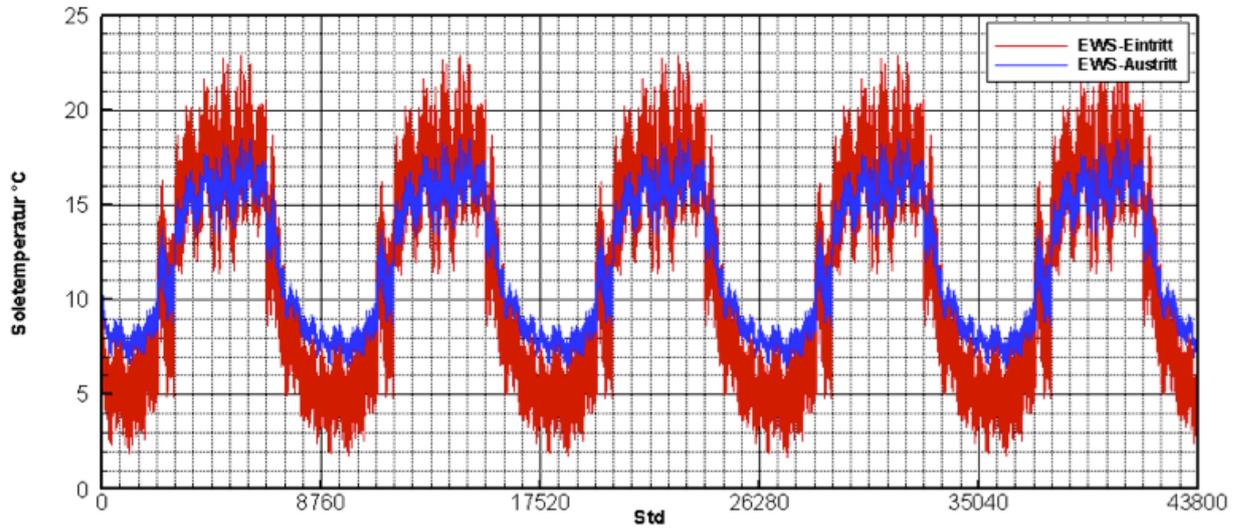


Bild 4.10: Temperaturen von Ein- und Austritt der Erdsonde bei Wärmebezug mit 2000h/a, mit einer Sondenbelastung von 25W/m (oberes Diagramm) und 45W/m (unteres Diagramm). Die vollständige Rücklieferung ist mit ebenfalls 2000h/a und damit gleichen spezifischen Leistungen pro Sondenlänge gerechnet. Gegenüber der mittleren Sondenbelastung im Heizfall von 35W/m (Bild 4.9, oberes Diagramm) sinken die Temperaturen um etwa 2K bei der tiefen spezifischen Sondenbelastung und steigen um etwa 2K bei der hohen. Bei nur 25W/m könnten also 100% der für vollständige Regeneration notwendigen Wärme mit rein passiver Raumkühlung selbst bei 4K Spreizung im Kühlfall an die Sonde abgegeben werden. Umgekehrt wäre bei 45W/m Sondenbelastung dafür während 2 bis 3 Monaten eine Kompressorkühlung nötig.

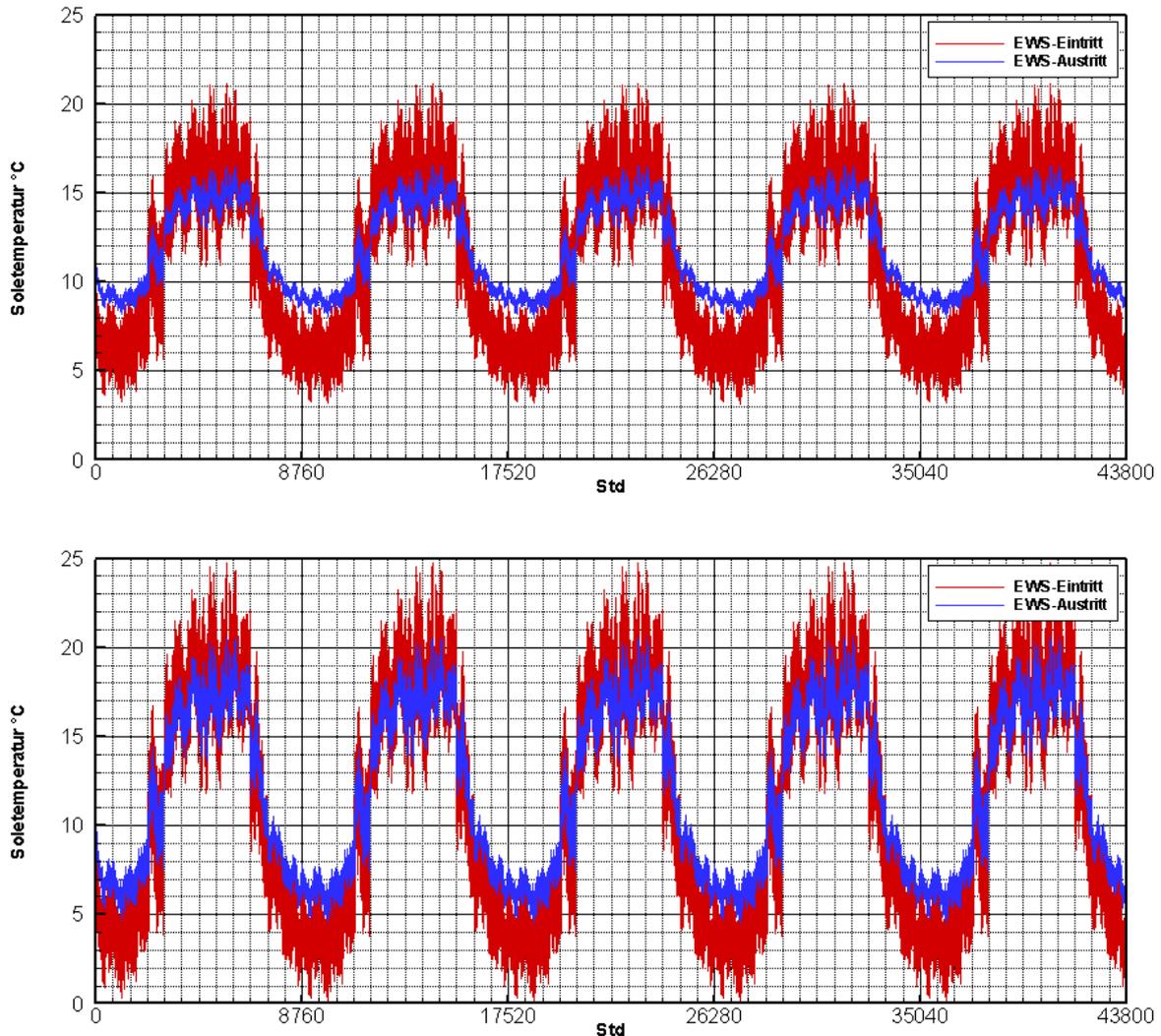


Tabelle 4.7 zeigt die Ein- und Austrittstemperaturen bei hoher Regenerationsleistung mit ca. 1600 Jahresstunden durch Vergleich der beiden Fälle in Bild 4.9. Für die Nutzbarkeit der Sonde zur passiven Kühlung ist die angenommene maximale Spreizung entscheidend. Kann diese auf zB. 3K beschränkt werden, kann fast die ganze Wärmeabfuhr aus der Bodenheizung passiv erfolgen, mit einzelnen Engpässen im Juli und August. Steigt sie jedoch auf 6K an, wird die Raumtemperatur über 25°C ansteigen, d.h. etwa Juni bis September ist eine aktive Raumkühlung nötig.

