

# Luft-/Erdwärmetauscher EWT: Modellierung, Auslegung und Betriebserfahrungen

Andreas Gerber,  
Jens Pfafferott und  
Gerd Dibowski

Dipl.-Phys. Andreas Gerber ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Fraunhofer-Institutes für Solare Energiesysteme (Fraunhofer ISE), in Freiburg.

Dipl.-Ing. Jens Pfafferott ist Mitarbeiter der Energieversorgung Spree-Schwarze Elster AG(ESSAG), Cottbus.

Dipl.-Ing. Gerd Dibowski ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Sonnenofen im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Köln.

## Überblick

Luft-/Erdwärmetauscher EWT nutzen das Erdreich als saisonalen Energiespeicher, sie werden beispielsweise zur Zuluft-Vorwärmung oder -kühlung eingesetzt. Die Planung und Auslegung von Luft-/Erdwärmetauscher erfordert geeignete Hilfsmittel, um das komplizierte Temperaturfeld im Erdreich mit ausreichender Genauigkeit abbilden zu können. Da die Wärmestromdichten im Erdreich und der Wärmeübergang zwischen der Luft im Luft-/Erdwärmetauscher und dem umgebenden Erdreich gering sind, ist sowohl eine detaillierte Abbildung des Erdreichs als auch die Modellierung des Wärmeübergangs im Luft-/Erdwärmetauscher erforderlich. Verfahren zur Auslegung und Ertragsvorhersage von Luft-/Erdwärmetauschern werden vorgestellt und deren Anwendung demonstriert. Die Ergebnisse werden mit Betriebserfahrungen von realisierten Luft-/Erdwärmetauschern verglichen. Möglichkeiten und Grenzen von Luft-/Erdwärmetauschern werden anhand von Praxis und Simulationsrechnungen diskutiert.

Air/Ground Heat Exchanger (GHE) utilize soil for seasonal heat storage and are used for air preheating or -cooling. Design an layout require suitable tools which adequately describe the complex heat temperature mechanisms in soils. Since heat densities in soil and heat exchange coefficients between air and GHE are both low, a detailed characterization of the soil and a precise modeling of the heat exchange processes within the GHE are needed. Tools for the design and yield prediction of GHE are presented by way of examples. Results are compared with measured data and both opportunities and limitations of GHEs are discussed using calculated and actual data.

## 1. Einleitung

In Büro- und Verwaltungsgebäuden, Werkhallen, Einkaufszentren oder ähnlich zu definierenden Gebäuden gelten maschinell betriebene Lüftungsanlagen als reguläre raumlufttechnische Einrichtung. Bei Wohngebäuden ist für die nahe Zukunft mit einer Zunahme solcher Systeme zu rechnen. Die bei der maschinellen Raumlüftungsanlage durch Zwangskonvektion umgesetzten Energiemengen können durch den zusätzlichen Einsatz von Luft-/Erdwärmetauschern

EWT deutlich reduziert werden. Insbesondere nehmen die sommerlichen Überhitzungen der Räume bei steigender thermischer Wirksamkeit von inneren Wärmequellen in Form von Personen, Computern, technischen Geräten und thermischen Fertigungsprozessen verstärkt zu. Die notwendige Energie- und kostenintensive Abfuhr von Kühllasten gewinnt dabei zunehmend an Bedeutung.

Obwohl mittlerweile Luft-/Erdwärmetauscher immer häufiger zum Einsatz kommen und das Energieeinsparpotential von Fachleuten als unbestritten hoch eingeschätzt wird, fehlt es nach wie vor an präzisen und alltagstauglichen Planungswerkzeugen sowie Vorhersagen zum Leistungsprofil.

Die offenbar besonders guten Eigenschaften von EWT zur Verhinderung von sommerlichen Kühllasten, vor allem bei gewerblich-technisch genutzten Gebäuden, müssen im Rahmen der bestehenden Normen allein deswegen einer kritischen Prüfung standhalten, weil der Planer für diesen Konditionierungsfall eine Gewährleistung für seine Auslegungsplanung abgeben muß (Einhaltung der oberen Raumlüfttemperaturgrenze ( $\vartheta \leq 26^\circ\text{C}$  gemäß der Arbeitsstättenverordnung). Um diesem Ziel näher zu kommen, wird in mehreren Einrichtungen – wie am Fraunhofer-ISE in Freiburg in Zusammenarbeit mit der TU Berlin – an Simulationsmodellen gearbeitet, die die geforderte Genauigkeit gewährleisten sollen. Zum anderen ist die meßtechnische Langzeitbeobachtung von Luft-/Erdwärmetauschern unter realistischen Nutzerbedingungen – wie bei der DLR in Köln in Zusammenarbeit mit der GhK Kassel – von besonderer Bedeutung, da umfangreiche und aussagefähige Meßdaten bisher nur unzureichend vorliegen. Anhand der Meßdaten lassen sich die Simulationsprogramme validieren.

