

**Solar-Luft-System zur Erwärmung von Gebäuden
mit extrem großer thermischer Speicherfähigkeit
unter Ausnutzung der thermischen Speicherfähigkeit
des Baukörpers**

Abschlussbericht



gefördert durch



Deutsche Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Förderverein für Handwerk und Denkmalpflege Schloss Trebsen e. V.

Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig

Grammer Solar GmbH



**Solar-Luft-System zur Erwärmung von Gebäuden
mit extrem großer thermischer Speicherfähigkeit
unter Ausnutzung der thermischen Speicherfähigkeit
des Baukörpers**

Abschlussbericht

gefördert durch



Deutsche Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Bewilligungsempfänger: Förderverein für Handwerk und Denkmalpflege Schloss Trebsen e.V.
Thomas-Müntzer-Gasse 2
04687 Trebsen

Kooperationspartner: Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig
Grammer Solar GmbH

Projektleiter: Dipl.-Ing. (FH) Uwe Bielefeld

Verantwortl. Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Busch
Prof. Dr.-Ing. Falk Nerger

Bearbeiter: Dipl.-Ing. (FH) Uwe Bielefeld, Förderverein
Dr.-Ing. Olaf Freytag, HTWK Leipzig
Prof. Dipl.-Ing. Frank Hülsmeier, HTWK Leipzig
Dipl.-Ing (FH) Rudolf Ettl, Grammer Solar GmbH
Dipl.-Ing. Norbert Lange M. A., HTWK Leipzig
Dipl.-Ing (FH) Alexander Kahnt, HTWK Leipzig
Dipl.-Ing. (FH) Eric Kessler-Büttner, HTWK Leipzig
Prof. Dr.-Ing. Rainer Agsten, HTWK Leipzig
Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Busch, HTWK Leipzig
Prof. Dr.-Ing. Falk Nerger, HTWK Leipzig

Leipzig, den 30.8. 2011

.....
Dipl.-Ing. (FH) Uwe Bielefeld

.....
Prof. Dr.-Ing. Falk Nerger

Inhalt

1.	Veranlassung	1
2.	Zielstellung	2
3.	Untersuchungsobjekt	2
3.1	Schloss Trebsen	2
3.2	Gewölbekeller	3
4.	Das Solar-Luft-System	7
4.1	Auswahl des technischen Grundkonzeptes	7
4.2	Bemessungsgrundlagen für das Solar-Luft-System	9
4.3	Technische Realisierung	11
4.3.1	Kennwerte der Solar-Luft-Systeme	11
4.3.2	Temporäre Anlage	12
4.3.3	Denkmalgerechte Anlage	14
5.	Mess-und Untersuchungskonzept	18
6.	Eigenklima des Kellers	19
7.	Energogene Klimatisierung des Kellers mittels Solar-Luft-System	21
7.1	Auswirkungen auf das Raumklima	21
7.1.1	Raumlufttemperatur	21
7.1.2	Raumluftfeuchte	23
7.2	Betriebsverhalten des Solar-Luft-Systems	25
7.2.1	Winter	25
7.2.2	Sommer	25
7.2.3	Energiegewinne	30
7.3	Thermische Verhalten der Baukonstruktion	33
7.3.1	Messtechnische Erfassung	33
7.3.2	Simulationsrechnungen	36
7.3.3	Referenzkeller	40
8.	Ökonomische und ökologische Bewertung	44
9.	Ableitung von Grundsätzen für den Einsatz von Solar-Luft-Systemen	45
9.1	Am Schloss Trebsen gewonnenen Erfahrungen	45
9.2.	Einsatzgrundsätze und mögliche Anwendungsfälle	47
9.3	Hinweise für die Bemessung von Solar-Luft-Systemen	48
10.	Zusammenfassung	49

Literatur

Verzeichnis der Bilder

- Bild 3-1: Schloss Trebsen; Südseite mit Tor
- Bild 3-2: Unterkellerung von Schloss Trebsen (untersuchter Keller gelb hervorgehoben)
- Bild 3-3: Detail zu Bild 3-2
- Bild 3-4: Kellerzugang vom Schlosshof aus
- Bild 3-5: Hauptraum des Kellers
- Bild 3-6: Luftströmung bei geöffneter Kellertür (Nebelversuch)
- Bild 4.1-1: Grundkonzept des Solar-Luft-Systems
- Bild 4.1.-2: Varianten der Temperierung nach Großesmidt
- Bild 4.2.-1: Erforderliche Heizleistung im Jahresgang
- Bild 4.3-1: Temporäre Solaranlage
- Bild 4.3-2: Lichtschacht zur Einführung des Nahwärmerohrs während der Bauphase
- Bild 4.3-3: Warmluftauslass im Keller
- Bild 4.3-4: Schloss Trebsen mit Energiegarten (Pfeil)
- Bild 4.3-5: Detailplanung für den Energiegarten
- Bild 4.3-6: Aufbau der Solar-Beete
- Bild 4.3-7: Der Energiegarten nach seiner Fertigstellung
- Bild 4.3-7: Der Energiegarten nach seiner Fertigstellung
- Bild 6-1: Eigenklima; Raumlufttemperatur im Jahresgang
- Bild 6-2: Eigenklima; relative Raumluftfeuchte im Jahresgang
- Bild 6-3: Eigenklima; absoluter Feuchtegehalt der Raumluft im Jahresgang
- Bild 7.1.1-1: Raumlufttemperatur im Fall „Eigenklima“ und unter Einfluss der temporären Solaranlage
- Bild 7.1.1-2: Raumlufttemperatur im ersten Jahr nach Inbetriebnahme der denkmalgerechten Solaranlage
- Bild 7.1.1-3: Vergleich der Raumlufttemperaturen in den Monaten Januar und Februar im Falle des Eigenklimas (2006 und 2007) sowie unter der Wirkung der denkmalgerechten Solaranlage (2010)
- Bild 7.1.1-4: Verlauf der Raumlufttemperaturen im Fall „Eigenklima“ und unter dem Einfluss des Solar-Luft-Systems
- Bild 7.1.2-1: Die relative Raumluftfeuchte im Eigenklima und unter Wirkung des Solar-Luft-Systems im Jahresgang
- Bild 7.1-2-2: Die relative Raumluftfeuchte im Eigenklima und unter Wirkung des Solar-Luft-Systems in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur (Beispiel: temporäre Anlage)
- Bild 7.1.2-3: Der absolute Feuchtegehalt der Raumluft im Eigenklima und unter Wirkung des Solar-Luft-Systems (Beispiel: temporäre Anlage)
- Bild 7.2.1-1: Abhängigkeit der Zulufttemperatur von der Außenlufttemperatur im März (Beispiel: temporäre Anlage)
- Bild 7.2.1-2: Abhängigkeit der Zulufttemperatur von der Globalstrahlung im März (Beispiel: temporäre Anlage)
- Bild 7.2.1-3: Betriebsverhalten des Solar-Luft-Systems an einem strahlungsarmen Wintertag (Beispiel: temporäre Anlage)
- Bild 7.2.2-1: Abhängigkeit der Zulufttemperatur von der Außenlufttemperatur im März (Beispiel: temporäre Anlage)

- Bild 7.2.2-2: Abhängigkeit der Zulufttemperatur von der Globalstrahlung im März (Beispiel: temporäre Anlage)
- Bild 7.2.3-3: Beispiel für das Betriebsverhalten der temporären Solaranlage im Hochsommer
- Bild 7.2.3-4: Beispiel für das Betriebsverhalten der denkmalgerechten Solaranlage im Hochsommer
- Bild 7.2.3-1: Vom Kollektorfeld 2008 abgegebene Energiemenge (Die Anlage wurde erst am Ende Februar 2008 in Betrieb genommen)
- Bild 7.2.3-2: Von der temporären Solaranlage 2008 dem Keller zugeführte Energiemenge (Die Anlage wurde erst im Ende Februar 2008 in Betrieb genommen)
- Bild 7.2.3-3: Differenz zwischen Kollektoraustrittstemperatur und der Zulufttemperatur des Kellers
- Bild 7.3.1-1: Lage der Messstellen
- Bild 7.3.1-2: Temperaturverlauf Fussboden (Messstelle M 1)
- Bild 7.3.1-3: Temperaturverlauf Innenwand (Messstelle M 2)
- Bild 7.3.1-4: Temperaturverlauf Außenwand (Messstelle M 3)
- Bild 7.3.1-5: Vertikales Temperaturprofil der Raumluft (denkmalgerechte Solaranlage; Durchgang zum Vorraum verschlossen)
- Bild 7.3.2-1: Grundzusammenhänge
- Bild 7.3.3-1: Lage des Referenzkellers (grün hervorgehoben)
- Bild 7.3.3-2: Temperierleitung im Referenzkeller
- Bild 7.3.3-3: Gemessenes Auskühlverhalten des Referenzkellers
- Bild 7.3.3-4: Berechnetes Auskühlverhalten des Referenzkellers

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 3-1:	Energieökonomisch relevante Kennwerte des Nutzungskonzeptes
Tabelle 4.1-1:	Vergleich möglicher Varianten der solaren Temperierung
Tabelle 4.2.-1:	Erforderliche Heizleistung
Tabelle 4.2-2:	Regeln für die Auslegung von Luftkollektoren [5]
Tabelle 4.3-1:	Kennwerte der Solar-Luft-Systeme
Tabelle 5-1:	Überblick Messprogramm
Tabelle 7.2.3-1:	Energiegewinne der temporären Solaranlage 2008
Tabelle 7.2.3-2:	Gegenüberstellung der Energiegewinne der temporären und der denkmalgerechten Solaranlage für den Monat März
Tabelle 7.3.2-1:	Dauer bis zum Erreichen des eingeschwungenen Zustandes;
Tabelle 7.3.2-2:	Temperaturverteilung in der Baukonstruktion und im angrenzenden Erdreich
Tabelle 7.3.3-1:	Referenzkeller; Temperaturverteilung in der Baukonstruktion und im angrenzenden Erdreich in der Auskühlphase
Tabelle 8-1:	Kostenübersicht Energiegarten
Tabelle 8-2:	Zusatzkosten für die denkmalgerechte Gestaltung
Tabelle 8-3:	Vergleich Wärmepreise

1. Veranlassung

Steigende Energiepreise erschweren zunehmend die Bewirtschaftung und damit auch den Erhalt von Baudenkmalen. Vor diesem Hintergrund gewinnt die Erarbeitung spezieller, denkmalgerechter Lösungen zur Reduzierung des Energieverbrauchs zunehmend an Bedeutung. Dies trifft besonders für denkmalgeschützte Nichtwohngebäude zu. Im Unterschied zu historisch wertvollen Wohngebäuden liegen für diese Gebäudeart bisher kaum Untersuchungen vor.

Ein möglicher Lösungsansatz zur Energie- und Kosteneinsparung für die Beheizung monumentaler Baudenkmale ist die Speicherung sommerlicher solarer Wärmegewinne für die winterliche Warmhaltung der Räume. Bisher scheiterten solche Überlegungen in erster Linie an der hierfür notwendigen aufwändigen Solar- und Speichertechnik. Wesentliche Vereinfachungen erscheinen möglich, wenn man die Baukonstruktion selbst und eventuell das angrenzende Erdreich als Wärmespeicher nutzt. Bevorzugter Anwendungsbereich dieses Prinzips ist die winterliche Warmhaltung von genutzten Räumen (Gaststätten-, Lager- und Sozialräume usw.), die tief in das Erdreich einbinden und sehr dickes Mauerwerk aufweisen. Es gibt eine große Zahl von Altbauten mit derartigen Merkmalen und Nutzungen, für die die beschriebene unkonventionelle Erwärmung eine kostengünstige Alternative gegenüber den für Neubauten entwickelten TGA-Systemen darstellen könnte. Mit dem aufgezeigten technischen Lösungsansatz kann über die Senkung der Heizkosten hinaus auch den typischen Feuchtigkeitsproblemen in diesen Gebäuden begegnet werden. Diese sind aufgrund ihrer großen thermischen Speichermasse in erheblichem Maße durch die Bildung von Sommerkondensat gefährdet und die relative Raumluftfeuchte weist häufig kritisch hohe Werte auf. Im Falle ihrer sommerlichen Nutzung werden diese Probleme noch verstärkt. Ihnen kann jedoch durch eine Temperierung des Gebäudes entgegengewirkt werden.

2. Zielstellung

Im Rahmen des vorliegenden Themas wurde am Beispiel eines Tiefkellers des Schlosses Trebsen untersucht inwieweit mittels eines Solar-Luft-Systems

- im Sommer eine thermische Aktivierung der Baukonstruktion erreicht werden kann, die in den Wintermonaten zu einer Anhebung der Raumlufttemperatur führt und
- die für diese Raumart typischen Feuchteprobleme, wie zu hohe relative Luftfeuchte und Bildung von Sommerkondensat, vermieden werden können.

Darüber hinaus wird der Frage der denkmalgerechten Integration eines Solarsystems in eine historische Schlossanlage besonderes Augenmerk geschenkt. Sowohl aus Gründen der Denkmalverträglichkeit als auch vor dem Hintergrund, dass Einsparungen im Bereich der Energiekosten nicht durch Betriebs- bzw. Wartungskosten wieder kompensiert werden, wird der Einsatz von Low-Tech favorisiert. Low-Tech ist durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- Geringer Bedien- und Wartungsaufwand.
- Einfache Bedienung.
- Hohe Sicherheit gegen Bedienfehler.
- Für Reparatur keine preisintensiven Fachfirmen notwendig.
- Einsatz bewährter, ausgereifter Technik.

3. Das Untersuchungsobjekt

3.1 Das Schloss Trebsen

Der Landschaftsraum zwischen Saale und Mulde bot über Tausende von Jahren günstige Voraussetzungen für die Ansiedlung von Menschen. So waren es z.B. slawische Wenden, die im 6. und 7. Jahrhundert im Zuge der Völkerwanderung ansässige germanische Stämme verdrängten und neue Siedlungen anlegten. Die Gründung Trebsens reicht in diese Zeit zurück und wird selbst durch den alten Namen, Trebizin, der Ort wo gerodet wurde, als slawischen Ursprunges belegt. Mit der Erweiterung des Deutschen Reiches im 10. Jahrhundert unter König Heinrich I. wird unser Gebiet Bestandteil der Ostmark und bedarf des Schutzes und der Sicherung der neuen Grenzen. Zu diesem Zwecke werden steinerne Burgen errichtet, die gleichzeitig auch den neuen deutschen und flämischen Siedlern bei Gefahr Zuflucht bieten.

Mit hoher Wahrscheinlichkeit kann der Bau der Trebsener Burg ins 11./12. Jahrhundert gelegt werden, denn für die Ausübung der Herrschaft brauchte man nicht nur eine Burg als Wohnanlage und Machtzentrum, sondern ihr oblagen auch entscheidende strategische Aufgaben. Über Trebsen führten damals wichtige Handels- und Heeresstraßen, die eines Schutzes bedurften.

Inwieweit Teile der Burganlage in den späteren Schlossbau mit einbezogen wurden, lässt sich heute nur schwer festzustellen. Der muldenseitige Ostflügel repräsentiert die älteste Phase des Schlossbaus. Anhand von Daten, die bei der Bestimmung des Holzalters der Dachbalken gewonnen wurden, kann mit hoher Sicherheit von einer Fertigstellung dieses Teiles um 1509/1510 ausgegangen werden.



Bild 3-1: Schloss Trebsen; Südseite mit Tor

1756 übernimmt die, aus Hamburg eingewanderte bürgerliche Familie des Dr. Vincent Baumanns für 113.000 Taler das Rittergut mit allen Lasten und Rechten. Unter dem neuen Eigentümer werden umfangreiche Baumaßnahmen ausgeführt, die auch das Erscheinungsbild des Trebsener Schlosses ver-

ändern. Der Ostflügel als Wohnbereich erfährt eine neue Raumaufteilung, zu der unter anderem der Einbau größerer und regelmäßig angeordneter Fensteröffnungen und prächtiger Stuckdecken gehörten. Vor den südlichen Eingangsfügel wird ein Arkadengang gesetzt und eine weitere Etage für Wohnzwecke aufgestockt. Das zweite Obergeschoss wird als Sommersaal in Nutzung genommen. In diese Bauphase einzuordnen sind auch der Abbruch des Bergfriedes und der Bau einer neuen Brücke über den Wassergraben. Das nördlich vom Schloss gelegene Brachland wird in einen Landschaftspark im sogenannten englischen Stil umgestaltet.

1892 wird das Rittergut von Rittmeister a.D. Georg von Zimmermann angekauft und damit eine dritte große Umbauphase angeleitet. 1909/10 werden nach Entwürfen der Saalecker Werkstätten unter Leitung von Paul Schultze-Naumburg zahlreiche Umbauten und Modernisierungen vorgenommen. Neben der Neugestaltung des Schlossinnenhofes werden auch die Räume im Erdgeschoss des West- und Ostflügels den Nutzeransprüchen angepasst. Mit der Elektrifizierung und dem Einbau zentraler Heizungen enthält das Schloss eine neue Wohnqualität.

Im Mai 1945 nehmen sowjetische Kampfverbände im Schloss Quartier. Während dieser neuen Herrschaft werden auch die Beschlüsse zur Enteignung der Großgrundbesitzer im Rahmen der Bodenreform getroffen und umgesetzt. In die Nachkriegszeit müssen auch die größten Verluste an baulichen Werten, sowie der gesamten Ausstattung des Schlosses eingeordnet werden. Waren es noch im Haus stationierte Rotarmisten, die fast den gesamten Aktenbestand des Gerichtsarchivs vernichteten, so war die Freigabe der Abbrüche der Dächer über West – und Nordflügel, durch den damaligen Bürgermeister, ein schwerer Schlag für das Baudenkmal Schloss Trebsen. 1947 zogen in den nun neu gegliederten Ost – und Südflügel Familien als Umsiedlern und Vertriebenen ein. Während durch diese Wohnnutzungen die Sicherheit für den Gebäudebestand gewahrt werden konnte, verfielen der dachlose West – und Nordflügel über die Jahre zusehends.

Im Jahr 1992 wurde aus einer Initiative des Landesdenkmalamtes Sachsen, des Regierungspräsidiums Leipzig, der Handwerkskammer zu Leipzig, der Bauinnung Leipzig, des Landkreises Muldentale und engagierter Denkmalpfleger der Förderverein für Handwerk und Denkmalpflege e.V. – Schloss Trebsen – gegründet.

Auf Basis eines Nutzungsvertrages zwischen der Stadt Trebsen und dem Förderverein bezog dieser, unter dem Vorsitz des erfahrenen Denkmalschützers Dr. Wolfgang Hocquel als Bildungsstätte das Schloss und begann mit der Umsetzung eines neuen Nutzungskonzeptes und einer umfassenden Sanierung des Schlosses (Bild 3-1). Zu den Hauptzielen des Vereins gehört es Projekte zu entwickeln, die der handwerklichen Denkmalpflege dienen und einen Beitrag zur Nutzung und zum Erhalt wertvoller sächsischer Baukultur leisten.

3.2 Der Gewölbekeller

Bauliche Situation. Das Schloss Trebsen ist nur teilunterkellert (Bild 3-2). Der im Rahmen des vorliegenden Projektes untersuchte, im Bereich der Süd-Ost-Ecke des Schlosses gelegene Gewölbekeller ist nur direkt vom Schlosshof aus über einer Treppe erreichbar (Bilder 3-3 und 3-4). Der Hauptraum des Kellers (Bild 3-5) verfügt über eine Grundfläche von 52 m². Im Gewölbescheitel beträgt die Raumhöhe 3,30 m. Das Mauerwerk ist überwiegend aus Naturstein errichtet. Der Fußboden besteht entsprechend dem historischen Vorbild aus im Sandbett verlegten Ziegeln.

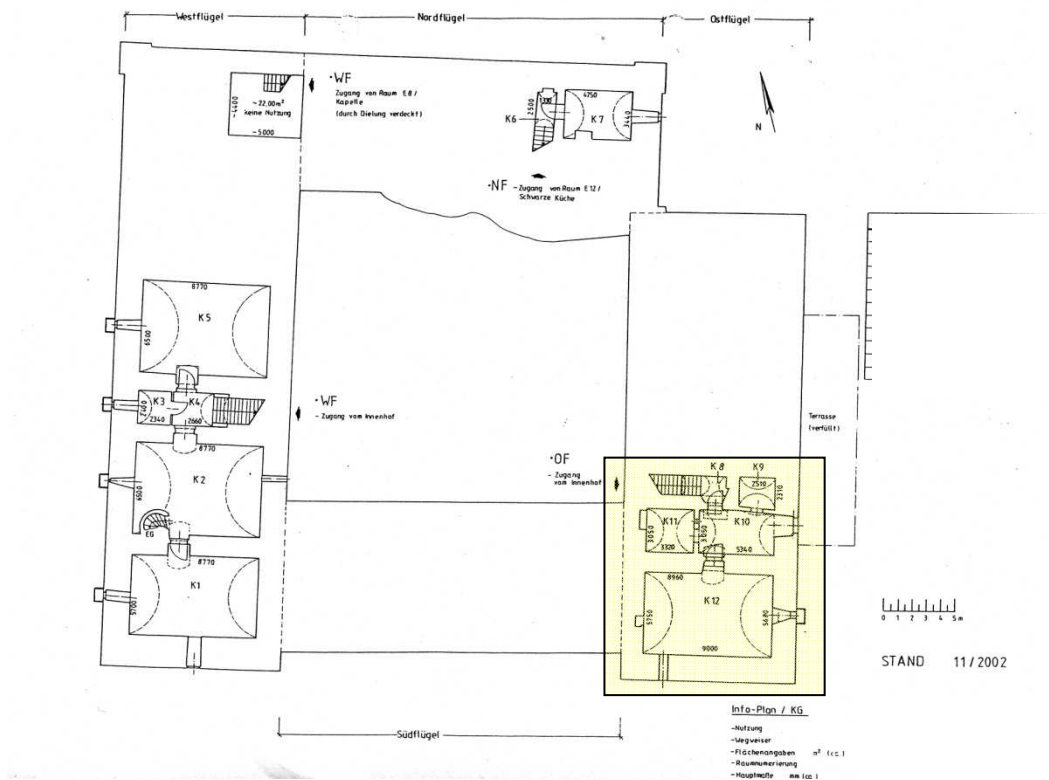


Bild 3-2: Unterkellerung von Schloss Trebsen (untersuchter Keller gelb hervorgehoben)

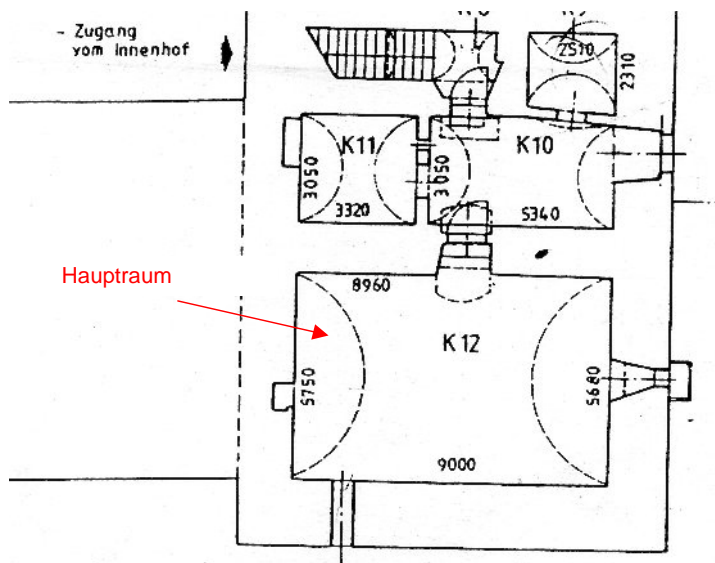


Bild 3-3: Detail zu Bild 3-2

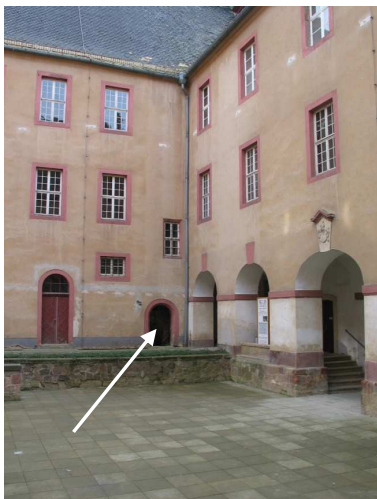


Bild 3-4: Kellerzugang vom Schlosshof aus



Bild 3-5: Hauptraum des Kellers

Nutzungskonzept. Bis 2008 wurde das Schloss durch den Förderverein für Handwerk und Denkmalpflege Schloss Trebsen e. V. bewirtschaftet. Für den Keller war eine Nutzung als Weingaststätte geplant. Hierauf wurde auch das Konzept für den Einsatz des Solar-Luft-Systems abgestimmt. In [Tabelle 3-1](#) sind die in diesem Zusammenhang zu berücksichtigenden Merkmale des Nutzungskonzepts zusammengestellt.

