

Abschlussbericht zum Projekt

Validierung des Programms 'Graphische Auslegung von ErdwärmeAustauschern *GAEA*' mit Hilfe von Messdaten im Rahmen des Verbundprojekts 'Luft-/Erdwärmetauscher' der AG Solar NRW

> Dipl.-Phys. St. Benkert, Prof. Dr.-Ing. F.D. Heidt Fachgebiet Bauphysik & Solarenergie (Leitung: Prof. Dr.-Ing. F.D. Heidt) Universität-Gesamthochschule Siegen D-57068 Siegen

> > T: +49-271-740-3817 F: +49-271-740-3820 E: heidt@physik.uni-siegen.de W: http://nesa1.uni-siegen.de/

Laufzeit des Projekts: 01.01.1999 bis 31.12.1999 Abschlussbericht fertiggestellt: Februar 2000

Gefördert durch:



Vorwort zum Abschlussbericht

Der vorliegende Bericht informiert über den Abschluss des Projekts "Validierung des Programms 'Graphische Auslegung von ErdwärmeAustauschern *GAEA*' mit Hilfe von Messdaten im Rahmen des Verbundprojekts 'Luft-/Erdwärmetauscher' der AG Solar NRW", dessen Aufgabenstellung und Zielsetzung in Kapitel 1 beschrieben werden.

Der Abschlussbericht präsentiert die Ergebnisse der Überprüfung des vom Fachgebiet Bauphysik & Solarenergie entwickelten Programms *GAEA*. Er beschreibt die Software und gibt Erläuterungen und Empfehlungen zu deren Anwendung für die Auslegung von Erdwärmetauschern auch im Vergleich zu anderen Auslegungsverfahren.

Gleichzeitig ist damit ein erster Teil des weiter laufenden Verbundprojekts "Luft-/Erdwärmetauscher" beendet. Weitere Untersuchungen im Rahmen des Verbundprojekts stehen erst am Anfang, so dass insbesondere aus der Auswertung des Betriebs von Erdwärmetauschern noch wertvolle Erfahrungen für den gesamten Themenbereich zu erwarten sind. Die Autoren hoffen, dass *GAEA* sich bei diesen weiteren Arbeiten als wertvolle Hilfe für die Untersuchung bestehender und die Planung zukünftiger Erdwärmetauscher-Systeme bewähren wird.

Siegen, Februar 2000

Prof. Dr.-Ing. F.D. Heidt

Dipl.-Phys. St. Benkert

Inhalt

Abstract		7
1	FuE-Aufgabenstellung und -Zielsetzung	9
2	Beschreibung von <i>GAEA</i>	11
2.1	Analytisches Berechnungsverfahren	11
2.1.1	Umgebungslufttemperatur	11
2.1.2	Temperatur des Erdreichs	12
2.1.3	Wärmeaustausch zwischen Rohr und Erdreich	14
2.1.4	Wärmeaustausch im EWT	15
2.1.5	Lufttemperatur im Rohr	16
2.1.6	Abwärme des Ventilators	16
2.1.7	Gesamtertrag	17
2.2	Anpassung des Berechnungsmodells	18
2.2.1	Verwendung dynamischer Wetterdaten	18
2.2.2	Anpassung der Temperatur oberflächennaher Erdschichten	18
2.2.3	Berücksichtigung von Gebäudefundamenten	19
2.2.4	Berucksichtigung von Grundwasser	19
2.2.5	Berechnung von Ronrregistern	21
2.3	Modeligrenzen	23
2.3.1	Instationares Vernalten	23
2.3.2	Latente warme Wärme übergenge durch dieke Debruigede	24
2.3.3	Inhomogonität und Anigotronia des Rodens	24
2.3.4	Reputzung des Programme	24
2.4	Monü "Erdwärmonustauscher / EW/T"	20
2.4.1	Menü "Erdreich / Erde"	25
2.4.2	Menü "Klimawerte / Klima"	20
2.4.3	Menü "Heizung/Lüftung/Klimatisierung / HLK"	20
2.4.4	Menü "Kosten"	26
2.4.0	Menü "Jahresauswertung / Jahr"	27
2.4.0	Menü "Tagesauswertung / Tag"	27
2.4.8	Menü "Optimierter Erdwärmeaustauscher / Optimum"	28
3	Überprüfung von <i>GAEA</i>	29
3.1	Untersuchte Problemstellungen	29
3.2	Untersuchungsmethodik	30
3.3	Vergleichsobjekte	31
3.3.1	EWT des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Köln	31
3.3.2	EWT des L.E.O. in Köln / EWT-Modell der AG Klimaforschung, Ruhr-	
	Universität Bochum	32
3.3.3	EWT an der FernUniversität Hagen	33
3.3.4	EWT an der Fachhochschule in Jülich	34
3.3.5	EWT des Schwerzenbacherhofs in Schwerzenbach (Zürich)	35
3.3.6	Fallstudie mit dem Widerstands-Kapazitäten-Modell (WKM)	35
3.3.7	EWT des Energieautarken Solarhaus in Freiburg	36
3.3.8	Planungshilfe der Fa. Heliograph	36

Inhalt

6		Inhalt
4 4.1 4.1.1 4.1.2 4.1.3	Ergebnisse der Überprüfung EWT des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Köln Berechnung der Erdreichtemperaturen Berechnung der Temperatur oberflächennaher Erdschichten Berechnung der Lufttemperatur im Rohr und nach dem EWT	39 39 40 43
4.1.4	Variation der Temperaturleitfähigkeit des Erdreichs / Variation des Grundwasserspiegels	44
4.1.5 4.2	Berechnung von Rohrregistern im Vergleich zu Einzelrohren EWT des L.E.O. in Köln / EWT-Modell der AG Klimaforschung, Ruhr- Universität Bochum	48 53
4.3 4.3.1 4.3.2 4.3.3	EWT an der FernUniversität Hagen Überprüfung der Auslegung des EWT Berechnung anhand des gebauten EWT Variationen zum gebauten EWT	54 54 56 56
4.4 4.4.1 4.4.2 4.4.3	EWT an der Fachhochschule in Jülich Berechnung der Erdreichtemperaturen Berechnung der Lufttemperatur nach dem EWT Berechnung des Wärmeaustauschs	57 57 58 61
4.4.4 4.5 4.5.1 4.5.2 4.5.3	Berechnung der Ventilatorleistung EWT des Schwerzenbacherhofs in Schwerzenbach (Zürich) Berechnung der Erdreichtemperaturen / Berücksichtigung von Grundwasser Berechnung der Lufttemperatur nach dem EWT Berechnung des Wärmeaustauschs	62 62 62 64 67
4.6	Fallstudie mit dem Widerstands-Kapazitäten-Modell (WKM)	68
5 5.1 5.2	Zusammenfassung der Überprüfung Fazit Besonderheiten	71 71 72
6 6.1 6.2	Kontakte und Zusammenarbeit mit Dritten Informationsangebot im WorldWideWeb Telephonische und schriftliche Kontakte	77 77 77
Α	Abbildungsverzeichnis	79
В	Tabellenverzeichnis	81
С	Nomenklatur	83
D	Literatur	85
Е	Veröffentlichungen	89

Abstract

With the program "*GAEA* – Graphical Design of Earth Heat Exchangers" (in German: "Graphische Auslegung von ErdwärmeAustauschern") an easily understandable and operable software has been developed which can be used to assist the design of earth heat exchangers for building projects. The program has been distributed as a pre-release version since the middle of 1998 to engineers and architects and has been applied within several project studies mainly in Germany.

Whereas this pre-release version has only been tested in a preliminary way with a limited number of case studies to ensure the applicability of its calculation method and the program algorithms, a much more detailed examination took place within the collaborative project "Air/Earth Heat Exchangers" of the AG Solar NRW.

Simulation data of *GAEA* for existing earth heat exchangers were carefully compared with measured data of several built systems to answer e.g. the following questions:

- Is the quick calculation of processes in the earth heat exchanger with *GAEA* based on analytical solutions of steady-state cases sufficient to assist the design of earth heat exchangers during the early design phase of a building or is it necessary to use complex numerical models with much more input effort?
- Is it possible to adapt the analytical model e.g. to calculate groups of pipes instead of single pipes only?
- How does *GAEA* cope with dynamic situations during the operation of an earth heat exchanger (like sudden temperature changes of ambient air, changes in ventilation needs etc)?
- Are there critical system sizes or ventilation schedules for earth heat exchangers that limit the range of application for *GAEA*?

The results achieved during these examinations and the intense contact with a couple of users of GAEA led to certain modifications of the program; but no changes were necessary for the calculation method. It was found that the simulation of earth heat exchanger processes with GAEA by steady-state analytical solutions is a valuable help for designing low energy and solar buildings.

In the following report selected results of validation are presented that best show the possibilities and limits of *GAEA*. A program description and demo version are available at http://nesa1.uni-siegen.de/softlab/gaea.htm. The authors thank the Ministerium für Schule, Weiterbildung, Wissenschaft und Forschung of North Rhine-Westphalia for financial support within the collaborative project "Air/Earth Heat Exchangers" of the AG Solar NRW.

1 FuE-Aufgabenstellung und -Zielsetzung

Mit dem Programm "GAEA – Graphische Auslegung von ErdwärmeAustauschern" steht seit Mitte 1998 eine anschauliche und intuitiv zu bedienende Software zur Verfügung, um die Auslegung von Erdwärmetauschern (EWT) zu unterstützen. Während das Programm in der Entwicklungsphase nur anhand einiger Testfälle auf die Anwendbarkeit seiner Berechnungsmethode und der Programmalgorithmen überprüft wurde, fanden im Rahmen des Verbundprojekts "Luft-/Erdwärmetauscher" der AG Solar NRW ein umfassender Vergleich von GAEA-Ergebnissen mit Messergebnissen mehrerer Erdwärmetauscher-Anlagen und eine Validierung des Programms statt.

Durch diese Überprüfung sollten u.a. folgende Fragen geklärt werden:

- Ist die schnelle, analytische Berechnung der Vorgänge im EWT mit *GAEA* ausreichend, um die Auslegung von EWT in der frühen Gebäudeplanung zu ermöglichen – oder sind komplexe numerische Modelle mit umfangreicheren Eingaben nötig?
- Sind die in *GAEA* implementierten Anpassungen des analytischen Modells (z.B. zur Berechnung von Rohrregistern) vertretbar?
- Wie reagiert *GAEA* auf dynamische Situationen im EWT-Betrieb (Temperatursprünge der Umgebungsluft, Lastwechsel im Volumenstrom etc.)?
- Welche Anlagengrößen und Volumenströme für EWT lassen sich sinnvoll mit *GAEA* simulieren?

Die im Rahmen der Validierung gewonnenen Erkenntnisse und der intensive Kontakt mit Anwendern von *GAEA* dienten dazu, die Software in einigen Details anzupassen und neu zu gestalten, ohne dass die Berechnungsmethode verändert werden musste. Prinzipiell zeigt sich, dass die analytische Berechnung der Vorgänge im EWT mit *GAEA* eine gute Hilfe ist, um in der frühen Gebäudeplanung einen EWT so auszulegen, dass er die Anforderungen der Lüftungsplanung erfüllt.

Im folgenden werden ausgesuchte Ergebnisse der Validierung präsentiert, die die Möglichkeiten und Grenzen von *GAEA* aufzeigen. Eine Programmbeschreibung und eine Demoversion finden sich unter http://nesa1.uni-siegen.de/softlab/gaea.htm. Die Autoren danken dem Ministerium für Schule, Weiterbildung, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen für die finanzielle Förderung im Rahmen des Verbundprojekts "Luft-/Erdwärmetauscher" der AG Solar NRW.

2 Beschreibung von GAEA

2.1 Analytisches Berechnungsverfahren

Die grundsätzliche Funktionsweise eines EWT ist, dass Umgebungsluft durch ein im Erdboden verlegtes Rohrsystem fließt. Die Luft tauscht dabei durch die Rohrwände Wärme mit dem umgebenden Erdreich aus. Am Ausgang des Systems wird die Luft in das Lüftungssystem eines Gebäudes geleitet und trägt dort zur Heizung oder Kühlung bei (siehe Abbildung 2.1). Die Theorie zur Beschreibung von EWT umfasst also hauptsächlich Wärmeübertragungsprozesse und Strömungsmechanik.



Abbildung 2.1: Grundsätzliche Funktionsweise eines Erdwärmetauschers.

GAEA wurde anhand bekannter Modelle des Wärme- und Stofftransports entwickelt [5, 10, 11, 19]. Ein analytisches Modell wird verwendet, um die Temperatur entlang eines Rohres des EWT während dessen Betriebs zu bestimmen. Die Berechnungen beruhen auf einer Abschätzung für die jahreszeitliche Änderung der Erdreichtemperatur in verschiedenen Bodenschichten. Wärmeübertragungskoeffizienten zur Bestimmung des Wärmeflusses zwischen Luft, Rohr und Erdreich werden aus Materialwerten, Strömungseigenschaften und geometrischen Kenngrößen ermittelt. Als Einschränkung wird für die derzeitige Programmversion von *GAEA* angenommen, dass das Erdreich um und über dem EWT homogen sei, bzw. die Bodeneigenschaften räumlich und zeitlich konstant seien.

2.1.1 Umgebungslufttemperatur

Die Umgebungslufttemperatur $\vartheta_{A,0}$ bestimmt direkt die Eintrittstemperatur für Luft in den EWT und ist indirekt maßgeblich für die Erdreichtemperatur (siehe Gleichung 2.2). Im

analytischen Modell wird ein sinusförmiger Jahresverlauf der Umgebungslufttemperatur angenommen [1, 5]:

$$\vartheta_{A,0}(t) = \vartheta_{m} + (\vartheta_{max} - \vartheta_{m}) \cdot \cos\left(2\pi \frac{t}{t_{0}}\right)$$
 2.1

mit:

 $\begin{array}{ll} \vartheta_{A,0}\left(t\right) &= Umgebungslufttemperatur in \ ^C (zur Zeit t in s)\\ \vartheta_m &= j \\ \ddot{a}hrlicher Mittelwert der Umgebungslufttemperatur in \ ^C\\ \vartheta_{max} &= j \\ \ddot{a}hrlicher maximaler Monatsmittelwert der Umgebungslufttemperatur in \ ^C\\ t &= Zeit in s (t = 0 entspricht dem Zeitpunkt des Maximums der Umgebungslufttemperatur)\\ t_0 &= Dauer des Jahres in s (1 a \approx 31.5 x 10^6 s) \end{array}$

2.1.2 Temperatur des Erdreichs

Die Erdreichtemperatur an der Rohrwand hängt zunächst vom Wärmeaustausch zwischen dem tiefen Erdreich, den oberflächennahen Erdschichten und der Umgebungsluft ab. Sobald der EWT in Betrieb ist, beeinflusst der Wärmeaustausch zwischen Luft und Rohr im EWT ebenso die Erdreichtemperatur an der Rohrwand und in der Nähe des Rohres.