## 2. Modellbildung und Entwicklung eines Planungshilfsmittels

Das Grundprinzip der Funktionsweise eines EWT wird in [Abbildung 1](#) verdeutlicht.

Bei der thermischen Modellierung von Luft-/Erdwärmetauschern müssen komplexe Zusammenhänge berücksich-

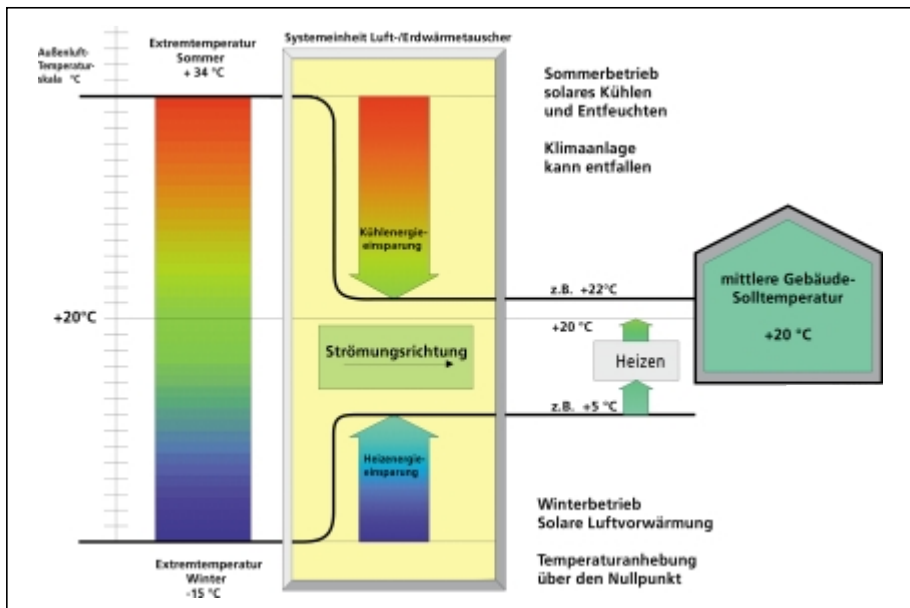
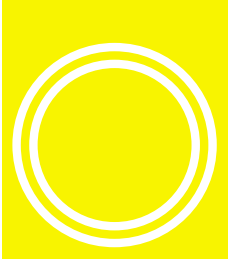


Abbildung 1: Prinzipielle Funktionsweise eines Luft-/Erdwärmetauschers (EWT)

sichtigt werden: Aufbau und Struktur des Erdreichs, Feuchtigkeitstransport im Erdreich, thermo-hydraulische Eigenschaften des Grundwassers, der thermische Austausch an der Erdoberfläche, das Klima (Solarstrahlung, (Luft-)Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Niederschlag, Wind), der Einfluß eines Gebäudes auf das Erdtemperaturfeld sowie Luft-/Erdwärmetauscher in unterschiedlichen Größen, Geometrien, Anordnungen und Verlegetiefen.

Das Erdtemperaturfeld stellt sich in Abhängigkeit der Stoffwerte des Erdreichs sowie den Randbedingungen an der Erdoberfläche und am Grundwasser ein. Die Lufttemperatur im Luft-/Erdwärmetauscher ist von der Wärmeübertragung im und vom treibenden Temperaturgradienten am Erdrohr abhängig. Erd- und Lufttemperatur sind über den Wärmestrom gekoppelt. Mit der Fourier'schen Differentialgleichung der Wärmeleitung wird das instationäre Erdtemperaturfeld beschrieben. Mit den Energiebilanzen an der Erdoberfläche und am Grundwasser sowie der Annahme adiabater (horizontaler) Ränder kann die Differentialgleichung gelöst werden:

Eine analytische Lösung der Wärmeleitungsgleichung ist für den eingeschwungenen Zustand nur für zweidimensionale Geometrien mit konstanten Stoffwerten und -konstanten inneren Wärmequellen bekannt, [1]. Diese

Lösung ist die Basis für das analytische Formfaktorenmodell, das saisonale Lastgänge in guter Näherung abbilden kann.