Tabelle 3-1: Energieökonomisch relevante Kennwerte des Nutzungskonzeptes

Raumnutzung		Weingaststätte
Art der Veranstaltungen		Geschlossene Gesellschaften
Nutzungshäufigkeit		sporadisch, vorwiegend an Wochenenden und Feiertagen
Anzahl der Personen		25-30
Nutzungszeitraum		März bis Mai und September bis Dezember
Interne Wärmelasten infolge der Ausstattung	Ständig	Weinkühlschrank (elektrische Leistungsaufnahme ca. 220 W)
	während Veranstaltungen	Warmhalteplatten für Speisen elektrische Leistungsaufnahme bis 2,3 kW)

Aus Tabelle 3-1 ergeben sich für das vorliegende Projekt folgende Randbedingungen:

- Im Hochwinter (Januar, Februar) muss keine Raumlufttemperatur entsprechend der thermischen Behaglichkeit gewährleistet sein.
- Im Sommer bestehen unter dem Aspekt der Behaglichkeit keine Restriktionen hinsichtlich eines forcierten Wärmeintrages.
- Während der Veranstaltungen können nennenswerte interne Wärmelasten auftreten. Diese können sich auf bis zu 5,5 kW belaufen.

Heizungs- und Lüftungskonzept. Mittels Solarenergie soll eine Grundtemperierung des Kellers erreicht werden, die es erlaubt, dass lediglich kurz vor Veranstaltungsbeginn mit transportablen elektrischen Heizgeräten der Raum nachgeheizt wird und während der Veranstaltung die internen Wärmelasten weitgehend die erforderliche Raumlufttemperatur sichern.

Die aus Gründen des Feuchteschutzes erforderliche Raumlüftung (Vermeidung einer ständig hohen relativen Raumluftfeuchte, Verhinderung von Sommerkondensat) soll weitgehend mittels des Solar-Luft-Systems (s. Abschnitt 4) erfolgen. Sofern die Veranstaltungen tagsüber stattfinden, soll auch die Bedarfslüftung über das Solar-Lüftungs-System erfolgen. In den Zeiten, in denen das Solar-Lüftungs-System nicht in Betrieb ist, soll natürliche Lüftung zu Anwendung kommen. Eine wirksame natürliche Lüftung kann über die zum Schlosshof führende Kellertreppe realisiert werden. Mittels Nebelversuche (Bild 3-6) konnte nachgewiesen werden, dass sich bei geöffneter Tür und ausgeschaltetem Solar-Luft-System ein Zuluftstrom ausbildet, welcher unmittelbar über die Treppenstufen hinweg in den Keller einströmt. Die Fortluftabführung erfolgt ebenfalls über die Kellertreppe. Dieser Luftstrom bewegt sich unmittelbar unter der Decke der Kellertreppe. Da sich zwischen den Hauptraum des Kellers und der Kellertreppe noch ein Vorraum befindet (s. Bild 3-3) sind keine Zugerscheinungen zu erwarten.

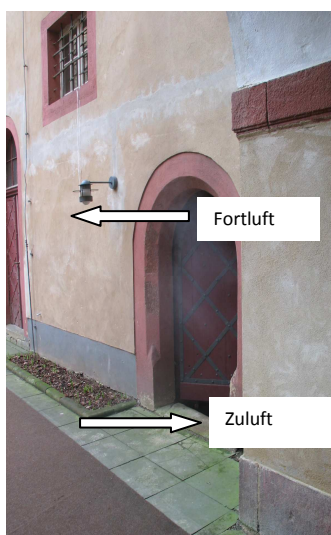


Bild 3-6: Luftströmung bei geöffneter Kellertür (Nebelversuch)

4. Das Solar-Luft-System

4.1 Auswahl des technischen Grundkonzeptes

Bei der Auswahl des technischen Systems für die Aufnahme der Solarenergie und die Einleitung der Solarwärme in das Gebäude standen zwei Alternativen zur Auswahl:

- Variante 1: Solar-Luft-System (Bild 4.1-1)
- Variante 2: Solaranlage mit soledurchströmten Kollektoren, ggfs. unter Verzicht auf einen Pufferspeicher

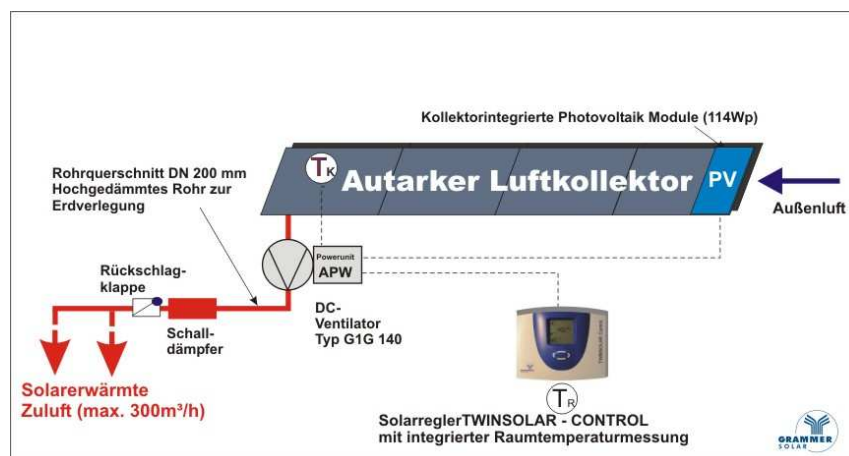


Bild 4.1-1: Grundkonzept des Solar-Luft-Systems

Die Frage, ob statt solar erwärmter Zuluft nicht ein direkter Eintrag der solar bereitgestellten Wärme in die Baukonstruktion erfolgen sollte, wurde eingehend diskutiert. Grundsätzlich sind hierfür folgende Varianten möglich:

Fußbodenheizung. Der nachträgliche Einbau ist mit erheblichen Eingriffen in die historische Bausubstanz verbunden. Zudem ist zu erwarten, dass außer der Fußbodenkonstruktion nur das unmittelbar darunter befindliche Erdreich temperiert wird, also nur eine begrenzte Speichermasse thermisch aktiviert werden kann.

Temperierung nach GROSSESCHMIDT [3]. Diese technische Lösung ist nach [3, S. 5] „eine Alternative zu den üblichen Methoden der Gebäudeheizung und des Feuchteschutzes. Sie wirkt im Wesentlichen über Warmwasser-Heizrohre, Temperierbänder oder Sockelleistenheizkörper, die an allen Fundamenten und äußeren Stockwerksbegrenzungen auf der ganzen Länge verlegt sind und bei Bedarf durch weitere Heizrohre ergänzt werden.“

Als bisheriger Endpunkt der Entwicklung und als die Ideallösung für Massivbauten werden nach [3, S.10], Anlagen angesehen bei denen lediglich Heizrohre mit kleinen Durchmessern

- in direkte Berührung mit dem Mauerwerk unter Putz verlegt werden,
- in den Fußbodenaufbau eingebracht (Bild 4.1-2 a) werden oder
- hinter Sockelleisten geführt werden (Bild 4.1-2 b).

Die von den Befürwortern behaupteten bauklimatischen und energieökonomischen Vorteile sind in der Fachwelt stark umstritten (vergl. z. B. [8] u. [9]). Eigene Untersuchungen in einem für Ausstel-

lungszwecke genutzten Keller des Schlosses Trebsen (Referenzkeller) haben ergeben, dass mit einer umlaufend verlegten Temperierleitung zwar im Falle einer ganzjährig kontinuierlichen Beheizung zwar eine Raumlufttemperatur von 20 °C gesichert werden kann, nicht jedoch die relative Raumluftfeuchte auf unter 60 % begrenzt werden kann. Dies wäre nur mit zusätzlichen Maßnahmen zur Belüftung des Kellers möglich. Ursache für die zu hohe relative Luftfeuchte in diesem Referenzkeller war der Feuchteintrag über den nicht mit einer Bauwerksabdichtung versehenen Kellerfußboden (im Sandbett verlegte Ziegel). Der Feuchteintrag über den Fußboden führte dazu, dass auch im Sommer der absolute Feuchtegehalt der Raumluft über dem der Außenluft lag.

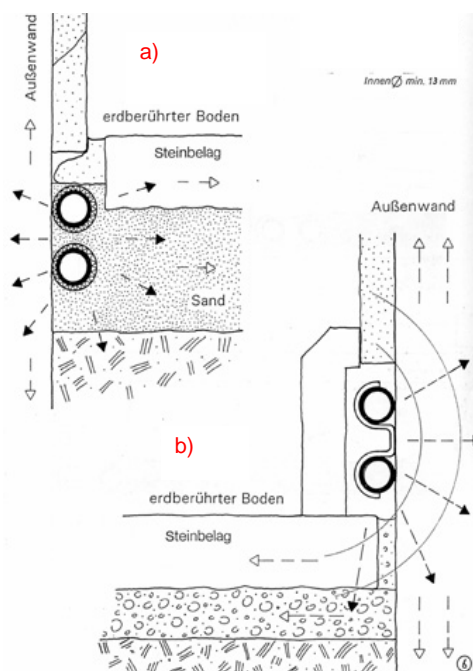


Bild 4.1.-2: Varianten der Temperierung nach Großschmidt [3]

Kapillarrohrmatten. Um einen möglichst großen Anteil der speicherwirksamen Bauwerksmasse zu aktivieren, ist auch die Belegung möglichst aller raumseitigen Bauteiloberflächen mit eingeputzten Kapillarrohrmatten denkbar. Ein wesentlicher Nachteil dieser Lösung ist jedoch der Verlust an historischen Oberflächen. Sofern die Baukonstruktion salzbelastet ist, wären zudem, sofern nicht kostenintensive Sanierputze nach WTA zum Einsatz kommen, nennenswerte Salzausblühungen zu erwarten.

Tabelle 4.1-1 enthält eine Gegenüberstellung der eingangs genannten Varianten sowie der Möglichkeiten der thermischen Aktivierung der Bausubstanz. Für den vorliegenden Fall wurde das Solar-Luft-System favorisiert. Für dieses System sprachen vor allem folgende Argumente:

- Der für die Reduzierung des absoluten Feuchtegehaltes der Kellerluft erforderliche Luftwechsel wird ohne zusätzliche technische Einrichtungen realisiert.
- Durch die unmittelbare Erwärmung der Zuluft müssen im Keller keine zusätzlichen Einrichtungen zur Abgabe der Wärme an den Raum (z. B. Heizkörper) installiert werden bzw. umfangreiche Eingriffe in die vorhandene Bausubstanz (z. B. nachträglicher Einbau einer Fußbodenheizung) vorgenommen werden.

- Da die Zuluftleitung unmittelbar von außen über einen vorhandenen Lichtschacht in den Keller geführt werden kann, sind keine Eingriffe in die historische Bausubstanz erforderlich.

Tabelle 4.1-1: Vergleich möglicher Varianten der solaren Temperierung

		Variante 1	Variante 2		
		Solar-Luft-System	Solaranlage mit soledurchströmten Kollektoren		
Einrichtungen zur Wärmeabgabe an den Raum		Zuluftöffnung	Fußbodenheizung	Temperierung nach Großes Schmidt	Kapillarrohrmatten
Raumlüftung		nur Abluftöffnung	Zwangslüftungsanlage notwendig		
Verbindungsleitungen vom Kollektorfeld zum Raum	maximal mögliche Länge	geringer als bei Variante 2	größer als bei Variante 1		
	Leitungsdurchmesser	groß	gering		
Gefahr der sommerlichen Überhitzung der Solaranlage		nicht vorhanden	gegeben sobald die Baukonstruktion die zugeführte Wärme nicht aufnehmen kann		
Thermisch aktivierbare Bauwerksmasse		alle an die Raumluft angrenzenden Bauteile erreichbar	nur im Fußbodenbereich	nur in unmittelbarer Nähe der Temperierleitungen	entsprechend der mit Kapillarrohrmatten belegten Fläche
Eingriffe in die historische Bausubstanz	Einrichtung zur Wärmeabgabe an den Raum	sehr gering	hoch	gering bis hoch	hoch
	Leitungsführung im Gebäude	hoch	gering bis hoch		

4.2 Bemessungsgrundlagen für das Solar-Luft-System

Heizleistung. Die maximal für die Sicherung einer Raumlufttemperatur von 20 °C erforderliche Heizleistung wurde mittels unterschiedlicher Verfahren ermittelt (Tabelle 4.2-1). Bemerkenswert ist die Abweichung zwischen den Handrechenverfahren nach [1] u. [2] einerseits und den Ergebnissen der dynamischen Simulationsrechnung andererseits. Es ist zu vermuten, dass die Abweichung aus der unzureichenden Berücksichtigung der thermischen Speichermasse im Rahmen der Handrechenverfahren resultiert.

Tabelle 4.2.-1: Erforderliche Heizleistung

Berechnungsansatz	Erforderliche Heizleistung kW
Norm-Heizlast nach DIN 12831 [1]	3,90 ^{1) 3)}
Verfahren nach Mrziglod-Hund und Dahlem [2, S. 78 ff]	3,22
Dynamische Simulationsrechnung mit HEAT [3]	0,95 ²⁾
Luftwechsel 0,4 1/h	
1) ohne Berücksichtigung der Aufheizleistung	
2) Berechnet mit der mittleren monatlichen Außenlufttemperatur für TRY Region 4	
3) Vereinfachtes Verfahren	

Die in Bild 4.2.-1 dargestellten Ergebnisse der dynamischen Simulationsrechnung zeigen, dass

- die maximal erforderliche Heizleistung erst im Februar auftritt und nicht, wie üblicherweise in Handrechenverfahren angesetzt im Januar,
- auch im Hochsommer noch eine Heizleistung erforderlich ist, die etwa die Hälfte der maximal erforderlichen beträgt und dass
- die niedrigste erforderliche Heizleistung Ende August- Anfang September zu verzeichnen ist.

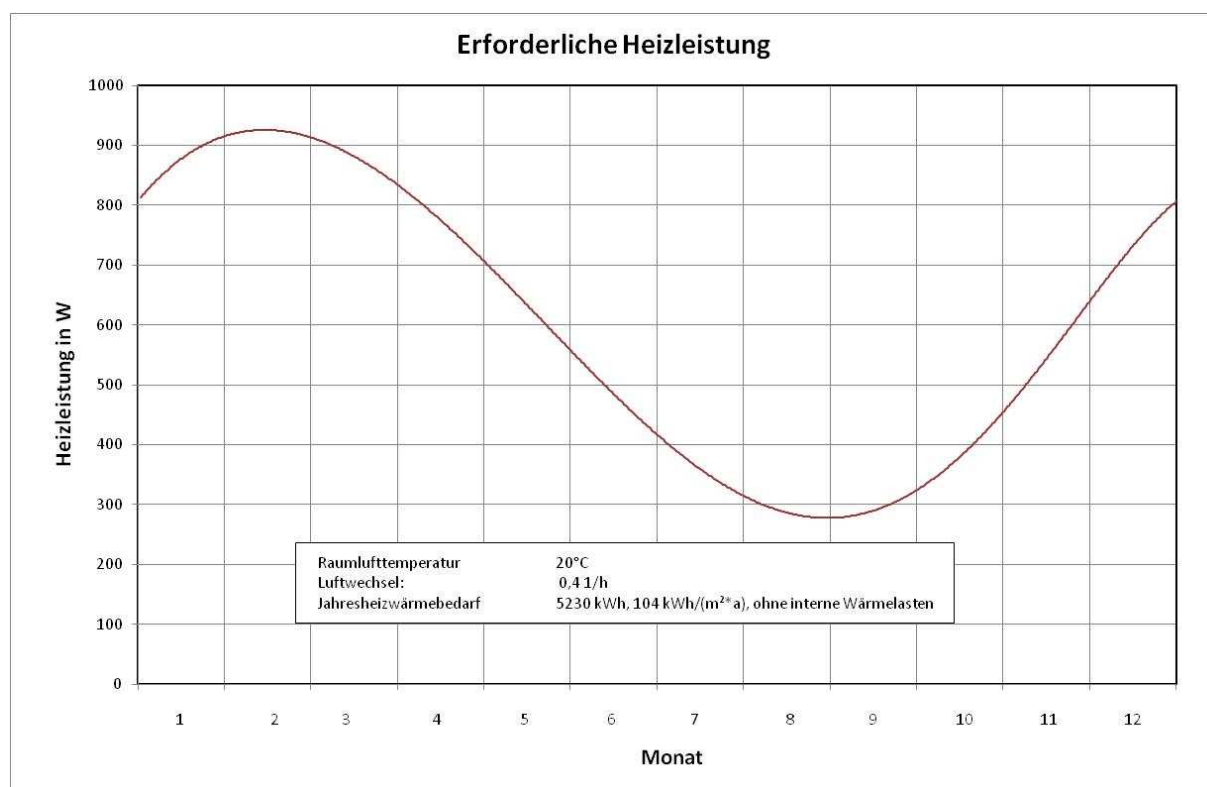


Bild 4.2.-1: Erforderliche Heizleistung im Jahresgang

Jahresheizwärmebedarf. Ohne Berücksichtigung interner Wärmegewinne beträgt der Jahresheizwärmebedarf des Kellers 5230 kWh bzw. 104 kWh/(m²*a). Ermittelt wurden diese Werte mittels dynamischer Simulation unter Verwendung von HEAT.

Ermittlung der erforderlichen Kollektorfläche. Im Unterschied zur Auslegung von Wärmeerzeugern bildet die Norm-Heizlast nicht generell die Bemessungsgrundlage für die Bestimmung der erforderlichen Kollektorfläche. Tabelle 4.2-2 enthält gängige Bemessungshinweise nach [5]. Für den vorliegenden Anwendungsfall sind jedoch keinerlei Bemessungsregeln verfügbar. Daher wird das Solar-Luft-System auf der Grundlage des Jahresheizwärmebedarfes des Kellers ausgelegt.

Tabelle 4.2-2: Regeln für die Auslegung von Luftkollektoren [5]

Art des Gebäudes	Grundlage für erforderliche Kollektorfläche
Große Hallen	1 m ² Kollektorfläche je kW Norm-Heizlast
Wohngebäude	1 m ² Kollektorfläche je 10 m ² Wohnfläche
beheizte Gebäude allgemein	solarer Deckungsgrad 15 bis 20 %
Gebäuden mit großer Speichermasse	1 m ² Kollektorfläche je 25-30 m ³ Raumvolumen

4.3 Technische Realisierung

4.3.1 Kennwerte der Solar-Luft-Systeme

Im Rahmen des vorliegenden Projektes kamen zwei unterschiedliche Solar-Luft-Systeme zum Einsatz (Tabelle 4.3-1). Mit der ersten temporären Anlage sollten mit begrenztem technischem Aufwand erste Erfahrungen hinsichtlich der Eignung zur Temperierung von Gebäudeteilen mit extrem großer Speichermasse gesammelt werden. Bei der zweiten Anlage stand neben der Erhöhung des Wärmeintrages in den Kellern die Frage nach der denkmalverträglichen Integration des Solar-Luft-Systems im Mittelpunkt.

Tabelle 4.3-1: Kennwerte der Solar-Luft-Systeme

		1. Anlage (temporäre Anlage)	2. Anlage (denkmalgerechte Anlage)
Kollektorfläche	m ²	12	25
Kollektorneigung	°	45	20
max. Luftvolumenstrom	m ³ /h	350	700
therm. Leistung (peak)	kW	7,5	15
bereitgestellte Wärmemenge ¹⁾	kWh/a	6.000	13.000
1) berechnet mit T-SolPro			

4.3.2 Temporäre Anlage

Die erste Anlage wurde ebenerdig in der Nähe der Süd-Ost-Ecke des Schlosses, also in unmittelbare Nähe des zu temperierenden Kellers installiert (Bild 4.3-1). Die Zufuhr der Warmluft in den Keller erfolgt über ein erdverlegtes Nahwärmerohr. Das Rohr wird über einen vorhandenen Lichtschacht in den Keller eingeführt (Bild 4.3-2). Der Warmluftauslass befindet sich unmittelbar unter der Gewölbedecke an der stirnseitigen Kelleraußenwand (Bild 4.3-3).



a) Ansicht von Süden



b) Ansicht von Süd-Osten

Bild 4.3-1: Temporäre Solaranlage

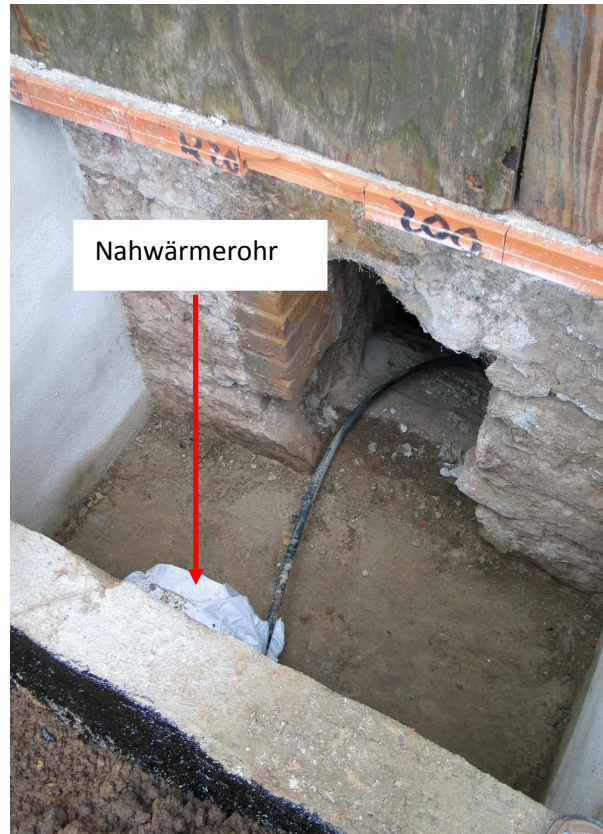


Bild 4.3-2: Lichtschacht zur Einführung des Nahwärmerohrs während der Bauphase



Bild 4.3-3: Warmluftauslass im Keller

4.3.3 Denkmalgerechte Anlage

Solaranlage und Baudenkmal. Solaranlagen auf oder an Baudenkmalen sind zumindest in Teilen der Fachwelt stark umstritten. Die Beurteilung ihrer denkmalschutzseitigen Zulässigkeit kann nur im Einzelfall erfolgen. Hierbei können auch zwischen den Vertretern der Denkmalpflege divergierende Auffassungen bestehen.

In einem Arbeitsblatt der Vereinigung der Landesdenkmalpfleger in der Bundesrepublik Deutschland [7] heißt es:

„Solaranlagen stellen in der Regel u.a. wegen ihrer seriell hergestellten Module, wegen ihrer Größe, der technisch bestimmten glatten Oberfläche, der optischen Wirkung einer dunkel hinterlegten Glasfläche mit silbrig erscheinenden Innenstrukturen, der planebenen Gesamtoberfläche einer Modulgruppe eine empfindliche Störung des historischen und denkmalrelevanten Erscheinungsbildes eines Denkmals dar. Sie sind mit dessen Oberflächenstrukturen, der Farbigkeit und dem Alterungsverhalten traditioneller Deckungsmaterialien selten vereinbar.“

Die in diesem Arbeitsblatt im Folgenden genannten Kriterien für eine mögliche Zulässigkeit sind restriktiv formuliert. Sie berücksichtigen nicht die Möglichkeit, dass Solaranlagen eine architektonisch eigenständige Weiterentwicklung des Baudenkmal darstellen können. Im Arbeitsblatt [] heißt es:

„Solarthermische Anlagen sind gegebenenfalls erlaubnis-/genehmigungsfähig, wenn:

- *sie auf untergeordneten, nahe stehenden Nebengebäuden oder auf für das Erscheinungsbild unerheblichen, nicht denkmalwerten Anbauten montierbar sind*
- *Kollektorenflächen auf ein notwendiges Mindestmaß beschränkt werden*
- *der Standort ihrer Montage unauffällig oder vom öffentlichen Raum nicht einsehbar ist*
- *die Eigenwirkung der Anlagenmodule gering ist*
- *sie sich dem Gesamterscheinungsbild des Denkmals in Bezug auf Farbigkeit, Struktur, Größe, Standort unterordnen*
- *sie sich in den gestalterischen Charakter der bestehenden Architektur einfügen lässt*
- *sie der unterstützenden Versorgung des Denkmals aus erneuerbaren Energien dienen und sie wirtschaftlich auf unmittelbare Nähe zum Abnehmer angewiesen sind“*

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde unter Einbeziehung von Studenten der Fachrichtung Architektur der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig eine Lösung für die denkmalgerechte Anordnung der Solarkollektoren erarbeitet. Diese Lösung ist dadurch gekennzeichnet, dass sie die Kollektoren bewusst zu Schau stellt ohne jedoch das Baudenkmal in seiner Substanz und Erscheinungsbild zu beeinträchtigen.