Monat	April	Mai	Juni	Jul.	Aug.	Sept.	Okt.
Mitteltemp. Sondenaustritt, °C	14	17	18	20	20	18	16
Mitteltemp. Sondeneintritt bei Spreizung 3K, °C	17	20	21	23	23	21	19
Realist. passiver Anteil an max. Leistung, %	100	100	100	70	70	100	100
Mitteltemp. Sondeneintritt bei Spreizung 6K, °C	20	23	24	26	26	24	22
Geschätzter passiver Anteil an Raumkühlung, %	100	70	50	25	25	50	100

Tabelle 4.8: Mögliche Anteile passive Kühlung mit Hydraulik gem. Bild 4.1 und 4.2 für Fall 3, 20% Fensterflächenanteil, Aussenluftkühlung bis 5°C:

Monat	Wärmebedarf aus EWS, kWh/Mt	verfügbare Wärme aus AUL-Kühler, Abkühl bis 5°C; COP=6 kWh/Mt.	Werte v. "Bilanz Haus", Fall 3			von Tabelle 11		Hydraulik 4.1		Hydraulik 4.2	
			verfügbare Einstrahl. für Regen., kWh/Mt	für Regen. Anteil aus Einstrahl., %	notw. Wärme aus Einstrahl., kWh/Mt	Geschätzte Temp. ES, °C	Temp. VL Regen., Spreizung 3K, °C	mögl. Anteil Free Cooling, %	mögl. Wärme aus Free-Cool., kWh/Mt	pass. Kühlung AUL bei WW-Bereitung, kWh/Mt	pass. Wärme aus AUL für WW-Bereitung und Raumkühlung, kWh/Mt
Jan	1576		412	20%	82	9	12	100%	82		82
Feb	1502		435	20%	87	9	12	100%	87		87
Mae	1263		891	40%	357	10	13	100%	357		357
Apr	1085	147	853	50%	427	14	17	100%	427	147	574
Mai	250	524	833	70%	583	17	20	100%	583	233	816
Jun	250	1020	928	75%	696	18	21	100%	696	250	946
Jul	250	1115	1621	75%	1216	20	23	50%	608	250	858
Aug	250	1115	1486	70%	1040	20	23	50%	520	250	770
Sep	250	925	918	40%	367	18	21	100%	367	250	617
Okt	993	373	667	50%	334	16	19	100%	334	233	567
Nov	1342		280	20%	56	11	14	100%	56		56
Dez	1490		291	20%	58	9	12	100%	58		58
Summe Monate			9617		5303						
Jahr Bedarf	10500	5220	9617		5280				4175	1613	5788
Anteil, %		50%			100%				40%	15%	55%

Tabelle 4.9: Wärmequellen und Stromverbrauch für die Regeneration mit Hydraulik 4.1 und 4.2: (Ermittlung der COP-Werte sh. Anhang II, Werte für Hydraulik 4.1 um 7.5% vermindert wegen Wirkungsgradverlust durch Umkehrventil)

	Hydraulik 4.1			Hydraulik 4.2				
	kWh _{th} /a	COP	kWh _{el} /a	kWh _{el} /m ² a	kWh _{th} /a	COP	kWh _{el} /a	kWh _{el} /m ² a
Wärme aus AUL-Kühler für WW-Bereitung	5220				3607			
COP AUL-Kühler		5.55				6		
Stromverbrauch AUL-Kühler			941	4.7			601	3.0
Wärme aus passiver Raumkühlung	4175				5788			
COP passive Kühlung		40				40		
Stromverbrauch passive Kühlung			104	0.5			145	0.7
Wärme aus aktiver Raumkühlung	1105				1105			
COP aktive Raumkühlung		8.33				9		
Stromverbrauch aktive Raumkühlung			133	0.7			123	
Mehrverbrauch für Heizung/WW, 7.5%			263	1.3			0	
Minderverbr. dank > Sondentemp., 10%			-350				-350	
Total	10500	9.6	1090	5.5	10500	20.2	519	2.6
In Prozent des ME-Standards			31%				15%	

Trotz dem Mehrverbrauch der Wärmepumpe mit Umkehrventil von fast 600kWh/a lohnt sich die starke Komplizierung von Kleinanlagen mit Hydraulik 4.2 (vier 3-Wegventile und ein Doppel-3-Wegventil statt drei) kaum. Der reduzierte Stromverbrauch durch die WW-Bereitung mit Wärme aus der Aussenluft-Kühlung und das entfallende Kältekreis-Umkehrventil ist zu gering, sofern nicht die präzise Einhaltung der Raumtemperatur eine aktive Raumkühlung verlangt.

Insgesamt ist der Strombedarf für die Regeneration mit ca. 15% aber auch mit Hydraulik 4.2 spürbar, trotz der ca. 10% verbesserten Leistungsziffer der Wärmepumpe für Raumheizung und Warmwasserbereitung dank 3 bis 5K höherer Sondentemperatur.

Der höhere Sommer-Stromverbrauch zugunsten eines geringeren Winterbedarfs wird durch den sich abzeichnenden Überschuss an erneuerbarem Strom im Sommer, ev. aus eigener PV-Anlage, weiter relativiert. Soll für den Aussenluftkühler allerdings weitgehend eigener PV-Strom eingesetzt werden, ist eine Batterie nötig, weil der Kühler im Sommer ganztags in Betrieb stehen muss.