Das dreidimensionale Erdtemperaturfeld kann mit dem Differenzenverfahren numerisch berechnet werden [2]. Dieses numerische Differenzenmodell ist flexibler und kann das reale Erdreich (Erdschichtung, Feuchtigkeit, Vereisung, etc.) und das reale Betriebsverhalten (Betriebszeiten, Entfeuchtung durch Kondensation, Wärmeentwicklung durch Strömungsverluste, etc.) abbilden. Der hohe Detaillierungsgrad der Simulation bedarf allerdings eines wesentlich höheren Rechenaufwands.

Das entwickelte Planungshilfsmittel kombiniert unterschiedliche Detaillierungstiefen der thermischen Simulationsmodelle, die vom Anwender je nach Kenntnis über das konkrete Projekt gewählt werden; eine energetische (monatliche Energiesummen, Leistungszahl etc.), ökologische (Ökobilanz auf der Basis von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten) und eine wirtschaftliche Bewertung (gemäß VDI-Richtlinie 2067) sind integriert.

### 3. Validation

Zur Validation des Planungshilfsmittels werden die Meßdaten des EWT am Energieautarken Solarhaus in Freiburg [3] benutzt. Dieser ist einer Tiefe von

2,5 m verlegt und besteht aus drei je 18 m langen Rohren der Nennweite 300 mm.

Im folgenden werden ausgewählte Aspekte der Modellvalidation präsentiert. Während die Erdtemperaturen im freien Gelände in guter Näherung durch das analytische Formfaktorenmodell abgebildet werden, treten unter dem Gebäude große Differenzen auf, da die Randeinflüsse an der Bodenplatte des Gebäudes nicht abgebildet werden (Abbildung 2). Die simulierte Austrittstemperatur für das Einzelrohr ist tendenziell etwas höher als für das Rohrregister, da dem Erdreich durch die Konkurrenzrohre zusätzlich Wärme entzogen wird. Die tatsächlich gemessene (Luft-)Austrittstemperatur liegt zwischen den beiden simulierten Grenzfällen.

Abbildung 3 zeigt den Vergleich der gemessenen und mit dem numerischen Differenzenmodell simulierten Erdtemperaturen im freien Gelände und unter der Bodenplatte des Gebäudes. Da in dieser Simulation der latente Wärmegewinn durch Vereisung des Erdreichs nicht berücksichtigt wird, fallen die simulierten Erdtemperaturen an der Erdoberfläche im Winter deutlich unter die gemessenen, so daß die simulierten Erdtemperaturen in 3,4 m Tiefe im Frühjahr wegen der entsprechenden Verzögerung ebenso unter den gemessenen liegen. Die Temperaturen unter der Bodenplatte werden durch die Simulation mit dem numerischen Differenzenmodell sehr gut abgebildet.

Die Temperatur an der Erdoberfläche wird im numerischen Differenzenmodell in Abhängigkeit vom Klima und von der Beschaffenheit des Erdreichs berechnet. Dabei werden die absorbierte Globalstrahlung, die langwellige Abstrahlung, der latente Wärmestrom infolge von Verdunstung und Tauwasserbildung sowie der konvektive Wärmetransport zwischen Erdreich und Umgebung und der Wärmeleitung zwischen Erdreich und Erdoberfläche bei der Simulation berücksichtigt.

Für einfache Geometrien liefert das Formfaktorenmodell also ausreichend genaue Ergebnisse. Zur Simulation von EWT in der Nähe von Gebäuden