Energiegarten am Schloss Trebsen. Die Anordnung der Solar-Luft-Kollektoren und der Photovoltaikpaneele erfolgt in unmittelbarer Nähe zur Weingaststätte im Außenbereich des Schlosses (Bild 4.3-4). Dazu wird der an der südlichen Eingangsseite befindliche Kräutergarten verlegt und durch einen Energiegarten ersetzt. Die Anordnung und Gestaltung des Energiegartens (Bilder 4.3-5 und 4.3-7) folgt dem historischen Beispiel eines Nutzgartens einer Burganlage. Baulich betrachtet bedeutet dies, dass sich der Garten gestalterisch und konzeptionell - aber nicht inhaltlich – von der restlichen Anlage abtrennt. Im Garten selbst wird das Thema durch 15 Blöcke von 3,30 m x 2,70 m geprägt. Diese Blöcke bestehen aus zwei Teilen, einer Umrahmung und einer Beetfläche im Inneren. Die Umrah-

mung besteht aus einem modernen Recyclingmaterial und ist so dimensioniert, dass man bequem auf ihr sitzen kann. Die Beete im Inneren bestehen entweder aus typischen Energiepflanzen oder den für die Luftherwärmung benötigten Kollektoren. Diese Kollektorflächen sind Richtung Süden geneigt und mit einem eloxierten Aluminiumblech ummantelt. Dadurch erreichen sie eine körperhafte Gestalt und heben sich nicht wesentlich von der Bepflanzung ab. Die eigentlichen Beete bestehen aus Energiepflanzen wie Mais, Raps, Weizen oder Sonnenblumen. Diese unterstützen durch ihre Nutzung als Energieträger das Thema „Energiegarten“ und geben ihm durch unterschiedliche Wuchshöhen, Farbigkeiten und Strukturen eine Gestalt. Durch den Energiegarten führt ein auf die Kollektorflächen aufgedrucktes Informationssystem mit Hinweisen zum Projekt und zur Nutzung regenerativer Energien. Es lässt sich ein vielschichtiges Spektrum aufzeigen, wie der Entwurf das Thema „Energie“ darstellt. Erkennbar ist der „aktive“ Bereich auf technischer Ebene durch die Verwendung von Luftkollektoren zur Beheizung des Weinkellers. Der „aktive“ Bereich auf der Vegetationsebene lässt sich durch die Herstellung von Energiepflanzen als Energieträger beschreiben. Im „passiven“ Bereich auf baulicher Ebene wird durch die Verwendung von Recyclingmaterialien die Ressourcen- und Energieschonung verarbeitet. Auf metaphysischer Ebene steht im „passiven“ Bereich die Energieregeneration des Gartenbesuchers im Vordergrund. Durch Ausruhmöglichkeiten, Abgeschiedenheit und Naturbezug sollen sich die körpereigenen Ressourcen regenerieren.

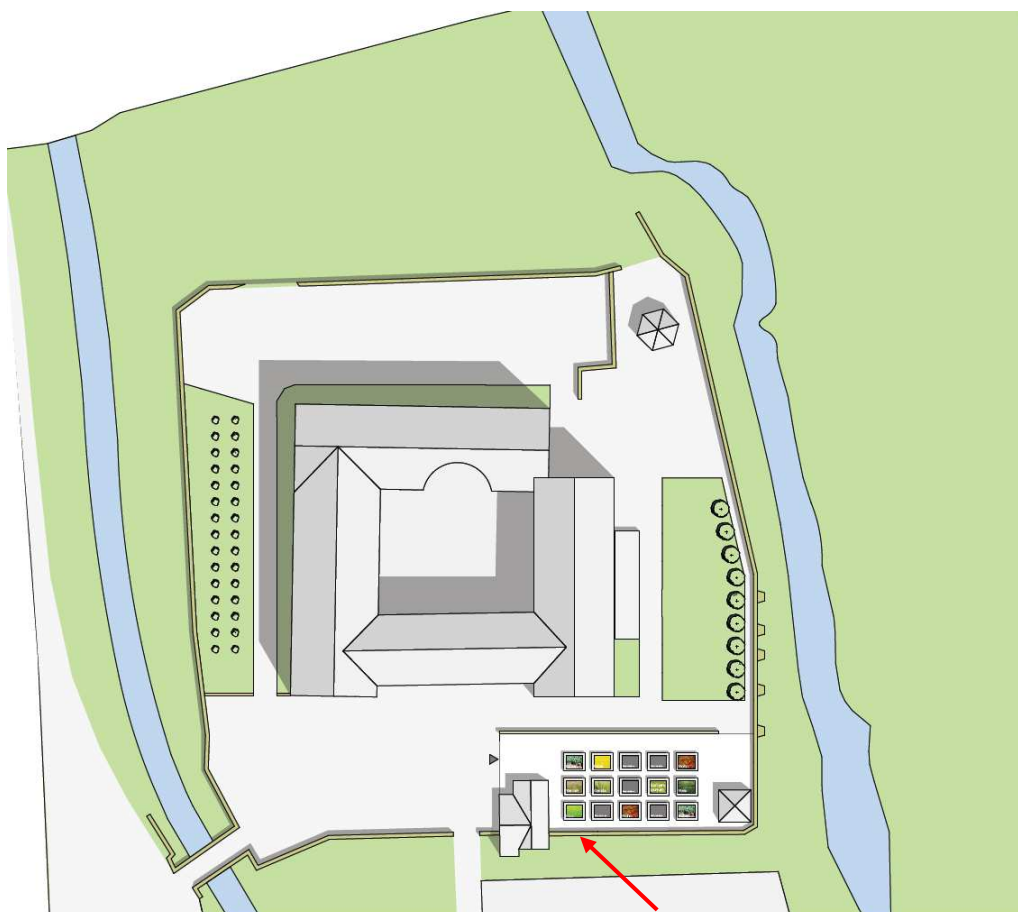


Bild 4.3-4: Schloss Trebsen mit Energiegarten (Pfeil)



Bild 4.3-5: Detailplanung für den Energiegarten

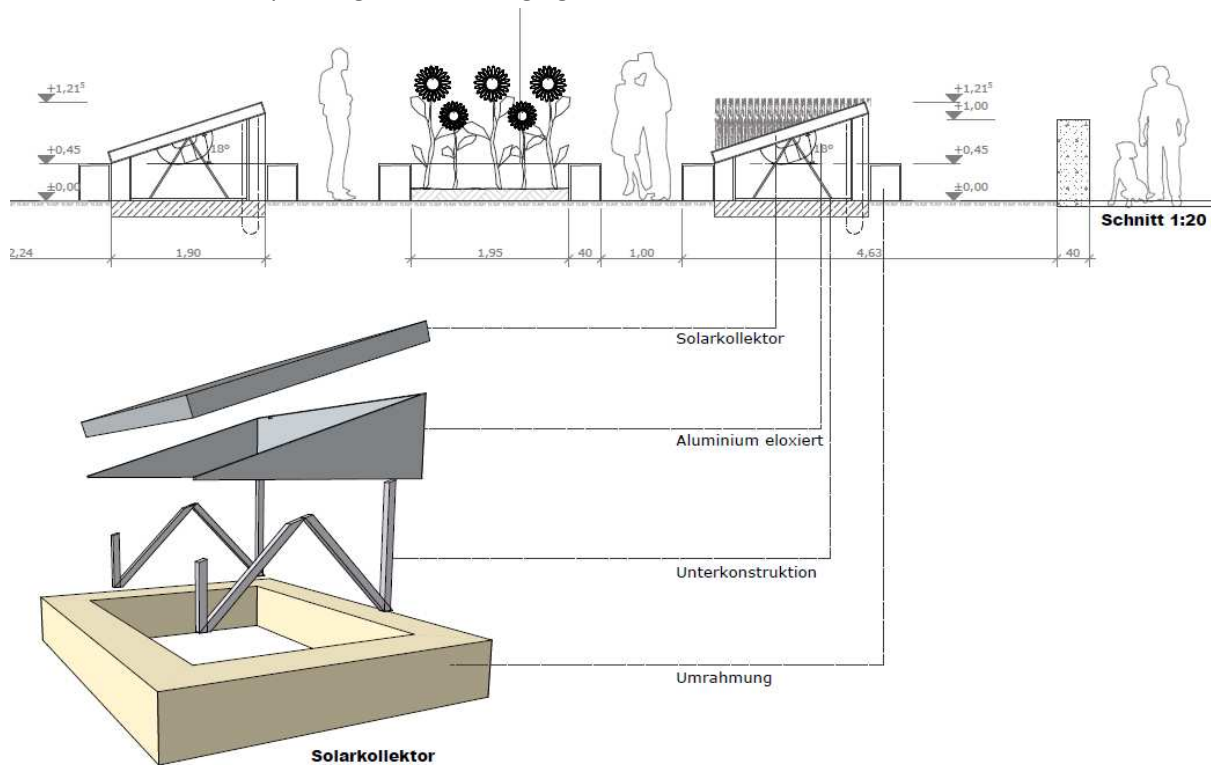


Bild 4.3-6: Aufbau der Solar-Beete



a) Ansicht von Süden



b) Ansicht vom Torweg aus

Bild 4.3-7: Der Energiegarten nach seiner Fertigstellung

5. Mess- und Untersuchungskonzept

Im Verlaufe des Projektes wurden messtechnische Untersuchungen zu folgenden Themenkomplexen durchgeführt:

1. Eigenklimas des Kellers (Nullmessung)

Das Eigenklima (freie Klimatisierung) stellt sich ein, wenn ein ungenutztes Gebäude bzw. ungenutzter Gebäudeteil nur dem Einfluss des Außenklimas ausgesetzt ist. Das Raumklima wird hierbei weder mittels passiven noch gebäudetechnischen Maßnahmen durch den Menschen beeinflusst.

2. Raumklimas im Keller und des Betriebsverhaltens der **temporären Solaranlage**

Da erhebliche Unsicherheiten bei der Bemessung bei der Auslegung des Solar-Luft-Systems bestanden, wurden vor der Erarbeitung der Lösung für die denkmalgerechte Anlage erste Erfahrungen mit einer temporären Anlage gesammelt.

3. Raumklimas im Keller und des Betriebsverhaltens der **denkmalgerechten Solaranlage**

Bei den Messungen im Rahmen dieses Teilkomplexes wurde das bereits im Zusammenhang mit der temporären Solaranlage erprobte Messprogramm ([Tabelle 5-1](#)) beibehalten.

Tabelle 5-1: Überblick Messprogramm

	Nullmessung	Temporäre Anlage	Denkmalgerechte Anlage
Raumklima	Lufttemperatur und Luftfeuchte in Raummitte		
	----	Vertikales Temperaturprofil im Raum	
Außenklima	Lufttemperatur und Luftfeuchte		
	-----	Globalstrahlung	
Temperaturverhalten der Baukonstruktion	raumseitige Oberflächentemperatur (1 Messtelle)	raumseitige Oberflächentemperaturen an mehreren Stellen Temperaturverteilung über den Bauteilquerschnitt an mehreren Stellen	
Betriebsverhalten des Solar-Luft-Systems	----	Luftaustrittstemperatur Kollektorfeld Lufteintrittstemperatur in den Raum Luftvolumenstrom	

Eine vollständige Umsetzung des Messkonzeptes war besonders in der Betriebsphase der denkmalgerechten Anlage nicht möglich. So kam es infolge unbefugter Eingriffe in die Elektroanlage des Schlosses, durch Vandalismus und Marderfraß zu Unterbrechungen in den Messreihen.

6. Eigenklima des Kellers¹

Raumlufttemperatur. Der Jahresgang der Raumlufttemperatur im Keller ist in Bild 6-1 dargestellt. Er folgt der Außenlufttemperatur. Gegenüber dieser ist jedoch eine deutliche Dämpfung zu verzeichnen. Die Phasenverschiebung der Raumlufttemperatur gegenüber der Außenlufttemperatur beträgt etwa ein Monat. Auch im Hochwinter ist der Keller frostfrei.

Relative Raumluftfeuchte. Der Jahresgang ist sehr ausgeprägt (Bild 6-2). Im Winter liegen die Werte zwischen 60 und 85 %. Im Sommer ist tendenziell eine deutlich höhere relative Luftfeuchte als im Winter zu verzeichnen. Häufig werden Werte nahe 100 % erreicht; ein kurzzeitiger Abfall auf bis zu 60% ist jedoch nicht ausgeschlossen. Ganzjährig weist die relative Raumluftfeuchte ausgeprägte kurzzeitige Schwankungen auf.

Absoluter Feuchtegehalt der Raumluft. Auch der absolute Feuchtegehalt der Raumluft folgt dem Außenklima (Bild 6-3). Vor allem in der kälteren Jahreszeit liegt der absolute Feuchtegehalt der Raumluft über dem der Außenluft. Dies kann nur auf einen Feuchteintrag über die Baukonstruktion zurückgeführt werden. Weder die Kelleraußenwände noch der Kellerfußboden verfügen über eine Abdichtung gegenüber einem Feuchteintrag aus dem Baugrund.

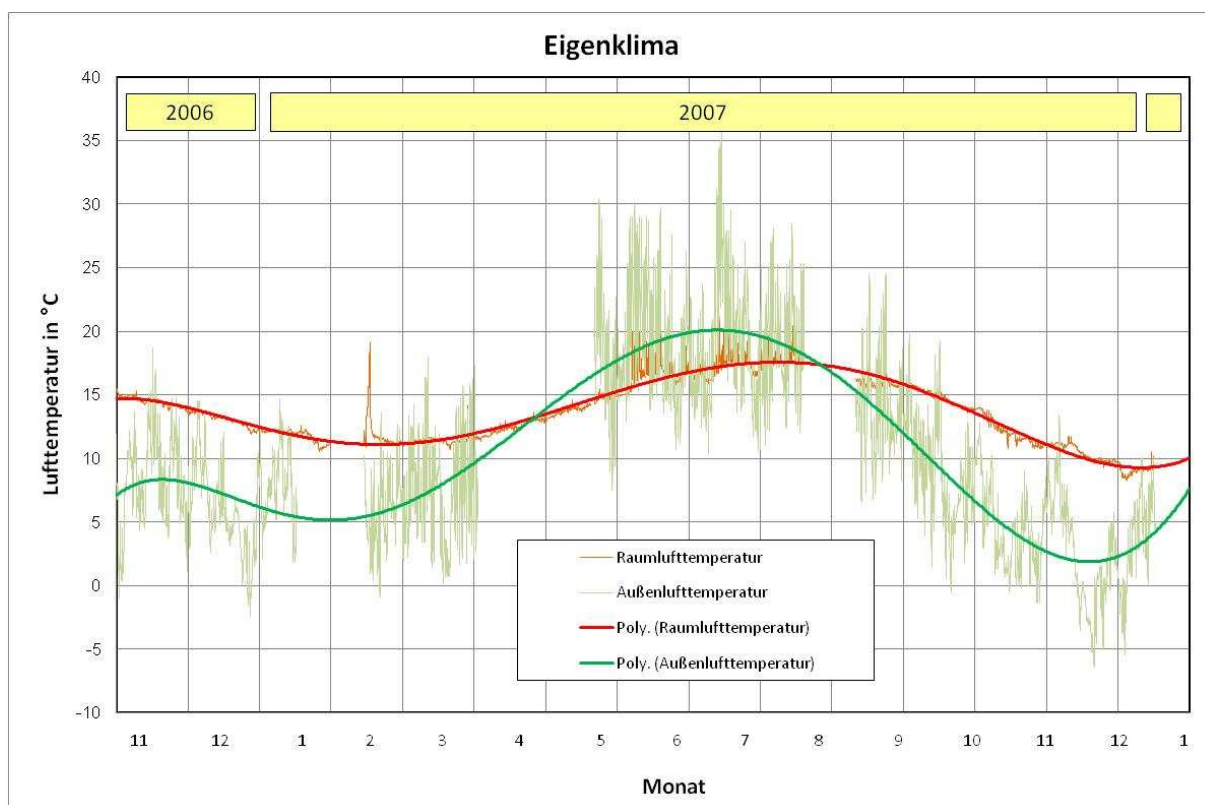


Bild 6-1: Eigenklima; Raumlufttemperatur im Jahresgang

¹ Das Eigenklima stellt sich ein, wenn ein ungenutztes Gebäude nur dem Einfluss des Außenklimas ausgesetzt ist. Das Raumklima wird weder durch passive noch gebäudetechnische Maßnahmen durch den Menschen beeinflusst. [6]

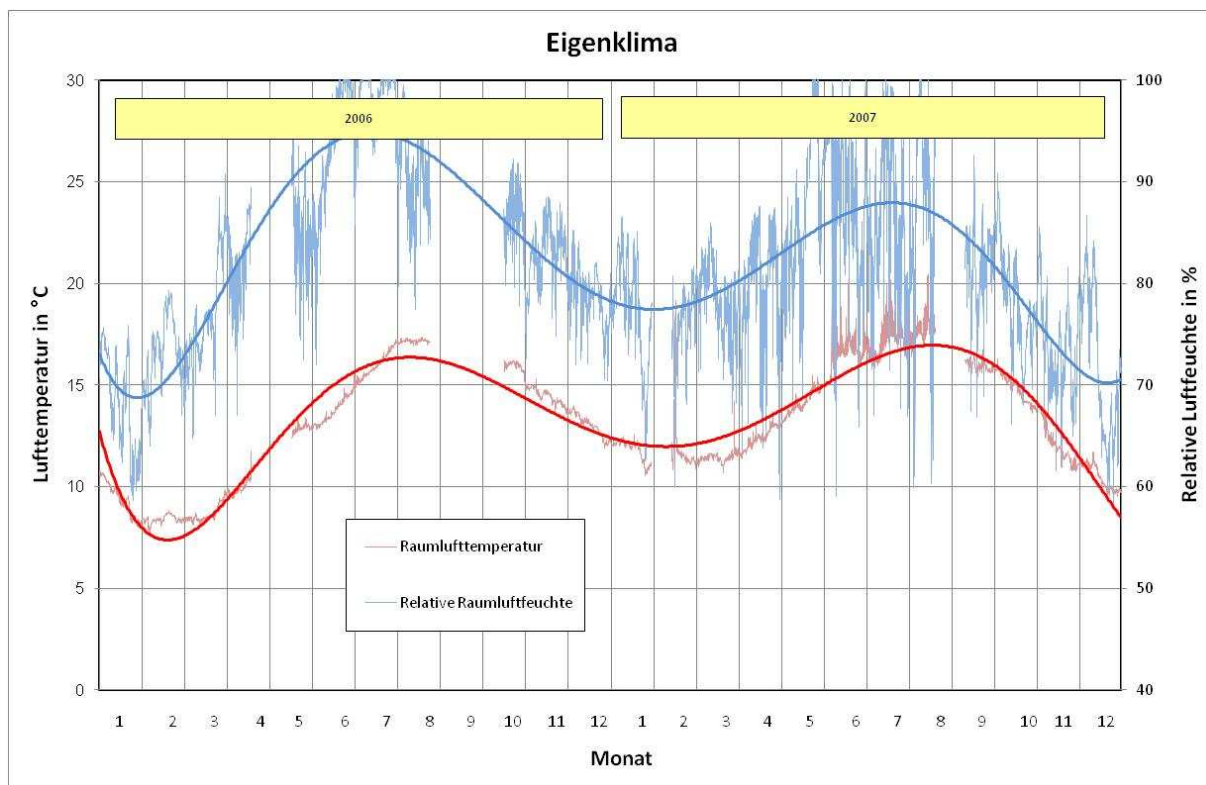


Bild 6-2: Eigenklima; relative Raumluffeuchte im Jahresgang

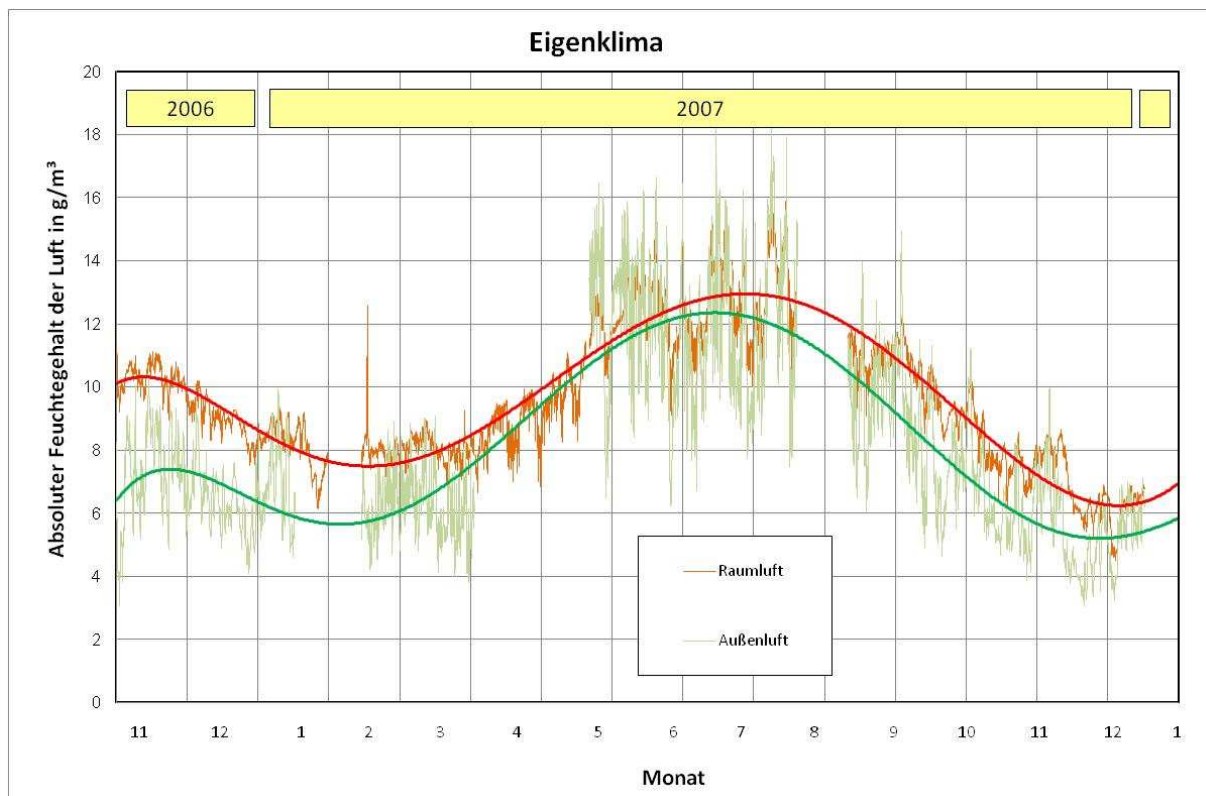


Bild 6-3: Eigenklima; absoluter Feuchtegehalt der Raumlufft im Jahresgang

7. Energogene Klimatisierung des Kellers mittels Solar-Luft-System²

7.1 Auswirkungen auf das Raumklima

7.1.1 Raumlufthtemperatur

Bild 7.1.1-1 zeigt den Verlauf der Raumlufthtemperatur im Falle des Eigenklimas und bei Einsatz der temporären Solaranlage. Die Anhebung der Spitzenwerte der Raumlufthtemperatur ist deutlich erkennbar. Im Hochwinter ist jedoch keine signifikante Erhöhung der Minimalwerte der Raumlufthtemperatur erkennbar. Auch unter der Wirkung der denkmalgerechten Anlage ist keine nennenswerte Anhebung der Raumlufthtemperatur im Winter zu verzeichnen (Bild 7.1.1-2). Bild 7.1.1-3 verdeutlicht, dass in den Jahren 2005 und 2007 (Eigenklima) in den Monaten Januar und Februar die Raumlufthtemperatur im Keller bereits auf dem Niveau lag, welches im ersten Jahr nach Inbetriebnahme der denkmalgerechten Anlage (2010) zu verzeichnen war. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass diese Anlage erst Ende August 2009 in Betrieb genommen wurde, die temporäre aber bereits im Mai 2009 abgebaut werden musste. Die Monate Juni, Juli und auch weitgehend der August konnten somit nicht für einen Wärmeeintrag in den Keller genutzt werden.