4.6 Folgerungen zur Regeneration durch Raumkühlung

- Für eine vollständige Regeneration der Erdsonden durch die Fenstereinstrahlung ist ein tiefer spezifischer Wärmebedarf in der Grössenordnung des Minergie-Basisstandards Voraussetzung. Eine vollständige Regeneration ausschliesslich durch die Fenstereinstrahlung scheint mit tolerierbaren Temperaturbedingungen im normalen Wohnraum aufgrund des resultierenden ungünstigen thermischen Komforts in den besonnten Räumen aber trotzdem nicht erreichbar, wären dafür doch Fensterflächen von ca. 30% der EBF nötig, deren Einstrahlung ganzjährig fast vollständig genutzt werden müsste (Tabelle 4.2). Die Komfortbedingungen im Raum wären für übliche mitteleuropäische Vorstellungen mit jeder Art der Raumkühlung zu ungünstig, und gäbe nur wenige Anwender, die wegen dem kleinen Problem der Erdsondenregeneration ihre Storen nicht entsprechend ihrem Bedürfnis nach Beschattung oder Aussicht einstellen würden.
- Durch Kühlung und Trocknung der für den Luftwechsel im Gebäude notwendigen Aussenluft auf 10 bis 5°C kann ein Anteil von 25 bis 50% der für vollständige Regeneration notwendigen Wärmemenge auf einfache Art gedeckt werden (Tabelle 4.3). Durch Nachwärmen im nachgeschalteten Lüftungsgerät kann diese Wärmegewinnung auch an kühlen Tagen, etwa im April oder Oktober, ohne spürbaren Einfluss auf die Raumtemperatur in Betrieb bleiben. Die Lufttrocknung verbessert im Sommer den Raumkomfort, und auch die Zuluft kann an heissen Tagen durch Steuerung des Bypass des Lüftungsgeräts zur Raumkühlung beitragen.
- Müssen nur noch 50% der für vollständige Regeneration nötigen Wärme durch die Fenstereinstrahlung geliefert werden, so sinken deren zu nutzende Anteile drastisch ab (Tabelle 4.5). Werden zudem die Storen so gesteuert, dass sie bei Erreichen einer bestimmten Strahlungsintensität auf die Fassade nicht vollständig schliessen, sondern nur so weit, dass die Raumtemperatur nicht weiter ansteigt, so können auch bei tiefer maximaler Strahlungsintensität im Raum hohe Anteile der Gesamtstrahlung genutzt werden (Bild 4.4 und Tabelle 4.6).
- Die Temperaturbedingungen im Raum werden so auch bei vollständiger Regeneration sehr viel akzeptabler, müssen doch bei 20% Fensterfläche nur noch Intensitäten bis max. 330W/m² (Bild 4.7, durch Storen begrenzte Strahlungsintensität) resp. ca. 500W/m² (Bild 4.6, vollständige Abschattung bei höherer Strahlungsintensität) genutzt werden.
- Durch Ersatz eines Teils der üblichen Aussen- durch Innenstoren können als weiterer Nebennutzen der Raumkühlung die Kosten für die Beschattung reduziert werden. Gleichzeitig wird dadurch erreicht, dass ein minimaler und kalkulierbarer Anteil der Einstrahlung im Raum anfallen wird. Dieser kann für die Regeneration immer noch verloren gehen, wenn der Bewohner die Wärme weglüftet. Doch ist der Raumkomfort sehr viel besser, wenn die einfallende Sonnenstrahlung nicht direkt auf die Personen im Raum trifft. Dies wird das Bedürfnis reduzieren, den Raum durch offene Fenster zu kühlen, wenn die Bodenkühlung für angenehme Raumtemperaturen sorgt.
- Die Leistung, mit der eine Sonde regeneriert wird, bestimmt sehr stark die Eintrittstemperatur in die Sonde (Bild 4.9). Einerseits erhöht eine grosse Leistung das Temperaturgefälle zwischen Sole und Erdreich. Andererseits steigt dadurch auch die Spreizung. Letztere kann durch grösseren Wasserdurchfluss kompensiert werden. Eine vollständige Regeneration mit passiver Kühlung der Bodenheizung wird im schweizerischen Mittelland bei grosszügiger Auslegung der Sonde (max. 35W/m Entzugsleistung) und kleiner Spreizung (max. 3K) mit nachgeschalteter aktiver Kühlung der Aussenluft möglich, wenn eine Raumtemperatur bis etwa 26°C akzeptiert wird. In Kombination mit der getrockneten Zuluft dürfte diese Bedingung für die grosse Mehrheit der Nutzer komfortabel sein. Die Halbierung der maximalen Kühlleistung durch die Aussenluftkühlung ist für die direkte Nutzbarkeit einer möglichst hohen Sondenaustrittstemperatur entscheidend.
- Soll eine etwas tiefere Raumtemperatur garantiert werden können, muss ein Teil der Raumkühlung mit Kältemaschine erfolgen, womit der Stromverbrauch gem. Tabelle 4.9 je nach gewählter Hydraulik gegenüber der alleinigen Aussenluftkühlung mit 4.4 kWh/m²a für 50% Regeneration (Tabelle 4.3) aber kaum ansteigt. Ein Teil dieses Mehrverbrauchs, nämlich etwa 1.5 bis 2kWh/m²a, wird sich zudem dank 3-5K höherer Sondentemperaturen durch eine höhere Leistungsziffer der Wärmeerzeugung kompensieren lassen.
- Dank dem hohen erreichbaren Anteil der Regeneration und der Lufttrocknung durch die Aussenluftkühlung genügt aber auch nur schon eine geringe zusätzliche passive Raumkühlung für eine drastische Verlängerung der Sondennutzungszeit und für komfortable sommerliche Bedingungen.

5 Quartierstrasse als Sonnenkollektor

5.1 Konstruktion des Strassen- oder Asphaltkollektors

Die englische Firma OGI, Groundwater Specialists, Meadowfield, Durham, bietet auf ihrer Homepage (<http://www.ogi.co.uk/road-energy/>) ein Road Energy System (RES) als Sonnenkollektor zum Füllen von Erdspeichern an.

Bild 5.1: OGI erwähnt einen Wärmegewinn von jährlich 250kWh/m^2 im englischen Klima. Die Kunststoffrohre werden in einen Raster, ebenfalls aus Kunststoff, eingeclipst.



Bild 5.2: Das Westschweizer Ingenieurbüro B. Matthey, Montezillon, hat schon 1990 einen Erdspeicher mit einem Asphaltkollektor erwärmt, als Quelle für die Salle Polyvalente de Cortaillod [1]. Von Oktober bis März wird die gesammelte Wärme direkt der Wärmepumpe zugeführt, von April bis September dem Speicher. Die so jährlich gesammelte Wärme wird mit 330kWh/m^2 angegeben. D.h. 32m^2 Strasse sind nötig zur vollständigen Regeneration der Sonden des Referenz-EFH von 200m^2 EBF mit $10'500\text{kWh/a}$. Die real erreichbare Wärmemenge wird stark von der Sondentemperatur, der Beschattung der Sammelfläche und deren Ausführung abhängen.



Bild 5.3 Die australische Firma Vim Sustainability Consulting setzt die Methode ebenfalls als Wärmequelle für Erdspeicher ein.

(http://www.spec-net.com.au/press/0209/vsc_110209.htm)



Bild 5.4: Rehau bietet wärmefeste Kunststoffrohre an, die sich zum Eingießen in den heißen Asphalt eignen. Primär wird das Produkt von Rehau aber zur Beheizung von Strassen im Winter und nicht als Kollektor eingesetzt [2].



REHAU bietet mit RAUWAY stabil in jeder Hinsicht ein optimales Rohrsystem. Für den Einsatz im Gussasphalt sind drei Aspekte zu beachten: Zunächst muss das Verhältnis von Durchmesser zu Wanddicke dahingehend optimiert werden, dass eine ausreichende Ringsteifigkeit des Rohrsystems erreicht wird. So werden die Rohre beim Einbau nicht deformiert.

Weiterhin darf die Wanddicke nicht zu stark sein, damit bei gegebener Abmessung ausreichend freier Querschnitt vorhanden ist. Hierdurch wird ein zu hoher Druckverlust mit daraus resultierendem, erhöhtem Pumpenstrombedarf vermieden. Zudem würde eine zu große Wanddicke zu verringerter Wärmeübertragung vom Frostschutzgemisch an den Asphalt führen.

Schließlich müssen Rohre beim Einbau in Gussasphalt kurzfristigen Temperaturen von 250°C standhalten.

RAUWAY stabil ist ein Asphaltkollektorrohr mit PE-Xa Grundrohr, längs verschweißter Aluminiumschicht und einem PE-HD Schutzmantel. RAUWAY



Während OGI und Rehau Kunststoffrohre einsetzen, wurden im 1994 von Polydynamics in der Schweiz realisierten Projekt SERSO Chromstahlrohre verwendet [8]. In diesem Projekt wurden nur 140kWh/m² Wärme gesammelt [9]. Weshalb der Ertrag hier soviel tiefer ist als von OGI oder B. Matthey, Bild 5.2, kommuniziert, ist unbekannt. Vermutet werden die höheren Speichertemperaturen von 9 bis 14°C, statt 5 bis 10°C im Falle des Wärmepumpenbetriebs.

5.2 Verfügbarkeit der notwendigen Absorberflächen

a. Beispiel städtische MFH-Siedlung Höfliweg

Ca. 150 Wohnungen, EBF 14'000m² in 5 bis 10-geschossigen MFH, also 70mal Referenzgebäude gem. Kap. 3;

Wärmebedarf aus Sonde für diese Siedlung mit gleichem spez. Bedarf wäre: 735'000kWh/a

Notwendige Fläche der Quartierstrasse mit Angabe von [1] (330kWh/m²a): 2200m²;