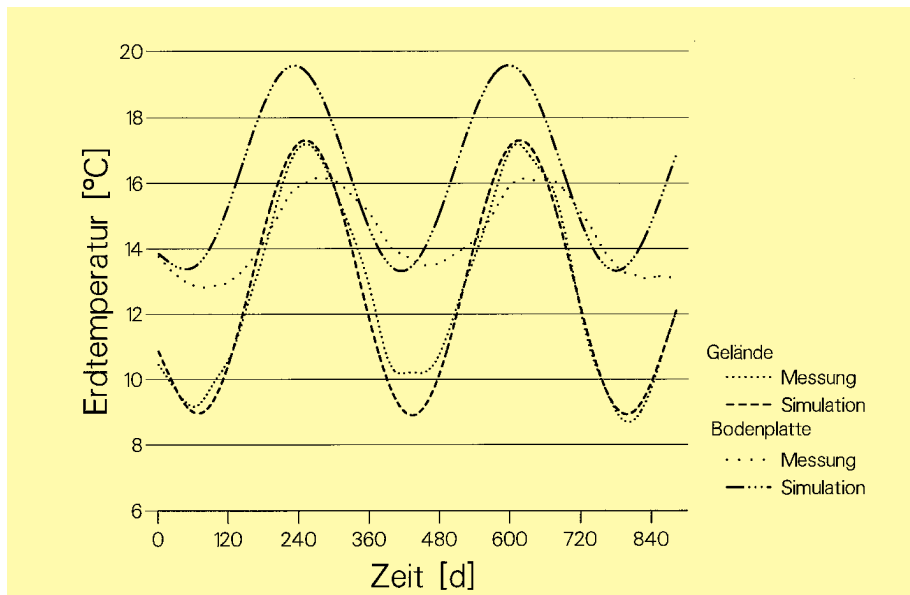
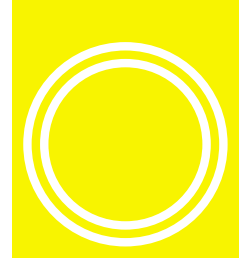
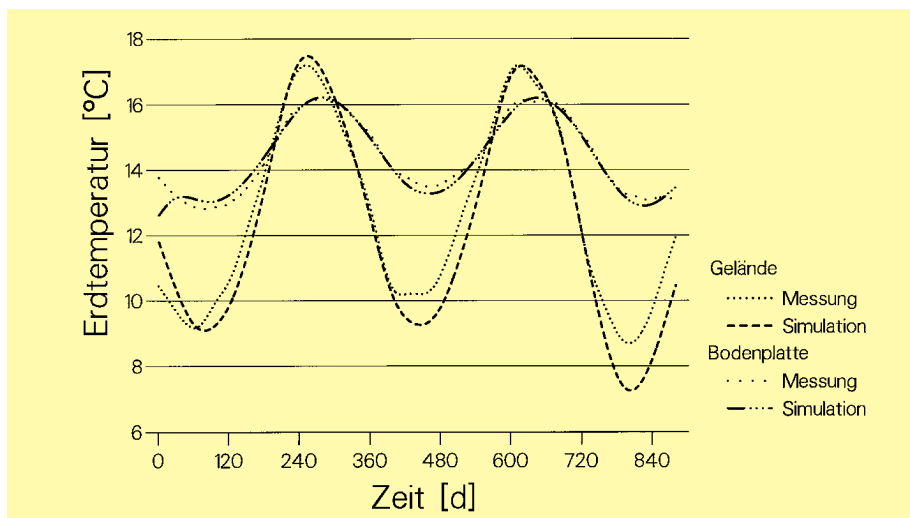


Abb. 2: Gemessene und simulierte Erdtemperaturen in 3,4m Tiefe im offenen Gelände und unter der Bodenplatte des Energieautarken Solarhauses. Analytisches Formfaktorenmodell.

Abb. 3: Gemessene und simulierte Erdtemperaturen in 3,4m Tiefe im offenen Gelände und unter der Bodenplatte des Energieautarken Solarhauses. Numerisches Differenzenmodell.



oder auch zur Berücksichtigung von variablen Luftvolumenströmen sind geeignete numerische Modelle erforderlich.

#### 4. Der Luft-/Erdwärmetauscher des DLR Köln

Im Rahmen des von der Arbeitsgemeinschaft Solar NRW (AG Solar NRW) geförderten Projektes Hochflußdichte-Sonnenofen auf dem Gelände des DLR in Köln, wird seit Oktober 1995 für das zugehörige Büro- und Laborgebäude (Abbildung 4) ein Luft-/

Erdwärmetauscher EWT betrieben und umfangreich meßtechnisch untersucht [4].