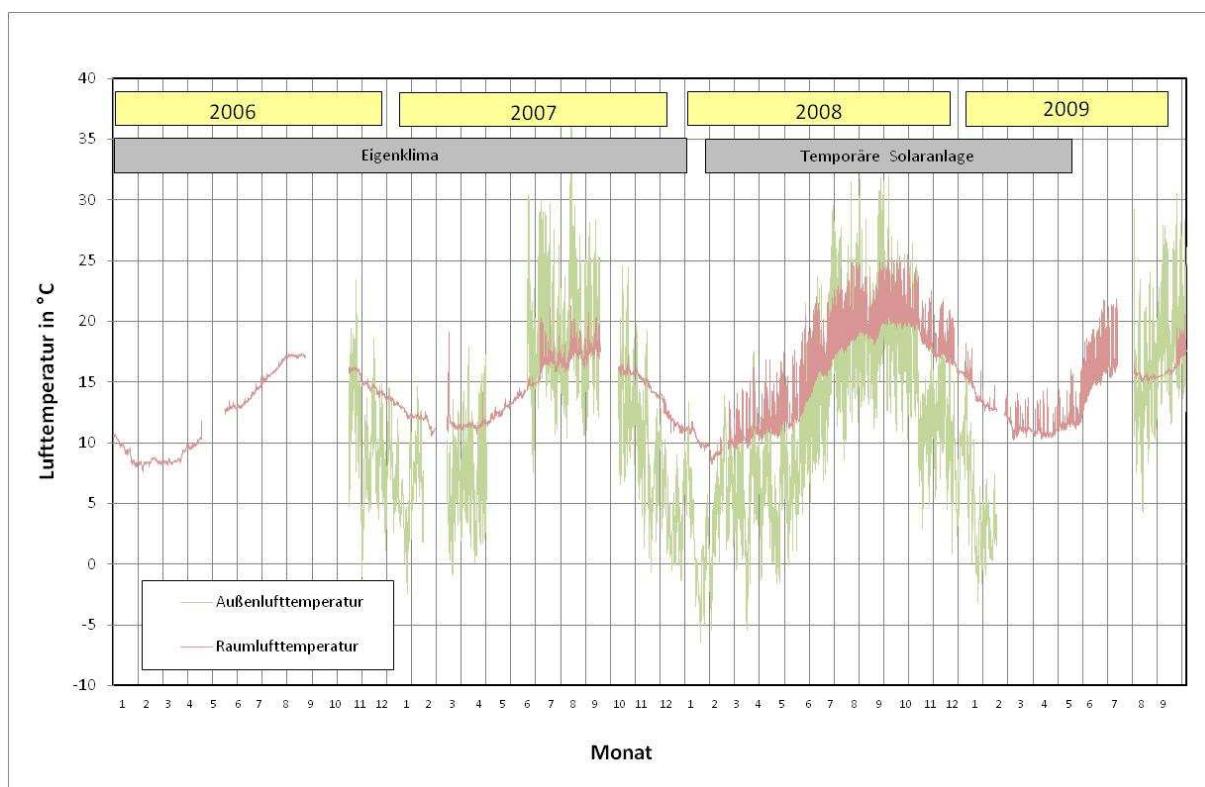


Bild 7.1.1-1: Raumlufthtemperatur im Fall „Eigenklima“ und unter Einfluss der temporären Solaranlage

Die Beurteilung der Wirksamkeit des Solar-Luft-Systems hinsichtlich einer möglichen positiven Wirkung auf die Raumlufthtemperatur in der Heizperiode darf sich nicht auf den Hochwinter beschrän-

² Energogene Klimatisierung. ist eine erzwungene Klimatisierung unter bewusstem Einsatz der Technischen Gebäudeausrüstung [6]

ken. In Bild 7.1.1-4 ist erkennbar, dass unter der Wirkung der zum Frühjahr hin ansteigenden Solar-
gewinne die Raumlufttemperatur im Vergleich zum Eigenklima deutlich schneller ansteigt.

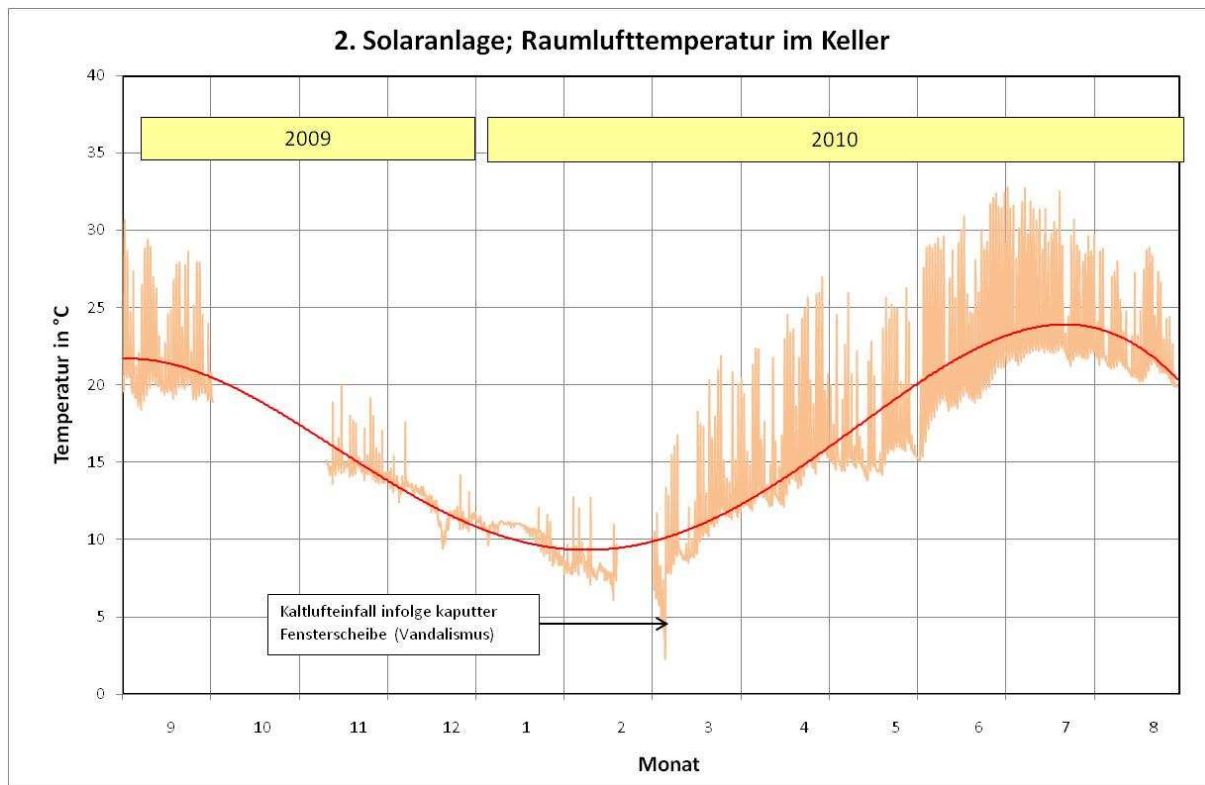


Bild 7.1.1-2: Raumlufttemperatur im ersten Jahr nach Inbetriebnahme der denkmalgerechten Solaranlage

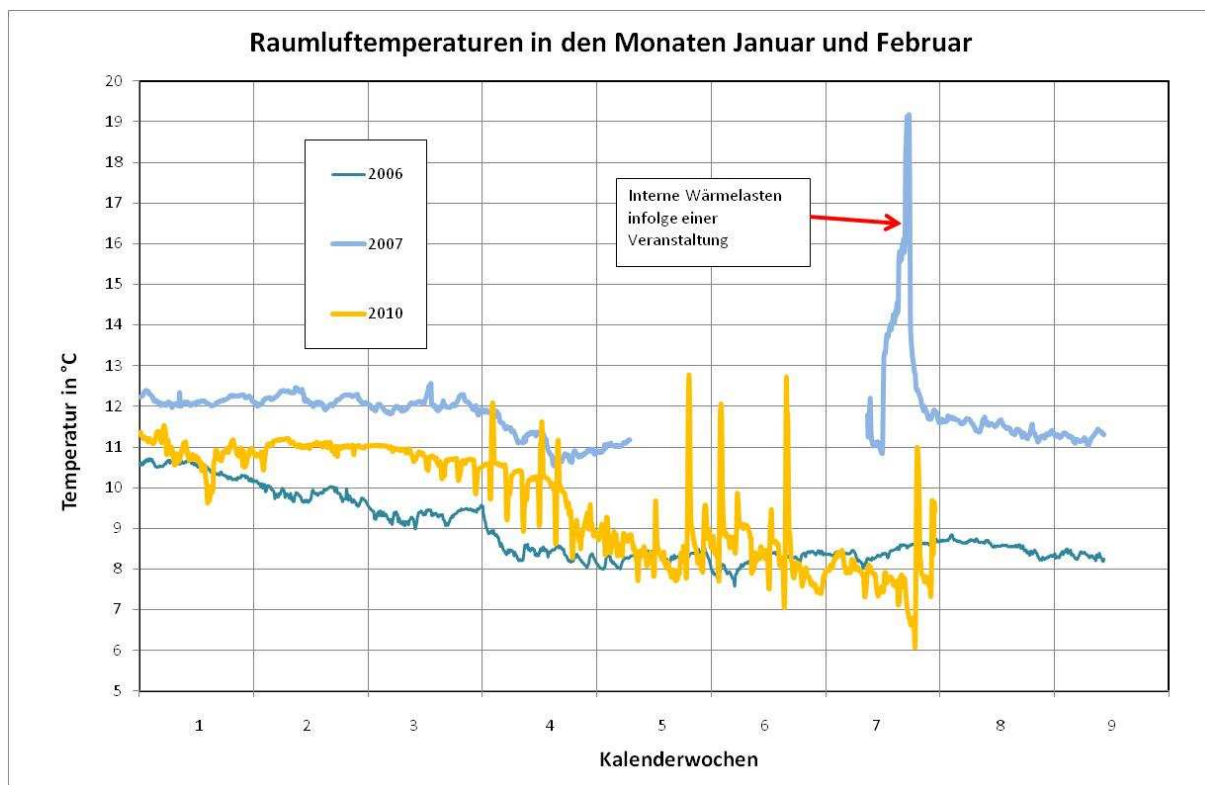


Bild 7.1.1-3: Vergleich der Raumlufthtemperaturen in den Monaten Januar und Februar im Falle des Eigenklimas (2006 und 2007) sowie unter der Wirkung der denkmalgerechten Solaranlage (2010)

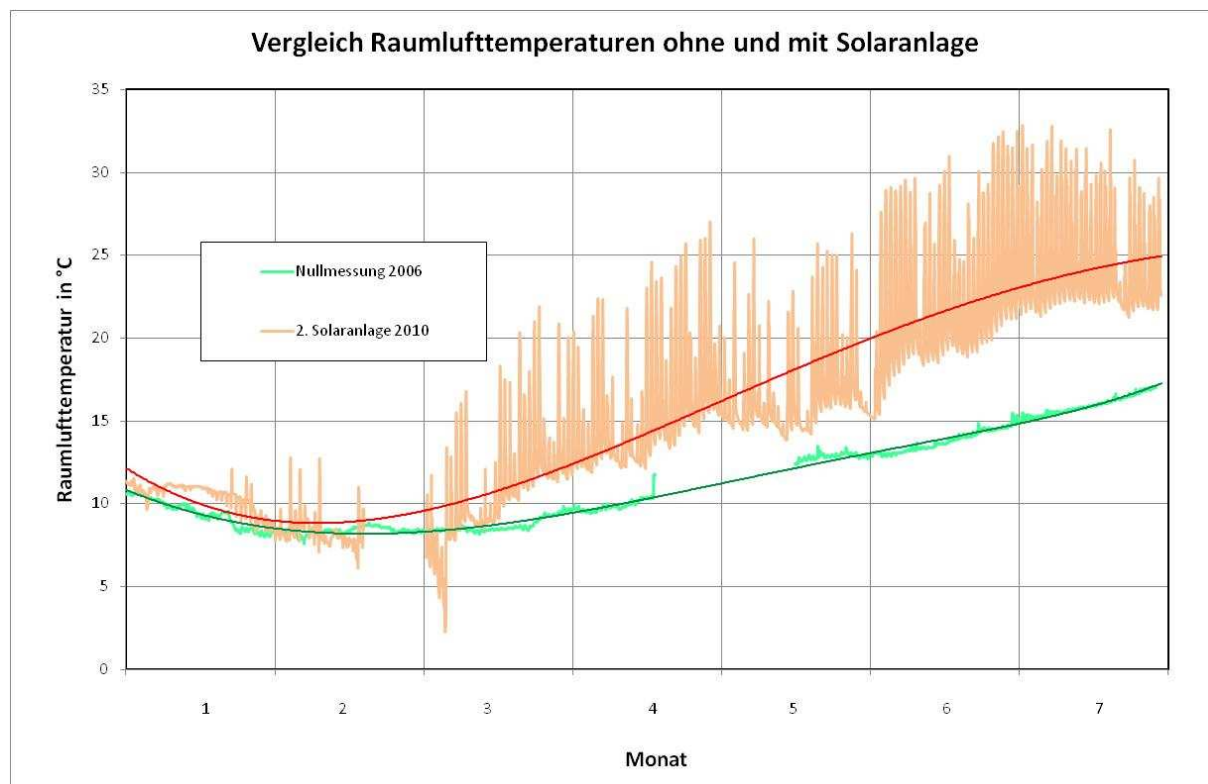


Bild 7.1.1-4: Verlauf der Raumlufthtemperaturen im Fall „Eigenklima“ und unter dem Einfluss des Solar-Luft-Systems

Sommerliche Raumlufthtemperaturen. In Bild 7.1.1-4 ist erkennbar, dass im Hochsommer Raumlufthtemperaturen von über 30 °C auftreten können. Im vorliegenden Fall resultieren hieraus jedoch keine Probleme hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit. Eine sommerliche Nutzung des Kellers ist nicht beabsichtigt (s. Abschnitt 3.2.).

7.1.2 Raumlufthfeuchte

Bereits mit der temporären Anlage konnte eine deutliche Reduzierung der relativen Luftfeuchte im Keller erreicht werden (Bild 7.1.2-1 und 7.1.2-2). Für das Eigenklima ist eine relative Luftfeuchte im Bereich von 60 bis 100 % typisch. Unter der Wirkung der temporären Anlage schwankt die relative Luftfeuchte dagegen im Bereich von 40 bis 80 %. Während im Fall Eigenklima der angegebene Schwankungsbereich nur bei Betrachtung des Jahresganges ausgeschöpft wird, wird er unter Wirkung der temporären Anlage nahezu ganzjährig ausgeschöpft. Wenn der Keller dem Eigenklima unterliegt ist zumindest tendenziell eine Abhängigkeit der relativen Raumlufthfeuchte von der Außenlufttemperatur erkennbar. Mit steigender Außenlufttemperatur nimmt auch die relative Luftfeuchte zu (Bild 7.7-2). Unter der Wirkung des Solar-Luft-Systems ist die gegenläufige Tendenz zu verzeichnen. Da das Solar-Luft-System bei hohen Außenlufttemperaturen häufiger in Betrieb ist, erfolgt an diesen Tagen eine Erwärmung der Raumlufth bei gleichzeitig erhöhtem Luftwechsel. Wie Bild 7.1.2-3 verdeut-

licht, ist die Absenkung der relativen Raumluftheuchte nicht lediglich auf die Anhebung der Lufttemperatur im Keller zurückzuführen. Durch das Solar-Luft-System wird der Luftwechsel im Keller erhöht; die von der Baukonstruktion in die Kellerluft abgegebene Feuchte kann besser abgeführt werden.

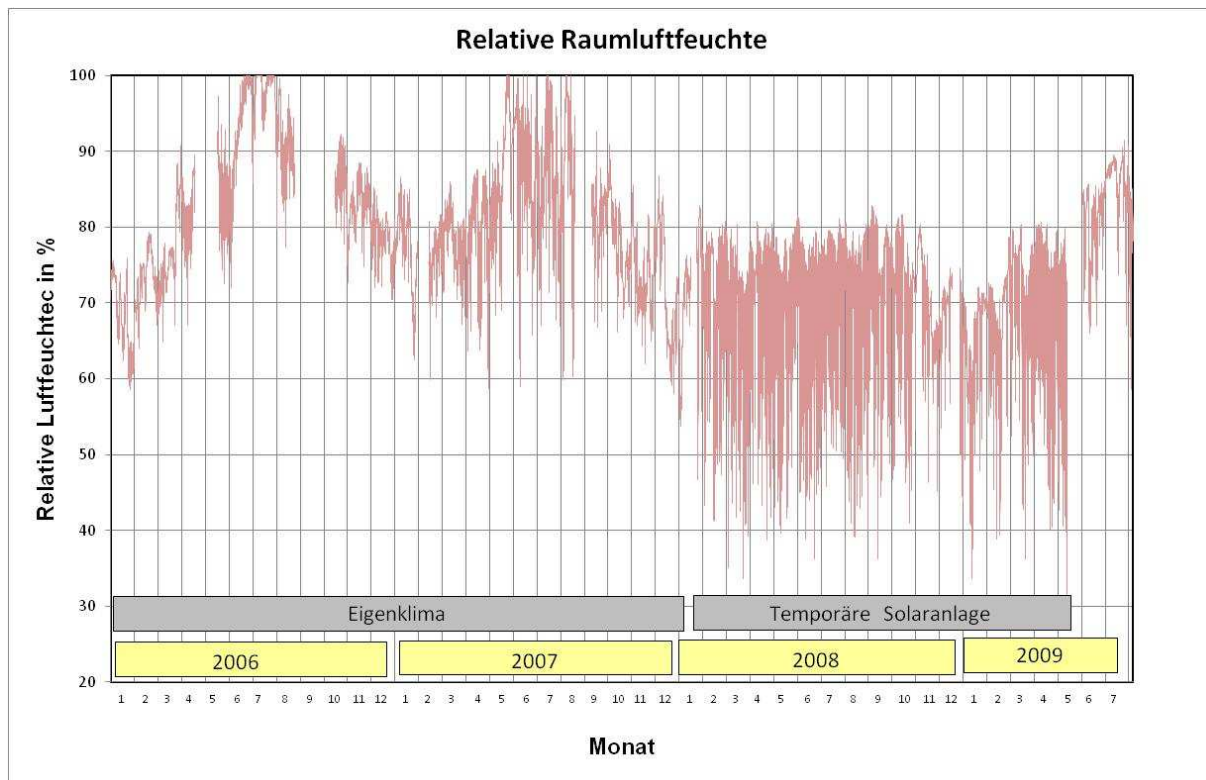


Bild 7.1.2-1: Die relative Raumlufffeuchte im Eigenklima und unter Wirkung des Solar-Luft-Systems im Jahresgang

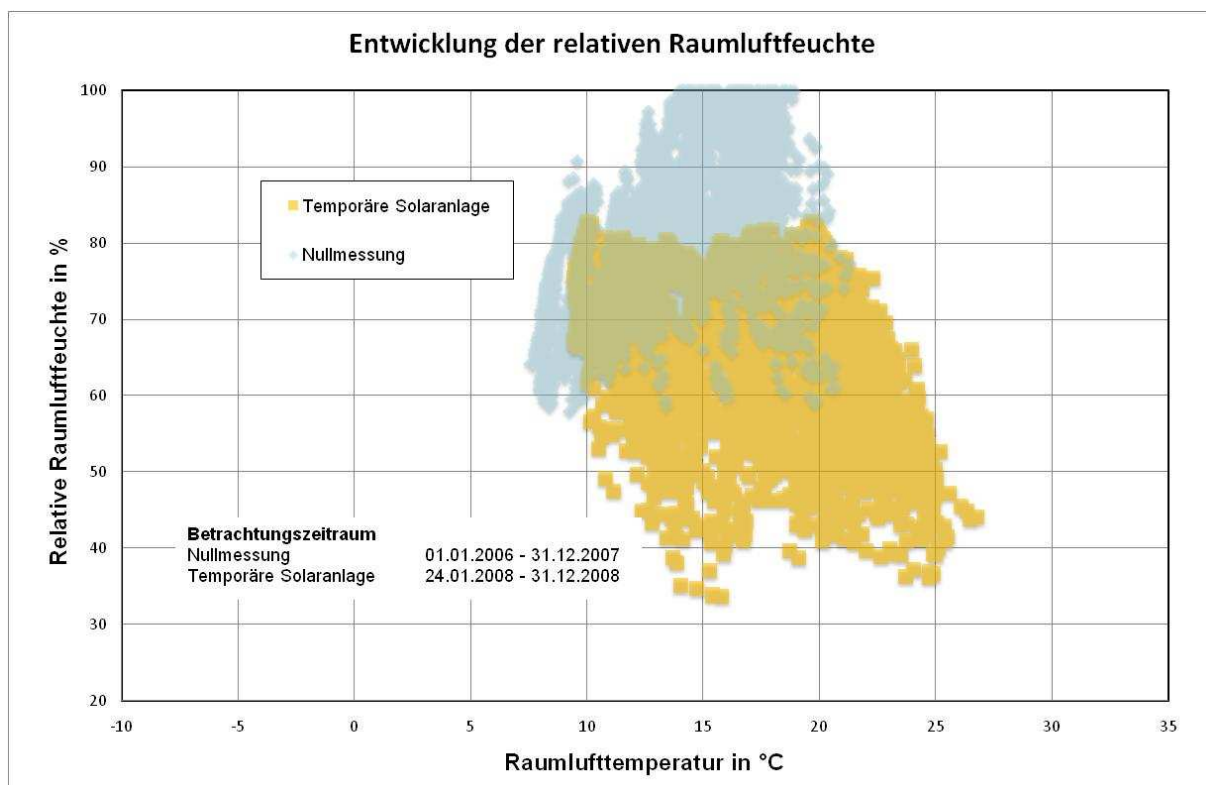


Bild 7.1-2-2: Die relative Raumluftheuchte im Eigenklima und unter Wirkung des Solar-Luft-Systems in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur (Beispiel: temporäre Anlage)

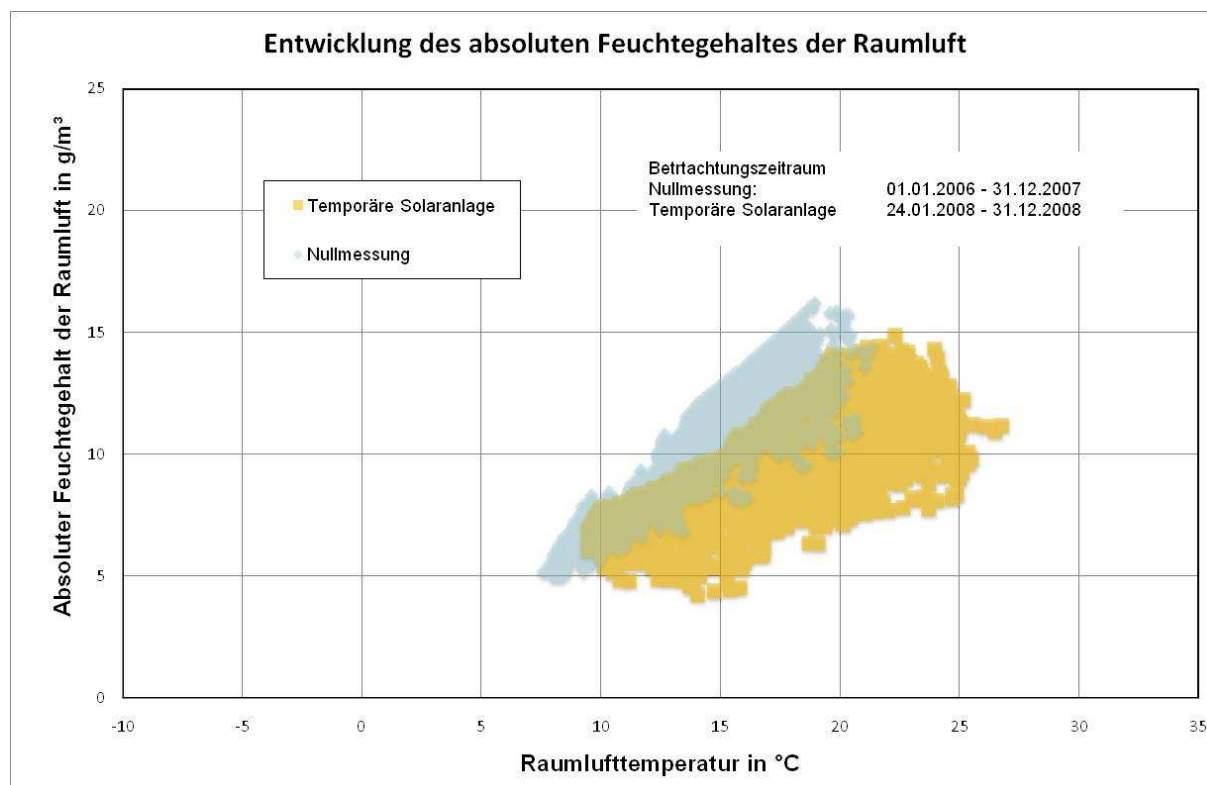


Bild 7.1.2-3: Der absolute Feuchtegehalt der Raumluft im Eigenklima und unter Wirkung des Solar-Luft-Systems (Beispiel: temporäre Anlage)

7.2 Betriebsverhalten des Solar-Luft-Systems

7.2.1 Winter

Bild 7.2.1-1 zeigt, dass auch im Winter mit dem Solar-Luft-System Zulufttemperaturen, die deutlich über der Außenlufttemperatur liegen, erreicht werden können. Die Zulufttemperatur kann bereits in dieser Jahreszeit bis zu 55 K über der Außenlufttemperatur liegen. Zulufttemperaturen bis 60 °C sind möglich. Die Abhängigkeit der Zulufttemperatur von der Globalstrahlung wird in Bild 7.2.1-2 untersucht:

- Die Maximalwerte der Zulufttemperaturen steigen bis etwa einer Globalstrahlung von 550 W/m² an. Eine höhere Strahlungsintensität führt zu keinem weiteren Anstieg. Dies liegt darin begründet, dass das Solar-Luft-System nicht mit einem konstanten Luftvolumenstrom betrieben wird. Vielmehr wird dieser in Abhängigkeit von der Kollektorausstrittstemperatur geregelt.
- Die bei einer bestimmten Globalstrahlung erreichbare Zulufttemperatur schwankt sehr stark. Dies resultiert daraus, dass auch die Dauer der Einstrahlung für das Betriebsverhalten des Solar-Luft-Systems von entscheidender Bedeutung ist. Wie aus Bild 7.2.1-3 ersichtlich ist, kann es bei einer geringen solaren Einstrahlung mehrere Stunden dauern bis das System in Betrieb geht. Nach Bild 7.2.1-2 sind zum Beispiel bei einer Globalstrahlung von 100 W/m² Zulufttempe-

peraturen von bis zu 40 °C möglich. Am Beispiel des 3. März 2008 zeigt sich jedoch, dass dies nur bei einer entsprechend langen Einstrahldauer gegeben ist.