Die ungestörte Erdreichtemperatur an der Rohrwand $\vartheta_{E,0}$ sei die Temperatur, die das Erdreich ohne EWT an einer beliebigen Stelle annehmen würde. Dies entspricht bei homogenem Erdreich der Temperatur, die das Erdreich in gleicher Tiefe aber weitab vom EWT einnimmt. $\vartheta_{E,0}$ ergibt sich näherungsweise aus dem jährlichen Verlauf der Umgebungslufttemperatur,



wobei wie bei der Umgebungslufttemperatur ein sinusförmiger Jahresverlauf der Temperatur im Erdreich angenommen wird. Ein Parameter ξ beschreibt die "thermische Tiefe" des Rohrs. Der Wärmeübergang zwischen Luft und Erdreich an der Erdoberfläche erfolgt im verwendeten Modell ohne Widerstand [5]. Daraus ergibt sich (siehe Abbildung 2.2):

$$\vartheta_{\mathsf{E},0}(\mathsf{t}) = \vartheta_{\mathsf{m}} + \left(\vartheta_{\mathsf{max}} - \vartheta_{\mathsf{m}}\right) \cdot \mathsf{e}^{-\xi} \cos\left(2\pi \frac{\mathsf{t}}{\mathsf{t}_{0}} - \xi\right)$$
 2.2

mit:

ξ

 $\vartheta_{E,0}$ = ungestörte Erdreichtemperatur an der Rohrwand in °C

 dimensionsloser Parameter f
ür die "thermische Tiefe" des Rohrs

Die "thermische Tiefe" ξ des EWT hängt ab von dessen Verlegungstiefe und den thermischen Eigenschaften des Erdreichs oberhalb des EWT:

$$\xi = S_0 \sqrt{\frac{\pi \rho c}{t_0 \lambda}}$$
 2.3

mit: S₀

λ

= Verlegungstiefe der Rohrmitte unter der Erdoberfläche in m

- ρ c = volumenbezogene Wärmekapazität des Erdreichs in J/(m³ K)
 - Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs in W/(m K)

Abbildung 2.2: Erdreichtemperaturprofile im Jahresverlauf für ungestörtes Erdreich.

Typische Werte der Bodeneigenschaften finden sich in der Literatur [5, 17, 18].



Abbildung 2.3: Transformation des Systems "Rohr im Erdreich" in das System "Ebene Platte" über konforme Abbildung.

Während v. Cube [5] nun einen Korrekturfaktor einführt, um die Beeinflussung der Erdreichtemperatur an der Rohrwand durch den EWT wiederzugeben, verwendet Albers [1] die Methode der konformen Abbildung [24, 25] zur Bestimmung der Störung durch den EWT.

Er transformiert das Problem aus dem System (x, y) mit unbekannter Lösung (hier: Rohr im Erdreich) in ein System (u, v) mit bekannter Lösung (hier: ebene Platte). Hierbei wird die Rohrwand auf eine Seite der Platte abgebildet, die Erdoberfläche auf die gegenüberliegende (siehe Abbildung 2.3). Das Temperaturfeld $\vartheta_{\rm E}(u,v)$ für die ebene Platte ist bekannt:

$$\vartheta_{\mathsf{E}}(\mathsf{u},\mathsf{v}) = \vartheta_{\mathsf{E},0} + \left(\vartheta_{\mathsf{E},\mathsf{W}} - \vartheta_{\mathsf{E},0}\right) \cdot \frac{\mathsf{u}}{\mathsf{u}_{\mathsf{w}}}$$
 2.4

mit:

 $\begin{array}{lll} \vartheta_{\mathsf{E}}(u,v) &= \mathsf{Erdreichtemperatur} \text{ im System "Ebene Platte" in °C} \\ \vartheta_{\mathsf{E},\mathsf{W}} &= (\mathsf{korrigierte}) \ \mathsf{Erdreichtemperatur} \ \mathsf{an} \ \mathsf{der} \ \mathsf{Rohrwand} \ \mathsf{in} \ ^{\circ}\mathsf{C} \\ u_{\mathsf{W}} &= \mathsf{Dicke} \ \mathsf{der} \ \mathsf{ebenen} \ \mathsf{Platte} \ \mathsf{in} \ \mathsf{m} \end{array}$

Gemäß den Abbildungsvorschriften der Transformation¹ ist dann die Erdreichtemperatur im System "Rohr im Erdreich" (Abbildung 2.4 erläutert die verwendeten Variablen):



Abbildung 2.4: Rohrgeometrie nach [19].

$$\vartheta_{\mathsf{E}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \vartheta_{\mathsf{E},0} - \left(\vartheta_{\mathsf{E},\mathsf{W}} - \vartheta_{\mathsf{E},0}\right) \cdot \frac{\ln\left(\frac{\mathbf{r}_{1}}{\mathbf{r}_{2}}\right)}{\ln\left(\frac{\mathbf{S}_{0}}{\mathsf{R}_{0}} + \sqrt{\left(\frac{\mathbf{S}_{0}}{\mathsf{R}_{0}}\right)^{2} - 1}\right)} \quad \text{mit}: \quad \mathbf{r}_{1,2} = \sqrt{\left(\mathbf{x} \pm \sqrt{\mathsf{S}_{0}^{2} - \mathsf{R}_{0}^{2}}\right)^{2} + \mathbf{y}^{2}} \quad 2.5$$

mit:

 $\begin{array}{ll} \vartheta_{\mathsf{E}}(x,y) &= \mathsf{Erdreichtemperatur} \text{ im System "Rohr im Erdreich" in °C} \\ \mathsf{r}_{1,2} &= \mathsf{Variable} \ \text{der geometrischen Anordnung des Rohrs in m} \\ \mathsf{R}_0 &= \mathsf{Rohrradius} \ \text{in m} \ (\mathsf{R}_0 \ \text{sei klein gegenüber der Verlegungstiefe } \mathsf{S}_0) \end{array}$

Die Abbildung ist definiert durch: $w(z) = ln\left(\frac{z-x_0}{z+x_0}\right)$ mit: w = u + iv, z = x + iy

Die Rechengröße x_0 gibt dabei die scheinbare Tiefe der Rohrmitte für die Transformation an, so dass die Senkrechten der ebenen Platte (u = const.) Isothermen sind (vgl. Bestimmung der Punkte G₁ und G₂ in [19]).



Abbildung 2.5: Beeinflussung des Temperaturprofils des Erdreichs durch den EWT.

Abbildung 2.5 zeigt qualitativ, wie das Temperaturprofil des homogenen und isotropen Erdreichs laut Gleichung 2.5 durch den EWT beeinflusst wird. Das tatsächliche Temperaturprofil im Erdreich ergibt sich aus der Überlagerung mit dem jahreszeitlichen Temperaturverlauf (Abbildung 2.2).

2.1.3 Wärmeaustausch zwischen Rohr und Erdreich

Wie die Erdreichtemperatur lässt sich der Wärmefluss zwischen Erdreich und Rohr

über konforme Abbildung bestimmen. Der längenbezogene Wärmefluss $\dot{Q}_{W,L}$ zwischen Erdreich und Rohr ergibt sich zu:

$$\dot{Q}_{W,L} = 2\pi \frac{\lambda}{\ln\left(\frac{S_0}{R_0} + \sqrt{\left(\frac{S_0}{R_0}\right)^2 - 1}\right)} \cdot \left(\vartheta_{E,0} - \vartheta_{E,W}\right)$$
2.6

mit:

Q_{W,L} = längenbezogener Wärmefluss zwischen Erdreich und Rohr in W/m

Aus den Erhaltungsgesetzen für den Wärmetransport folgt, dass für Rohre mit dünnen Rohrwänden mit vernachlässigbarer Wärmespeicherfähigkeit der Wärmefluss zwischen Erdreich und Rohr gleich dem Wärmefluss durch die Rohrwand sowie gleich dem Wärmefluss zwischen Rohrwand und Luft im Rohr ist. Gleichung 2.6 lässt sich also ergänzen zu:

$$\dot{\mathbf{Q}}_{\mathsf{W},\mathsf{L}} = 2\pi \frac{\lambda}{\mathsf{ln}\left(\frac{\mathsf{S}_{0}}{\mathsf{R}_{0}} + \sqrt{\left(\frac{\mathsf{S}_{0}}{\mathsf{R}_{0}}\right)^{2} - 1}\right)} \cdot \left(\vartheta_{\mathsf{E},\mathsf{0}} - \vartheta_{\mathsf{E},\mathsf{W}}\right) = \mathsf{U}_{\mathsf{L}} \cdot \left(\vartheta_{\mathsf{E},\mathsf{W}} - \vartheta_{\mathsf{A},\mathsf{P}}\right)$$
2.7

mit:

U_L = längenbezogener Wärmedurchgangskoeffizient der Rohrwand in W/(m K)

 $\vartheta_{A,P}$ = Lufttemperatur im Rohr in °C

Zur Vereinfachung wird ein Parameter U* eingeführt, der den Einfluss beider Anteile des Wärmetransports zwischen Erdreich und Luft im Rohr wichtet. U* berücksichtigt die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs, den Wärmedurchgangskoeffizienten der Rohrwand sowie die geometrische Anordnung [1]:

$$U^{*} = 2\pi \frac{\lambda}{U_{L}} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{S_{0}}{R_{0}} + \sqrt{\left(\frac{S_{0}}{R_{0}}\right)^{2} - 1}\right)}$$
2.8

mit: U*

 Einflussverhältnis des Wärmeaustauschs zwischen Erdreich und Rohr und zwischen Rohr und Luft im Rohr Durch Einsetzen dieses Einflussverhältnisses U* in Gleichung 2.7 und Auflösen nach $\vartheta_{E,W}$ ergibt sich die korrigierte Erdreichtemperatur an der Rohrwand $\vartheta_{E,W}$ zu:

$$\vartheta_{\mathsf{E},\mathsf{W}} = \frac{\mathsf{U}^{*}\vartheta_{\mathsf{E},0}(\mathsf{t}) + \vartheta_{\mathsf{A},\mathsf{P}}}{\mathsf{U}^{*} + 1}$$
 2.9

 $\vartheta_{E,W}$ ist also das gewichtete arithmetrische Mittel zwischen der Temperatur des Luftstroms im EWT $\vartheta_{A,P}$ und der ungestörten Erdreichtemperatur an der Rohrwand $\vartheta_{E,0}$ mit den Wärmeleiteigenschaften für den Wärmeaustausch zwischen Erdreich und Rohr und zwischen Rohrwand und Luft als Wichtungsfaktoren.

2.1.4 Wärmeaustausch im EWT

GAEA berechnet nur den sensiblen – nicht den latenten – Wärmeaustausch im EWT. Hierzu wird die Gesamtlänge eines Rohrs in 100 Segmente geteilt, die schrittweise berechnet werden. Jedes Segment wird dabei betrachtet, als enthalte es Luft von konstanter Temperatur. Der Wärmeaustausch im Rohr führt zu einer Temperaturänderung der Luft am Übergang zwischen zwei Segmenten. Der Wärmeübergang in jedem Segment beträgt (siehe Gleichung 2.7):

$$\dot{\mathbf{Q}}_{W} = \Delta \mathbf{z} \cdot \mathbf{U}_{\mathsf{L}} \cdot \left(\vartheta_{\mathsf{E},\mathsf{W}} - \vartheta_{\mathsf{A},\mathsf{P}} \right)$$
 2.10

mit:

Q_W = Wärmefluss vom Erdreich durch die Rohrwand an die Luft im Rohr in W

 Δz = Segmentlänge in m

Der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient U_L hängt für dünnwandige Rohre aus Kunststoff mit geringer Wärmespeicherfähigkeit, wie sie häufig für EWT eingesetzt werden, wesentlich nur vom Wärmeübergangskoeffizient h_i an der Rohrinnenwand ab:

$$U_{L} = 2\pi R_{0} h_{i}$$
 2.11

mit: h_i

= Wärmeübergangskoeffizient an der Rohrinnenwand in W/(m² K)

Der Wärmeübergangskoeffizient an der Rohrinnenwand h_i folgt aus Strömungseigenschaften, Rohrabmessungen und Materialwerten [23, 26]:

$$h_{i} = \frac{\lambda_{A,P} N u}{2 \cdot R_{0}}$$
 2.12

mit:

 $\lambda_{A,P}$ = Wärmeleitfähigkeit der Luft im Rohr in W/(m K)

Nu = Nusselt-Zahl der Luft im Rohr

Die Nusselt-Zahl Nu der Luft im Rohr folgt aus der Reynolds-Zahl Re und somit aus den Strömungsverhältnissen. Für turbulente Strömungen in dem für EWT typischen Temperaturbereich bietet Gnielinski [10] folgende Näherung an:

$$Nu = 0.0214 \cdot (Re^{0.8} - 100) \cdot Pr^{0.4}$$
 2.13

mit:

Re = Reynolds-Zahl der Luft im Rohr

Pr = Prandtl-Zahl für Luft (typischerweise: Pr = 0,72)

Die Reynolds-Zahl Re hängt ab von der mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Rohr $\overline{v}_{A,P}$, dem Rohrradius R₀ und der kinematischen Viskosität $v_{A,P}$ der Luft im Rohr:

$$Re = \frac{\overline{v}_{A,P} \cdot 2 R_0}{v_{A,P}} \quad mit: \quad \overline{v}_{A,P} = \frac{\dot{v}_{A,P}}{R_0^2 \pi}$$
 2.14

mit:

 $\overline{v}_{A,P}$ = mittlere Strömungsgeschwindigkeit der Luft im Rohr in m/s

 $v_{A,P}$ = kinematische Viskosität der Luft im Rohr in m²/s

(typischerweise: $v_{A,P} = 1.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ bei $\vartheta_{A,P} = 20 \text{ °C}$)

 $\dot{V}_{A,P}$ = Volumenstrom im Rohr in m³/s

2.1.5 Lufttemperatur im Rohr

Mit den vorstehenden Gleichungen kann segmentweise die Lufttemperatur im Rohr über die gesamte Länge des EWT berechnet werden. Von einer Eintrittstemperatur im ersten Segment gleich der Umgebungslufttemperatur ausgehend, wird Schritt für Schritt (Segment für Segment) die Lufttemperatur gemäß dem Wärmeaustausch im Segment und der Wärmekapazität der Luft bestimmt:

$$\vartheta_{A,P,f} = \frac{\rho_A c_A \cdot \dot{V}_{A,P} \cdot \vartheta_{A,P,i} + \dot{Q}_W}{\rho_A c_A \dot{V}_{A,P}}$$
2.15

mit:

 $\vartheta_{\text{A},\text{P},\text{f}} \qquad = \text{Lufttemperatur im Rohr beim Verlassen des Segments in °C}$

 $\rho_A c_A = volumenbezogene Wärmekapazität der Luft in J/(m³ K)$

 $\vartheta_{A,P,i}$ = Lufttemperatur im Rohr beim Eintritt in das Segment in °C

Die Lufttemperatur am Ende des EWT ist gleich der Austrittstemperatur der Luft im letzten Segment.