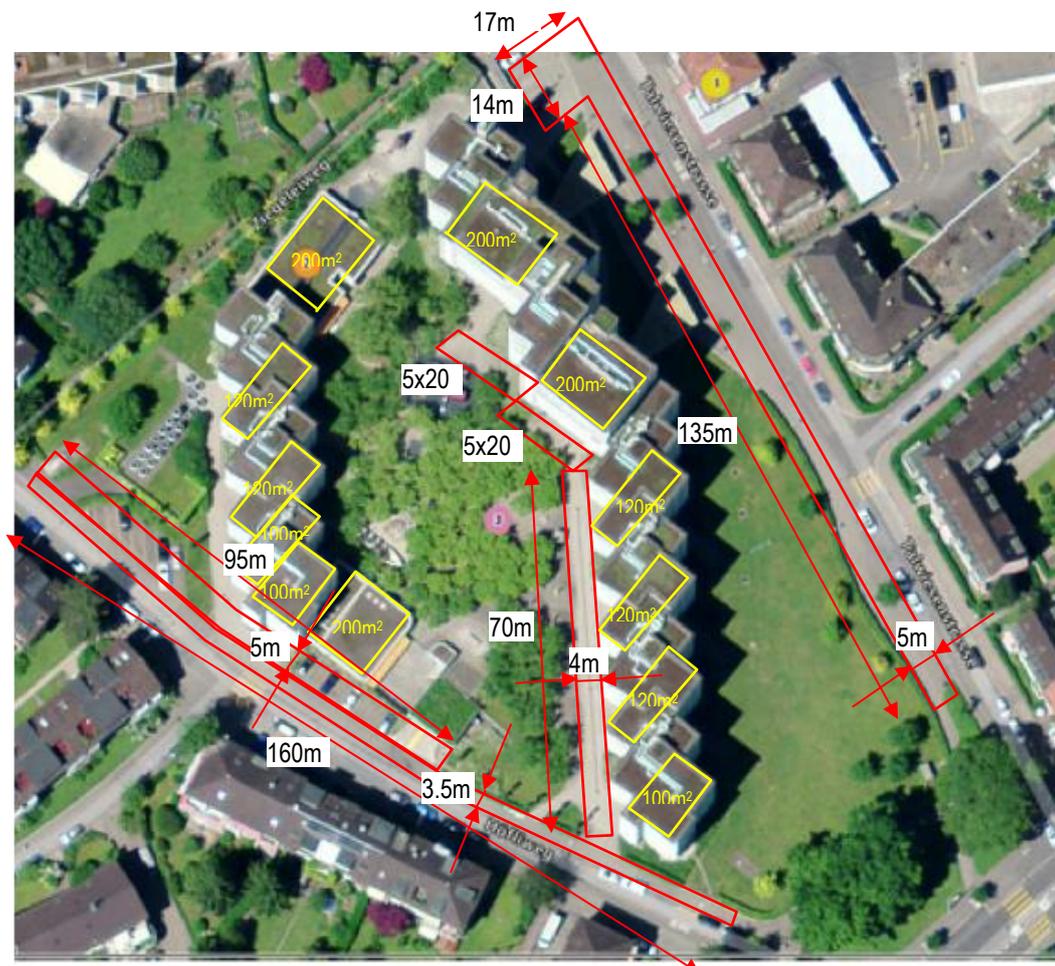
Verfügbare Fläche mit Trottoirs auf der Siedlungsseite der Strassen, Parkflächen und grösseren internen Fusswegen (rote Flächen):

Fläche = 17x14 + 5x135 + 160x3.5 + 70x4 + 5x95 + 5X20x2 = 2400 m²

Die Strassen werden als reserviert für Leitungen angesehen.

Selbst in einem so dichten Quartier mit 5- bis 10-geschossigen Bauten scheinen die Flächen ohne Einbezug der Dächer, Grünflächen und Strassen gerade knapp verfügbar.

Bild 5.5: Verfügbare Flächen auf Trottoirs auf der Siedlungsseite der Strassen, Parkflächen und grösseren internen Fusswegen. Weitere ca. 1700m² wären auf den Flachdächern verfügbar;



b. Beispiel DEFH-Siedlung im Boller, Wädenswil

10 Doppel-Einfamilienhäuser, EBF $10 \times 270\text{m}^2 = 2'700\text{m}^2$, also 13.5mal Referenzgebäude gem. Kap. 3;

Wärmebedarf aus Sonde für diese Siedlung mit gleichem spez. Bedarf wäre: $142'000\text{kWh/a}$
Notwendige Fläche der Quartierstrasse mit Angabe von [1] ($330\text{kWh/m}^2\text{a}$): 430m^2 ;

Verfügbare Fläche mit Quartierstrasse und Kehrplatz (rote Flächen):

Fläche = $14 \times 14\text{m}^2 + 16 \times 6 + 11 \times 8 + 66 \times 4 = 650\text{m}^2$;

Die verfügbare Verkehrsfläche ist also 50% grösser als nötig.

Bild 5.6: Verfügbare Fläche mit Quartierstrasse und Kehrplatz (rote Flächen). Auch als Gartensitzplatz wären die 43m^2 pro Haus auch verfügbar zu machen (sh. eingezeichnete Fläche von 50m^2 bei 2. Haus von links). Als Direktabsorber, der die Wärme ohne Kompressor mit 30°C in die Erdsonde liefern soll, würde die gekühlte Fläche bezüglich Temperatur die Nutzung als Gartensitzplatz nicht stören. Allerdings wäre als Absorber eine etwas dunklere Farbe erwünscht, ähnlich der Strasse. Diese wäre im Widerspruch zur angestrebten hohen Reflexion für einen möglichst hellen Innenraum.

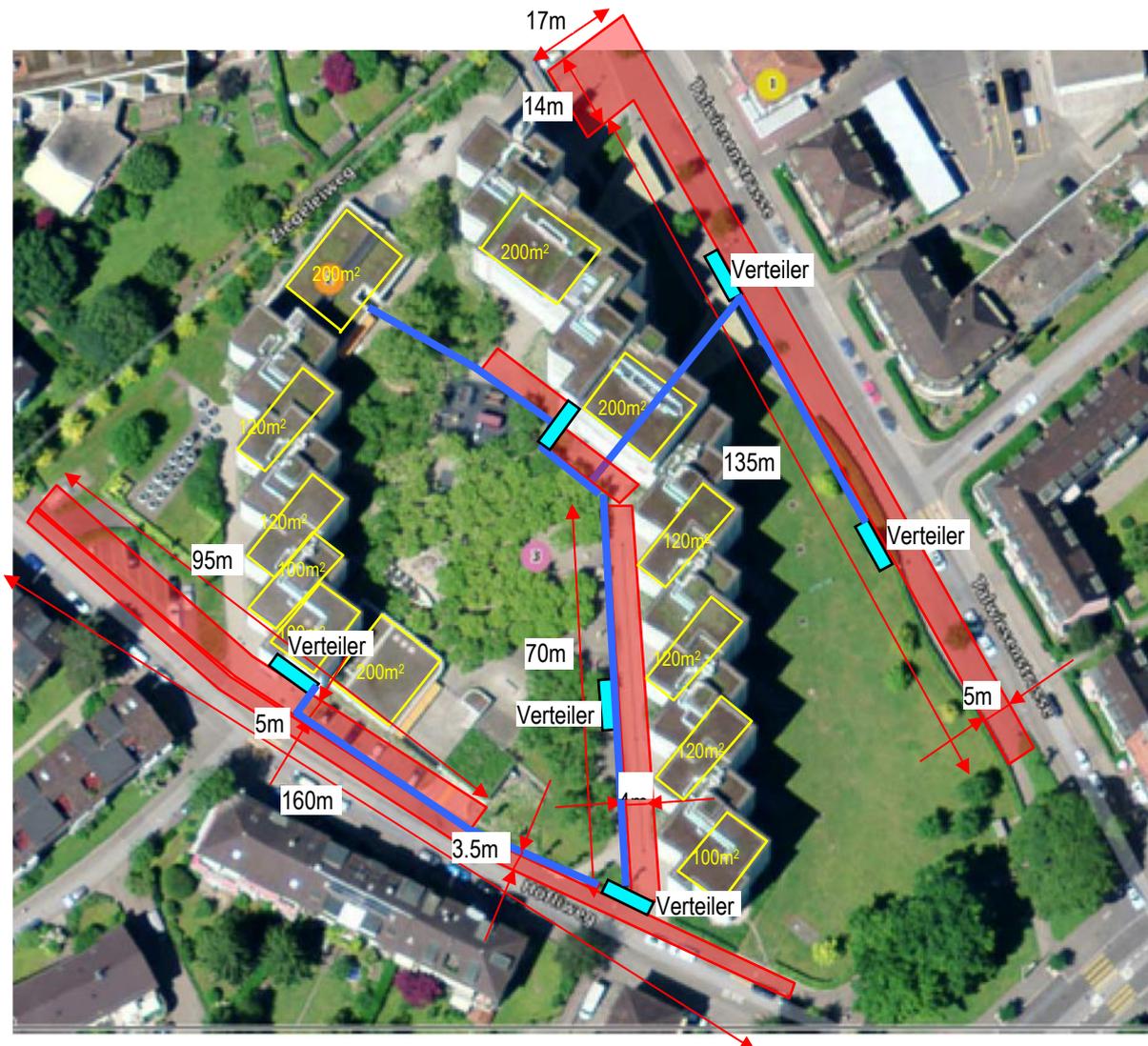


5.3 Grobe Kostenschätzung der Strassenkühlung:

(ohne Teerarbeiten, d.h. Neubau oder ohnehin notwendige Belagssanierung)