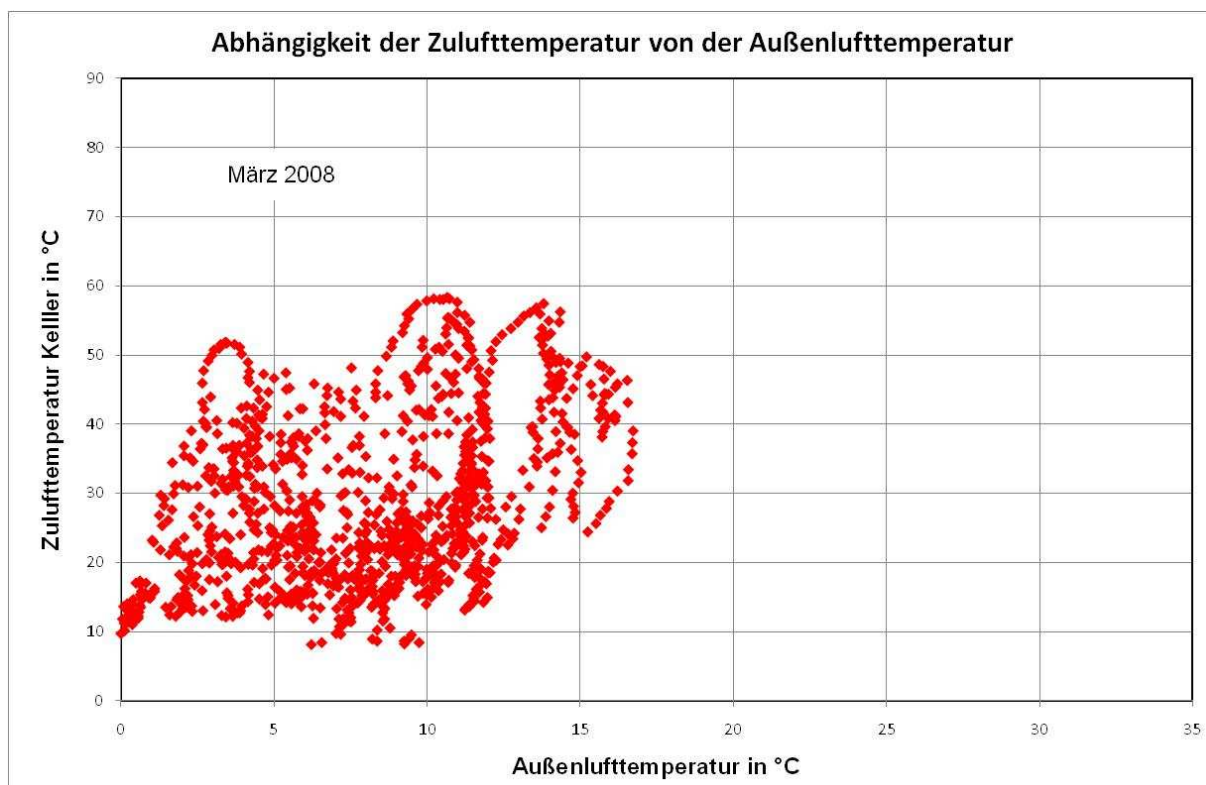


Bild 7.2.1-1: Abhängigkeit der Zulufttemperatur von der Außenlufttemperatur im März (Beispiel: temporäre Anlage)

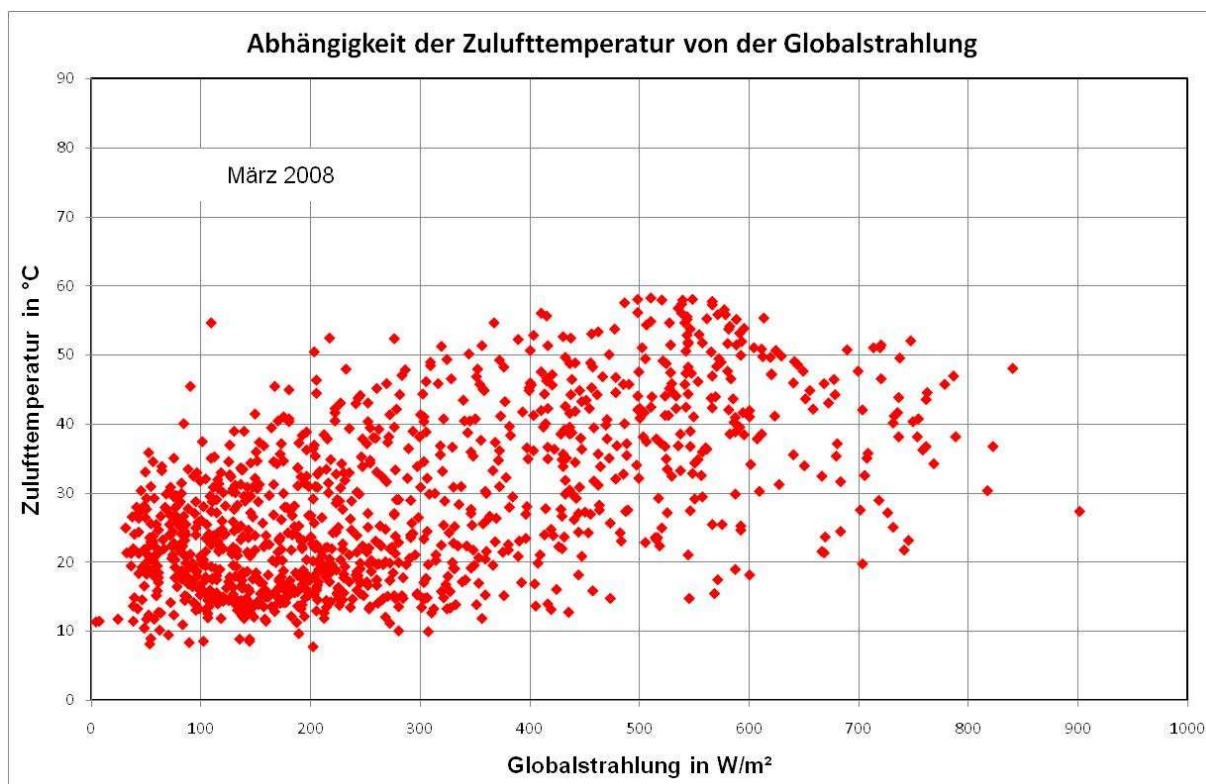


Bild 7.2.1-2: Abhängigkeit der Zulufttemperatur von der Globalstrahlung im März (Beispiel: temporäre Anlage)

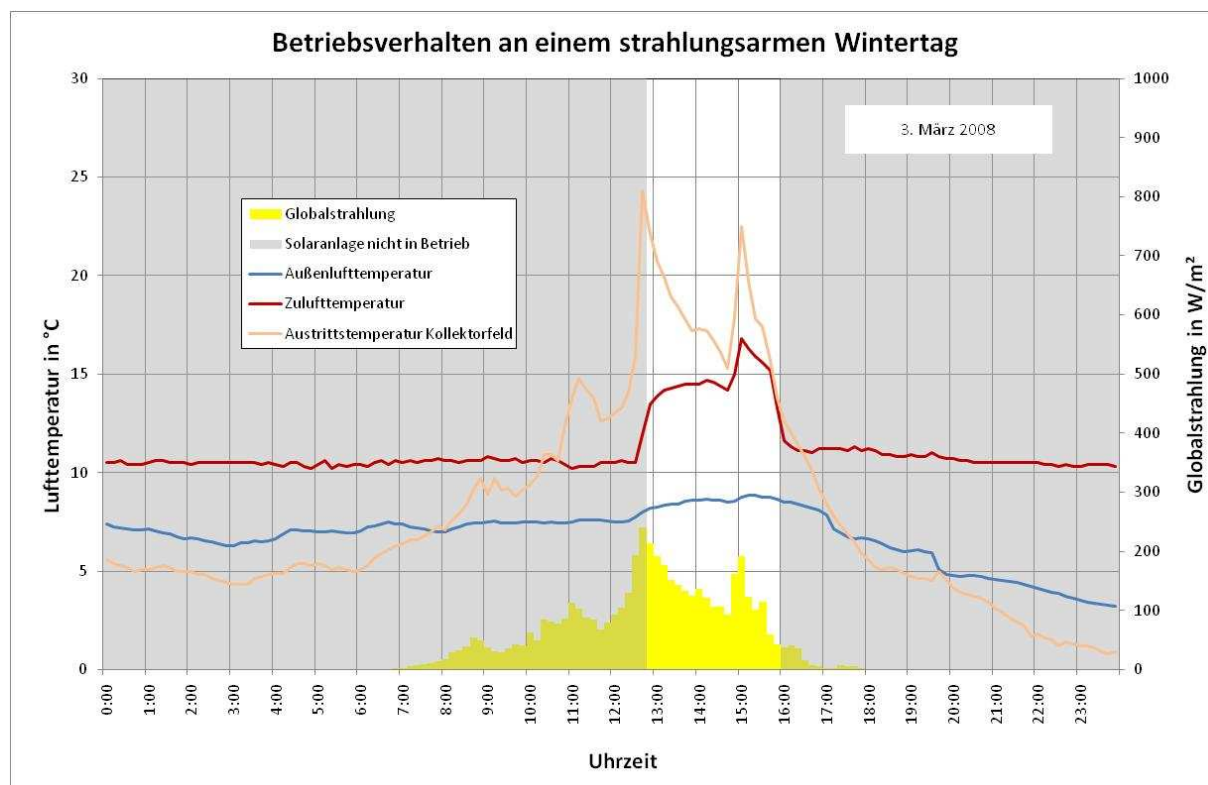


Bild 7.2.1-3: Betriebsverhalten des Solar-Luft-Systems an einem strahlungsarmen Wintertag (Beispiel: temporäre Anlage)

7.2.2 Sommer

Im Hochsommer können Zulufttemperaturen von bis zu 80 °C erreicht werden. Zwischen Zulufttemperatur und Außenlufttemperatur kann die Differenz bis zu 55 K betragen (Bild 7.2.2-1). Bei entsprechender Betriebsdauer des Solar-Luft-Systems können bereits bei einer Intensität der Globalstrahlung von um die 200 W/m² Zulufttemperaturen von 70 °C erreicht werden (Bild 7.2.2-2). Bedingt durch die Art der Regelung des Solar-Luft-Systems (variabler Luftvolumenstrom) sind jedoch auch bei sehr hoher solarer Einstrahlung keine Zulufttemperaturen von mehr als 80 °C anzutreffen. Das sommerliche Betriebsverhalten wird für beide Anlagen exemplarisch in den Bildern 7.2.2-3 und 7.2.2-4 dargestellt.

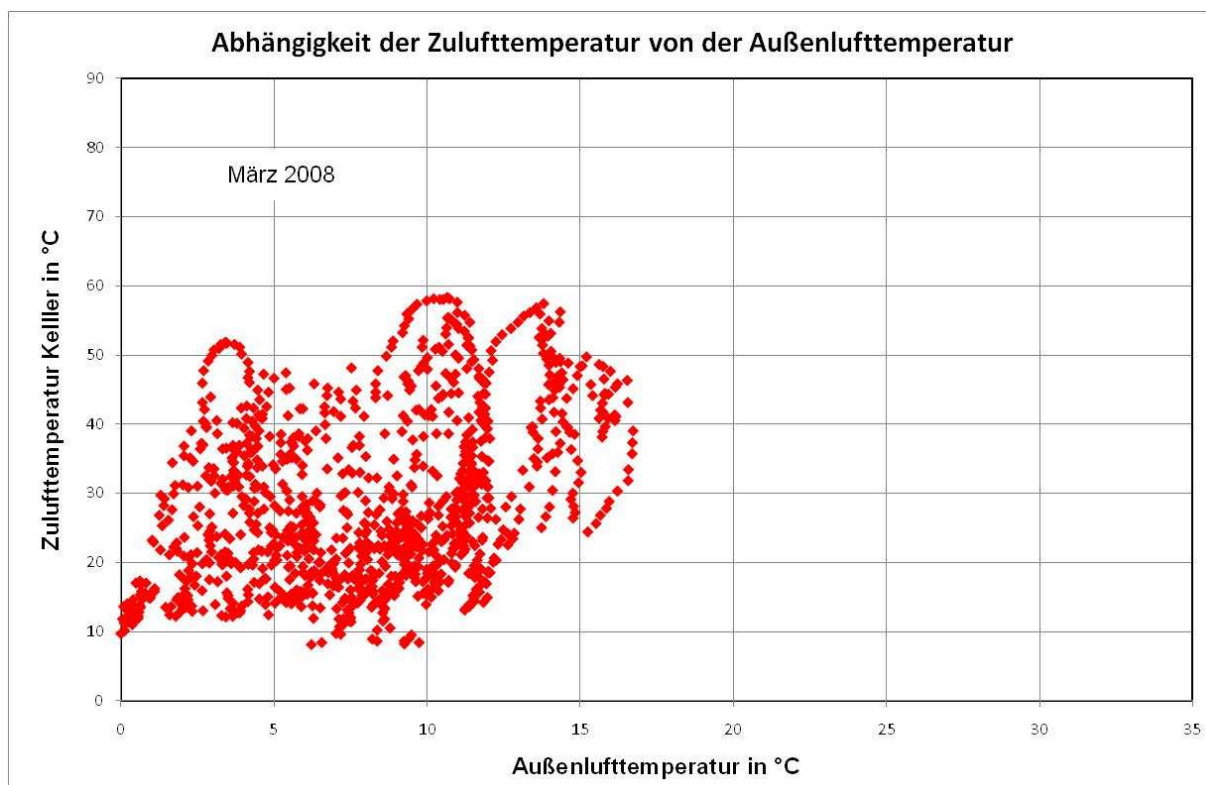


Bild 7.2.2-1: Abhängigkeit der Zulufttemperatur von der Außenlufttemperatur im März (Beispiel: temporäre Anlage)

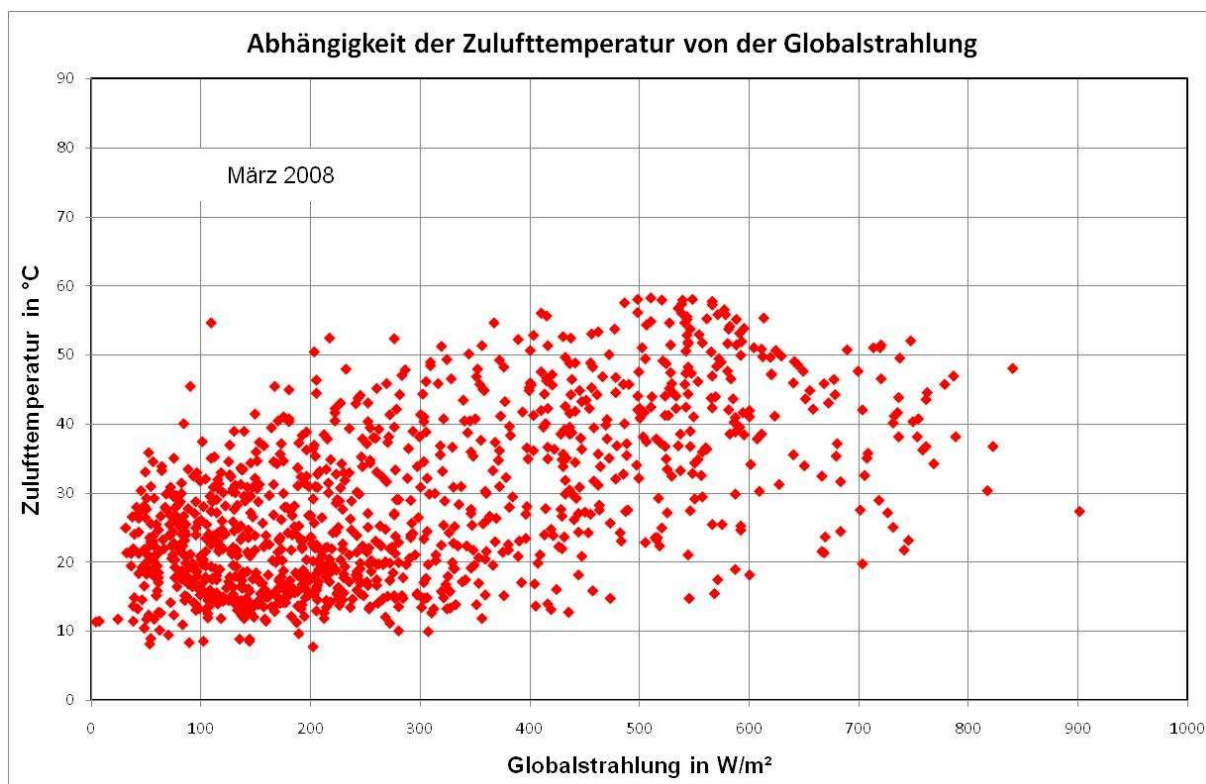


Bild 7.2.2-2: Abhängigkeit der Zulufttemperatur von der Globalstrahlung im März (Beispiel: temporäre Anlage)

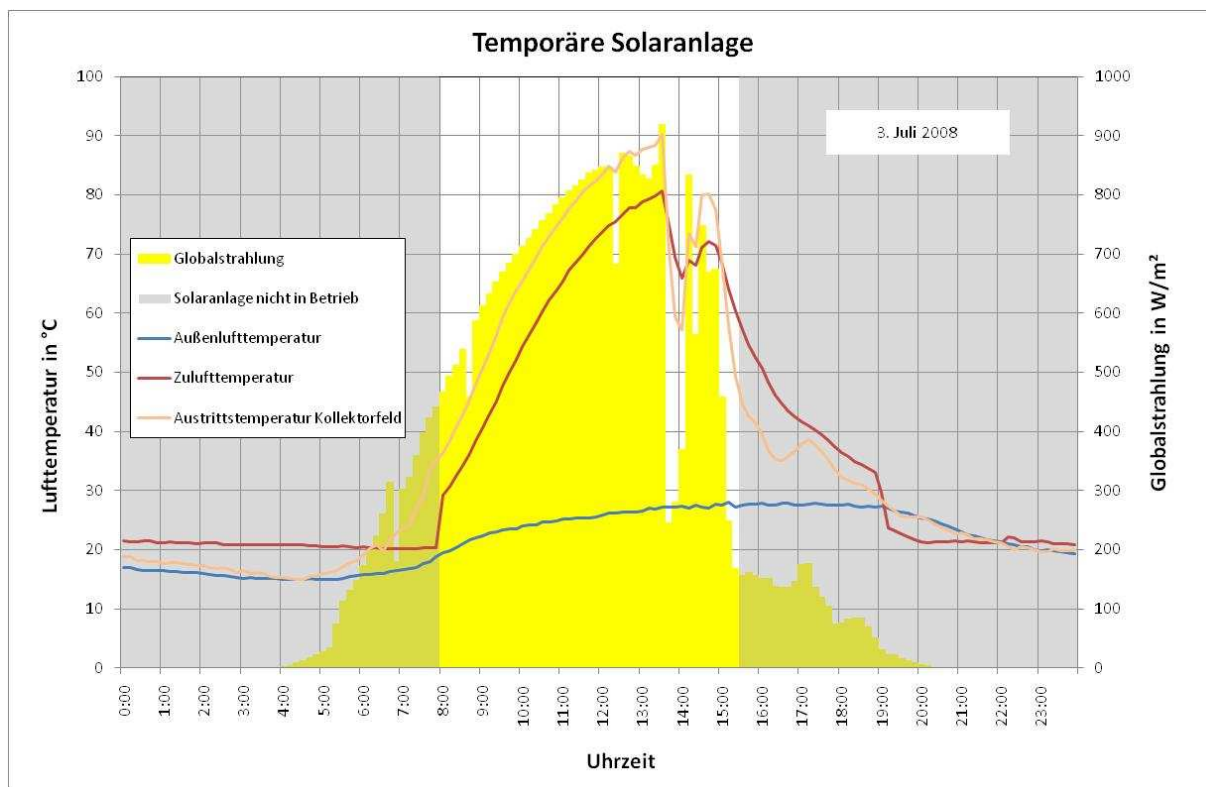


Bild 7.2.3-3: Beispiel für das Betriebsverhalten der temporären Solaranlage im Hochsommer

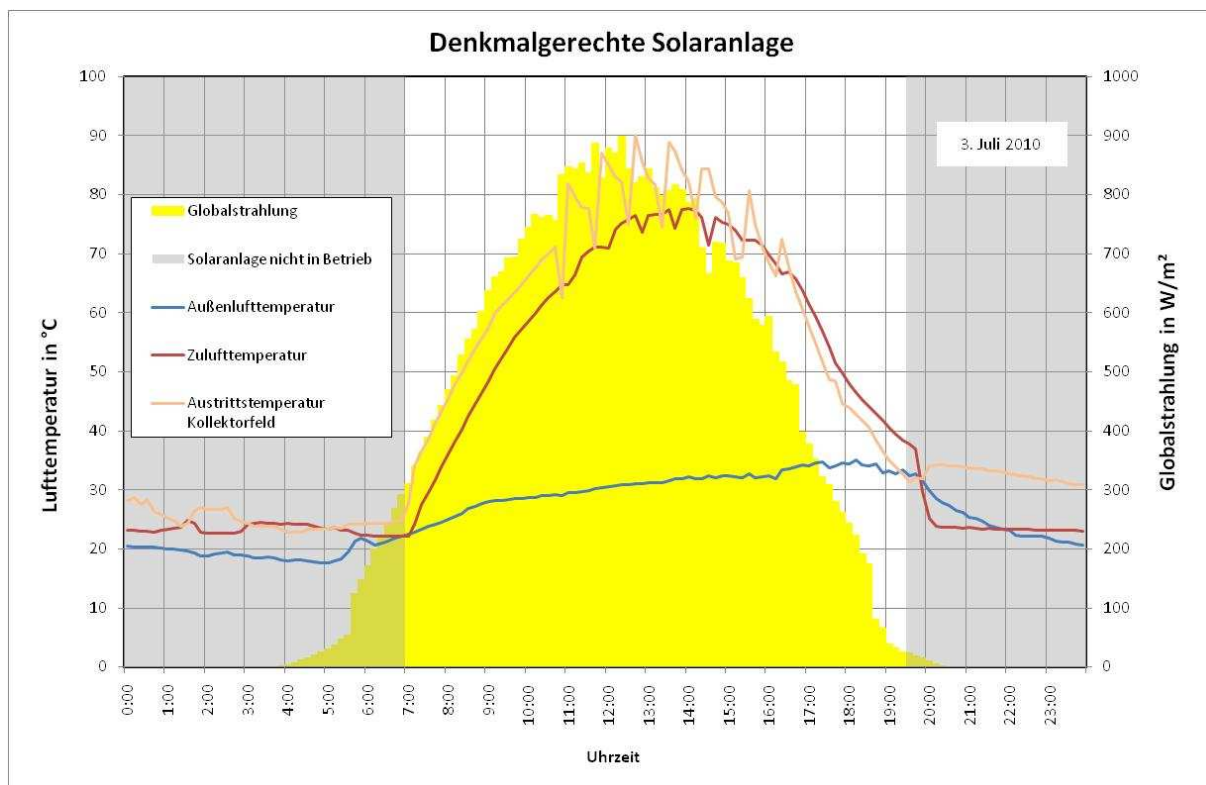


Bild 7.2.3-4: Beispiel für das Betriebsverhalten der denkmalgerechten Solaranlage im Hochsommer

7.2.3 Energiegewinne

Bei der Beurteilung der durch das Solar-Luft-System realisierten Gewinne sind zwei Fälle zu unterscheiden:

- Beurteilung auf der Basis der Temperaturdifferenz zwischen Außenlufttemperatur und der Austrittstemperatur des Kollektorfeldes (= vom Kollektorfeld abgegebene Energiemenge)
- Beurteilung auf der Grundlage der Temperaturdifferenz zwischen der Zulufttemperatur und der Raumlufthtemperatur im Keller (= Energieeintrag in den Keller)

Für die temporäre Solaranlage sind diese Werte in [Tabelle 7.2.3-1](#) zusammengestellt. Detaillierte Angaben können den [Bildern 7.2.3-1 und 7.2.3-2](#) entnommen werden. Eine vergleichbare detaillierte Auswertung ist für die denkmalgerechte Solaranlage nicht möglich. Es kam mehrmals zu Störungen im Betrieb, u. a. infolge von Marderbiss an den erdverlegten Mess- und Steuerleitungen.