Wichtigste Aspekte dieses Projektes sind die sehr aufwendige Vermessung von (real genutztem) Gebäude und des Luft-/Erdwärmetauschers (EWT), mit der Möglichkeit, eindeutige Ursachen-Wirkungsbeziehungen – auch für kleine instationäre Zeiträume – darzustellen, um Verbesserungen hinsichtlich der Anwendung solarer Systemtechnik bei Gebäuden mit hohen inneren Lasten zu erarbeiten. Sommerliche Küh-

lung von Räumen ist mit Hilfe der Sonnenenergie über Luft-/Erdwärmetauscher bei richtiger Auslegung, wie in diesem Fall, **vollständig** erreichbar. Bereits erste Datenauswertungen am EWT haben Leistungszahlen von  $\zeta = 15$  ergeben. Die Leistungszahl ist die wichtigste Kenngröße zur Beurteilung von EWT-Anlagen. Diese Zahl ergibt sich aus dem Verhältnis von Kühl- bzw. Vorwärmleistung zur elektrischen Antriebsleistung für die maschinelle Gebäudelüftung. Mögliche Maximalwerte werden z. Z. auf bis zu 20 geschätzt. Vergleicht man bekannte Leistungszahlen von z. B. Wärmepumpensystemen mit ihrer typischen Leistungsziffer 3, wird die Effizienz des EWT-Konzeptes, allein schon für den Winterbetrieb, besonders deutlich.

Um der Klärung einiger der wesentlichen Fragen zur Auslegung und zum Betrieb von EWT näher zu kommen, wurde der EWT für das Büro- und Laborgebäude so konzipiert, daß er aufgrund seiner Konfiguration besonders gut für eine (Langzeit-) Untersuchung geeignet ist.

Das Konzept zur Rohrverlegung (Abbildung 5) wurde u. a. von der Beantwortung folgender Fragestellungen geleitet: welche Leistungserträge ergeben sich, wie verändern sich die Leistungserträge in Abhängigkeit von der Verlegetiefe und der Zeit, wie verhalten sich diese Erträge in der „Konkurrenzsituation“ innerhalb einer Registeranordnung im Vergleich zu einem freiverlegten Idealrohr, wie wirken sich die objektiven Leistungsdaten auf die Raumkonditionierung eines real genutzten Gebäudes mit hohen inneren Lasten und Niedrigenergiestandard aus und welche lufthygienischen Zustände stellen sich nach längerer Betriebszeit und zu unterschiedlichen Jahreszeiten ein.

Für den Vergleich der Wärmeerträge bei unterschiedlichen Verlegetiefen müssen Teilstränge ungestört voneinander und von anderen Einflußfaktoren, wie in Abbildung 5 zu erkennen, verlegt sein. Weitere Rohre dienen zur Prüfung des gegenseitigen Einflusses eng zueinander verlegter Rohre. Zudem kann das energetische Verhalten der engverlegten Rohre mit den „ungestörten“, aber baugleichen Einzelsträngen verglichen werden. Die

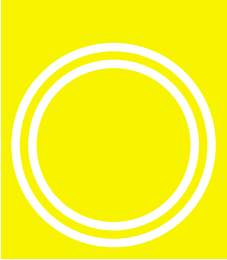


Abbildung 4: Im Vordergrund ist ein Teil des EWT während der Bauphase zu sehen; im Hintergrund das Sonnenofen-Laborgebäude.

unterschiedlichen Abstände zwischen den Rohren ermöglichen die Aufnahme des Temperaturprofils im Erdreich zur Bestimmung des Regenerationsverhaltens und dem Temperatur-Folgeverhalten. Die beschriebene Konfiguration erlaubt die Anwärmung und Abkühlung der gesamten Gebäudezuluft (max. ca. 4000 m<sup>3</sup>/h) auf der zur Verfügung stehenden Grundstücksfläche von etwa 900 m<sup>2</sup>.

Der Rohrdurchmesser der Einzelstränge liegt nach vorgenommenen Optimierungsrechnungen bei DN 300, Sammelleitungen bei DN 500. Die Einzelrohre haben eine mittlere Länge von 30 m. Der Verlegeabstand im Registerbereich beträgt lediglich 70 cm. Eine Meßgruppe liegt bei 1,5 m, die zweite bei 3 m Tiefe. Die Lage des EWT ist besonders günstig, da durch die natürliche Neigung des Geländes ein konstanter Abstand zwischen Rohr und Erdoberfläche trotz Neigung der Leitungen gewährleistet ist. Die Neigung ermöglicht das Ausleiten von