	Mass	Preis
Erdregister 2200m ² , inkl. Verteiler, vorgefüllte TABS-Gitter, verlegt: (gem. Bauprojekt G&P, Verbundrohr von TABS AG, 90.-/m ² [7]) (zum Vergleich: SERSO-Plus für Register, Anschlüsse, Füllung 79€/m ² , Niveau 2002, d.h. ca. 120Fr./ m ² , [8], der höhere Preis erklärt sich durch die Verwendung von Chromstahl- statt Kunststoffverbundrohren)	2'200m ²	Fr. 200'000
Zuleitungen zu Verteilern: (ab hypothetischer WP-Zentrale im Kindergarten links oben) (Erfahrungspreis Fernleitung G&P in einfachem Gelände, 300.-/m)	300m	Fr. 90'000
Total		Fr. 290'000
Jahreskosten: Amortisation 20 Jahre:		Fr./a 14'500
Strombedarf Pumpen (sh. unten):		Fr./a 900
Gesamt:		Fr./a 15'400
Pro kWh:		Rp. 2.1

Bild 5.7: Anordnung Sammelflächen, Kollektoren und Sammelleitungen. Die Heizzentrale wird willkürlich im Gebäude links oben angenommen.



Strombedarf der Pumpen:

Flüssigkeitsumlaufmenge gesamt:
 Erwartete maximale Wärmeleistung: Jahresertrag 330kWh/m² / 500 bis 1000 h/a
 = 300 bis 600 W/m²
 Flüssigkeitsmenge: 2200m² x 0.4 kW/m² / 1.05kWh/m³K /5K = 170m³/h
 Verteiler:
 Annahme Fliessgeschwindigkeit: 1m/s
 Rohrdurchmesser, 2 parallele Rohre: $d = \sqrt{4 \times F/\pi} = \sqrt{4 \times (V/w)/\pi}$
 = $\sqrt{4 \times 170/2/3600/3.14} = 0.17m$
 Durchmesser der 6 Verteilrohre: $d = 0.17m/\sqrt{6} = 0.07m$

Tabelle 5.1: Ermittlung Druckverlust der Kühlkreise bei unterschiedlichen Rohrdurchmessern:
 (k-Wert, d.h. Rohrrauigkeit, sh. [3])

	D25x2.3	D20x2.0	D18x2.0
Da, m	0.025	0.02	0.018
Di, m	0.0204	0.016	0.014
Annahme der Kühlfläche pro Rohrkreis, m ²	10	7	5.5
Leistung von 1 Kreis, Fläche x 300W/m ² , kW	3	2.1	1.65
Durchfluss, Wasser, Spreizung 5K, m ³ /h	0.57	0.40	0.32
Länge pro Rohrkreis, Fläche x 10, m	100	70	55
Fliessgeschwindigkeit, m/s	0.49	0.55	0.57
Viskosität ν , m ² /s	0.000002	0.000002	0.000002
Reynoldszahl	4973	4438	3985
k-Wert, mm	0.03	0.03	0.03
k/di	0.0015	0.0019	0.0021
Druckverlustbeiwert λ	0.050	0.050	0.050
Druckverlust, N/m ²	33494	38709	36607
in mWS	3.3	3.9	3.7

Tabelle 5.2: Ermittlung Druckverlust Verteilleitungen, di 0.2m:
 Beispiel Frostschutz Tyfoxit bis -20°C: Dichte 1.15g/cm³, Viskosität bei 20°C 2.1mm²/s, spez. Wärme 3.3J/gK

	D225/203
Da, m	0.225
Di, m	0.203
Annahme der Kühlfläche für grösseren Rohrkreis, m ²	1400
Leistung von 1 Kreis, Fläche x 400W/m ² , kW	560
Durchfluss, Frostschutz, Spreizung 5K, m ³ /h	107.02
Länge pro Rohrkreis, 200m	200
Fliessgeschwindigkeit, m/s	0.92
Viskosität ν , m ² /s	0.000002
Reynoldszahl	93278
k-Wert, mm	0.03
k/di	0.0001
Druckverlustbeiwert λ	0.017
Druckverlust, N/m ²	8134
in mWS	0.8

Pumpleistung: $E = V \times \Delta p / \eta = 170m^3/h \times 47000N/m^2/0.6 = 4.6kW$
 Pumpenergie: $E = 1000h/a \times 4.6kW = 4600kWh/a = 0.6\%$ von Jahreswärmeertrag
 Pumpkosten: $K = 4600kWh/a \text{ à } -.20 \text{ Fr.} = 920.- \text{ Fr./a}$

6 Gartenteich als Sonnenkollektor

6.1 Wärmebilanz

Auf den ersten Blick erscheint die Wärmeentnahme aus einem Teich am einfachsten, indem warmes, gefiltertes Oberflächenwasser durch einen Wärmetauscher geleitet wird. In Realität werden das Algenwachstum im Wärmetauscher und das Muschelwachstum auf dem Ansauggitter aber kaum beherrschbar sein. Praktikabler scheint die Verlegung eines Kunststoffrohrregisters am Boden des Teichs. Diese Rohre werden immer noch Wärme übertragen, auch wenn sie nach kurzer Betriebszeit von einer Schlammschicht überdeckt sind.

Wärmebedarf für 200m² EBF:

Bedarf aus Erdsonde des Referenzgebäudes gem. Kap. 2: 10'500kWh/a

Bild 6.1: Ähnliche Systeme werden in den USA zur direkten Wärmegegewinnung zum Betrieb von Wärmepumpen aus künstlichen oder natürlichen Teichen eingesetzt. Die Verlegung ist denkbar einfach. Die Rohre werden ab der Rolle ins Wasser gelegt und mit Betonelementen beschwert.



Die erreichbare Wassertemperatur wird aber tiefer sein als die Umgebungstemperatur, damit ein wesentlicher Teil der eingestrahlten Wärme entzogen werden kann. Im 1m tiefen Wasserteich erreicht nur etwas mehr als die Hälfte der Strahlung den Boden. Der Rest wird auch bei sauberem Wasser in den oberflächennahen Schichten absorbiert. Im trüben Wasser wird der Anteil, der den Boden erreicht, noch kleiner sein. Allerdings werden die tieferen sommerlichen Wassertemperaturen die Schlammbildung stark bremsen.

Die Oberfläche wird also wärmer sein als der Grund, womit auch keine am Grund absorbierte Wärme über die Oberfläche verloren gehen wird, weil das kühlere Wasser am Teichgrund sich als Folge der Temperaturschichtung nicht auf die Verlustrate an der Teichoberfläche auswirkt.

Ein horizontaler, unverglaster Sonnenkollektor würde im Jahr etwa 1000kWh/m² absorbieren, wovon etwa 80% in den Monaten April bis September. Erreicht etwa die Hälfte davon den Grund des Teichs, so können rund 400kWh/m²a genutzt werden. Für das Referenz-EFH wären also rund 25 bis 30m² Teich notwendig, entsprechend z.B. 4m x 7m.