Tabelle 7.2.3-1: Energiegewinne der temporären Solaranlage 2008

Monat	Vom Kollektorfeld abgegebene Energiemenge	Energieeintrag in den Keller
	kWh	kWh
Januar	Anlage noch nicht in Betrieb	
Februar		
März	360	236
April	480	369
Mai	826	706
Juni	761	669
Juli	584	513
August	604	515
September	380	285
Oktober	269	188
November	60	32
Dezember	(16)	(8)
Summe	4.340	3.520

In [Tabelle 7.2.3-2](#) wurden für den Monat März die Energiegewinne der temporären sowie der denkmalgerechten Solaranlage einander gegenübergestellt. Auch wenn einschränkend anzumerken ist, dass die Messwerte aus unterschiedliche Zeiträume einander gegenübergestellt werden, wird deutlich, dass mit der denkmalgerechten Solaranlage, deren Kollektorfläche um 110 % gegenüber der temporären Anlage vergrößert ist, keine äquivalente Erhöhung der solaren Gewinne erreicht werden konnte. Eine wesentliche Ursache hierfür ist, dass die 2. Solaranlage nicht aus einem zusammenhängenden Kollektorfeld besteht, sondern auf Grund der Anordnung in Form von Energiebeeten aus 5, über erdverlegte Leitungen miteinander verbundenen, Kollektorfeldern aufgebaut ist.

Für die Verbindungsleitung zwischen Kollektorfeld und Keller wurde ein 8,75 m langes, vorgedämmtes Nahwärmerohr mit Stahl-Innenrohr (lichter Durchmesser 210 mm) eingesetzt. Die in [Tabelle 7.2.3.-1](#) ersichtliche Differenz von 19% zwischen der vom Kollektorfeld abgegebenen Energiemenge und dem Energieeintrag in den Keller resultiert nicht allein aus dem Energieverlust über das Nahwärmerohr. Bezugsbasis für die vom Kollektorfeld abgegebene Energiemenge ist die Außenlufttemperatur; für die dem Keller zugeführte Energiemenge hingegen die Raumlufttemperatur.

In [Bild 7.2.3.-3](#) ist für die Zeiten, in denen das Solar-Luft-System 2008 in Betrieb war, also dem Keller Zuluft zugeführt wurde, die Differenz zwischen der Luftaustrittstemperatur unmittelbar am Kollektorfeld und der Temperatur der Zuluft unmittelbar am Luftauslass im Keller dargestellt. Bemerkenswert ist, dass die Zulufttemperatur auch deutlich über der Austrittstemperatur liegen kann. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Stahl-Innenrohr mit seiner Wanddicke von 4,5 mm als Speicher wirken kann. Besonders in Phasen mit extrem dynamischen Betriebsverhalten kann der Zuluftstrom im Rohr zusätzlich erwärmt werden. Umgekehrt kann es im Nahwärmerohr, solange das Stahl-Innenrohr noch nicht ausreichend erwärmt ist, zu einer verstärkten Abkühlung des Luftstroms kommen ([vergl. Bild 7.2.1-3](#)). Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die in [Bild 7.2.3-3](#) dargestellte Temperaturdifferenz auf zeitgleich ermittelten Werten für die Luftaustrittstemperatur aus dem Kollektorfeld und die Temperatur am Zuluftseintritt in den Keller basiert. Um diesen Umstand zu berücksichtigen, wurde die mittlere Temperaturdifferenz aus den [Bild 7.2.3-3](#) zugrunde gelegten Messwerten berechnet. Im Jahr 2008 betrug somit der mittlere Temperaturabfall im Nahwärmerohr 4 K. Im Hochsommer kann der Temperaturabfall bis zu 10 K betragen.

Tabelle 7.2.3-2: Gegenüberstellung der Energiegewinne der temporären und der denkmalgerechten Solaranlage für den Monat März

Anlage	Betrachtungszeitraum	Vom Kollektorfeld abgegeben Energiemenge	Energieeintrag in den Keller	Randbedingungen	
				Mittelwert der Außenlufttemperatur	Summe Globalstrahlung
		kWh	kWh	°C	kWh/m ²
temporäre	März 2008	378	236	5,5	65
denkmalgerechte	März 2010	463	319	5,5	69

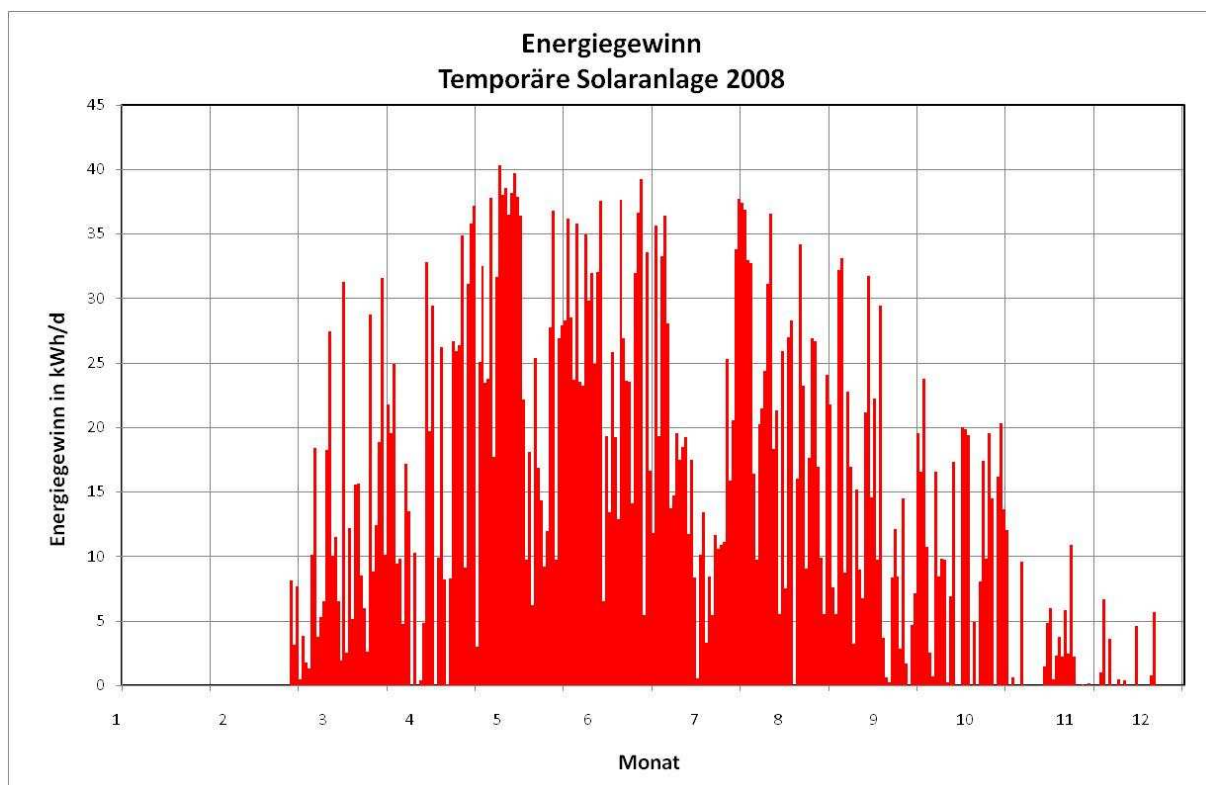


Bild 7.2.3-1: Vom Kollektorfeld 2008 abgegebene Energiemenge (Die Anlage wurde erst am Ende Februar 2008 in Betrieb genommen)

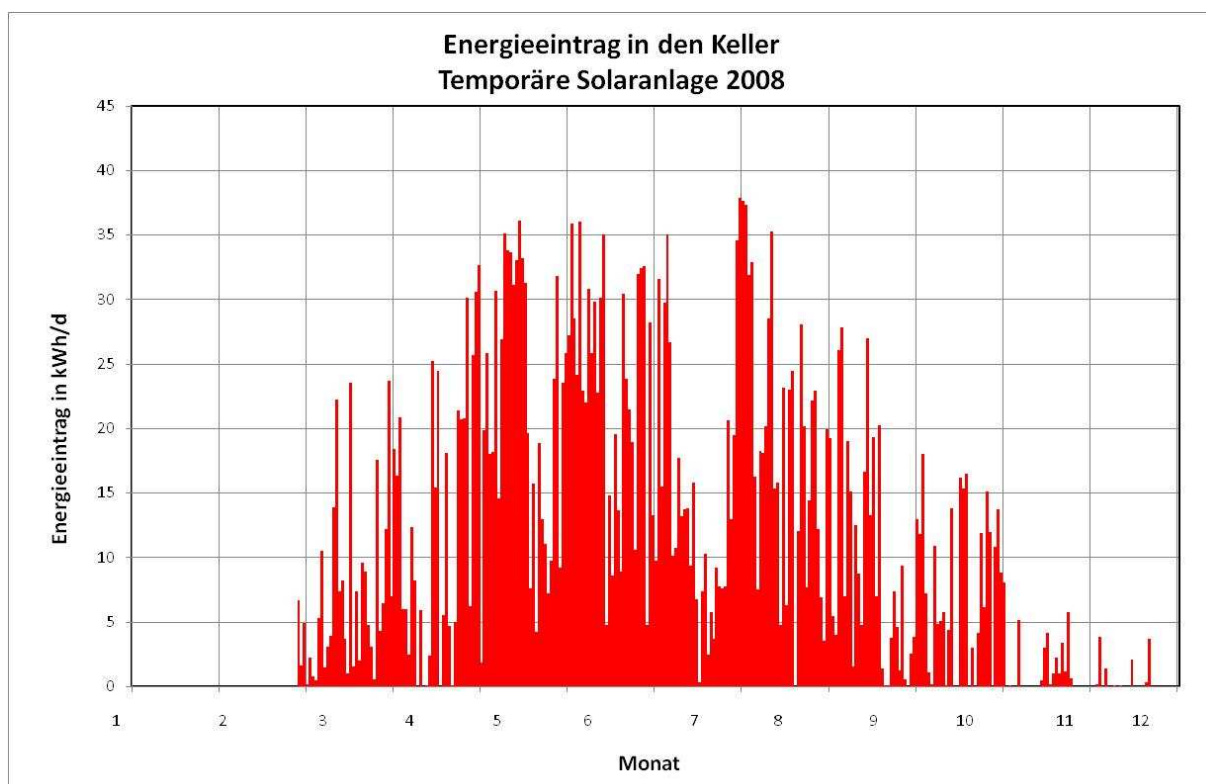


Bild 7.2.3-2: Von der temporären Solaranlage 2008 dem Keller zugeführte Energiemenge (Die Anlage wurde erst im Ende Februar 2008 in Betrieb genommen)

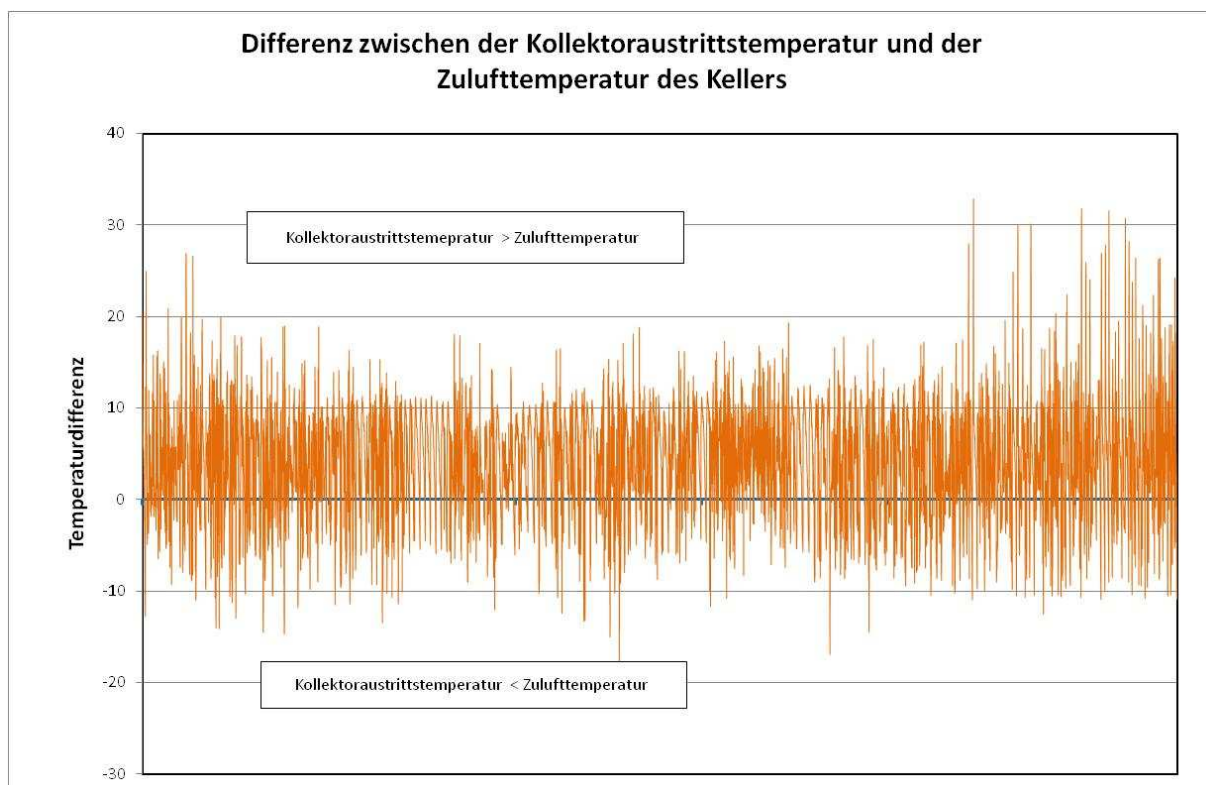


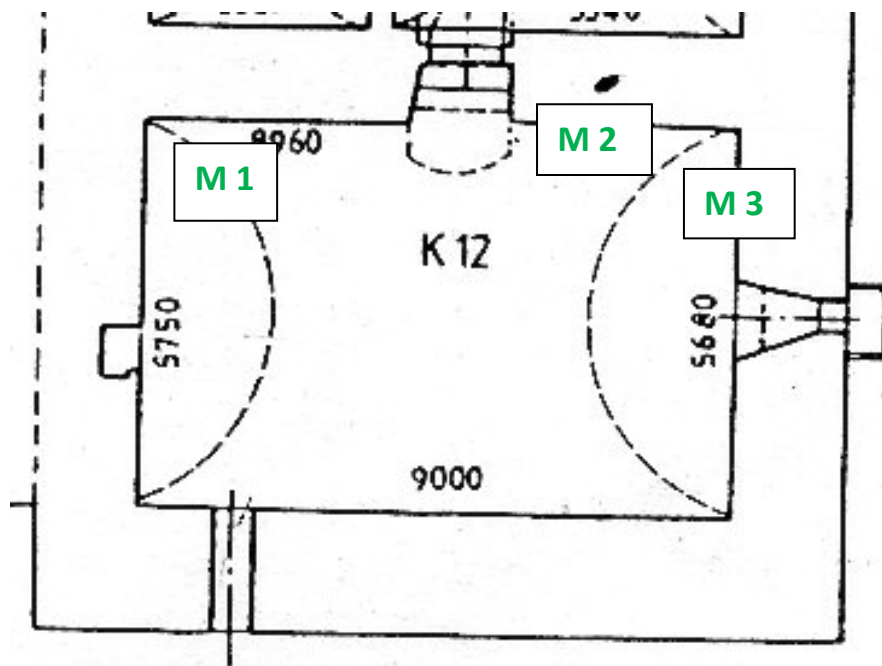
Bild 7.2.3-3: Differenz zwischen Kollektoraustrittstemperatur und der Zulufttemperatur des Kellers

7.3. Das thermische Verhalten der Baukonstruktion

7.3.1 Messtechnische Erfassung

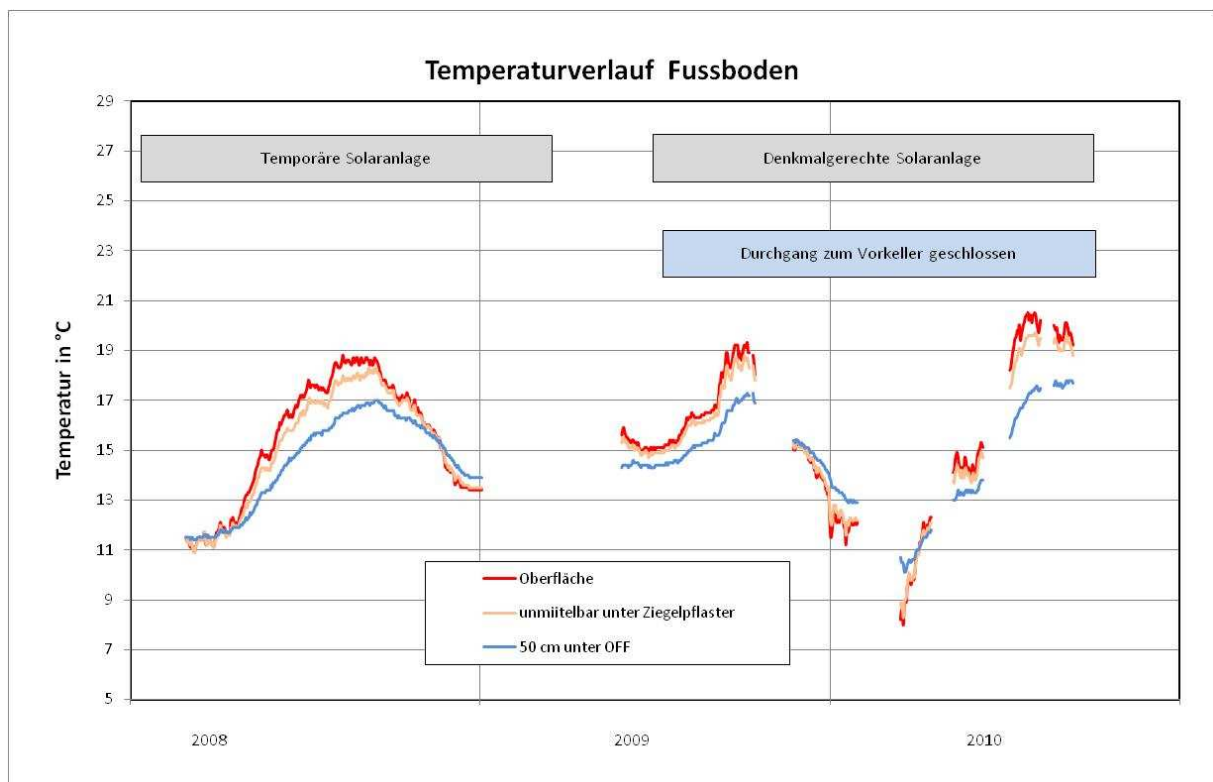
Die Lage der Messstellen zur Erfassung des thermischen Verhaltens der Baukonstruktion ist in [Bild 7.3.1-1](#) ersichtlich. Während des Einsatzes der temporären Anlage war der Durchgang zum Vorraum nicht verschlossen. Dies hatte in Verbindung mit der Zuluftzuführung in der oberen Raumhälfte ([Bild 4-4](#)) zur Folge, dass die Raumluft einen deutlichen vertikalen Temperaturgradienten aufwies. Dies hatte zur Folge, dass die Baukonstruktion im unteren Raumbereich (etwa bis 1,5 m über OFF) nur gering erwärmt wurde. Wie in den [Bildern 7.3.1-2 bis 7.3.1-4](#) ersichtlich ist, folgen nicht nur die raumseitigen Oberflächentemperaturen sondern auch die Temperaturen im Bauteil der Raumlufttemperatur. Auffallend ist, dass die Temperaturen im Bauteil sich nicht wesentlich von der raumseitigen Oberflächentemperatur unterscheiden.

Mit Inbetriebnahme der 2. Anlage wurde der Durchgang zum Vorraum soweit verschlossen, dass lediglich unmittelbar über dem Fussboden eine Abluftöffnung von 10 cm Höhe vorhanden war. Hierdurch konnte die Intensität des vertikalen Temperaturprofils lediglich gemindert werden ([Bild 7.3.1-5](#)). Dennoch war eine Steigerung der thermischen Aktivierung der Baukonstruktion zu verzeichnen: Das Temperaturniveau steigt insgesamt an und die raumseitigen Oberflächentemperaturen liegen deutlicher über den im Bauteil.