2.1.6 Abwärme des Ventilators

Je nach Anordnung des Ventilators, der die Luft durch den EWT treibt, führt dessen Abwärme zur Erwärmung der Luft¹. In *GAEA* wird deshalb zunächst gemäß [23, 26] der Druckabfall im Rohrsystem geschätzt, der vom Ventilator zu überwinden ist. Der Druckabfall setzt sich gemäß Abbildung 2.6 zusammen aus je einem Anteil durch



Abbildung 2.6: Druckverluste im EWT.

Luftreibung im geraden Rohr – abhängig von Rohrreibungszahl, Rohrlänge und -durchmesser und Strömungsgeschwindigkeit;

- Strömungswiderstände an Umlenkungen (z.B. Krümmungen, Abzweigungen) im Rohr – abhängig von Form der Umlenkung und Strömungsgeschwindigkeit;
- strömungsunabhängige (feste) Druckverluste an Filtern etc.

Die Eintrittstemperatur bzw. Austrittstemperatur der Luft im EWT ändert sich, wenn vor bzw. nach dem EWT ein Ventilator angebracht ist, dessen Abwärme dem Luftstrom zugeführt wird. Die Berechnung der Änderung der Lufttemperatur erfolgt gemäß der Leistung des Ventilators mit Gleichung 2.15.

Der gesamte Druckabfall pro Rohr ergibt sich zu:

$$\Delta p = \lambda_{P} \frac{L_{0}}{2 \cdot R_{0}} \cdot \frac{\rho_{A}}{2} \cdot \overline{v}_{A,P}^{2} + \sum \zeta_{u} \cdot \frac{\rho_{A}}{2} \cdot \overline{v}_{A,P}^{2} + \Delta p_{F}$$
 2.16

mit:

 $\begin{array}{lll} \Delta p & = Druckabfall \mbox{ im Rohr in Pa} \\ \lambda_P & = Rohrreibungszahl \\ L_0 & = Rohrlänge \mbox{ in m} \\ \rho_A & = Luftdichte \mbox{ in kg/m}^3 \\ \zeta_u & = Widerstandsbeiwert \mbox{ der Umlenkung} \\ \Delta p_F & = strömungsunabhängiger (fester) Druckabfall \mbox{ im EWT in Pa} (z.B. \mbox{ durch Filter}) \end{array}$

Die Widerstandsbeiwerte an Umlenkungen ζ_u hängen von der Form der Umlenkung ab. Beispielhafte Werte finden sich in [26]. In *GAEA* wurde die Summe der Widerstandsbeiwerte pro Rohr abgeschätzt zu $\Sigma \zeta_u = 1$, um so typische Krümmungen am Rohreinlass und -auslass zu berücksichtigen. Der strömungsunabhängige (feste) Druckabfall im EWT Δp_F kann in *GAEA* gemäß den Gegebenheiten am EWT eingegeben werden.

Die Rohrreibungszahl λ_P zur Berechnung des Druckabfalls im geraden Rohr wird für ein hydraulisch glattes Kunststoffrohr¹ für turbulente Strömung anhand der Reynolds-Zahl der Luft im Rohr Re näherungsweise berechnet zu:

$$\lambda_{P} = \frac{0.3164}{\sqrt[4]{Re}}$$
 (Blasius'sches Gesetz) 2.17

Die Gesamtleistung des Ventilators P_V zur Überwindung des Druckabfalls Δp ergibt sich anhand des transportierten Volumenstroms $\dot{V}_{A,P}$ und dem Ventilatorwirkungsgrad η_V zu:

$$\mathsf{P}_{\mathsf{V}} = \frac{\Delta \mathsf{p} \cdot \mathsf{V}_{\mathsf{A},\mathsf{P}}}{\eta_{\mathsf{V}}}$$
 2.18

mit:

 $\begin{array}{ll} \mathsf{P}_{\mathsf{V}} & = \mathsf{Gesamtleistung} \ \mathsf{des} \ \mathsf{Ventilators} \ \mathsf{in} \ \mathsf{W} \\ \eta_{\mathsf{V}} & = \mathsf{Ventilatorwirkungsgrad} \ (\mathsf{typische} \ \mathsf{Werte:} \ \eta_{\mathsf{V}} = 0, 6...0, 87 \ \mathsf{bei} \ \mathsf{Radialventilatoren}; \\ \eta_{\mathsf{V}} & = 0, 3...0, 9 \ \mathsf{bei} \ \mathsf{Axialventilatoren} \ [26]) \end{array}$

2.1.7 Gesamtertrag

Zur Berechnung des gesamten Wärmeaustauschs im EWT \dot{Q}_{ges} werden die Wärmeerträge der Segmente und die Abwärme des Ventilators addiert:

$$\dot{Q}_{ges} = \sum_{z=1}^{100} \dot{Q}_{W,z} + P_V$$
 2.19

mit:

 \dot{Q}_{ges} = gesamter Wärmeaustausch im EWT in W ($\dot{Q}_{ges} > 0$: Erwärmung; $\dot{Q}_{ges} < 0$: Abkühlung)

Q_{W,z} = Wärmeaustausch in einem Segment des EWT in W

¹ Ein Rohr gilt als hydraulisch glatt, wenn die Rauheitshöhe ("Rauhigkeit") der Oberfläche kleiner ist als die Dicke der laminaren Unterschicht (viskosen Reibungsschicht). Diese Bedingung ist beim Betrieb von EWT aus Kunststoffrohren erfüllt [23, 26]. Für hydraulisch rauhe Rohre lässt sich die Rohrreibungszahl λ_P mit entsprechenden Formeln berechnen oder aus Diagrammen entnehmen [23, 26].

2.2 Anpassung des Berechnungsmodells

2.2.1 Verwendung dynamischer Wetterdaten

Die Näherungslösung des analytischen Berechnungsmodells gilt ansatzweise nur für quasistationäre Betrachtungen der Wärmeübertragung im EWT (siehe 2.3 Modellgrenzen). Für die praktische Auslegung von Anlagen ist es jedoch nötig, das Verhalten eines EWT im Jahresverlauf zu kennen, bzw. abschätzen zu können. Hier ist auch das Verhalten in Extremsituationen interessant, z.B. während einer Kälte- oder Hitzeperiode. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurde *GAEA* um die Möglichkeit erweitert, typische Wetterdaten als Eingabewerte für die Umgebungstemperatur $\vartheta_{A,0}$ anstatt des sinusförmigen Jahresverlaufs aus Gleichung 2.1 zu verwenden.

Die Auswahl von Wetterdaten erfolgt durch die Angabe einer Klimaregion (Abbildung 2.13) oder durch den Bezug auf eine Datei mit Messwerten. Die Umgebungstemperatur $\vartheta_{A,0}$ wird entsprechend aus einer programminternen Klimadatei oder aus den Messwerten direkt als Eingangsgröße für die analytische Berechnung der Vorgänge im EWT verwendet.

Der jährliche Mittelwert der Umgebungslufttemperatur ϑ_m und der jährliche maximale Monatsmittelwert der Umgebungslufttemperatur ϑ_{max} werden dann aus den regionaltypischen Wetterdaten oder Messwerten $\vartheta_{A,0}$ berechnet und als Eingangsgrößen für die Bestimmung des Verlaufs der ungestörten Erdreichtemperatur $\vartheta_{E,0}$ (Gleichung 2.2) gesetzt.



Abbildung 2.7: Veränderung des Temperaturprofils oberflächennaher Erdschichten an einem kalten Winter- und heißen Sommertag.

2.2.2 Anpassung der Temperatur oberflächennaher Erdschichten

In der Nähe der Erdoberfläche folgt die Temperatur des Erdreichs noch deutlich dem Tagesgang der Umgebungslufttemperatur. Dies zeigt sich z.B. im Auftreten von Bodenfrost an kalten Wintertagen. Für *GAEA* sollte dieser Einfluss auf das Erdreichtemperaturprofil berücksichtigt werden, auch wenn EWT üblicherweise in Tiefen verlegt werden, wo die tageszeitlichen Schwankungen im Vergleich zum jahreszeitlichen Verlauf der Erdreichtemperatur gering sind.

Der Ansatz zur Berücksichtigung der geänderten Temperatur oberflächennaher Erdschichten im analytischen Berechnungsmodell orientiert sich an Gleichung 2.2 zur Bestimmung des Erdreichtemperaturprofils aus dem jahreszeitlichen Verlauf der Umgebungslufttemperatur $\vartheta_{A,0}$. Ab Gleichung 2.4 und insbesondere für Gleichung 2.9 wird die ungestörte Erdreichtemperatur $\vartheta_{E,0}$ durch die korrigierte Erdreichtemperatur $\vartheta_{E,0,Ob}$ für oberflächennahe Schichten ersetzt:

$$\vartheta_{\mathsf{E},0,\mathsf{Ob}} = \vartheta_{\mathsf{E},0} + \left(\vartheta_{\mathsf{A},0} - \vartheta_{\mathsf{E},0}\right) \cdot e^{-\left(\frac{\mathsf{S}_0}{\mathsf{S}_{\mathsf{Ob}}} \cdot \xi\right)}$$
2.20

mit:

 $\begin{array}{ll} \vartheta_{\text{E},0,\text{Ob}} & = \text{korrigierte Erdreichtemperatur zur Berücksichtigung von Erdoberflächeneinflüssen in °C} \\ \textbf{S}_{\text{Ob}} & = \text{Eindringtiefe für Erdoberflächeneinflüsse in m} \end{array}$

Die Eindringtiefe S_{Ob} ergibt sich als Schätzung durch den Vergleich der Berechnungsergebnisse für kalte Wintertage mit typischen Bodenfrosttiefen in Deutschland

Beschreibung von GAEA

zu $S_{Ob} = 0,14$ m. Abbildung 2.7 zeigt, wie das Erdreichtemperaturprofil (vgl. Abbildung 2.2) bei extremen Außentemperaturen durch die Erdoberflächeneinflüsse verändert wird.

2.2.3 Berücksichtigung von Gebäudefundamenten

Sobald der EWT in der Nähe eines Gebäudes verlegt ist, findet durch dieses eine Störung des Erdreichtemperaturfelds und damit eine Beeinflussung des Wärmeaustauschs statt. Das Ausmaß der Beeinflussung hängt im wesentlichen ab vom Abstand des Rohrs zum Gebäude, von der Gebäudeinnentemperatur und der Gebäudedämmung.

Ein Parameter U^*_{Geb} wichtet den Einfluss der Anteile des Wärmetransports zwischen Erdreich und Rohr und Gebäude und Rohr. U^*_{Geb} berücksichtigt die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs, den Wärmedurchgangskoeffizienten der Gebäudewand sowie die geometrische Anordnung (vgl. Parameter U* in Gleichung 2.8):

$$U^{*}_{Geb} = \left(\frac{\lambda}{S_{0}}\right) / \left(\frac{U_{Geb}}{\xi}\right)$$
 2.21

mit:

U*_{Geb} = dimensionsloses Einflussverhältnis des Wärmeaustauschs zwischen Erdreich und Rohr sowie zwischen Gebäude und Rohr

U_{Geb} = Wärmedurchgangskoeffizient der Gebäudewand in W/(m² K)

Die Erdreichtemperatur an der Gebäudewand $\vartheta_{E,Geb}$ ergibt sich analog Gleichung 2.9 zu:

$$\vartheta_{\mathsf{E},\mathsf{Geb}} = \frac{\mathsf{U}^*_{\mathsf{Geb}} \vartheta_{\mathsf{E},0}(\mathsf{t}) + \vartheta_{\mathsf{A},\mathsf{Geb}}}{\mathsf{U}^*_{\mathsf{Geb}} + 1}$$
 2.22

mit:

 $\begin{array}{ll} \vartheta_{\mathsf{E},\mathsf{Geb}} & = \mathsf{Erdreichtemperatur} \text{ an der Gebäudewand in }^\circ\mathsf{C} \\ \vartheta_{\mathsf{A},\mathsf{Geb}} & = \mathsf{Lufttemperatur} \text{ im Gebäude in }^\circ\mathsf{C} \end{array}$

Wie schon bei der Anpassung der Temperatur oberflächennaher Erdschichten (Gleichung 2.20) erfolgt eine Korrektur der ungestörten Erdreichtemperatur $\vartheta_{E,0}$ ab Gleichung 2.4 und insbesondere für Gleichung 2.9 mit:

$$\vartheta_{\mathsf{E},0,\mathsf{Geb}} = \vartheta_{\mathsf{E},0} + \left(\vartheta_{\mathsf{E},\mathsf{Geb}} - \vartheta_{\mathsf{E},0}\right) \cdot \mathrm{e}^{-\left(\frac{\mathsf{S}_{\mathsf{Geb}}}{\mathsf{S}_{0}} \cdot \xi\right)}$$
 2.23

mit:

 $\vartheta_{E,0,Geb}$ = korrigierte Erdreichtemperatur zur Berücksichtigung von Gebäudeeinflüssen in °C S_{Geb} = Abstand zwischen Rohr und Gebäude in m

2.2.4 Berücksichtigung von Grundwasser

Das Vorhandensein von Grundwasser in der Nähe eines EWT beeinflusst das Erdreichtemperaturprofil und damit den Wärmefluss zwischen Erdreich und Rohr. Mit der Annahme eines isothermen Grundwasserspiegels kann dessen Einfluss auf die Rohrwandtemperatur analytisch bestimmt werden durch den Vergleich mit der Lösung für ein in einer Wand verlegtes Rohr [1, 7], wobei die Wandoberflächentemperaturen gleich der ungestörten Erdreichtemperatur an der Rohrwand $\vartheta_{E,0}$ sind (Abbildung 2.8).