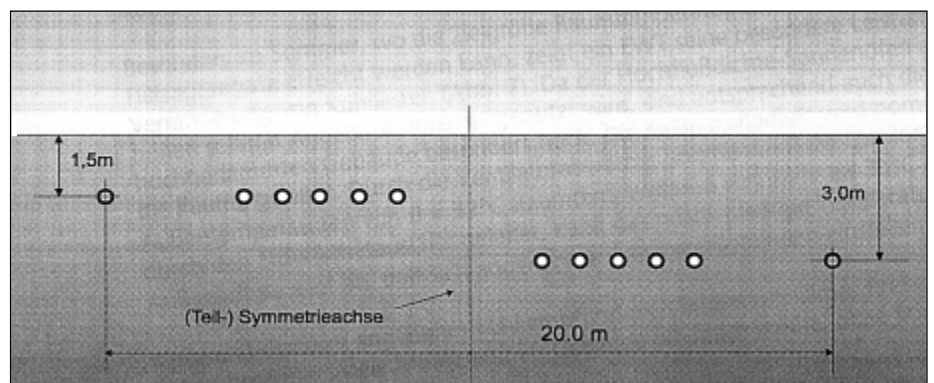
unter Umständen gebildetem Tauwasser.

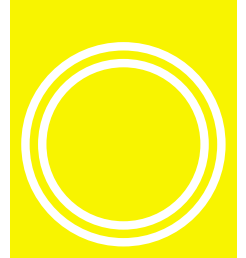
Als Beispiel für die Wirksamkeit im Winterbetrieb (Anwärmung der Außenluft) zeigt [Abbildung 6](#) die besondere Effizienz bei sehr tiefen Temperaturen.

Besonders im Sommer, wo die Ziel-

größe Raumtemperatur allein durch einen EWT, ohne weitere Hilfsaggregate erreicht werden kann, zeigt ein EWT seine besondere Leistungsfähigkeit zur Verhinderung von Kühllasten ([Abbildung 7](#)). Da der Hochflußdichte-Sonnenofen gerade in Zeiten eines hohen solaren Angebotes intensiv genutzt wird, sind entsprechend auch die thermischen Lasten im hochge-

Abbildung 5: Verlegeschema des EWT zur Bestimmung der wesentlichen Leistungsrelationen





dämmten Gebäude besonders hoch. Die heiße Außenluft wird normalerweise unabgekühlt in die Räume geleitet. Durch die Ventilatorabwärme und den inneren Quellen können sich bei mittleren Außentemperaturen von  $\vartheta = 32^\circ\text{C}$  Raumtemperaturen von mehr als  $36^\circ\text{C}$  einstellen. Wird die Zuluft durch den Erdwärmetauscher geleitet, kühlt das relativ niedrige Temperaturniveau im Erdreich die Außenluft so weit ab, daß sich angenehme Arbeitsbedingungen einstellen ( $\vartheta < 25^\circ\text{C}$ ).

Aufgrund des sehr angenehm kühl empfundenen Innenraumklimas finden sich an schwül-heißen Tagen besonders viele Mitarbeiter im Gebäude ein, auch solche, ohne konkrete Sonnenofen-Betriebsaufgaben.

Dieser Zustand könnte alternativ auch durch eine konventionelle und fossil-elektrisch betriebene Klimaanlage erreicht werden. Die Kostenrecherche für eine solche Anlage ergab einen Investitionsbedarf von ca. DM 100.000,. Der EWT wurde etwas kostengünstiger erstellt, wobei allerdings erst die Einbeziehung der allgemeinen Betriebskosten (nach VDI 2067) die eindeutigen Vorteile zugunsten eines EWT erkennen lassen; ohne die Energieeinsparungen im Winterbetrieb!

### 5. Erste Ergebnisse

Ein Niedrigenergiegebäude wird durch den jährlichen flächenspezifischen Heizenergiebedarf definiert. Ein Wert von ca. 60 kWh oder weniger gilt dabei als kalorische Zielgröße (zum Vergleich: 400 kWh im ungedämmten Altbau). Nach Reduzierung der Transmissionsverluste durch entsprechenden Dämaufwand wird in der Regel der Niedrigenergie-Referenzwert durch die Reduzierung des konvektiven Luftaustausches (Luftwechsel) erreicht. Um so bemerkenswerter ist die Tatsache, daß durch die hohen Luftwechselraten im Betriebsgebäude von bis zu 5 h- und oft praktiziertem 24-Stunden- und Wochenendbetrieb im ersten Betriebsjahr der Niedrigenergie-Standardwert von 60 kWh/m<sup>2</sup>/a erreicht worden ist. Ein Wert, der auf die durchgeführten NESA-Maßnahmen (NESA = **N**iedrig-**E**nergie-**S**olar-**A**rchitektur) und insbesondere auf den Einsatz des Luft-/Erdwärmetauschers zurückzuführen ist.