- M 1 Fussboden
- M 2 Innenwand, 80 cm über OFF
- M 3 Außenwand gegen Erdreich, 80 cm über OFF

Bild 7.3.1-1: Lage der Messstellen



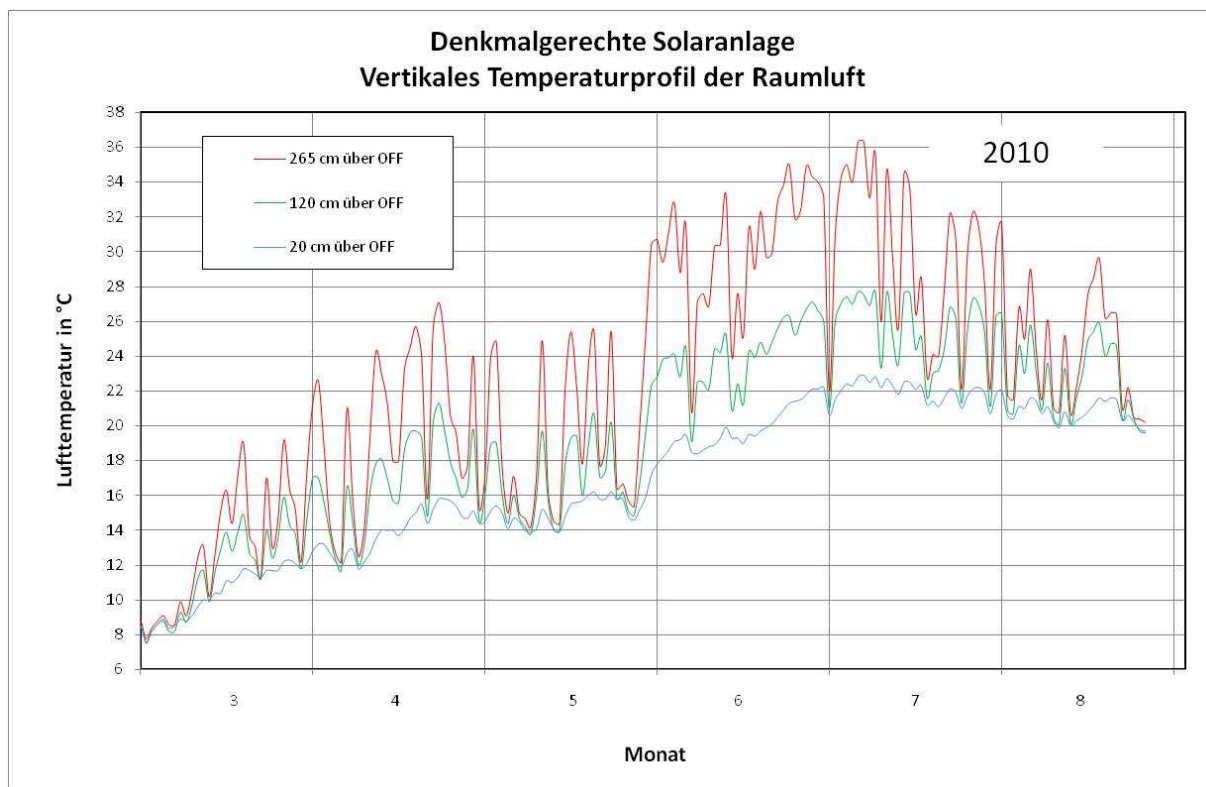


Bild 7.3.1-5: Vertikales Temperaturprofil der Raumluft (denkmalgerechte Solaranlage; Durchgang zum Vorraum verschlossen)

7.3.2 Simulationsrechnungen

Vorbemerkungen. Von zentraler Bedeutung für die Interpretation der messtechnisch gewonnenen Ergebnisse zur Wirksamkeit des Solar-Luft-Systems ist die Beantwortung der Frage, ob im dem Zeitrahmen der für die Messungen zur Verfügung stand, bereits der Aufheizvorgang von Baukonstruktion und angrenzendem Erdreich abgeschlossen werden konnte. Unter diesem eingeschwungener Zustand ist zu verstehen, dass die sich im sinusförmigen Jahresgang der jeweiligen Temperatur ergebenden Minimal- und Maximalwerte sich nicht mehr von den Vorjahreswerten unterscheiden, d. h. gegenüber zum Vergleichsmonat des Vorjahres keine zusätzlichen Speichermasse erwärmt werden. Für die Berechnungen wurde das Programm HEAT 2 (Version 5.02) eingesetzt. Diese Software erlaubt sehr gut die Berücksichtigung von Bauteilen mit extrem großer thermischer Speichermasse bis hin zur Visualisierung der Temperaturverteilung im angrenzenden Erdreich. Als Außenklima wurden die Werte für die TRY Region 4 angesetzt. Der über dem Keller befindliche Raum wurde konstant mit 20°C angesetzt.

Dauer der Einschwingphase. Bereits nach drei Jahren ist keine weitere Erhöhung der Raumlufttemperatur zu verzeichnen. [Tabelle 7.3.2-1](#) verdeutlicht am Beispiel des Fußbodens bzw. der darunter befindlichen Erdreichsschichten die Dauer bis zum Erreichen des eingeschwungenen Zustandes.

Tabelle 7.3.2-1: Dauer bis zum Erreichen des eingeschwungenen Zustandes; Beispiel Fußboden

Abstand zu Oberfläche Fußboden [m]	Bauer bis zum Erreichen des eingeschwungenen Zustandes [a]
0,1	3
1	4
4	6

Raumlufttemperatur im eingeschwungenen Zustand. Bild 7.3.2-1 verdeutlicht den Einfluss der Außenlufttemperatur auf die Raumlufttemperatur im Falle des Eigenklimas und nach Erreichen des eingeschwungenen Zustandes bei Betrieb des Solar-Luft-Systems. Aus Gründen einer verbesserten Übersichtlichkeit wurden in dieser Darstellung nur die Trendlinien für die jeweiligen Wertereihen wiedergegeben. Im Falle von vergleichenden Betrachtungen zu den in Abschnitt 7 wiedergegebenen Ergebnissen aus den messtechnischen Untersuchungen ist zu berücksichtigen, dass den Simulationsrechnungen ein Testreferenzjahr zu Grunde gelegt wurde.

Es lassen sich aus der Darstellung folgende Grundzusammenhänge ableiten.

Fall: Eigenklima

- Auch im Hochwinter fällt die Raumlufttemperatur im Keller nur auf etwa 10°C ab.
- Auch im Hochsommer sind im Keller keine behaglichen Raumlufttemperaturen gesichert.
- Die Phasenverschiebung der Raumlufttemperatur gegenüber der Außenlufttemperatur beträgt etwa 1,7 Monate

Fall: Solar-Luft-System

- Der Minimalwert der Raumlufttemperatur im Hochwinter wird nur marginal erhöht. Nach dem Erreichen des Minimalwertes ist jedoch ein deutlich schnellerer Wiederanstieg der Raumlufttemperatur zu verzeichnen. Im Herbst hingegen wird der Temperaturabfall deutlich verlangsamt.
- Im Hochsommer kann die Raumlufttemperatur zumindest zeitweise Werte oberhalb der Behaglichkeitsgrenze erreichen.
- Die winterliche Phasenverschiebung der Raumluft- gegenüber der Außenlufttemperatur wird nur geringfügig beeinflusst. Hingegen ist im Sommer nahezu keine Phasenverschiebung zu verzeichnen.

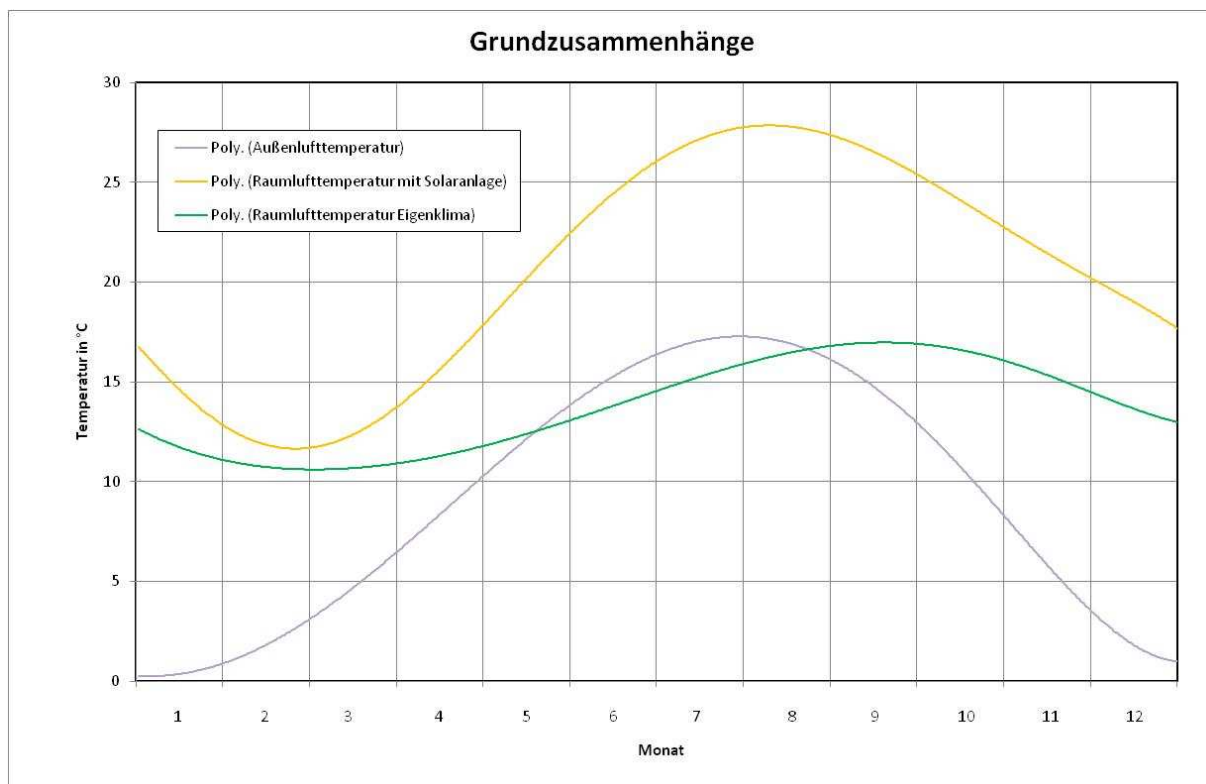


Bild 7.3.2-1: Grundzusammenhänge

Temperaturverteilung in der Baukonstruktion und im angrenzenden Erdreich. Die Darstellung in [Tabelle 7.3.2-2](#) umfasst drei thermische Zustände: Eigenklima, Keller in der Aufheizphase und eingeschwungener Zustand. Ein Vergleich der berechneten mit den gemessenen Werten ist nur bedingt möglich; in die Simulationsrechnungen konnte die thermische Schichtung der Raumlufttemperatur, wie sie beim Betrieb des Solar-Luft-Systems auftraten, nicht mit abgebildet werden. Hinsichtlich der thermischen Aktivierung der Baukonstruktion und des angrenzenden Erdreichs lassen sich aus [Tabelle 7.3.2-2](#) folgendes ableiten:

Eigenklima

- Auch ohne einer aktiven Energiezufuhr unterliegt die Baukonstruktion allein unter der Wirkung des Außenklimas im Jahresgang einer thermischen Aktivierung
- In den Wintermonaten existiert unter dem Keller eine „Wärmelinse“.

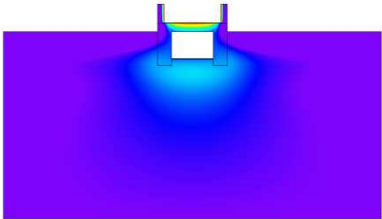
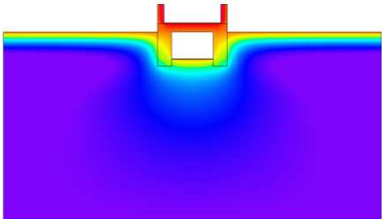
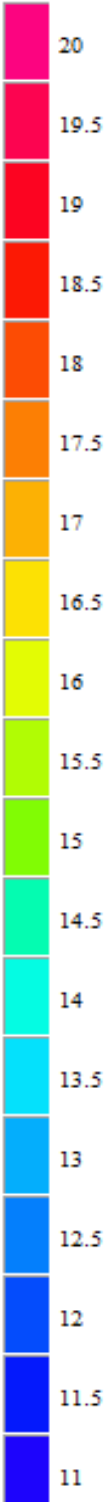
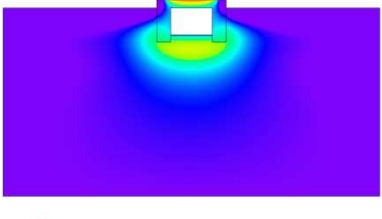
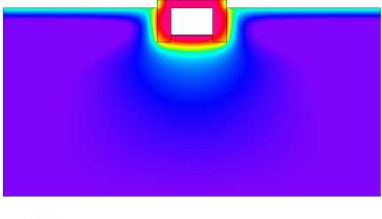
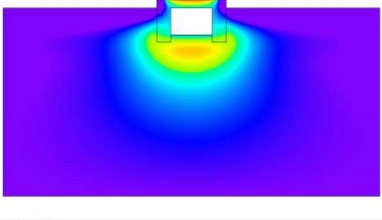
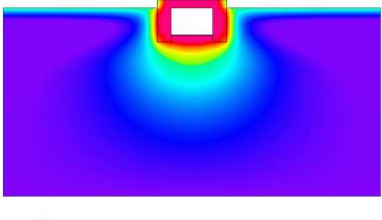
Aufheizphase

- Unter der Wirkung des Solar-Luft-Systems tritt bereits nach wenigen Monaten eine deutliche thermische Aktivierung der Baukonstruktion ein.
- Bereits im ersten Winter nach der Inbetriebnahme des Solar-Luft-Systems kommt es zu einer Verstärkung der „Wärmelinse“ unter dem Keller.

Eingeschwungener Zustand

- Sowohl im Sommer als auch im Winter ist eine deutliche thermische Aktivierung der Baukonstruktion und des angrenzenden Erdreichs zu verzeichnen.
- Im Winter ist die thermische Aktivierung der Baukonstruktion vorwiegend auf die tiefer im Erdreich liegenden Bereiche beschränkt. Die Bereiche, welche sich näher an der Geländeoberfläche befinden, unterliegen deutlich dem Einfluss des Außenklimas.

Tabelle 7.3.2-2: Temperaturverteilung in der Baukonstruktion und im angrenzenden Erdreich

Winter	Sommer	°C	
Eigenklima			
			
<p>Raumlufttemperatur: 10 °C Zustand Ende Februar</p>	<p>Raumlufttemperatur: 17 °C Zustand Ende September</p>		
Aufheizphase			
			
<p>Raumlufttemperatur: 11 °C Zustand Ende Februar nach 14 Monaten Betrieb des Solar-Luft-Systems</p>	<p>Raumlufttemperatur: 28 °C Zustand Ende Juli nach 6monatigem Betrieb des Solar-Luft-Systems</p>		
Nach Abschluss der Aufheizphase			
			
<p>Raumlufttemperatur: 12 °C Zustand Ende Februar</p>	<p>Raumlufttemperatur: 28 °C Zustand Ende Juli</p>		

7.3.3 Referenzkeller

Merkmale des Referenzkellers. Die Lage des Referenzkellers ist in Bild 7.3.3-1. ersichtlich. Der als Ausstellungskeller genutzte Raum wird ganzjährig auf 20 °C beheizt. Hierfür kommt eine Bauteiltemperierung nach GROSSESCHMIDT zur Einsatz (s. auch Abschnitt 4.1). Die Temperierleitung ist umlaufend entlang der Kellerwände in einem Sandbett verlegt (Bild 7.3.3-2). Geometrie und bauliche Ausbildung des Referenzkellers sind weitgehend identisch mit dem Keller, welcher mit dem des Solar-Luft-Systems ausgestattet wurde.

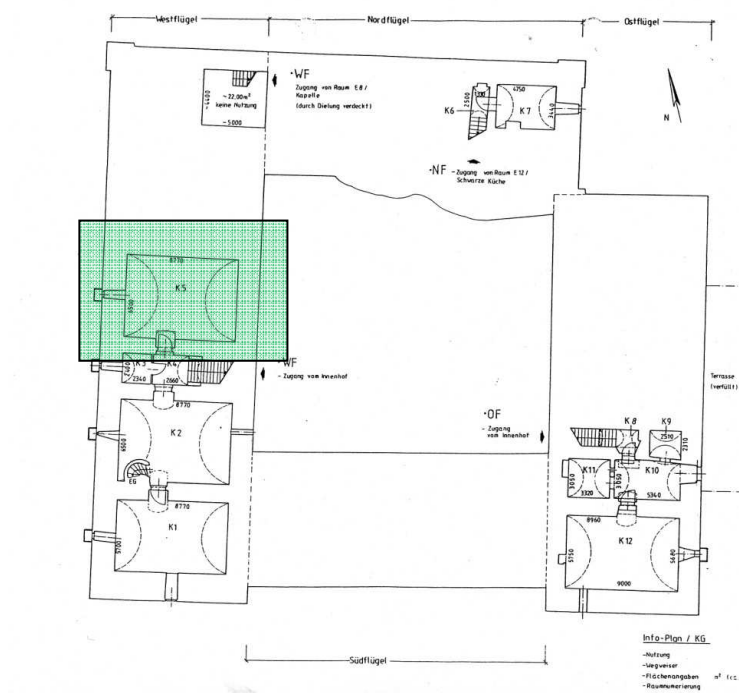


Bild 7.3.3-1: Lage des Referenzkellers (grün hervorgehoben)



Bild 7.3.3-2: Temperierleitung im Referenzkeller

Messtechnische Untersuchung des Auskühlverhaltens. Um Aussagen darüber zu gewinnen, wie sich eine über mehrere Jahre kontinuierlich beheizter Keller im Falle einer Heizungsunterbrechung verhält, wurde Ende Juni 2010 die Heizung außer Betrieb genommen. Bild 7.3.3-3 zeigt, dass bis Februar die Raumlufttemperatur lediglich um ca. 5 K abfällt. Sie beträgt zu diesem Zeitpunkt immer noch etwa 15 °C und liegt damit deutlich über der Raumlufttemperatur des solar erwärmten Kellers (s. Bild 7.1.1-4). Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass in den Referenzkeller auch bei abgeschalteter Temperierleitung noch Fremdwärmeeinträge erfolgen:

- Eine Überprüfung mittels Thermokamera hat ergeben, dass entgegen den Bauzeichnungen außer der Temperierleitung im Fußboden zusätzlich eine Verbindungsstrang von etwa 3m Länge verläuft welcher nicht außer betrieb genommen werden konnte.
- Über dem Referenzkeller befindet sich ein Raum mit Fußbodenheizung. Der Raum über dem solar temperierten Keller wird hingegen lediglich mittels Radiatoren beheizt.

Weiterhin ist zu beachten, dass zwischen beiden Kellerräumen auch Abweichungen bei der Größe des natürlichen Luftwechsels nicht ausgeschlossen werden können.

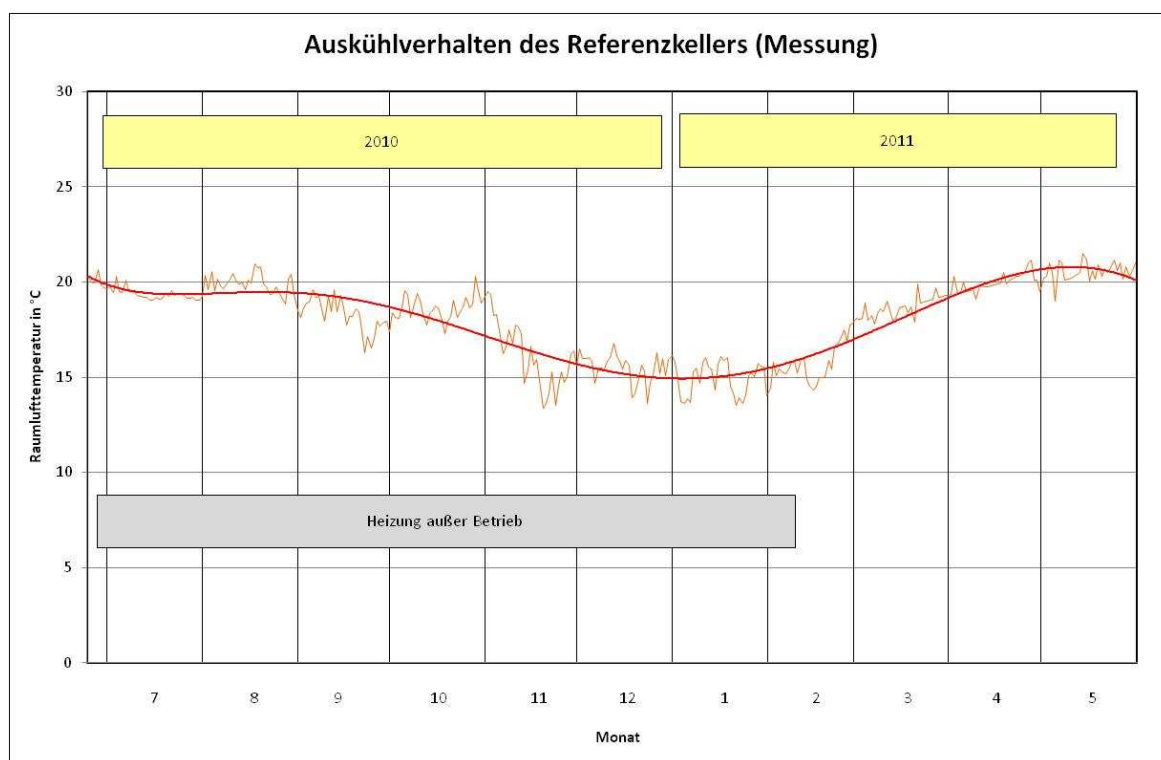


Bild 7.3.3.-3: Gemessenes Auskühlverhalten des Referenzkellers

Berechnung des Auskühlverhaltens. Während im Rahmen der messtechnischen Untersuchung nur eine 7monatige Auskühlphase erfasst werden konnte, zeigt Bild 7.3.3.-4 den Verlauf der Raumlufttemperatur während einer mehrjährigen Auskühlphase auf der Grundlage einer Simulationsrechnung. Randbedingungen für diese sind ein Luftwechsel von $0,1 \text{ h}^{-1}$ und das Testreferenzjahr für die TRY-Region 4. Bemerkenswert ist, dass, obwohl der Keller über mehrere Jahre hinweg kontinuierlich auf 20 °C beheizt wurde, bereits im ersten Winter die Raumlufttemperatur nahezu auf das Niveau des Eigenklimas (eingeschwungener Zustand) abfällt. Zu Beginn des Projektes wurde erwartet, dass sich in Folge der jahrelangen Aufheizung die Annäherung an das Eigenklima wesentlich langsamer vollzieht. Tabelle 7.3.3-1 verdeutlicht den Temperaturverlauf in der Baukonstruktion und im angrenzenden Erdreich an Hand zu drei ausgewählten Zeitpunkten der Abkühlphase.