Abbildung 2.8: Rohrgeometrie nach [7].

Elgeti [7] beschreibt die näherungsweise Lösung der zweidimensionalen Wärmeleitungsgleichung für die beschriebene Rohrgeometrie. Die analytische Lösung führt zu einem Korrekturfaktor U^*_{GW} , der den Einfluss des Grundwassers auf den Wärmeaustausch zwischen Erdreich und Rohr beschreibt. Die Korrektur der Berechnung in *GAEA* erfolgt durch die Ersetzung des Einflussverhältnisses U* in den Gleichungen 2.8 und 2.9 durch das korrigierte Einflussverhältnis U*_{GW} nach [7] zu:

$$U_{GW}^{*} = 2\pi \frac{\lambda}{U_{L}} \cdot \frac{1}{\ln\left(z + \sqrt{z^{2} - 1}\right)}$$
2.24

mit:

U*_{GW} = korrigiertes Einflussverhältnis zur Berücksichtigung von Grundwasser

z = Substitutionsgröße der Berechnung

Die Substitutionsgröße z beschreibt die Lage des EWT bezüglich Erdoberfläche und Grundwasser [7]:

$$z = \frac{S_{GW}}{\pi \cdot R_0} \cdot \left[1 + \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{R_0}{S_{GW}} \right)^2 \right] \cdot \sin \left(\pi \cdot \frac{S_0}{S_{GW}} \right)$$
 2.25

mit:

S_{GW} = Tiefe des Grundwasserspiegels unter der Erdoberfläche in m

Der Rohrradius R_0 sei dabei klein gegenüber der Verlegungstiefe S_0 und der Tiefe des Grundwasserspiegels S_{GW} . Liegt das Grundwasser sehr viel tiefer als der EWT, geht z gegen $z = S_0/R_0$ und U^*_{GW} geht über in $U^*_{GW} = U^*$. Der Einfluss des Grundwassers ist dann vernachlässigbar.



Abbildung 2.9: Vergleich eines Wärmestroms zwischen dem Erdreich und einer ebenen Platte zur Ermittlung der Einflussbreite eines Rohres.

2.2.5 Berechnung von Rohrregistern

Aufbauend auf Albers [1] wurde das Berechnungsverfahren erweitert, um neben Einzelrohren auch horizontale Rohrregister¹ berechnen zu können.

Berechnung der Einflussbreite

Albers berechnet die Einflussbreite B_0 für den Wärmeaustausch eines im Erdreich verlegten Rohres durch den Vergleich eines Wärmestroms \dot{Q}_W , wie er zwischen Erdreich und Rohr fließt, mit dem Wärmestrom, wie er durch eine ebene Platte (mit gleichen Wärmeleiteigenschaften wie das Erdreich) fließt (Abbildung 2.9). Die Oberflächentemperaturen der Platte entsprechen der Erdoberflächentemperatur bzw. der Erdreichtemperatur an der Rohrwand. Er setzt die Verlegungstiefe des Rohres S₀ gleich der Dicke der Platte und ermittelt den Wärmefluss \dot{Q}_{Pl} zwischen den Plattenoberflächen als:

$$\dot{\mathbf{Q}}_{\mathsf{PI}} = \frac{\Delta z \cdot \mathbf{B}_{0} \cdot \lambda}{\mathbf{S}_{0}} \cdot \left(\vartheta_{\mathsf{E},\mathsf{S}} - \vartheta_{\mathsf{E},\mathsf{W}}\right) = \dot{\mathbf{Q}}_{\mathsf{W}} = 2\pi \frac{\Delta z \cdot \lambda}{\ln\left(\frac{\mathbf{S}_{0}}{\mathbf{R}_{0}} + \sqrt{\left(\frac{\mathbf{S}_{0}}{\mathbf{R}_{0}}\right)^{2} - 1}\right)} \cdot \left(\vartheta_{\mathsf{E},\mathsf{S}} - \vartheta_{\mathsf{E},\mathsf{W}}\right)$$
2.26

mit:

Die Einflussbreite B₀ eines Rohres ist dann:

$$\mathsf{B}_{0} = 2\pi \frac{\mathsf{S}_{0}}{\mathsf{ln}\left(\frac{\mathsf{S}_{0}}{\mathsf{R}_{0}} + \sqrt{\left(\frac{\mathsf{S}_{0}}{\mathsf{R}_{0}}\right)^{2} - 1}\right)}$$
2.27

Es wird angenommen, dass der Wärmefluss von der Rohrmitte zu den Rändern der Einflussbreite linear abfällt. Abbildung 2.10 zeigt einen Vergleich zwischen den Modellen eines Wärmeflusses. der über die Einflussbreite konstant bleibt, dem verwendeten Modell mit linearem Abfall und einer Gauß'schen Verteilung des Wärmeflusses (mit 95 % des Wärmeflusses innerhalb der Einflussbreite. also $B_0/2 = 1.96$ · Standardabweichung σ).



Abbildung 2.10: Modelle für den Wärmefluss eines Einzelrohrs bezüglich seiner Einflussbreite.

¹ Horizontal bedeutet, dass alle Rohre des Registers die gleiche Verlegungstiefe aufweisen.

Superposition der Einzelrohre

Solange der Abstand W_0 zwischen den Rohren eines Rohrregisters größer ist als die berechnete Einflussbreite B_0 , wird angenommen, dass die Rohre sich nicht gegenseitig beeinflussen. Der gesamte Wärmeaustausch des Rohrregisters ergibt sich dann aus der Addition des Wärmeaustauschs der Einzelrohre:

$$\dot{Q}_{RR} = n_R \cdot \dot{Q}_{ER}$$
 2.28

mit:

 \dot{Q}_{RR} = Wärmeaustausch des Rohrregisters in W

n_R = Anzahl der Rohre im Rohrregister

 \dot{Q}_{ER} = Wärmeaustausch eines Einzelrohrs in W

Sind die Rohre enger verlegt, ist der Wärmeaustausch des Rohrregisters zwischen dem Erdreich und der zu erwärmenden Luft geringer, da nicht das gesamte Erdreich als Austauschfläche genutzt wird. Abbildung 2.11 veranschaulicht dies als Überlagerung der Einflussbreiten der Einzelrohre. Der gesamte Wärmeaustausch des Rohrregisters ergibt sich anschaulich aus der grau schattierten Gesamtfläche des Wärmeaustauschs der Einzelrohre,



Abbildung 2.11: Bei engem Rohrabstand überlagern sich die Einflussbreiten der Rohre im Rohrregister.

Beschreibung von GAEA

wobei die sich überlagernden Flächenanteile (dunkelgrau schattiert) nur einfach – nicht doppelt – gerechnet werden. Mit dem angenommenen Modell des linearen Abfalls des Wärmeflusses zu den Rändern der Einflussbreite ist der gesamte Wärmeaustausch des Rohrregisters:

$$\dot{Q}_{RR} = n_R \cdot \dot{Q}_{ER} - (n_R - 1) \left(1 - \frac{W_0}{B_0}\right)^2 \cdot \dot{Q}_{ER}$$
 2.29

mit:

W₀ = Verlegeabstand zwischen den Rohren des Rohrregisters in m

2.3 Modellgrenzen

2.3.1 Instationäres Verhalten

Bei der Berechnung der Wärmeflüsse im EWT und in der Umgebung des EWT spielen Vorgänge in verschiedenen Zeitskalen eine Rolle. Beim Durchströmen des EWT bleibt die Luft in einem Zeitraum von der Größenordnung einiger Sekunden bis weniger Minuten im EWT und tauscht dabei Wärme mit der Rohrwand aus. Die Beeinflussung des Temperaturprofils des Erdreichs durch den Wärmeaustausch zwischen Rohr und Erdreich ist träger. Je nach Bodentyp liegt die typische Zeitkonstante z.B. zur Ausbildung des Temperaturprofils gemäß Abbildung 2.5 nach dem Anschalten des EWT im Bereich einiger Stunden. Schließlich folgt die vom EWT ungestörte Erdreichtemperatur mit zeitlicher Verzögerung der Umgebungslufttemperatur. In den für EWT üblichen Verlegungstiefen beträgt diese Verzögerung viele Tage bis mehrere Wochen ([5], vergleiche Abbildung 2.2).

Das analytische Berechnungsmodell, das in *GAEA* verwendet wird, erlaubt die Untersuchung von Vorgängen im EWT, die in verschiedenen Zeitskalen stattfinden. Da die Luft den EWT sehr viel schneller durchströmt, als die Erdreichtemperatur im Jahresverlauf schwankt, ist eine solche quasi-stationäre Berechnung möglich. Dabei wird zunächst davon ausgegangen, dass die Erdreichtemperatur nur vom Jahresverlauf der Umgebungstemperatur bestimmt wird. Im Gegensatz zur Realität wird nun angenommen, dass die Beeinflussung des Temperaturprofils des Erdreichs durch den Betrieb des EWT spontan erfolgt. Mit dieser Rahmenbedingung lässt sich der Wärmeaustausch zwischen Erdreich, Rohr und Luft im Rohr und damit die Lufttemperatur im Rohr im Verlauf des EWT analytisch berechnen (2.1 Analytisches Berechnungsverfahren).

Im quasi-stationären Modell lassen sich grundsätzlich keine Vorgänge untersuchen, die mehrere der oben beschriebenen Zeitskalen umfassen. Hierzu zählen z.B. An- und Abschaltvorgänge oder langfristige Temperaturveränderungen des Erdreichs aufgrund des Betriebs des EWT (Ermüdung des Erdreichs). Zur Simulation derartiger instationärer Vorgänge sind numerische Berechnungsmodelle nötig, wie sie z.B. von Bruse [4, 9] oder Huber/Remund [16] verwendet werden.

Unabhängig davon können im quasi-stationären Modell instationäre Rahmenbedingungen als Ausgangsgrößen für die analytische Berechnung des Betriebs eines EWT angegeben werden. So verwendet *GAEA* stündliche Werte für die Umgebungsluft aus Wetterdaten als Eingangsgröße zur Berechnung der Erdreichtemperaturen sowie als Lufteintrittstemperatur des EWT.

Ebenso wäre möglich, ein (einfaches) Modell für die Änderung der Bodenwerte wie Feuchte, Wärmespeicherkapazität und -leitfähigkeit im Jahresverlauf oder abhängig von Wetterdaten in *GAEA* zu integrieren, jedoch ist ein wissenschaftlich fundiertes Modell hierfür derzeit nicht verfügbar [22].

2.3.2 Latente Wärme

Die Kondensation von Feuchte aus der Luft an kalten Rohrwänden führt zu einem Umwandeln von latenter in sensible Wärme und damit zu einer Erwärmung der Rohrwand und folglich der Luft im EWT. Das Verdunsten von Feuchtigkeit auf den Rohrwänden entzieht der Rohrwand sensible Wärme und führt zu einer Abkühlung der Luft im EWT.

In *GAEA* werden (derzeit) die Energiebeiträge nicht berücksichtigt, die aufgrund der Änderung der latenten Wärme der Luft im EWT zustande kommen. Berechnet wird lediglich die Änderung der sensiblen Wärme aufgrund des Wärmeaustauschs zwischen Luft und Rohrwand im EWT. Dies ließe sich grundsätzlich ändern, wenn neben der Umgebungslufttemperatur auch die relative Feuchte der Umgebungsluft als Eingabegröße verwendet würde.

2.3.3 Wärmeübergang durch dicke Rohrwände

Erdwärmetauscher mit großen Durchmessern werden meist nicht aus Kunststoffrohren zusammengesetzt, sondern oft z.B. aus Betonrohren, also Rohren mit dicken Wänden. Diese Rohre besitzen eine nicht zu vernachlässigende Wärmespeicherkapazität, der Wärmedurchgangskoeffizient der Rohrwand hängt maßgeblich von der Wärmeleitfähigkeit des Materials und nicht nur vom Wärmeübergangswiderstand an der Oberfläche ab.

GAEA berechnet den Wärmefluss durch die Rohrwand, ohne dies zu berücksichtigen. Das Berechnungsmodell gilt also nur für dünne Rohrwände, die keine oder nur geringe Wärmespeicherfähigkeit besitzen und bei denen der Wärmedurchgangskoeffizient wesentlich nur vom Wärmeübertragungskoeffizient an der Rohrinnenwand bestimmt wird (siehe Gleichung 2.11). Für EWT aus Kunststoffrohren sind diese Bedingungen erfüllt.

2.3.4 Inhomogenität und Anisotropie des Bodens

Die (zeitabhängigen) Eigenschaften des Erdreichs wie Bodenfeuchte, Wärmespeicherfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit) in der Nähe eines EWT bestimmen wesentlich dessen Betriebsverhalten und sind deshalb wichtige Auslegungsparameter. Leider lassen sich die relevanten Bodenwerte meist nur sehr ungenau bestimmen [22]. Dies gilt insbesondere für den zeitlichen Verlauf der Bodenwerte über das Jahr sowie die Abhängigkeit vom Wetterverlauf, also z.B. vom Niederschlag, von der Sonneneinstrahlung und von der Umgebungslufttemperatur. Unklar ist weiter, ob die Bodeneigenschaften, die bei der Auslegung des EWT gelten, nach dem Bau des EWT und den damit verbundenen Erdarbeiten immer noch bestehen [22]. Insbesondere für numerische Berechnungsmodelle bedeuten diese Unsicherheiten bezüglich der Bodeneigenschaften eine wesentliche Einschränkung der Nutzbarkeit der Modelle und eine drastische Reduzierung der Genauigkeit der Ergebnisse.