Da die Nutztemperatur etwa 23°C betragen muss, muss die Wärme dem Teich zu einem wesentlichen Teil (willkürliche Annahme von 50%) mit der Wärmepumpe entzogen werden, mit einem Temperaturhub von ca. 20 auf ca. 30°C, entsprechend einem COP von etwa 10. Der Strombedarf zur vollständigen Regeneration der Sonde des Referenzgebäudes beträgt damit :

$10500\text{kWh} / (2 \times 10) = 500\text{kWh/a}$,

entsprechend 100.- Fr./a (-.20/kWh) oder 2.5kWhel/m²a oder 14% des Minergie-Standards.

6.2 Kostenschätzung (ohne Teichkosten)

Kühlleistung mit umgedrehtem Heizprozess der WP: $10500\text{kWh/m}^2\text{a} / 4\text{kW} = 2600\text{h}$
 (tief dank Speicherwirkung des Teichs)

Rohrlänge: $F \text{ ca. } 4\text{kW}/(50\text{W/m}^2\text{K} \times 4\text{K}) = 20\text{m}^2$; $L = 20\text{m}^2/(0.04\text{m} \times 3.14) = 160\text{m}$

Mehrkosten umkehrbare Wärmepumpe (geschätzt):		Fr.	1000
Rohrpreis:	160m	Fr.	600
Armaturen, 2 Kugelventile, el. 3-Wegventil:		Fr.	1'000
Mauerdurchführung:		Fr.	500
Verlegen, 2 Pers. 1 Tag		Fr.	<u>1'600</u>
Total:		Fr.	4'600

Jahreskosten: Amortisation 20 Jahre:		Fr./a	230
Freilegung Rohrschlange, jährlich ½ Tag:		Fr./a	400
WP-Strom:		Fr./a	<u>240</u>
Total:		Fr./a	870
Pro kWh Wärme:		Rp.	8

Mit 8Rp./kWh liegen die Kosten sehr viel höher als mit einem Strassenkollektor, obwohl davon ausgegangen wird, dass der Teich kostenlos verfügbar ist.

7 Vergleichskosten unverglaster Sonnenkollektor

Zum Vergleich mit der konventionellen Methode zur Erdsondenregeneration mit einem unverglasten Sonnenkollektor wird hier eine ganz grobe Kostenschätzung gezeigt.

Wärmegegewinn Sonnenkollektor bei 30°C Nutztemperatur, geschätzt 600kWh/m²a

Flächenbedarf für 10500kWh/a: 18m² Absorberfläche

Preis Absorber:		Fr. 3'600.-
Montage auf Hausdach:		Fr. 5'000.-
Zuleitungen in Schacht:	20m	Fr. 1'000.-
Armaturen:, 2 Kugelventile, el. 3-Wegventil, Pumpe:		<u>Fr. 1'000.-</u>
Total:		Fr. 10'600.-

Jahreskosten: Amortisation 20 Jahre:		Fr./a 530.-
Pro kWh Wärme:		5 Rp./kWh

8 Gesamtbewertung

- Der Strassenkollektor scheint sehr interessant, wenn ohnehin Umgebungsarbeiten vorgenommen werden, üblicherweise also nur im Neubau. In diesem Fall sind die Kosten erstaunlich tief und genügend grosse, im Sommer besonnte Flächen dürften oft verfügbar sein, wie die zwei sehr unterschiedlichen Beispiele plausibel erscheinen lassen.
- Diese sehr tiefen Wärmekosten des Strassenkollektors von etwa 2 Rp./kWh lassen die Vorschläge zur Nutzung des sommerlichen Energieüberschusses von Photovoltaik zur Regeneration von Erdsonden in einem merkwürdigen Licht erscheinen. Auch wenn der Wert des an das Netz zurück gelieferten PV-Stroms im Sommer tief ist, so nahe bei null wird er doch noch für einige Zeit nur während kurzen Perioden liegen. Auch hybride Kollektoren werden durch die Komplikation der Flüssigkeitsführung in der Gebäudehülle kaum je so tiefe Wärmekosten erreichen lassen.
- Der Teich als Sonnenkollektor ist nur interessant, wenn für einen herkömmlichen Sonnenkollektor kein geeigneter Platz verfügbar ist. Die Wärme wird nur teilweise mit genügend hoher Temperatur verfügbar sein, womit zur Wärmeentnahme eine umkehrbare Wärmepumpe mit einem zusätzlichen Stromverbrauch notwendig wird. Zudem muss der Wärmetauscher regelmässig vom Schlamm befreit werden. Insgesamt dürften die Kosten 1.5- bis 2mal höher liegen als mit einem unverglasten Sonnenkollektor.
- Attraktivste Methode zur Regeneration scheint die Raumkühlung, weil sie dem Nutzer zusätzlich Komfortvorteile bringt und nur wenig und im Freien keine zusätzlichen Installationen notwendig sind. Mit der Aussenlufttrocknung wird schon knapp die Hälfte des Wärmebedarfs abgedeckt. Entsprechend ist nur noch ein kleiner Anteil an Raumkühlung nötig, der mit einer passiven Kühlung und komfortoptimierter Beschattung erreichbar scheint, um mindestens $\frac{3}{4}$ des Bedarfs zu decken. Damit wird die Lebensdauer einer Sonde schon sehr stark verlängert. Falls die Temperatur der Sonde weiterhin sinkt, lässt sich die Raumkühlung später durch eine gezielte Steuerung der Storen – bei guten Bedingungen immer noch mit nur passiver Raumkühlung - bis zu vollständiger Regeneration erhöhen.
- Die Verfügbarkeit günstiger Renenerationsmethoden erleichtert auch den Umgang mit Gesuchen neuer Anlagen: Künftige Bewilligungen sollten mit der Auflage verbunden werden, die Mitteltemperatur der Sonden zu messen, die Möglichkeit einer späteren Regeneration vorzusehen und bei Unterschreitung von ca. $+2^{\circ}\text{C}$ zu realisieren. Diese Lösung ist weit wirtschaftlicher als eine Verlängerung der Sonden bei geringen Abständen.
- Sollte ein beachtlicher Anteil unterkühlter Sonden festgestellt werden, sollten alle Betreiber ermuntert werden, ihre Anlagen zu messen und allenfalls mit einer Regeneration zu ergänzen.