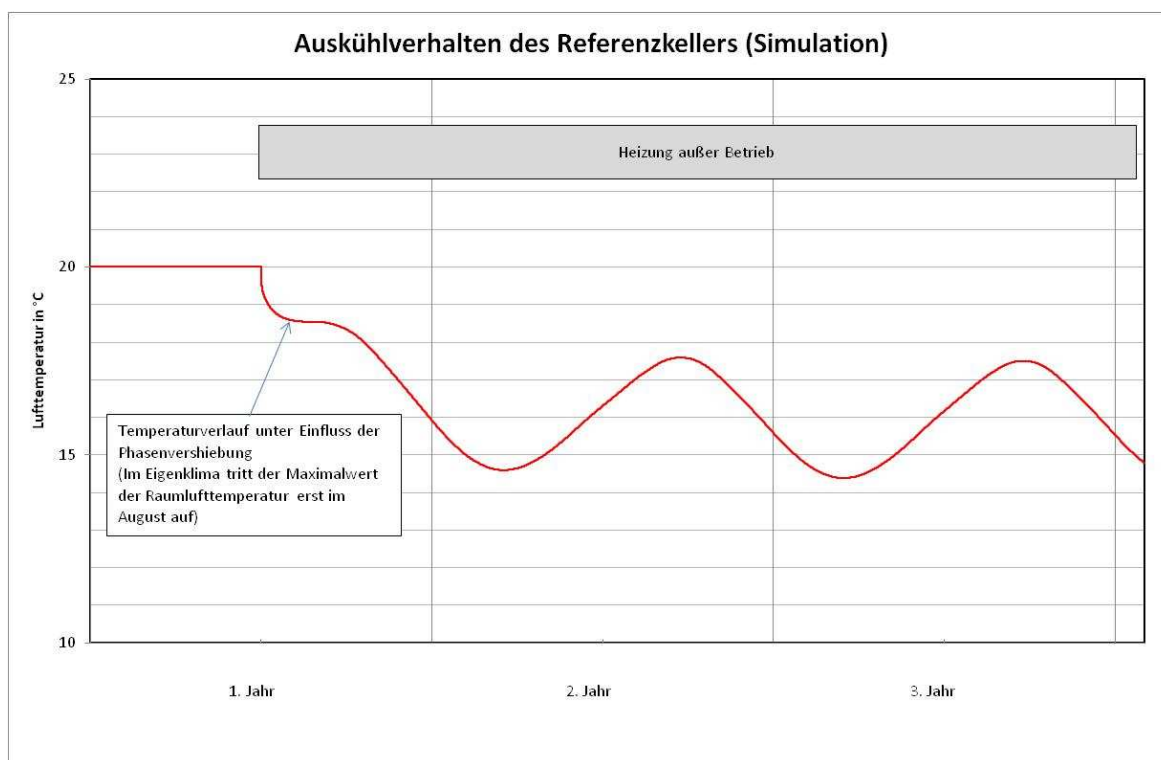
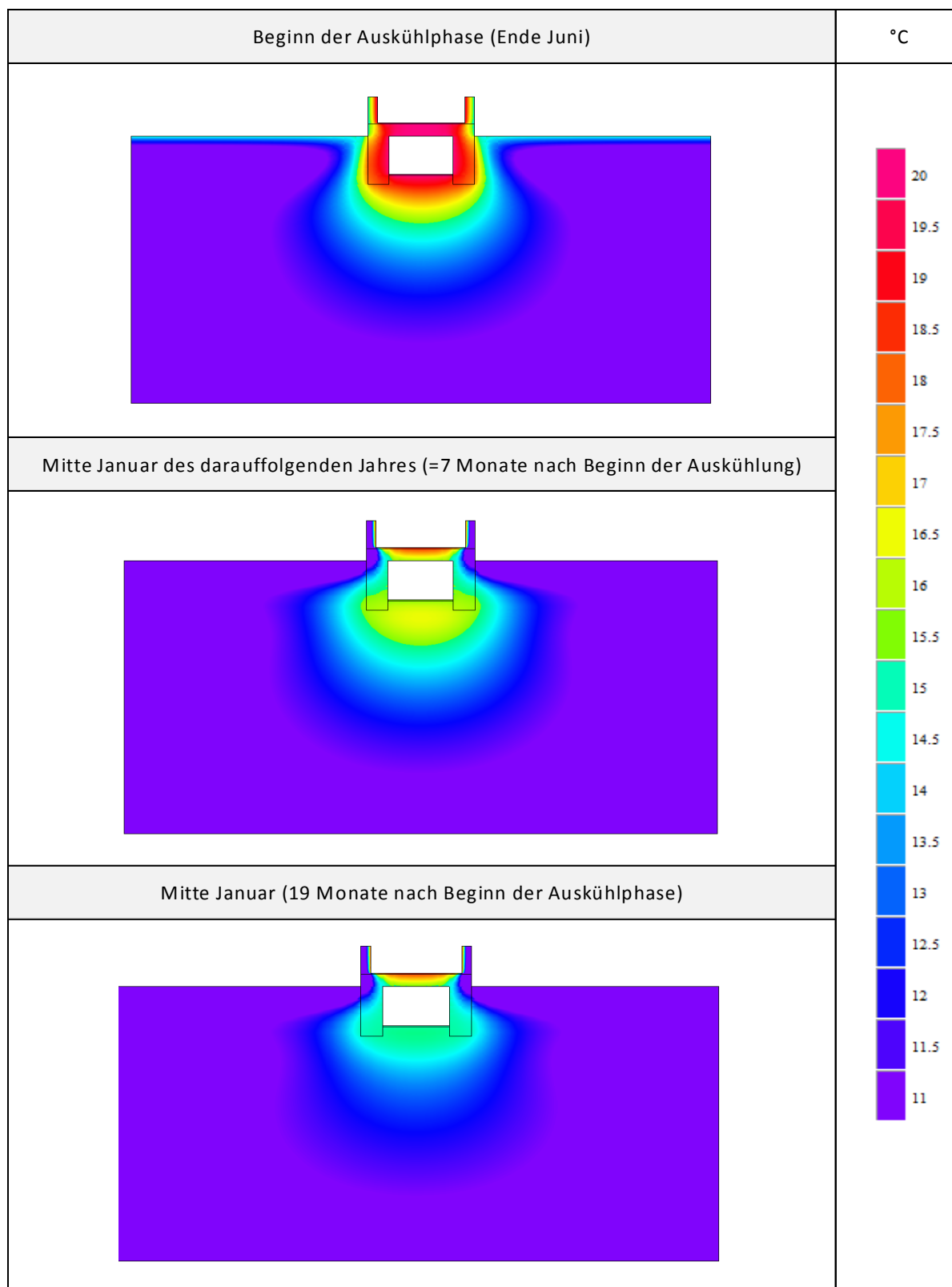


Bild 7.3.3-4: Berechnetes Auskühlverhalten des Referenzkellers

Tabelle 7.3.3-1: Referenzkeller; Temperaturverteilung in der Baukonstruktion und im angrenzenden Erdreich in der Auskühlphase



8. Ökonomische und ökologische Bewertung

Eine Zusammenstellung der einmaligen und laufenden sowie denkmalbedingten Mehraufwendungen ist in den Tabellen 8-1 und 8-2 zu finden. Die denkmalgerechte Gestaltung des Solar-Luft-Systems in Form eines Energiegartens führte zu einer Erhöhung der einmaligen Kosten um 117 %. Der sich hieraus ergebende Wärmepreis wird in Tabelle 8-3 mit Alternativvarianten verglichen. Es zeigt sich, dass der Wärmepreis der realisierten Lösung deutlich über dem anderer Beheizungsvarianten unter Nutzung regenerativer Energiequellen liegt.

Tabelle 8-1: Kostenübersicht Energiegarten ¹⁾

	Investitionskosten €	Laufende koste €/a
Solar-Luft-System	23.000	80
Zusatzkosten denkmalgerechte Gestaltung ²⁾	27.070	1.440
Summe	50.000	1.520
Wärmepreis ³⁾	0,31 €/kWh	

1) Material- und Lohnkosten, ohne MwSt. und Fördermittel
 2) detaillierte Aufstellung siehe Tabelle 8-2
 3) statische Wirtschaftlichkeitsberechnung, Betrachtungszeitraum 20 a, Bereitgestellte Wärmemenge gemäß Tab. 4.3-1

Tabelle 8-2: Zusatzkosten für die denkmalgerechte Gestaltung ¹⁾

Kostenart		€	
Investitionskosten	Kollektoren	Zusätzliche Blechverkleidung der Kollektoren	1.800
		Modifizierung der Aufständering	2.100
	Energiegarten	Tischlerarbeiten umlaufende Sitzbänke	10.740
		Geländeregulierung; Planung, Wegebau für Energiegarten	4.590
		Erdarbeiten Kanäle für Rohrverlegung einschl. Rohrinstallation Energiegarten-Keller ²⁾	6.100
		Pflanzarbeiten Energiegarten	1.300
		Elektroinstallation Anlagentechnik	440
	Summe		27.070
Laufende Kosten	Pflege Energiegarten (6 Monate/a)	1.440	

- 1) Material- und Lohnkosten, ohne MwSt.
 2) Diese Kosten müssen nicht zwingend den denkmalschutzzeitigen Mehraufwendungen zugerechnet werden, da sie bei jedem nicht unmittelbar am Gebäude installierten Solar-Luft-System entstehen.

Tabelle 8-3: Vergleich Wärmepreise

	Wärmepreis €/kWh
Pelletkessel (15 kW)	0,10
Luft-Wasser-Wärmepumpe (15 kW)	0,11
Erdreich-Wärmepumpe (15 kW)	0,10
typische Luftkollektoranlage (ca. 22 m ²)	0,07 bis 0,10

Im Rahmen der kritischen Auswertung des Themas wurden folgende Möglichkeiten einer Kostenreduzierung bei **Beibehaltung des Grundkonzeptes *Energiegarten*** ermittelt:

- Einsatz von für die Erdverlegung geeigneten Lüftungsrohren aus GFK mit PUR-Hartschaumdämmung an Stelle von Fernwärmerohren mit Stahl-Innenrohr,
- Verzicht auf den Einsatz kostenintensiver Recycling-Materialien für die Sitzbänke und das Plannum,
- Ersatz der in aufwendiger Einzelfertigung hergestellten seitlichen Blechverkleidung der Luftkollektoren durch einfacher zu bearbeitenden Plattenmaterialien,
- Senkung des Herstellungsaufwandes für die Sitzbänke durch Verzicht auf nur schwer zu realisierende Gestaltungsdetails
- Verzicht auf einen energieautarken Betrieb der Luftkollektoren (elektrische Hilfsenergie nicht über kollektoreigene Photovoltaikmodule)

Auf der Basis dieser Ansätze ist eine Senkung der Investitionskosten um 30 % möglich. Mit Ausnahme des Verzichtes auf die Recycling-Materialien beeinträchtigen die genannten Vorschläge nicht das architektonische Grundkonzept des Energiegartens.

Bei der Beurteilung der investiven Mehraufwendungen infolge der denkmalgerechten Gestaltung müssen zwei Aspekte mit beachtet werden:

1. Für den Eigentümer bzw. Betreiber des Baudenkmals stehen häufig die laufenden Kosten im Vordergrund. Im Unterschied zu den Investitionskosten muss er diese i. d. R alleine tragen. Die Finanzierung von Sanierungs- bzw. Energiesparmaßnahmen erfolgt in vielen Fällen durch Dritte (z. B. mittels Fördermittel).
2. Die Ausführung des Kollektorfeldes als eigenständige, gestalterisch unkonventionelle Lösung kann die Attraktivität des Schlosses für Besucher erhöhen.

Sofern auf die Anordnung des Kollektorfeldes als eigenständige architektonische Lösung verzichtet wird und stattdessen eine „**versteckte**“ **Aufstellung** gewählt wird, ist eine deutliche Kostenreduzierung möglich. Unter Beibehaltung einer Kollektorfläche von ca. 20 m² könnten die Investitionskosten auf etwa 13.500 € netto gesenkt werden.

Das ökologische Anliegen des vorliegenden Projektes sollte auch seinen Ausdruck im Energiegarten finden. Die Verwendung von Recyclingmaterial und Energiepflanzen sowie der Einsatz von Luftkolle-

toren, die ihre elektrische Hilfsenergie nicht aus dem öffentlichen Netz beziehen sondern über integrierte Photovoltaikmodule verfügen, werden diesem Anspruch formal gerecht. Zudem kann davon ausgegangen werden, dass die in den Luftkollektoren vergegenständlichte Primärenergie durch die Einsparung an fossilen Energieträgern bereits etwa nach einem Jahr kompensiert wird. Diesen positiven Effekten steht jedoch ein ungünstiges Aufwand-Nutzen-Verhältnis gegenüber. Der Wärmepreis liegt deutlich über dem anderer Varianten der Beheizung unter Nutzung regenerativer Energiequellen.

9. Ableitung von Grundsätzen für den Einsatz und die Bemessung von Solar-Luft-Systemen

9.1 Am Schloss Trebsen gewonnenen Erfahrungen

Die am Schloss Trebsen erreichten Ergebnisse lassen sich zu folgenden Kernaussagen verdichten:

Energieeffizienz

- (1) In den Sommermonaten kann die Baukonstruktion und das angrenzende Erdreich gegenüber dem *Eigenklima* deutlich erwärmt werden. Die eingespeicherte Wärme hat jedoch nur einen begrenzten Einfluss auf das winterliche Raumklima. Im Hochwinter liegt die mittlere Raumlufttemperatur nur geringfügig über dem Wert, der sich unter den Bedingungen des Eigenklimas einstellt. Eine *deutliche temporäre Anhebung* der Raumlufttemperatur kann jedoch während der Betriebszeit des Solar-Luft-Systems erreicht werden. Bereits im März können an sonnigen zeitweise Raumlufttemperaturen von 20°C erreicht werden.
- (2) Die Beurteilung der Wirksamkeit des Solar-Luft-Systems hinsichtlich einer möglichen positiven Wirkung auf die Raumlufttemperatur in der Heizperiode darf sich nicht auf den Hochwinter beschränken. Unter der Wirkung der zum Frühjahr hin ansteigenden Solargewinne steigt auch die mittlere Raumlufttemperatur im Vergleich zum Eigenklima deutlich schneller an. Im Herbst ist im Vergleich zum Eigenklima ein deutlich verlangsamter Abfall der mittleren Raumlufttemperatur zu verzeichnen. Mit Ausnahme des Hochwinters kann das Solar-Luft-System somit auch bei historischen Gebäuden mit einer extrem großen thermischen Speichermasse einen nennenswerten Beitrag zu Reduzierung der Energiekosten leisten.

Raumklima

- (3) Unter der Wirkung des Solar-Luft-Systems kommt es vielfach zu einer deutlichen Absenkung der relativen Raumluftfeuchte gegenüber dem Wert, der im Falle des *Eigenklimas* vorliegt. Gleiches gilt auch für den absoluten Feuchtegehalt der Raumluft, vor allem dann, wenn dieser auf Grund eines Feuchteeintrages über die Baukonstruktion im Fall *Eigenklima* über dem der Außenluft liegt. In Verbindung mit der Erwärmung der Baukonstruktion hat dies zur Folge, dass es trotz der Intensivierung des Luftwechsels durch das Solar-Luft-System nicht zu einer Erhöhung der Gefahr der Bildung von Sommerkondensat kommt.
- (4) Unter der Wirkung des Solar-Luft-Systems wird die Spannbreite der Schwankungen der relativen Raumluftfeuchte vergrößert. Dies ist bei mit Salzen belasteten Bauteilen sowie im Fall von Ausstattungsgegenständen, die hohe Anforderungen an die Stabilität des Raumklimas nachteilig.

- (5) Im Hochsommer können Raumlufttemperaturen deutlich oberhalb der Behaglichkeitsgrenze auftreten sofern die Regelung des Solar-Luft-Systems dieses nicht bei zu hohen Raumlufttemperaturen nicht außer Betrieb setzt.

Denkmalverträglichkeit

- (6) Im Unterschied zu wasserführenden Heizsystemen war es möglich das Solar-Luft-System nahezu ohne Eingriffe in die historische Bausubstanz zu installieren. Dies ist u. a. darauf zurückzuführen, dass die Fortluftführung über die Verbindungstreppe zum Schlosshof erfolgen konnte.
- (7) Der Einsatz der Luftkollektoren hingegen ist selbst dann, wenn diese im Rahmen einer eigenständigen architektonischen Lösung und ohne Beeinträchtigung des Erscheinungsbildes des Schlosses angeordnet werden, unter dem Aspekt der Denkmalverträglichkeit umstritten. Seitens der Denkmalpfleger werden unterschiedliche Auffassungen vertreten

Aufwand-Nutzens-Verhältnis

- (8) Angesichts dessen, dass die Betreiber bzw. Eigentümer von Baudenkmalen mit zunehmend steigenden Betriebskosten konfrontiert werden, sind Luftkollektoren aufgrund ihrer Wartungsarmut und der Möglichkeit eines Betriebes ohne elektrische Hilfsenergie eine interessante Alternative zu gängigen Varianten der Wärmebereitstellung.
- (9) Die Aufstellung der Luftkollektoren im Rahmen eines Energiegartens führte zu einer erheblichen Steigerung der Investitionskosten. Eine wirtschaftliche Darstellung dieser Variante ist damit fraglich. Durch eine Modifikation der konstruktiven Gestaltung des Energiegartens wäre jedoch eine Senkung der Investitionskosten um 30 % möglich.

9.2. Einsatzgrundsätze und mögliche Anwendungsfälle

Ausgehend von den Ergebnissen des vorliegenden Projektes lassen sich verallgemeinernd folgende bevorzugte Einsatzbereiche für Solar-Luft-System im Zusammenhang mit Baudenkmalen, die über eine extrem große thermische Speichermasse verfügen, ableiten:

Denkmalschutzseitige Voraussetzungen. Unabdingbare Voraussetzung ist, dass eine denkmalverträgliche Anordnung der Luftkollektoren möglich sein muss. Hierbei sind zwei grundsätzliche Varianten zu unterscheiden:

- eigenständige architektonische Lösung die als gestalterische Bereicherung des Baudenkmal wahrgenommen wird oder
- versteckte Aufstellung

Sofern die denkmalverträgliche Anordnung nur mit erheblichen investiven Mehraufwendungen möglich ist, ist es günstig, wenn gleichzeitig die Attraktivität des Denkmals erhöht wird. Im Bereich der Baudenkmal ist jedoch häufig zu verzeichnen, dass für den Eigentümer bzw. Betreiber des Baudenkmal die laufenden Kosten im Vordergrund stehen. Im Unterschied zu den Investitionskosten muss er diese i. d. R. alleine tragen. Die Finanzierung von Sanierungs- bzw. Energiesparmaßnahmen erfolgt in vielen Fällen unter Beteiligung von Dritten (z. B. mittels Fördermittel).

Raumgröße. Da mit steigender erforderlicher Kollektorfläche i. d. R. auch der Aufwand für eine denkmalverträgliche Ausführung ansteigt, ist eine Beschränkung des Einsatzes des Solar-Luft-Systems auf kleinere Räume bzw. Gebäudebereiche (max. 300 m²) sinnvoll.

Raumnutzung. Besonders effizient ist der Einsatz des Solar-Luft-Systems für Räume, die im Sommer oder in der Übergangsjahreszeit genutzt werden sollen und die im Zustand *Eigenklima* auf Grund ihrer großen thermischen Speichermasse eine zu geringe Raumlufttemperatur aufweisen. Dies kann zum Beispiel bei Tiefkellen und Kasematten der Fall sein. Für Räume die vorwiegend in der Heizperiode genutzt werden, kann das Solar-Luft-System zur Heizungsunterstützung genutzt werden. Ein Einsatz bei ungenutzten Räumen ist ebenfalls denkbar und zwar dann, wenn die Aufgabe steht, die Raumluftfeuchtigkeit in diesen zu senken. Bei diesem Anwendungsfall sollte jedoch geprüft werden, ob dieses Ziel nicht alternativ mit bauseitigen Maßnahmen erreicht werden kann (Reduzierung des Feuchteintrages über die Baukonstruktion)

Einsatzgrenzen. Der Einsatz des Solar-Luft-Systems unterliegt erheblichen Restriktionen, wenn Anforderungen an die Stabilität des Raumklimas bestehen. So besteht zum Beispiel bei salzbelastetem Mauerwerk die Gefahr, dass infolge der starken Schwankung der relativen Raumluftfeuchte die Salze einem ständigen Wechsel von Kristallisation und in Lösung gehen unterworfen sind in dessen Folge Mauerwerkschäden auftreten.

9.3 Hinweise für die Bemessung von Solar-Luft-Systemen

Gängiger Berechnungsprogramme, wie z. B. *T-SOL Pro*, erlauben nur begrenzt die Berücksichtigung der thermische Speichermasse des Gebäudes. Das thermische Verhalten von angrenzendem Erdreich wird gar nicht mit in die Berechnung einbezogen.

Für die Bemessung von Solar-Luft-Systemen in Gebäuden mit extrem großer thermischer Speichermasse sollte der Jahresgang des Heizwärmebedarfes auf der Grundlage einer dynamischen Simulationsrechnung bestimmt werden. Eine Berechnung auf der Grundlage der DIN 4108-6 [4] erscheint als nicht. Für die Außenlufttemperatur sind die Monatsmittelwerte des entsprechenden Testreferenzjahrs ausreichend. Sofern keine messtechnische Bestimmung, z. B. mittels Spurengas erfolgt, muss der natürliche Luftwechsel abgeschätzt werden. Anhaltswerte hierfür sind jedoch nicht verfügbar. Da der Einfluss auf die winterliche Raumlufttemperatur nur gering ist, muss eine Berücksichtigung des Einflusses einer möglichen sommerlichen Aufheizung von Baukonstruktion und angrenzendem Erdreich nicht erfolgen.

Die Kenntnis des Jahresganges des Heizwärmebedarfes ermöglicht es, das beabsichtigte Nutzungskonzept unter Beachtung des für die Realisierung erforderlichen Energiebedarfes zu beurteilen.

Durch Überlagerung der Ergebnisse aus der monatsweisen Berechnung des Heizwärmebedarfes mit denjenigen die gängige Software für die monatlichen solaren Wärmegewinne der Luftkollektoren liefert, kann die durch den Einsatz der Luftkollektoren zu erwartende Einsparung gängiger Endenergieträger relativ genau abgeschätzt werden. Diese Vorgehensweise ist daher der Anwendung anderer in Tabelle 4.2-2 ausgewiesener Empfehlungen vorzuziehen.

10. Zusammenfassung

Steigende Energiepreise erschweren zunehmend die Bewirtschaftung und damit auch den Erhalt von Baudenkmalen. Vor diesem Hintergrund gewinnt die Erarbeitung spezieller, denkmalgerechte Lösungen zur Reduzierung des Energieverbrauchs zunehmend an Bedeutung. Dies trifft besonders für denkmalgeschützte Nichtwohngebäude zu. Im Unterschied zu historisch wertvollen Wohngebäuden liegen für diese Gebäudeart bisher kaum Untersuchungen vor. Da umfangreiche nachträgliche Wärmedämm-Maßnahmen bei diesen Gebäuden meist nicht möglich sind, ist eine energetisch effiziente Wärmebereitstellung erforderlich.

Sowohl aus Gründen der Denkmalverträglichkeit als auch vor dem Hintergrund, dass Einsparungen im Bereich der Energiekosten nicht durch Betriebs- bzw. Wartungskosten wieder kompensiert werden, wurde daher im vorliegenden Projekt der Einsatz von Low-Tech favorisiert. Unter diesem Aspekt wurde eine Solaranlage konzipiert, die sich durch eine minimale Anzahl von Komponenten und nur geringe Eingriffe in die historische Bausubstanz auszeichnet. Das Solar-Luft-System verfügt über keinen kostenintensiven Speicher für die solar gewonnene Wärme. Es wurde untersucht inwieweit für die Wärmespeicherung die extrem große thermische Speichermasse monumentaler Baudenkmale nutzbar ist. Im Sommer sollte diese solar so erwärmt werden, dass im Winter ein deutlicher Anstieg der Raumlufttemperatur im Vergleich zum Eigenklima zu verzeichnen ist. Auf solare Luftkollektoren wurde zurück gegriffen weil die Erwärmung der speichernden Bausubstanz mittels Luft mit einer Reihe von Vorteilen verbunden: Reduzierung der Raumluftfeuchte, Beaufschlagung der gesamten raumseitigen Bauteiloberflächen mit Wärme sowie keine Eingriffe die die historische Bausubstanz im Zusammenhang mit der Installation von Einrichtungen zur Wärmeabgabe wie sie bei Warmwasserheizungen erforderlich sind.

Im Rahmen des vorliegenden Themas wurde am Beispiel eines Tiefkellers des Schlosses Trebsen untersucht inwieweit mittels eines Solar-Luft-Systems im Sommer eine thermische Aktivierung der Baukonstruktion erreicht werden kann, die in den Wintermonaten zu einer Anhebung der Raumlufttemperatur führt und gleichzeitig den für diese Raumart typischen Feuchteprobleme, wie zu hohe relative Luftfeuchte und Bildung von Sommerkondensat, begegnet werden kann. Darüber hinaus wurde der Frage der denkmalgerechten Integration eines Solarsystems in eine historische Schlossanlage besonderes Augenmerk geschenkt.

Im Ergebnis messtechnischen Untersuchungen zum Raumklima und zur thermischen Aktivierung der Bausubstanz sowie aufbauend auf ergänzenden Computersimulationen wurden die Grenzen der einer sommerlichen Aufheizung der Bausubstanz und des angrenzenden Erdreichs aufgezeigt. Einsatzempfehlungen für den Einsatz von Solar-Luft-Systemen in monumentalen Baudenkmalen werden unter den Kriterien Denkmalverträglichkeit, Energieeffizienz und Raumklima gegeben.

Literatur

- [1] DIN EN 12831 Heizungsanlagen in Gebäuden; Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast, Ausgabe August 2003
- [2] Usemann, K.:
Mindestwärmeschutz und Jahresheizwärmebedarf; Praktische Beispiele für DIN 4108-8
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 2004
- [3] Großschmidt, H.:
Die Temperierung ;Verfahren zur thermischen Bausanierung, Raumtemperierung und Klimastabilisierung in Museen und anderen Gebäuden
Fallbeispiele; Minimal-Lösungen, Stand März 1994
Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen
- [4] DIN V 4108-6, Juni 2003
Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden; Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und Jahresheizenergiebedarfes
- [5] Planungsgrundlagen der Fa. Grammer Solar GmbH
- [6] Petzold, K.:
Zu den Grundaufgaben der Bauklimatik
Vortrag auf dem 7. Bauklimatischen Symposium der Sektion Architektur
TU Dresden, 23. bis 25. Februar 1988
AID Schriftenreihe der Sektion Architektur, Heft 28 (1988), S. 113-126
- [7] Vereinigung der Landesdenkmalpfleger in der Bundesrepublik Deutschland;
Arbeitsblatt 37; Solaranlage und Denkmalschutz
- [8] Graupner, K.:
Wundersames Verfahren; Kritische Betrachtung der Temperierung für historische Gebäude
bausubstanz (1999), S. 36-39
- [9] Trogisch, A.:
Museen als Opfer; Kaum Argumente für die „Temperierung“ als Heizungslösung
Sanitär+Heizungstechnik (2002) 2, S. 44-47