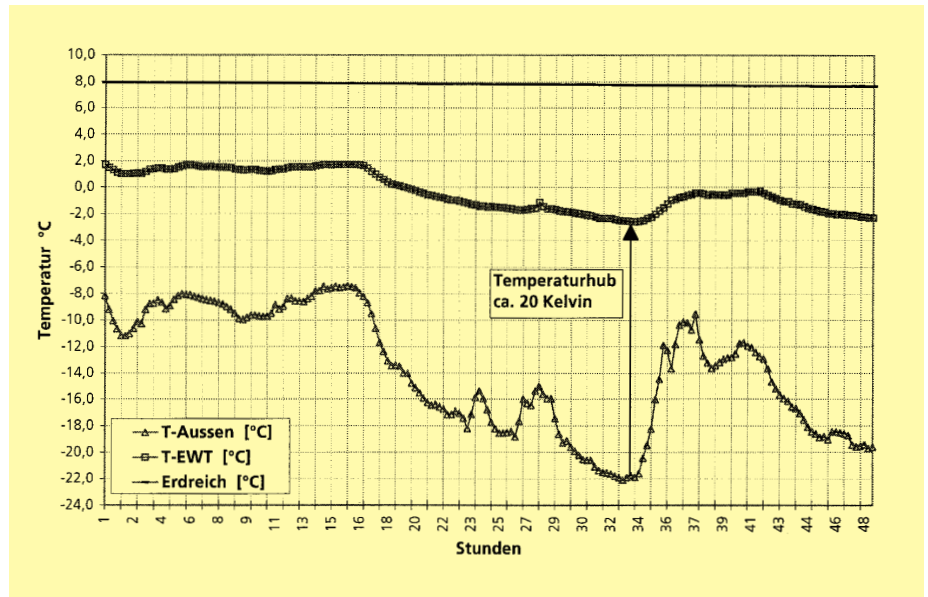
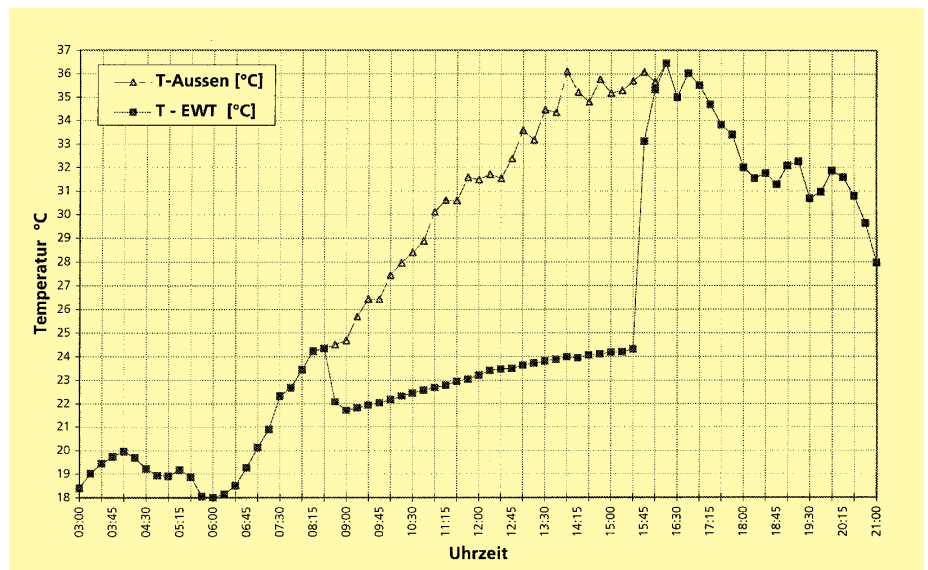


Abbildung 6: Beispiel für die Betriebscharakteristik im Winterfall (Luftvorwärmung)

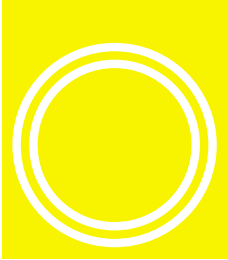
Abbildung 7: Beispiel für den Abkühleffekt im Sommerbetrieb (Luftvorwärmung)