Im analytischen Berechnungsmodell von *GAEA* wird grundsätzlich von einem homogenen und isotropen Aufbau des Erdreichs in der Umgebung des EWT ausgegangen. Die Bodenwerte lassen sich einstellen und werden als zeitlich konstant angenommen. Durch die schnelle Berechnung im analytischen Modell besteht die Möglichkeit, Parametervariationen zu den Bodeneigenschaften durchzuführen, um so die Sensitivität der erhaltenen Ergebnisse bezüglich der Parameter abschätzen zu können.

2.4 Benutzung des Programms

2.4.1 Menü "Erdwärmeaustauscher / EWT"

Der erste Schritt bei der Berechnung von – existierenden oder geplanten – EWT ist die Anlagenbeschreibung. Mit *GAEA* können alle relevanten Daten in einfacher Weise eingegeben werden. Abbildung 2.12 zeigt das Menü, in dem folgende Werte festgelegt werden:

- Anzahl paralleler Rohre
- Rohrlänge(n)
- Rohrradius
- Abstand zwischen den Rohren (falls mehr als ein Rohr)
- Verlegungstiefe unter dem Erdboden*
- Abstand der Rohre von benachbarten Gebäudeteilen*
- Ventilatorposition (vor oder nach dem Rohrsystem)

(* Zusätzliche Menüs erlauben detailliertere Angaben, z.B. wenn die Verlegungstiefe von Rohren im Erdreich unterschiedliche Werte für verschiedene Bereiche des Systems annimmt.)

2.4.2 Menü "Erdreich / Erde"

Im zweiten Schritt wird das Erdreich definiert, das den EWT umgibt. Üblicherweise sind aber die Erdreicheigenschaften nicht genau bekannt, insbesondere nicht in einem frühen Planungsstadium. Außerdem unterliegen sie jahreszeitlichen Schwankungen, ändern sich innerhalb kurzer Distanzen und werden durch den Betrieb des EWT beeinflusst. Anstatt in *GAEA* dieses komplexe und schwer vorhersagbare Verhalten zu modellieren, wird im Menü "Erdreich / Erde" zunächst überschlägig aus einer Liste die Bodenart ausgewählt. *GAEA* erlaubt durch sein schnelles Berechnungsverfahren dann das Durchführen von Parametervariationen. Ausgehend vom angenommenen Erdreich werden mehrere Berechnungen mit veränderter Erddichte, -wärmekapazität und -wärmeleitfähigkeit durchgeführt, um so den besten und schlechtesten Auslegungsfall für den Betrieb des EWT einzugrenzen. (Bei Kenntnis der relevanten Materialdaten des Bodens kann eine genaue Eingabe dieser Werte erfolgen.)

Abbildung 2.12: Erdwärmeaustauscher lassen sich detailliert in *GAEA* beschreiben – mit Anlagen-Layout (hier gezeigt), Eigenschaften des Erdreichs, Klimawerten, Ventilationsbedingungen und Kosten.



2.4.3 Menü "Klimawerte / Klima"

Heiz- und Kühllasten von Gebäuden und damit der Betrieb eines EWT hängen von den in situ Klimabedingungen ab. Im dritten Schritt wählt man also eine repräsentative Klimasituation für die Berechnung. Am einfachsten geschieht dies durch Anklicken einer Klimaregion auf der Deutschlandkarte oder durch Angabe einer Postleitzahl. Falls Messdaten der Umgebungslufttemperatur für einen Standort vorhanden sind, können diese direkt als Eingabe für die Berechnung verwendet werden. Schließlich – hauptsächlich für Testzwecke – kann ein sinusförmiger Temperaturverlauf als Klimamodell gewählt werden.



2.4.4 Menü "Heizung/Lüftung/Klimatisierung / HLK"

Der vierte Schritt bei der Arbeit mit *GAEA* zur Berechnung von EWT ist die Angabe der Anforderungen zur Heizung, Lüftung und Klimatisierung. Der Frischluftbedarf kann anhand des Gebäudevolumens und der erforderlichen Luftwechselzahl für die künstliche Belüftung oder als Volumenstrom eingestellt oder aus einer Datei gemäß simulierten oder gemessenen Daten übernommen werden. *GAEA* berechnet dann das Strömungsverhalten im Rohrsystem (mittlere Strömungsgeschwindigkeit, Reynoldszahl, Druckabfall und Wärmeübergangszahl) und den elektrischen Energiebedarf eines Ventilators für den Lufttransport durch den EWT.

2.4.5 Menü "Kosten"

Zur wirtschaftlichen Beurteilung des EWT werden im fünften Schritt Kosten des EWT – z.B. für Rohre und die Rohrverlegung – sowie wirtschaftliche Rahmenbedingungen – nämlich Inflationsrate und Energiekosten – angegeben. Die Energieeinsparung, die mit einem EWT erzielt werden kann, muss unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten mit anderen Energieeinsparungsmaßnahmen konkurrieren. *GAEA* berechnet den internen Zinssatz und die Amortisationszeit und stellt damit die ökonomischen Daten zur Verfügung, die für einen Vergleich von Energiesparmaßnahmen nötig sind.

2.4.6 Menü "Jahresauswertung / Jahr"

GAEA berechnet EWT-Systeme in zwei Zeitskalen. Für eine jährlich überschlägige Beurteilung werden im Menü "Jahresauswertung" folgende Werte bestimmt und graphisch ausgegeben (Abbildung 2.14):

- Heiz- und Kühlbeitrag (jährlich und stündlich)
- Temperaturen vor und nach dem EWT (jährliche Maxima und Minima und stündliche Werte)
- Betriebsstunden des Systems
- Amortisationsdauer und interner Zinssatz
- Energiekosten für die eingesparte Energie

In die graphische Ausgabe kann stufenlos gezoomt werden, um beliebige Zeiträume zwischen 24 Stunden und dem gesamten Jahr darzustellen. Zahlenwerte können zur weiteren Bearbeitung z.B. in Tabellenkalkulations- oder Simulationsprogrammen als Datei ausgegeben werden.

Abbildung 2.14: Die Jahresauswertung von GAEA stellt z.B. die Lufttemperaturen vor und nach dem EWT dar (hier gezeigt) oder auch den Wärmefluss im System. In die Graphik kann stufenlos gezoomt werden, um bis hin zu stündlich aufgelösten Werten Ergebnisse zu betrachten. Zu jeder Stunde kann in einer Tagesauswertung das Profil entlang des EWT untersucht werden.



2.4.7 Menü "Tagesauswertung / Tag"

Zur detaillierten Analyse der Vorgänge eines bestimmten Tages (zweite Zeitskala) lassen sich Temperaturen und Wärmeflüsse entlang des EWT durch *GAEA* berechnen und ausgeben – z.B. zur Validierung mit Messergebnissen. Stündlich kann für 100 Segmente des EWT dessen Verhalten genau untersucht werden.

2.4.8 Menü "Optimierter Erdwärmeaustauscher / Optimum"

Für die energetische und wirtschaftliche Optimierung von EWT-Systemen mit *GAEA* lassen sich aufgrund des schnellen analytischen Rechenmodells ohne großen Aufwand Parameter-variationen durchführen.

Insbesondere den frühen Planungsprozess unterstützt *GAEA* mit einem automatischen Berechnungsverfahren. Abbildung 2.15 zeigt das Ergebnis einer Übernacht-Berechnung einer Vielzahl von EWT-Systemen mit unterschiedlichen Werten für Rohranzahl, Rohrlänge etc. (siehe Angaben unter Menü "Erdwärmeaustauscher / EWT"). Alle sinnvollen Lösungen für eine gegebene Auslegungssituation mit ihren Randbedingungen (Erdreich, Klima, Heizung/Lüftung/Klimatisierung und Kosten) werden bezüglich ihres jährlichen Energiebeitrags und dem internen Zinssatz des eingesetzten Kapitals aufgetragen. Aus dieser Lösungswolke können nun Startpunkte für die weitere (manuelle) Auslegung gewählt werden.



Abbildung 2.15: Die automatische Optimierung von *GAEA* unterstützt die Auslegung von EWT. Systemvarianten werden berechnet und bezüglich ihres wirtschaftlichen und energetischen Verhaltens im XY-Diagramm aufgetragen. Alle Lösungen können begutachtet und als Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen gewählt werden.

3 Überprüfung von GAEA

3.1 Untersuchte Problemstellungen

Analytische Berechnung vs. numerische Berechnung

Ist die schnelle, analytische Berechnung der Vorgänge im EWT mit *GAEA* ausreichend, um die Auslegung von EWT in der frühen Gebäudeplanung zu ermöglichen – oder sind komplexe numerische Modelle mit umfangreicheren Eingaben nötig? Im Vergleich mit numerischen Berechnungsmethoden und Messergebnissen sollen Unterschiede der Modelle bei der Vorhersage von Erdreichtemperaturen, Lufttemperaturen und Jahresenergiebeiträgen im EWT untersucht werden.

Dynamische Wetterdaten und Erdreichtemperaturen

Ist es möglich, im analytischen Berechnungsmodell dynamische Wetterdaten als Eingabegrößen der Berechnung zu verwenden? Eine Überprüfung dieser Frage soll anhand folgender Kriterien erfolgen:

- Kurzfristiges Verhalten (Tagesverlauf): Wie wirken sich plötzliche Änderungen der Umgebungslufttemperatur (Temperatursprünge) auf die Temperaturen im Erdreich in verschiedenen Tiefen aus?
- Mittelfristiges Verhalten (Monatsverlauf): Wie wirken sich Perioden hoher oder niedriger Umgebungslufttemperatur (Hitze- oder Kälteperioden) auf den Verlauf der Erdreichtemperatur in verschiedenen Tiefen aus?
- Langfristiges Verhalten (Jahresverlauf): Wie wirkt sich der Betrieb des EWT auf die Temperatur des Erdreichs in seiner Umgebung aus (Ermüdungsverhalten)?

Da die Erdreichtemperatur in der Umgebung des EWT eine wesentliche Größe bei der Berechnung des Verhaltens des EWT ist, soll geklärt werden, ob es nötig und sinnvoll ist, in *GAEA* vom Modell eines sinusförmigen Verlaufs der Erdreichtemperatur abzuweichen. Im Vergleich zwischen *GAEA* und numerischen Berechnungsmodellen sowie anhand von dynamischen Vorgängen innerhalb der Messreihen lässt sich dann bestimmen, inwieweit *GAEA* die Abschätzung instationären Verhaltens bei der Auslegung von EWT ermöglicht.

Latente Wärme

Ist es nötig und sinnvoll, Änderungen der latenten Wärme bei der Berechnung der Temperaturen und Wärmeströme im EWT zu berücksichtigen? Hierzu soll anhand von Messdaten untersucht werden, wie groß der Anteil der latenten Wärme im Vergleich zur sensiblen Wärme am gesamten Wärmeaustausch eines EWT ist. Wie verhält sich dazu die Berechnung in *GAEA*, die eine Feuchteänderung der Luft im EWT nicht berücksichtigt?

Rohrregisterberechnung

Stimmt die von *GAEA* berechnete gegenseitige Beeinflussung der Rohre in Rohrregistern mit Messdaten überein? Insbesondere soll durch den Vergleich von Messdaten für Einzelrohre und Rohrregistern unter gleichen Betriebsbedingungen geklärt werden, ob das Modell der Einflussbreiten und der Superposition von Wärmeströmen als Erweiterung des analytischen Modells für Einzelrohre eine Berechnung von Rohrregistern erlaubt.

Berücksichtigung von Gebäudefundamenten und Grundwasser

Lässt sich die Beeinflussung des Temperaturfelds des Erdreichs durch nahegelegene Gebäude oder durch das Grundwasser durch Anpassungen im analytischen Modell erfassen? Durch den Vergleich der Ergebnisse des Berechnungsmodells in *GAEA* mit Messdaten zu Erdreichtemperaturprofilen soll überprüft werden, ob die Auslegung von EWT mit *GAEA* für diese geänderten Rahmenbedingungen möglich ist.

Lastwechselsituationen

Wie reagiert *GAEA* auf dynamische Situationen im EWT-Betrieb, z.B. beim An- und Abschalten des EWT oder bei der plötzlichen Veränderung des Ventilationsstroms? Im Vergleich zwischen *GAEA* und numerischen Berechnungsmodellen sowie anhand von dynamischen Vorgängen innerhalb der Messreihen trägt diese Untersuchung zur Abschätzung bei, inwieweit mit *GAEA* instationäre Vorgänge in EWT bei der Auslegung berücksichtigt werden können.

Grenzen für GAEA

Gibt es kritische Größen für EWT (z.B. bezüglich Rohranzahl, Rohrlänge, Rohrdurchmesser oder Volumenstrom), die eine Auslegung mit *GAEA* einschränken oder verbieten? Anhand von Messdaten und Untersuchungen des Programmverhaltens soll geklärt werden, wie das Anwendungsspektrum und damit die Zielgruppen für die Arbeit mit *GAEA* sind. Ist *GAEA* die eierlegende Wollmilchsau, die vom Einfamilienhaus bis zum großen Verwaltungs- und Industriebau die Auslegung von EWT unterstützt?

3.2 Untersuchungsmethodik

Als Ausgangsdaten für die Berechnung von EWT werden – soweit vorhanden – die gemessenen Werte der Umgebungslufttemperatur der Vergleichsobjekte verwendet. Lücken in den Datensätzen werden durch mit dem Programm METEONORM [20] für die entsprechende Klimaregion synthetisch generierte Werte aufgefüllt, um einen vollständigen Jahressatz an stündlichen Werten (insgesamt 8760 Werte) als Eingabewerte für *GAEA* zur Verfügung zu haben. Bei Datensätzen aus Schaltjahren wurden die "überzähligen Messwerte" des 29. Februars im Datensatz belassen und entsprechend 24 Stundenwerte aus einer Datenlücke gekürzt, um die vorhandenen Messwerte möglichst umfassend zu nutzen.

Gemäß den Plänen der Vergleichs-EWT werden die Anlagen detailgetreu in *GAEA* modelliert. Fehlende Angaben werden in Sensitivitätsanalysen variiert, um den Einfluss der unbekannten Größen auf die Berechnungsergebnisse und damit auf die Genauigkeit des Vergleichs zwischen Berechnung und Messung abschätzen zu können. Dies betrifft insbesondere die Werte der Wärmeleitfähigkeit, der Massendichte und der spezifischen Wärmekapazität des Erdreichs, die bei keinem der Vergleichsobjekte weder örtlich (in der Umgebung des EWT) noch zeitlich (im Jahresverlauf) bekannt sind. Hier werden anhand des wahrscheinlichen Erdtyps zunächst Werte von *GAEA* zugeordnet. Anschließend erfolgt die Variation der Parameter.