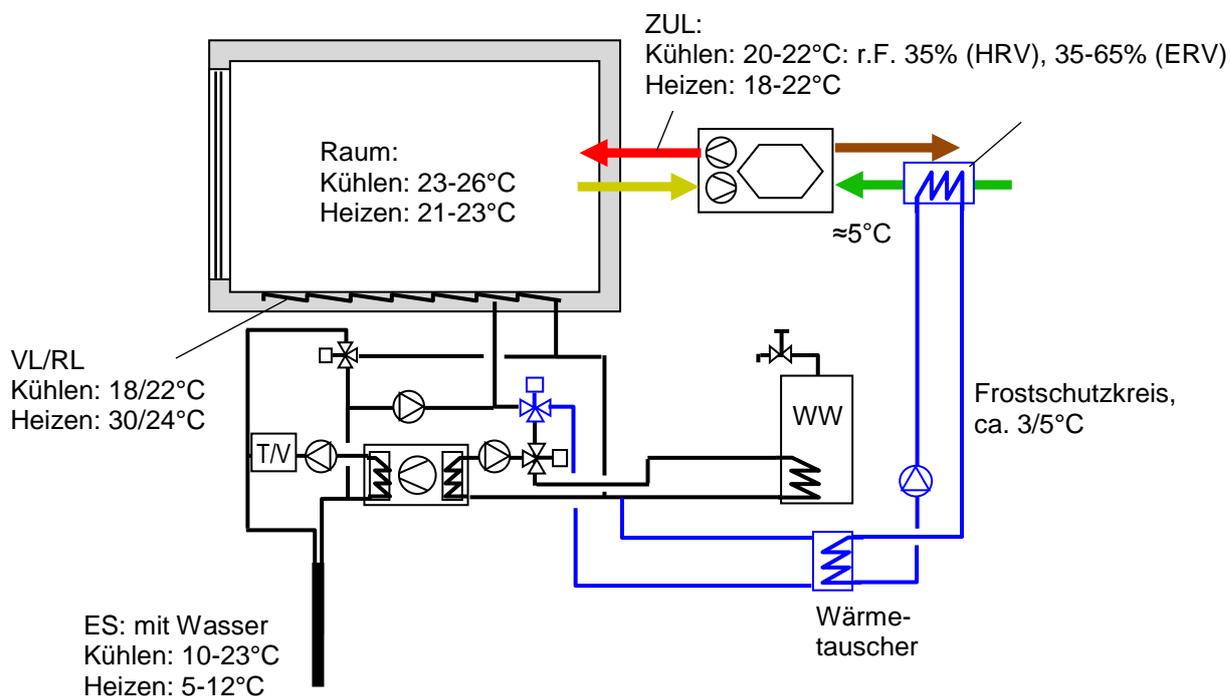
2.3.17

9 Anhang

9.1 ANHANG I: Temperaturen und Leistungsverhältnisse zu Hydraulik Bild 4.1

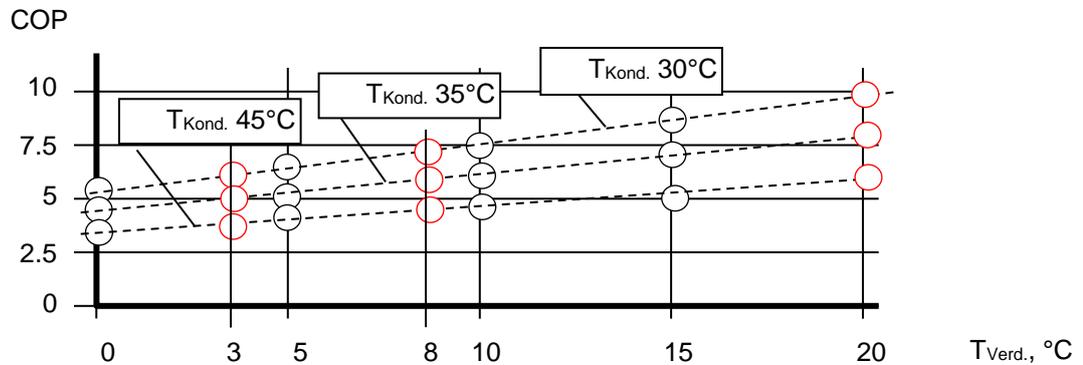
Kühlleistung im Verhältnis zur Heizleistung:

- Bediente Gebäudefläche: 200m²
- Heizleistung: 200m² x 20W/m² = 4kW
- Ungefähre Luftmenge: 150m³/h;
- Kühlleistung zur Abkühlung Aussenluft von 30°C/50% auf 5°C/100%:
(65 – 18 kJ/kg) x 150m³/h x 1.2kg/m³ = 2.3kW, entsprechend 60% der Heizleistung,
d.h. die erforderlichen Heiz- und Kühlleistungen der reversierbaren Wärmepumpe sind passend

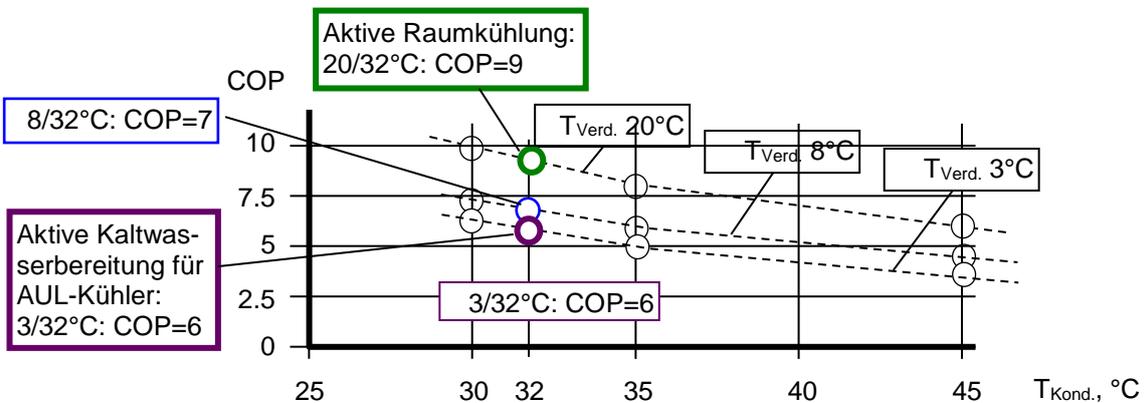


9.2 ANHANG II: Erwartete COP der aktiven Aussenluftkühlung:

Mit typischen Werten einer SW-WP (Beispiel der Firma CTA) lassen sich erreichbare COP für verschiedene Kondensationstemperaturen in Abhängigkeit der Verdampfungstemperatur darstellen:



Durch Interpolation lässt sich obiges Diagramm umzeichnen mit COP-Werten in Abhängigkeit der Kondensationstemperaturen. Hieraus lassen sich nun die COP-Werte für die gewünschten Verdampfungstemperaturen 8°C (Abkühlung der Aussenluft bis 10°C) und 3°C (Abkühlung der Aussenluft bis 5°C) mit Wärmeabgabe an die Erdsonde mit geschätzter Kondensationstemperatur von 32°C auslesen.

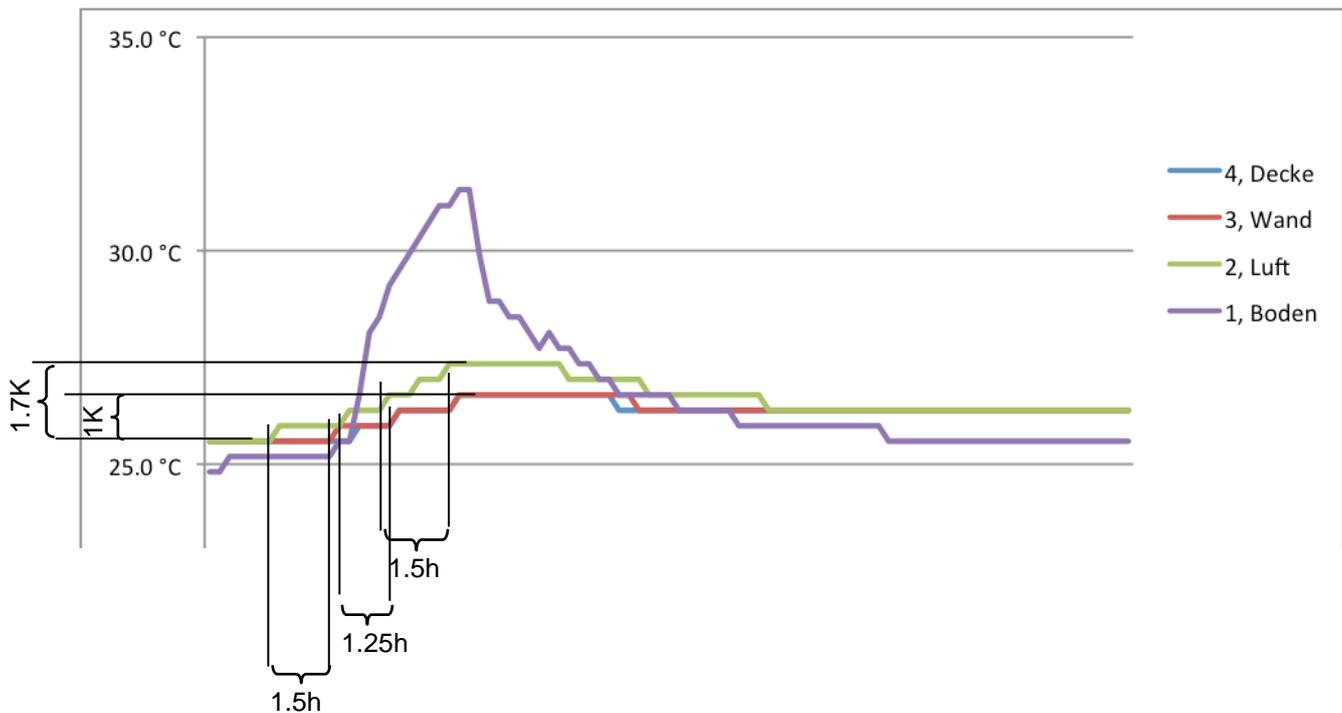


9.3 ANHANG III: Verhalten der massiven Raumbegrenzungsflächen an sonnigem Tag

Messung von 4 Temperaturen an wolkenlosem Tag bei höchstem Sonnenstand (23.6.16), d.h. nur ein kleiner Teil des Bodens direkt hinter dem Südfenster wird von der Sonne direkt bestrahlt.