### 6. Ergebnisse der ersten lufthygienischen Messungen

Im Zuge steigenden Interesses zum Bau von Luft-/Erdwärmetauschern muß die lufthygienische Unbedenklichkeit nachgewiesen werden. Im Frühjahr und Sommer kann es zu Taupunktunterschreitungen und somit zur Bildung von Kondenswasser kommen, welches die Grundlage zum Wachstum von Keimen darstellt. Darüber hinaus gibt es eine Reihe weiterer möglicherweise bedenklicher Aspekte, die im Rahmen einer sich in bestimmten Zeitabständen wiederholenden Meßkampagne untersucht werden sollen. Die erste Untersuchung fand

am 15. 8. 96 statt [5]. Das System wurde auf flüchtige organische Verunreinigungen der Zuluft auf Staub und Partikelbelastung untersucht. Darunter fallen im Einzelnen: Phtalate (Weichmacher), mikrobiell verursachte flüchtige organische Substanzen (MVOC), Gesamtstaub, alveolengängige Partikel, anorganische faserförmige Partikel, keimungsfähige Schimmelpilzsporen sowie bakterielle Keime und Legionellen. Zu den Ergebnissen läßt sich pauschal sagen, daß keine Belastungen zu messen waren. Für die Untersuchung der Dauerbetriebseignung werden 1998 drei weitere Messungen zu unterschiedlichen Außenklimabedingungen durchgeführt.



## 7. Ausblick

Die Nachfrage nach Ratschlägen zur Optimierung von Luft-Erdwärmetauschern nimmt insgesamt zu. Wie Messgespräche mit Fachfirmen der Bereiche Technische Gebäudeausrüstung und Haustechnik sowie mit Architekten zeigen, liegt z. B. die Absicht zum Bau von Luft-/Erdwärmetauschern genau in dem Bereich, wo heute schon Lüftungsanlagen üblich sind und erhebliche Energiemengen zur Luftvorwärmung und -kühlung benötigt werden: bei Banken, Einkaufszentren, Sport- und Mehrzweckhallen, Werkhallen, Büros oder öffentlichen Gebäuden.

Die Erkenntnisse, die am Versuchsgebäude gewonnen werden, können dazu genutzt werden, Büro- und Betriebsgebäude mit hohen inneren Lasten solar passiv und solar-systemtechnisch energetisch zu minimieren. Um den Planer gegenüber seinem Auftraggeber die notwendige Vorhersa-

gesicherheit geben zu können, wird an den notwendigen Planungswerkzeugen und Simulationsprogrammen z. Z. intensiv gearbeitet.

### Literatur

- [1] Trümper, H.; Albers, J., et. al.: „Erdwärmetauscher“. Ergebnisbericht zum Forschungsauftrag BmBau BI 5-800189-108, Dortmund (1991).
- [2] Clarke, J.: „Energy simulation in building design“, Adam Hilger Ltd., Bristol and Boston (1985)
- [3] Voss, K.: „Experimentelle und theoretische Analyse des thermischen Gebäudeverhaltens für das Energieautarke Solarhaus Freiburg,“ Dissertation Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne (1996)
- [4] Dibowski, G.; Heidt, F.-D.(Hrsg.): „NESA-Ausstattung und Meßkonzept für das Sonnenofen-Laborgebäude. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Köln“, in: VDI-Fortschrittsbe-

richte, Reihe 6: Energietechnik, Nr. 319, VDI-Verlag, Düsseldorf (1995) 30 – 42,

- [5] Grün, L; Strick, M.: „Untersuchungen zur lufthygienischen Bewertung des Erdwärmetauschers im Laborgebäude des „Sonnenofens“, Untersuchungsbericht, ECO Luftqualität und Raumklima Meßstelle, Beratungs- und Forschungsgesellschaft mbH, Köln (1996)

*Ansaugvorrichtung zur Vermessung der lufthygienischen Qualität im Zuluftkanal des maschinell belüfteten Büro-/Laborgebäudes des Hochfluß-dichte-Sonnenhofens beim DLR in Köln. Die Geräte zur Messung von Luftschadstoffen u. a. (von links nach rechts) PVC-Weichmacher (Phalata), mikrobiell verursachte Substanzen MVOC, alveolengängige Partikel, Gesamtstaub werden an den fünf Anschlußstutzen unten angeschlossen. Die keimungsfähigen Schimmelpilzsporen werden über eine seperete Platte erfaßt [5].*