Der Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den Messergebnissen erfolgt anhand folgender Werte:

- ungestörte Erdreichtemperaturen in der Umgebung des EWT
- Erdreichtemperaturen an der Rohrwand entlang des EWT

- Lufttemperatur vor, in und nach dem EWT
- einzelne Wärmeströme und gesamter Wärmeaustausch im EWT
- hydraulischer Druckabfall im Rohrsystem
- elektrische Leistung des Ventilators zum Lufttransport

Das zeitliche Verhalten der Vergleichsgrößen geht dabei mit in die Untersuchung ein.

3.3 Vergleichsobjekte

3.3.1 EWT des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Köln

Anlagenbeschreibung

Am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Hauptabteilung Solare Energietechnik in Köln wurde als Test- und Demonstrationsanlage ein EWT installiert, der der Lüftungsanlage des Niedrigenergie-Laborgebäudes vorgeschaltet ist [6]. Seit 1996 werden hier Messdaten erfasst. Die weitere Untersuchung der Anlage und Auswertung der Messungen ist Bestandteil des Verbundprojekts "Luft-/Erdwärmetauscher" der AG Solar NRW.

Der EWT ermöglicht durch seine Konfiguration den Vergleich von Einzelrohrbetrieb und Rohrregisterbetrieb in verschiedenen Verlegungstiefen. Dazu sind die zwölf Kunststoffrohre des EWT in vier Systeme aufgeteilt:

- ein Einzelrohr in 1,5 m Tiefe
- ein Einzelrohr in 3,0 m Tiefe
- ein Rohrregister à sechs Rohre in 1,5 m Tiefe
- ein Rohrregister à sechs Rohre in 3,0 m Tiefe

Die Rohre sind jeweils 30 m lang und haben einen (Innen-)Durchmesser von 300 mm. Der maximale Volumenstrom durch alle Rohre beträgt etwa 3.600 m³/h.

Untersuchungsziele

Anhand der zur Verfügung stehenden Messdaten für den EWT des DLR lassen sich folgende Aspekte des Programms *GAEA* untersuchen:

- Berechnung der Erdreichtemperaturen
- Berechnung des Wärmeaustauschs zwischen Rohr und Erdreich
- Berechnung des Wärmeaustauschs im EWT
- Berechnung der Lufttemperatur im Rohr und nach dem EWT
- Verwendung dynamischer Wetterdaten / instationäres Verhalten
- Anpassung der Temperatur oberflächennaher Erdschichten
- Berechnung von Rohrregistern

Probleme

Folgende Probleme entstehen bei der Verwendung der Messdaten des EWT des DLR, welche die Genauigkeit der Untersuchung beeinträchtigen:

Die Werte der Wärmeleitfähigkeit, der Massendichte und der spezifischen Wärmekapazität des Erdreichs, die in der Umgebung der Rohre des EWT gelten, sind nicht bekannt. Ein im Auftrag des DLR (vor der Verlegung des EWT) erstelltes Bodengutachten enthält keine Angaben über diese Werte [22, 30]. Darüberhinaus wurde nach der Verlegung des EWT die

Grube mit Erdreich verfüllt, dessen Eigenschaften nicht erneut untersucht wurden und nur anhand des augenscheinlichen Bodentyps geschätzt werden können.

Die exakten Betriebszeiten des EWT wurden nicht erfasst und lassen sich im Nachhinein nur anhand einer Plausibilitätsanalyse aus den Messdaten abschätzen. Als Indikatoren für einen Betrieb des EWT werden folgende Temperaturdifferenzen verwendet:

- Temperaturdifferenz zwischen Umgebungsluft und Luft im Ansaugschacht kleiner 1 K;
- Temperaturdifferenz zwischen Rohrwand und Luft im Rohr (an acht Punkten im EWT) größer 1 K.

Sobald mehr als die Hälfte dieser Kriterien erfüllt ist, wird angenommen, dass der EWT in Betrieb war.

Die so ermittelten jeweiligen Betriebszeiträume sind sehr kurz (meist nur einige Stunden). Der intermittierende Betrieb wurde absichtlich durchgeführt, um eine Ermüdung des Erdreichs auszuschließen. Für die Validierung von *GAEA* hat dies den Nachteil, dass nur relativ wenige Messdaten zum Vergleich verwendet können. Für das Jahr 1996 war der EWT z.B. nur 458 von 8784 möglichen Stunden in Betrieb, also nur 5,2 % des Jahres.

Für das Jahr 1997 führt dieses Verfahren zur Abschätzung der Betriebszeiten zu höchst fragwürdigen Ergebnissen, z.B. mehrfach zu Betriebszeiträumen von zwei Stunden mitten in der Nacht. Die für das Jahr 1997 zur Verfügung stehenden Messdaten wurden deshalb nur für eine qualitative Überprüfung von *GAEA* verwendet und nicht wie die Messdaten für 1996 quantitativ mit Berechnungsergebnissen verglichen.

Die Volumenströme in den einzelnen Rohren wurden nicht gemessen. Bekannt ist nur der Volumenstrom nach dem Wärmetauscher der Wärmerückgewinnungsanlage. Dabei wird angenommen, dass der Volumenstrom sich während des Betriebs des EWT gleichmäßig auf die Rohre verteilt. Allerdings lässt sich die Verteilung des Luftstroms auf die Rohre mit manuell bedienten Klappen regulieren. Über die Einstellung der Klappen während des Betriebs des EWT existieren jedoch keine Aufzeichnungen.

Die Lufttemperaturen an den Rohranfängen wurden nicht gemessen. Bekannt ist die Temperatur der Umgebungsluft und die Temperatur im Ansaugschacht. Die Verteilung der Luft auf die Rohre des EWT erfolgt durch im Erdreich verlegte Rohre, die bereits als Wärmeübertrager arbeiten. Bei der Berechnung des EWT mit *GAEA* wurde deshalb die Luftzufuhrstrecke als Verlängerung der zur untersuchenden Rohre betrachtet. Es ist so aber nicht möglich, den im Lauf der Verteilung abnehmenden noch verbleibenden Volumenstrom in der Luftzufuhr zu berücksichtigen.

3.3.2 EWT des L.E.O. in Köln / EWT-Modell der AG Klimaforschung, Ruhr-Universität Bochum

Anlagenbeschreibung / Modellbeschreibung

Das Low Energy Office (L.E.O.) in Köln ist ein Bürogebäude in Niedrigenergiebauweise [28]. Ein Erdkanal dient der Klimatisierung des Gebäudes insbesondere zur Vermeidung von Überwärmung im Sommer. Der EWT ist seit 1995 in Betrieb.

Der EWT des L.E.O. besteht aus einem Betonrohr mit einer Länge von 150 m. Der Innendurchmesser beträgt 0,8 m, so dass der EWT bekriechbar ist. Die Luft strömt im Rohr mit

Überprüfung von GAEA

etwa 3,5 m/s, dies entspricht einem Volumenstrom von über 6.000 m³/h. Der jährliche mittlere Volumenstrom beträgt unter Berücksichtigung des diskontinuierlichen Betriebs des EWT etwa 2.400 m³/h [9].

Von der Arbeitsgruppe Klimaforschung am Geographischen Institut der Ruhr-Universität Bochum (RUB) wurde in einem Projekt der AG Solar NRW mit Hilfe der Messdaten des L.E.O.-EWT ein numerisches Simulationsmodell für EWT entwickelt, das mit dem Finite-Differenzen-Modell arbeitet [9]. Die Untersuchung dieser Software ist wie die Untersuchung von *GAEA* ein Ziel des Verbundprojekts Luft-/Erdwärmetauscher der AG Solar NRW.

Untersuchungsziele

Anhand des Vergleichs der Berechnung des EWT des L.E.O. mit *GAEA* und mit der Software der AG Klimaforschung der RUB können folgende Aspekte von *GAEA* untersucht werden:

- Berechnung der Erdreichtemperaturen
- Berechnung des Wärmeaustauschs zwischen Rohr und Erdreich
- Berechnung des Wärmeaustauschs im EWT
- Berechnung der Lufttemperatur im Rohr und nach dem EWT
- Verwendung dynamischer Wetterdaten / instationäres Verhalten
- Berücksichtigung von Gebäudefundamenten
- Latente Wärme
- Wärmeübergang durch dicke Rohrwände
- Analytische Berechnung vs. numerische Berechnung

Probleme

Die Messergebnisse für den EWT des L.E.O. lagen für die Validierung von *GAEA* nur unvollständig vor, so dass insbesondere die Betriebszeiten des EWT des L.E.O. nicht bestimmt werden konnten. Die Überprüfung von *GAEA* beschränkt sich deshalb auf den Vergleich mit der Software der AG Klimaforschung der RUB.

3.3.3 EWT an der FernUniversität Hagen

Anlagenbeschreibung

Für die Erweiterung der Bibliothek der FernUniversität Hagen wurde vom Ingenieurbüro Wortmann & Scheerer ein EWT projektiert, der mit dem Ziel der Vermeidung einer konventionellen Kühlung ein angemessenes Raumklima bei minimalem Energieverbrauch sicherstellen soll [31].

Nach einer überschlägigen Auslegung des Ingenieurbüros erfolgte die Ausführung des EWT als Beton-Einzelrohr mit 140 m Länge bei einem Innen-Durchmesser von 0,8 m. Die Verlegungstiefe beträgt durchschnittlich 2,8 m, der Abstand zu Gebäuden durchschnittlich 4,8 m.

Die messtechnische Untersuchung der Anlage ist Bestandteil des Verbundprojekts "Luft-/Erdwärmetauscher" der AG Solar NRW. Die ersten Messungen sind für Ende 1999 geplant.

Untersuchungsziele

Anhand der Projektdaten des EWT der FU Hagen wurde eine Auslegung mit *GAEA* durchgeführt. Das Ergebnis wurde mit der überschlägigen Auslegung des Ingenieurbüros Wortmann & Scheerer bzgl. folgender Aspekte verglichen:

- Berechnung des Wärmeaustauschs im EWT
- Berechnung der Lufttemperatur im Rohr und nach dem EWT

Probleme

Der EWT ist in einer langgezogenen Schleife verlegt, so dass möglicherweise Rohranfang und Rohrende sich gegenseitig beeinflussen. Dies lässt sich mit *GAEA* nicht ermitteln.

Die Messungen sollen frühestens Ende 1999 beginnen. Somit stehen für die Validierung von *GAEA* keine Messdaten des EWT der FU Hagen zur Verfügung.

3.3.4 EWT an der Fachhochschule in Jülich

Anlagenbeschreibung

Am Solar-Campus der Fachhochschule in Jülich sollen mehrere Energie- und Umweltkonzepte für Gebäude verglichen und bewertet werden. Unter anderem werden für die Belüftung der Seminarräume des neuen Auditoriums sowie einer Wohnraumzeile des Studentenwerks EWT zur Zuluftkonditionierung eingesetzt [13]. Der EWT des Auditoriums soll vor allem dazu beitragen, eine Überwärmung der Seminarräume im Sommer zu vermeiden. Die messtechnische Untersuchung der Anlagen ist Bestandteil des Verbundprojekts "Luft-/Erdwärmetauscher" der AG Solar NRW. Die ersten Messergebnisse wurden Ende Juli 1999 erfasst.

Der EWT des Auditoriums wurde als Beton-Einzelrohr mit einer Länge von 138 m bei einem Innen-Durchmesser von 1,0 m in einer Tiefe von 2 m unter der Erdoberfläche verlegt. Der maximale Volumenstrom beträgt 12.000 m³/h.

Untersuchungsziele

Anhand der Messdaten vom EWT des Auditoriums der FH in Jülich können folgende Aspekte von *GAEA* untersucht werden:

- Berechnung der Erdreichtemperaturen
- Berechnung des Wärmeaustauschs zwischen Rohr und Erdreich
- Berechnung des Wärmeaustauschs im EWT
- Berechnung der Lufttemperatur im Rohr und nach dem EWT
- Berechnung der Abwärme des Ventilators
- Verwendung dynamischer Wetterdaten / instationäres Verhalten
- Latente Wärme
- Wärmeübergang durch dicke Rohrwände
- Grenzen für *GAEA* bzgl. der Berechnung großer Volumenströme

Probleme

Aufgrund des späten Messbeginns Ende Juli 1999 liegen nur wenige Daten (ab 27.07.1999 bis zum Zeitpunkt des Berichts) für die Validierung von *GAEA* vor. Die Bauarbeiten im Umfeld

des Auditoriums sind noch nicht abgeschlossen, so dass möglicherweise noch mit einer Beeinflussung der thermischen Eigenschaften des Erdreichs zu rechnen ist.

3.3.5 EWT des Schwerzenbacherhofs in Schwerzenbach (Zürich)

Anlagenbeschreibung / Modellbeschreibung

Der Schwerzenbacherhof in Schwerzenbach/Zürich ist ein Büro- und Industriegebäude, dessen Lüftungsanlage mit einem EWT gekoppelt ist [33]. Die Luft wird nach dem Durchströmen des EWT in einer Wärmerückgewinnungsanlage weiter konditioniert. Der EWT dient der Vorwärmung von Luft und der Vermeidung des Einfrierens des Wärmetauschers der Wärmerückgewinnung im Winter. Im Sommer wird eine Kühlung des Gebäudes hauptsächlich durch natürliche Lüftung über Nacht erreicht. Der EWT hilft tagsüber bei der Vermeidung von Überwärmungsspitzen. Die Anlage wird seit 1990 vermessen.

Der EWT des Schwerzenbacherhof besteht aus 43 Kunststoffrohren mit einer Länge von 23 m und einem Innendurchmesser von 230 mm. Das gesamte Rohrsystem inkl. Luftzufuhr und -abfuhr umfasst somit etwa 1.000 m. Die Rohre sind unterhalb des Gebäudes im Grundwasser verlegt. Die Verlegungstiefe unter der Erdoberfläche beträgt etwa 6,5 m, der Grundwasserspiegel liegt etwa 6 m oberhalb der Rohrebene. Der Ventilationsstrom durch den EWT beträgt bis etwa 18.500 m³/h.