Raumgröße: 12m²
Decke: Beton
Wände: Gipsplatten 12cm
Bodenbelag: Dünner Klebeparkett
Fensterfläche: 2.4m², südgerichtet

- 1, Fühler Boden im besonnten Bereich hinter Fenster
- 2, Fühler Raumluft in 1.5m Höhe
- 3, Fühler Wand in 1.5m Höhe
- 4, Fühler Decke in Raummitte, verhält sich fast identisch mit Fühler 3, Wand



Die Temperaturen von Wand und Decke steigen mit 1 bis 1.5 Std. Verzögerung gegenüber der Raumluft, solange die Einstrahlung stark ist. Mit abnehmender Einstrahlung nach 16 Uhr folgen die Massen der Raumluft trotz deren Übertemperatur von 0.7K während 3 Stunden aber nicht mehr. Die Wärmeaufnahme von Decke und Wand erfolgt also zu einem wesentlichen Teil durch die indirekte Strahlung, nicht durch die Raumluft. Während die Raumluft um 1.7K steigt, folgen Decke und Wand mit 1K, also mit 60%.

Diese indirekte Strahlung ist also so stark, dass sie für den Nutzer im Raum bestimmend wird, weshalb die Lufttemperatur allein kein Mass ist für dessen Komfortbedingungen ist.

9.4 ANHANG IV: Temperaturverhältnisse einer Fussbodenheizung im Kühlmodus

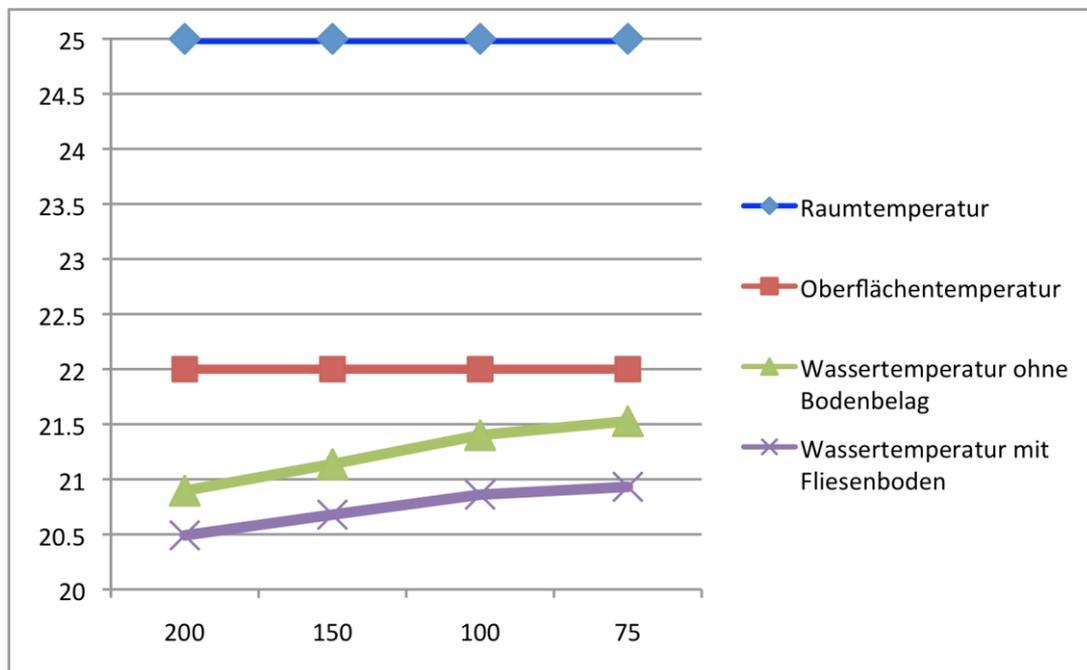
Verlegeabstand Rohre, mm	200	150	100	75
Heizleistung Purmo Rolljet ohne Bodenbelag, Heizung, W/m ² K	4.5	5.2	6.0	6.4
Heizleistung Purmo Rolljet mit Fliesenboden (R 0.05m ² K/W), Heizung, W/m ² K	3.4	3.9	4.4	4.6

Kühlung: $R_{\text{Oberfl-Raum}} = 1/6 \text{ m}^2 \text{ K/W}$,

d.h. Kühlleistung bei Temperaturdifferenz zwischen Raum und Boden $3\text{K} = 18\text{W/m}^2$;

Temperaturverhältnisse für die Raumkühlung mit 18W/m^2 in Abhängigkeit des Rohrabstands:

Bei engem Rohrabstand und gut leitendem Bodenbelag liegt die mittlere Wassertemperatur sehr nahe der Oberflächentemperatur, was die Selbstregelung erst ermöglicht. Der grösste Teil des Temperaturgefälles zwischen Wasser und Raumluft wird also durch den Übergang von der Raumluft zur Bodenoberfläche bestimmt. Steigt damit der Wärmeeinfall in den Raum an, so erhöht sich fast nur die Raumtemperatur, während sich die Bodenoberfläche kaum erwärmt.



9.5 Literaturverzeichnis

- [1] Accumulateurs saisonniers souterrains de chaleur, Bernard Matthey Ingénieurs-Conseils SA, 2037 Montezillon, 22ème journée technique et d'information de la Société Suisse de la Géothermie, 4. nov. 2011.
- [2] Geothermische Freiflächentemperierung, Prospekt Bau 729, 06-2012, www.rehau.com
- [3] GeroTherm, technisches Datenblatt, HakaGerodur, www.hakagerodur.ch
- [4] Erfahrungen aus 25 Jahren Betrieb der Siedlung „Boller“ in Wädenswil- vom Null-Heizenergie-Demonstrationsprojekt zu MINERGIE, Dr. Ruedi Kriesi, AWEL 2016;
http://www.awel.zh.ch/internet/baudirektion/awel/de/energie_radioaktive_abfaelle/pilotprojekte.html
- [5] Erfolgskontrolle Gebäudeenergiestandards 2014-2015, Demo Scope AG, econcept AG, Lemon Consult AG, Bundesamt für Energie 2016
- [6] Regeneration mit Sekundärnutzung, Simulation Erdsonde, Geowatt AG Engineering, Zürich, 31.5.16
- [7] Angebot TABS AG, 8422 Pfungen, an Gruenberg & Partner, 20.8.2015, ausgeführt
- [8] Walter J. Eugster, „SERSO Plus - neue Wege in der Belagsheizung“, in „Geothermische Energie“, Mitteilungsblatt der geothermischen Vereinigung e.V., Nov/Dez. 2002
- [9] Markus Sommer, „SERSO, Sonnenenergie rückgewinnung aus Strassenoberflächen, Messkampagne und Simulation des saisonalen Energiespeichers“, Jahresbericht 1998 zuhanden des Bundesamts für Energie, Berner Fachhochschule HTA Burgdorf
- [10] Heizen und Kühlen mit Abwasser, Ratgeber für Bauherren, Gemeinden und Betreiber; Gute Beispiele aus der Praxis, Beispiel des Hallenbadbetriebs Ovaverva in St. Moritz, Energie Schweiz, www.bundespublikationen.admin.ch, Artikelnummer 805.208.D