Für die Berechnung von EWT wurde das Widerstands-Kapazitäten-Modell (WKM) entwickelt, das in einem numerischen Verfahren den Wärmeaustausch zwischen Rohr und Erdreich simuliert [16, 32].

Untersuchungsziele

Anhand der Messdaten des EWT des Schwerzenbacherhofs können folgende Aspekte von *GAEA* untersucht werden:

- Berechnung der Erdreichtemperaturen
- Berechnung des Wärmeaustauschs zwischen Rohr und Erdreich
- Berechnung des Wärmeaustauschs im EWT
- Berechnung der Lufttemperatur im Rohr und nach dem EWT
- Verwendung dynamischer Wetterdaten / instationäres Verhalten
- Berücksichtigung von Gebäudefundamenten
- Berücksichtigung von Grundwasser
- Berechnung von Rohrregistern
- Latente Wärme
- Analytische Berechnung vs. numerische Berechnung
- Grenzen für *GAEA* bzgl. der Berechnung großer Volumenströme

3.3.6 Fallstudie mit dem Widerstands-Kapazitäten-Modell (WKM)

Modellbeschreibung

Im Rahmen einer ausführlichen Diplomarbeit zu EWT (mit umfangreicher Vorstellung von Beispielen und Berechnungsmodellen) an der Fachhochschule Köln [8] wurden Berechnungen zur Auslegung von EWT auf Basis eines Widerstands-Kapazitäten-Modells (WKM) durchgeführt, wie es auch bei der Berechnung des EWT des Schwerzenbacherhofs verwendet wurde [16, 32]. Ziel der Untersuchung war die Abschätzung des Potenzials für EWT in einem

gewerblich genutzten Gebäude mit einer Nutzung an fünf Tagen pro Woche von jeweils 8.00 bis 17.00 Uhr. Parallel zur Berechnung mit dem WKM wurden auch Berechnungen mit *GAEA* erstellt.

Untersuchungsziele

Anhand des Vergleichs mit dem WKM können hier folgende Aspekte von GAEA untersucht werden:

- Berechnung des Wärmeaustauschs im EWT
- Berechnung der Lufttemperatur im Rohr und nach dem EWT
- Verwendung dynamischer Wetterdaten / instationäres Verhalten
- Analytische Berechnung vs. numerische Berechnung

Probleme

Trotz mehrfacher Nachfragen stand die Diplomarbeit für die Validierung von *GAEA* leider bis zum Abschluss der Berechnungen nicht zur Verfügung. Die Vergleichsmöglichkeit beider Modelle beschränkt sich deshalb auf einen Briefwechsel des Verfassers der Diplomarbeit mit dem Fachgebiet Bauphysik & Solarenergie.

3.3.7 EWT des Energieautarken Solarhaus in Freiburg

Anlagenbeschreibung

Am Energieautarken Solarhaus in Freiburg sorgt ein EWT bei Bedarf für die Vorwärmung bzw. Vorkühlung der Zuluft zum Gebäude [29]. Der EWT ist dabei in einen umfangreichen Verbund energietechnischer Komponenten eingebunden, die zusammen die autarke Energieversorgung des Gebäudes sicherstellen sollen. Das vor allem auch Forschungszwecken dienende Gebäude wurde Ende 1992 fertiggestellt und in Betrieb genommen.

Probleme

Der EWT des Autarken Solarhaus in Freiburg endet im Keller des Gebäudes. Der Einfluss, den der Wärmeaustausch zwischen Keller und EWT auf die Lufttemperatur in den letzten Metern des EWT ausübt, ist nur schwer zu bestimmen. Rittenhofer [27] schreibt von einer Temperaturerhöhung von 1,3 K, die allerdings nicht durch Messungen belegt ist. Da außerdem Unstimmigkeiten in den zur Verfügung stehenden Messdaten für den Zeitraum 1994 bis Mitte 1996 nicht geklärt werden konnten, wurde auf eine Vergleich von *GAEA* mit Messdaten des EWT des Autarken Solarhaus in Freiburg verzichtet.

3.3.8 Planungshilfe der Fa. Heliograph

Modellbeschreibung

Die Planungshilfe zur Dimensionierung von Erdwärmetauschern (EWT) der Firma Heliograph [12] beschreibt anhand von Diagrammen und Tabellen die Auslegung von EWT für Volumenströme von 300 m³/h bis 10.000 m³/h. Nach Festlegung des Volumenstroms werden in sechs Schritten der Durchmesser und die Länge des EWT, die erzielbare Heiz-/Kühlleistung sowie die höchste und tiefste Temperatur nach dem EWT, der Jahresheiz- bzw. –kühlbeitrag, die jährlich benötigte Ventilatorenergie und die mittleren monatlichen Luftaustrittstemperaturen bestimmt.
Probleme

Die Empfehlungen der Planungshilfe ermöglichen nur eine sehr grobe Auslegung von Einzelrohr-Erdwärmetauschern. Die Aussagen über Heiz- und Kühlbeitrag eines EWT zur Gebäudeklimatisierung beschränken sich auf Monats- bzw. Jahressummen, ebenso werden Austrittstemperaturen für die Luft nach dem EWT nur als monatliche Mittelwerte zusammengefasst. Sämtliche Angaben gelten nur für das Klima des Testreferenzjahres "Essen" (Ruhrgebiet und weitere Ballungsgebiete des Flachlands) und sind nicht auf andere Klimagebiete übertragbar. Aufgrund dieser Einschränkungen wurde die Planungshilfe nicht zur Überprüfung von *GAEA* verwendet.

4 Ergebnisse der Überprüfung

4.1 EWT des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Köln

Der EWT des DLR besteht aus vier Systemen, die parallel betrieben werden. Je ein Einzelrohr und ein Rohrregister sind in zwei verschiedenen Tiefen im Erdreich verlegt, um so einen Vergleich des Verhaltens der Systeme zu Forschungszwecken zu ermöglichen. Die einzelnen Systeme werden wie folgt bezeichnet:

- flaches Einzelrohr mit Verlegungstiefe 1,5 m: ER_{1,5}
- tiefes Einzelrohr mit Verlegungstiefe 3,0 m: $ER_{3,0}$
- flaches Rohrregister mit Verlegungstiefe 1,5 m: RR_{1,5}
- tiefes Rohrregister mit Verlegungstiefe 3,0 m: RR_{3,0}

Tabelle 4.1 fasst die Eingabedaten für die Berechnung der einzelnen Systeme mit GAEA zusammen.

Tabelle 4.1: Eingabedaten der *GAEA*-Projektdateien zur Überprüfung der Auslegung des EWT am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).

ER1 5:		Klima:	
Rohranzahl:	1	Wetterdaten aus Datei	
Rohrlänge ¹ :	40.0 m	Maximale Monatsmitteltemperatur 1996	: 16.2 °C
Verlegungstiefe:	1.5 m	Maximale Monatsmitteltemperatur 1997	′: 18.7 °C
ER ₃₀ :	.,	Jahresmitteltemperatur 1996:	8.3 °C
Rohranzahl:	1	Jahresmitteltemperatur 1997	7.5 °C
Rohrlänge ¹ :	40.0 m	Minimale Monatsmitteltemperatur 1996	0.4 °C
Verlegungstiefe:	3.0 m	Minimale Monatsmitteltemperatur 1997	-3.6 °C
RR1.5:	,	•	,
Rohranzahl:	5		
Rohrlänge ¹ :	35,6 m		
Abstand zwischen den Rohrmitten:	0,7 m		
Verlegungstiefe:	1,5 m		
RR _{3.0} :			
Rohranzahl:	5		
Rohrlänge ¹ :	35,6 m		
Abstand zwischen den Rohrmitten:	0,7 m		
Verlegungstiefe:	3,0 m		
für alle Rohre:			
Rohrdurchmesser:	300 mm		
EWT-Betrieb:		Erdreich:	
Ventilationsstrom aus Datei:	03.660 m³/h	Bodentyp: leh	mig feucht
ER _{1,5} , ER _{3,0} :	0305 m³/h	Dichte: 2.1	00,0 kg/m³
RR _{1,5} , RR _{3,0} :	01.530 m³/h	Wärmekapazität: 1,34	4 kJ/(kg K)
Ventilatorposition: nach EWT	(Saugbetrieb)	Wärmeleitfähigkeit: 1,4	9 W/(m K)
		Grundwassertiefe:	20,0 m

¹ Zusätzlich zur eigentlichen Rohrlänge des Systems wird die Länge der Verteilkanäle teilweise für die Berechnung des EWT in *GAEA* berücksichtigt. Eine exakte Abstimmung mit den vorgenommenen Messungen ist dabei leider nicht möglich, da weder die Volumenströme durch die einzelnen Rohre noch die Lufttemperaturen an den Rohranfängen gemessen wurden. Der Anteil, den die Luftzufuhrstrecken am Wärmeaustausch des EWT haben, lässt sich also nicht rekonstruieren.

4.1.1 Berechnung der Erdreichtemperaturen

In Abbildung 4.1 ist zu erkennen, dass die von *GAEA* berechneten ungestörten Erdreichtemperaturen insbesondere im Sommer teilweise deutlich von den am EWT des DLR gemessenen Erdreichtemperaturen abseits der Rohre abweichen. An einigen markierten Zeitpunkten (A bis C) lässt sich zeigen, dass die in verschiedenene Tiefen gemessene Erdreichtemperatur auf Einflüsse der Umgebungslufttemperatur reagiert: Eine länger andauernde Periode hoher Umgebungslufttemperaturen führt zeitversetzt zu einer Erwärmung des Erdreichs, was im analytischen Modell mit sinusförmigem Erdtemperaturverlauf nicht berücksichtigt wird.

Da die Erdreicheigenschaften beim EWT des DLR nur ungenügend bekannt sind, wurde versucht, aus der Art der Fortpflanzung der Temperaturwellen von der Umgebungsluft in das Erdreich mit Hilfe der Wärmeleitungsgleichung Aussagen über die Temperaturleitfähigkeit des Erdreichs zu gewinnen.

Die Wärmeleitungsgleichung beschreibt den Zusammenhang zwischen der zeitlichen und örtlichen Temperaturänderung bei der Wärmeleitung innerhalb eines homogenen Körpers, hier innerhalb des Erdreichs:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$
 4.1

mit:

 $\begin{array}{lll} T & = Temperatur in K \\ t & = Zeit in s \\ \lambda & = Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs in W/(m K) \\ \rho c & = volumenbezogene Wärmekapazität des Erdreichs in J/(m³ K) \\ x & = Tiefe des Erdreichs in m \end{array}$

Aus der Wärmeleitungsgleichung lässt sich eine material- und zeitabhängige Eindringtiefe δ (t) abschätzen, die die Fortpflanzung der Temperaturwelle in das Erdreich beschreibt:

$$\delta(t) = \sqrt{4\pi a t}$$
 mit $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ 4.2

mit:

 δ (t) = Eindringtiefe einer Temperaturwelle in das Erdreich in m

a = Temperaturleitfähigkeit des Erdreichs in m²/s

Somit kann aus der zeitlichen Verzögerung der Temperaturwelle bei der Fortpflanzung im Erdreich die Temperaturleitfähigkeit a des Erdreichs für die markierten Zeitpunkte in Abbildung 4.1 in verschiedenen Tiefen bestimmt werden:

$$a = \frac{x^2}{4\pi \,\Delta t_{\text{Welle}}(x)} \tag{4.3}$$

mit:

 $\Delta t_{Welle}(x) = tiefenabhängige zeitliche Verzögerung der Temperaturwelle bei der Fortpflanzung im Erdreich in s$

40





- Gemessene Erdreichtemperatur in 1,5 m Tiefe (mehrere Messpunkte) in °C

- Berechnete Erdreichtemperatur in 1,5 m Tiefe (mehrere Segmente) in °C



EWT am DLR: Erdreichtemperatur (3,0 m Tiefe)

Umgebungstemperatur in °C

Gemessene Erdreichtemperatur in 3,0 m Tiefe (mehrere Messpunkte) in °C
 Berechnete Erdreichtemperatur in 3,0 m Tiefe (mehrere Segmente) in °C

Abbildung 4.1: Jahresverlauf der Erdreichtemperaturen am EWT des DLR in 1,5 m Tiefe (oben) und 3,0 m Tiefe (unten). Die Markierungen A, B und C bezeichnen Zeitpunkte, an denen die Fortpflanzung einer Temperaturwelle der Umgebungsluft in das Erdreich deutlich wird.



EWT am DLR: Gemessene Erdreichtemperatur (0,2 m Tiefe)

- Gemessene Erdreichtemperatur in 0.2 m Tiefe in °C





Umgebungstemperatur in °C
 Berechnete Erdreichtemperatur in 0,2 m Tiefe in °C

Abbildung 4.2: Jahresverlauf der Erdreichtemperaturen am EWT des DLR in 0,2 m Tiefe laut Messung (oben) und Berechnung mit *GAEA* (unten).

Aus den Messwerten zur Umgebungslufttemperatur und zu den Erdreichtemperaturen am EWT des DLR (Abbildung 4.1) wird nun durch Anfitten von Sinus-Halbwellen an die anregende Funktion der Umgebungslufttemperatur und Vergleich mit dem stärksten Anstieg der Erdreichtemperatur die

der Erdreichtemperatur die zeitliche Verzögerung Δt_{Welle} der Temperaturwelle bestimmt, um daraus die Temperaturleitfähigkeit a zu ermitteln. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst.

Aus den Materialeigenschaften des für den am EWT des DLR angenommenen Bodentyps (siehe Tabelle 4.1) berechnet sich die TemperaturleitfähigTabelle 4.2: Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit des Erdreichs am EWT des DLR aus der Fortpflanzung von Temperaturwellen.

Markierung	zeitl. Verzögerung ∆t _{welle} in h	Temp.leitfähigkeit a in 10 ⁻⁷ m²/s
A in 1,5 m T.	68 ± 5	7,31 ± 0,54
В "	80 ± 5	6,22 ± 0,39
С "	92 ± 5	5,41 ± 1,30
A in 3,0 m T.	74 ± 5	26,9 ± 1,80
В "	74 ± 5	26,9 ± 1,80
C "	86 ± 5	23,1 ± 1,35

keit zu $a = 5,29 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Die aus der Auswertung der Fortpflanzung von Temperaturwellen in das Erdreich ermittelten Werte für die Temperaturleitfähigkeit a erweisen sich als höher als die für den Bodentyp erwarteten. Insbesondere für das Erdreich in 3,0 m Tiefe ergäben sich damit unverhältnismäßig hohe Temperaturleitfähigkeitswerte.

Auffällig ist auch die große Ähnlichkeit in den Temperaturverläufen des Erdreichs in 1,5 m bzw. 3,0 m Tiefe. Nach der Theorie der Temperaturfortpflanzung würde in größerer Tiefe eine größere Dämpfung und größere zeitliche Verzögerung erwartet. Mögliche Erklärungen sind, dass die Temperatur des Erdreichs an den Messpunkten von lokalen Phänomenen beeinflusst ist – z.B. Unregelmäßigkeiten in der Erdschichtung aufgrund der Verlegearbeiten beim Bau des EWT – oder trotz des Abstands von 2,8 m zu den Rohren und trotz des sporadischen Betriebs des EWT im untersuchten Zeitraum durch den EWT beeinflusst wird.

4.1.2 Berechnung der Temperatur oberflächennaher Erdschichten

In Abbildung 4.2 ist zu erkennen, dass auch für oberflächennahe Erdschichten die Berechnungsergebnisses von *GAEA* nicht mit den Messergebnisse am EWT des DLR übereinstimmen. Die berechneten Werte folgen fast deckungsgleich dem Verlauf der Umgebungslufttemperatur, während die Messwerte nur eine geringe Schwankung aufweisen.

Wie schon bei den tieferen Erdschichten wurde auch hier versucht, anhand der Wärmeleitungsgleichung 4.1 aus den Messwerten eine Aussage über die Temperaturleitfähigkeit des Erdreichs zu gewinnen. Vereinfachend wird angenommen, dass die Anregung der Temperaturwelle im Erdreich durch die Umgebungsluft an der Erdoberfläche als Sinuswelle beschrieben werden kann. Der Wärmeübergang an der Erdoberfläche wird als widerstandslos angenommen. Die Lösung der Wärmeleitungsgleichung 4.1 führt dann zur bereits bekannten Temperaturverlaufsgleichung 2.2, jedoch mit veränderten Parametern:

$$\vartheta_{\mathsf{E},\mathsf{Welle}}\left(\mathsf{x},\mathsf{t}\right) = \vartheta_{\mathsf{E},0}\left(\mathsf{x},\mathsf{t}\right) + \Delta\mathsf{T}_{\mathsf{Welle},\mathsf{S}} \cdot e^{-\xi} \cos\!\left(2\pi \frac{\mathsf{t}}{\mathsf{t}_{0,\mathsf{Welle}}} - \xi\right)$$
4.4

mit:

$\vartheta_{E,Welle}$	= Erdreichtemperatur aufgrund der Anregung durch die Temperaturwelle an der Erdoberfläche in °C
$\vartheta_{E,0}$	= (von der Temperaturwelle) ungestörte Erdreichtemperatur in °C
$\Delta T_{\text{Welle,S}}$	= Amplitude der Temperaturwelle an der Erdoberfläche in K
ξ	= dimensionsloser Parameter für die "thermische Tiefe" des Erdreichs
t _{0,Welle}	= Dauer der Anregung (= Periode der Sinuswelle) in s

Aus der Dämpfungsfunktion $e^{-\xi}$ in Gleichung 4.4 ergibt sich eine Möglichkeit zur Bestimmung der thermischen Tiefe ξ :

$$\xi = -\ln \frac{\Delta T_{\text{Welle}}(x)}{\Delta T_{\text{Welle},S}}$$
4.5

mit:

 ΔT_{Welle} = Amplitude der Temperaturwelle im Erdreich in K

Mit Gleichung 2.3 lässt sich die Temperaturleitfähigkeit a des Erdreichs aus der thermischen Tiefe ξ und der realen Tiefe x bestimmen:

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} = \frac{\pi}{t_{0,Welle}} \cdot \left(\frac{x}{\xi}\right)^2$$
 4.6

Tabelle 4.3 beschreibt die Dämpfung der Temperaturwelle, wie sie aus dem Vergleich der Tagesamplitude der Messwerte der Umgebungslufttemperatur und der Erdreichtemperatur in 0,2 m Tiefe bestimmt wurde. Die Anregungsdauer ist dann $t_{0,Welle} = 1 d = 86.400 s$. Die

Tabelle 4.3: Dämpfung der Temperaturwelle in das Erdreich am EWT des DLR.

mittlere	mittlere	mittlere	Temp
Amplitude	Amplitude	dimlose	leitfähigkeit
des Temp	des Temp	thermische	a in 10 ⁻⁷ m²/s
verlaufs der	verlaufs des	Tiefe	
Umgebungs-	Erdreichs in	$\succeq \Delta T_{Welle}(x)$	
luft	0,2 m Tiefe	$\zeta = -\Pi \Delta T_{Welle,S}$	
$\Delta T_{\text{Welle,S}}$ in K	ΔT_{Welle} in K		
4,6	0,2	3.3 ± 0.6	1.4 ± 0.6

thermische Tiefe ξ wurde aus Einzelauswertungen aller Tage bestimmt, an denen die Amplitude der Umgebungslufttemperatur wenigstens 2,5 K betrug.

eile(x)
Veile,SDie ermittelte Temperaturleit-
fähigkeit a ist im gesamten
Jahresverlauf deutlich nied-
riger als der theoretische Wert

von a = $5,29 \cdot 10^{-7}$ m²/s. Dies zeigt den Einfluss des Wärmewiderstands beim Wärmeübergang an der Erdoberfläche, wo im analytischen Berechnungsmodell ein widerstandsloser Wärmetransport angenommen wird. Für die Auslegung von EWT macht dies jedoch keinen Unterschied, da EWT in größeren Tiefen verlegt werden, in denen auch im analytischen Berechnungsmodell von *GAEA* kein Einfluss der Tagesschwankungen der Umgebungslufttemperatur spürbar ist.

4.1.3 Berechnung der Lufttemperatur im Rohr und nach dem EWT

Der Vergleich der Lufttemperatur in den Rohren und nach den Rohren zeigt, dass *GAEA* für die Einzelrohre und das flach verlegte Rohrregister Temperaturen ermittelt, die in guter Übereinstimmung mit den Messergebnissen liegen – nicht jedoch für das tief verlegte Rohrregister. Abbildung 4.3 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Temperaturdifferenzen zwischen den von *GAEA* berechneten Lufttemperaturen am Ende der Einzelrohre des EWT des DLR und den entsprechenden Messwerten für 1996. Abbildung 4.4 zeigt diese Häufigkeitsverteilung der Temperaturen am Ende der Rohrregister.¹

¹ Die ebenfalls durchgeführten Vergleiche der gemessenen und berechneten Lufttemperaturen nach der Mitte der Rohrlänge zeigen das selbe Ergebnis und sind hier nicht eigens dargestellt.



Normierte Übereinstimmung GAEA - Vergleichswert

Abbildung 4.3a: Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Werte für die Luftaustrittstemperatur nach dem flachen Einzelrohr $ER_{1,5}$ des EWT des DLR (100 % entspricht 458 h).



Normierte Übereinstimmung GAEA - Vergleichswert

Abbildung 4.3b: Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Werte für die Luftaustrittstemperatur nach dem tiefen Einzelrohr $ER_{3,0}$ des EWT des DLR (100 % entspricht 458 h).



Normierte Übereinstimmung GAEA - Vergleichswert

Abbildung 4.4a: Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Werte für die Luftaustrittstemperatur nach dem flachen Rohrregister $RR_{1,5}$ des EWT des DLR (100 % entspricht 458 h).



Normierte Übereinstimmung GAEA - Vergleichswert

Abbildung 4.4b: Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Werte für die Luftaustrittstemperatur nach dem tiefen Rohrregister $RR_{3,0}$ des EWT des DLR (100 % entspricht 458 h).

Generell zeigt sich, dass die Luftaustrittstemperaturen von *GAEA* zu niedrig berechnet werden. Dies liegt an den von *GAEA* im Vergleich zur Messung zu niedrig bestimmten Erdreichtemperaturen (vgl. Abbildung 4.1) aufgrund der zu niedrig angenommenen Temperaturleitfähigkeit des Erdreichs (siehe oben). Dies führt auch dazu, dass der von *GAEA* berechnete Wärmeaustausch im EWT zu allen Zeiten niedriger ist als der gemessene, wodurch vor allem die Temperaturanhebung der Luft im EWT im Winter zu gering berechnet wird. Tabelle 4.4 fasst die Ergebnisse der Temperaturvergleiche zwischen *GAEA* und den Messergebnissen für die EWT-Systeme des EWT des DLR zusammen.

	Minimalwert der Temperatur in °C	Mittelwert der Temperatur in °C	Maximalwert der Temperatur in °C	Prozent. Über- einstimmung GAEA – Vergleichswert innerhalb ± 2,25 K
Umgebungsluft	-17,6	8,3	33,7	
Luft nach ER _{1,5}				
Messung	-2,2	5,7	20,5	
GAEA	-5,9	3,9	19,9	77 %
Luft nach ER _{3,0}				
Messung	-1,0	6,5	19,3	
GAEA	-5,8	4,2	19,4	50 %
Luft nach RR _{1,5}				
Messung	-4,6	4,9	22,2	
GAEA	-11,3	2,4	23,9	41 %
Luft nach RR _{3,0}				
Messung	-3,8	5,4	20,3	
GAEA	-12,6	2,2	25,1	11%

Tabelle 4.4: Charakteristische Temperaturwerte am EWT des DLR.

4.1.4 Variation der Temperaturleitfähigkeit des Erdreichs / Variation des Grundwasserspiegels

Aufgrund der Ergebnisse zur Abschätzung der Temperaturleitzahl des Erdreichs (siehe 4.1.1 Berechnung der Erdreichtemperaturen) wurde nun im Rahmen einer Faktorenanalyse untersucht, welche Auswirkung die Variation der Bodeneigenschaften auf die Berechnung der Luftaustrittstemperaturen mit *GAEA* hat (vergleiche zu diesem Verfahren auch [30]).

Schon durch eine geringfügige Erhöhung der Temperaturleitzahl lassen sich die Abweichungen der Berechnungsergebnisse von den Messergebnissen bei den Luftaustrittstemperaturen nach den Rohrregistern deutlich verringern. Abbildung 4.5 zeigt dies exemplarisch für das flach verlegte Rohrregister während eines längeren durchgehenden Betriebszeitraums im Dezember 1996. Die Temperaturleitzahl wurde hier vom aufgrund des Bodentyps bestimmten Wert a = $5,29 \cdot 10^{-7}$ m²/s auf a = $5,6 \cdot 10^{-7}$ m²/s angehoben. Abbildung 4.6 und Abbildung 4.7 stellen die bessere Übereinstimmung zwischen Berechnungsergebnissen und Messwerten bei dieser Veränderung der Temperaturleitzahl für das tief verlegte Rohrregister dar. Abbildung 4.6 zeigt dabei das Temperaturverhalten während des Sommers, wobei im Diagramm die meist sehr kurzen Betriebsintervalle zu einer Kurve zusammengefasst sind. Abbildung 4.7 zeigt das Temperaturverhalten während des durchgehenden Betriebs im Dezember 1996.

Eine weitere Variationsmöglichkeit zur Beeinflussung des Wärmeaustauschs zwischen EWT und Erdreich besteht in der Variation der Tiefe des Grundwasserspiegels. Für die Berechnung

des EWT des DLR wurde zunächst von einer großen Tiefe des Grundwassers ausgegangen ($S_{GW} = 20$ m), so dass keine Beeinflussung des Verhaltens des EWT auftrat. Eine Anhebung des Grundwasserspiegels bis knapp unter die Rohre des EWT ($S_{GW} = 3,2$ m) beeinflusst die Erdtemperatur an der Rohrwand während des Betriebs des EWT, auch wenn davon ausgegangen wird, dass das Grundwasser das Temperaturprofil des ungestörten Erdreichs unverändert lässt (siehe 2.2.4 Berücksichtigung von Grundwasser). Ein solcher Effekt ist – außer durch Grundwasser – z.B. durch das Vorhandensein von Sickerwasser vorstellbar, das an einer wasserundurchlässigen Schicht gestaut wird.

Die Veränderung der Erdtemperatur an der Rohrwand wirkt sich auf den Wärmeaustausch zwischen Rohr und Erdreich und damit auf die Temperatur der Luft im Rohr aus. Abbildung 4.8 zeigt, wie sich unter dieser Annahme die von *GAEA* berechneten Luftaustrittstemperaturen nach den Rohrregistern des EWT des DLR für den durchgehenden Betriebszeitraum im Dezember 1996 weiter an die Messergebnisse angleichen.

Auch wenn die Überlegungen zur Veränderung der Temperaturleitfähigkeit des Erdreichs oder des Grundwasserspiegels am EWT des DLR nur Spekulation bleiben, da keine verlässlichen Angaben zu den Bodeneigenschaften vorhanden sind, so zeigen sie doch, welchen Einfluss diese Werte auf die Berechnung des Verhaltens von EWT haben. In diesem Sinne sind alle Arbeiten zum Vergleich von Mess- und Berechnungsergebnissen an EWT-Systemen mit Vorsicht zu behandeln, solange keine ausreichend genauen Daten für die Randbedingungen insbesondere der Erdreicheigenschaften zur Verfügung stehen.

4.1.5 Berechnung von Rohrregistern im Vergleich zu Einzelrohren

Die Auswertung der Messungen am EWT des DLR ergibt, dass die Rohrregister geringere Erträge bringen als die in gleicher Tiefe verlegten Einzelrohre. Dies ist eine Auswirkung der gegenseitigen Beeinflussung der Rohre im Register (siehe 2.2.5 Berechnung von Rohrregistern). Die Berechnung von *GAEA* spiegelt dieses Ergebnis wider. Bei Berücksichtigung der Berechnungsvariante mit höherer Temperaturleitfähigkeit des Erdreichs ergibt sich für die flach verlegten Rohre auch eine gute quantitative Übereinstimmung der Ertragsveränderung mit den Messwerten. Die Ertragsveränderung bei den tief verlegten Rohren wird von *GAEA* hingegen deutlich überschätzt. Tabelle 4.5 fasst die Wärmeaufnahme und -abgabe der Einzelrohre und Rohrregister am EWT des DLR zusammen und vergleicht sie mit den entsprechenden Berechnungsergebnissen von *GAEA*.

Tabelle 4.5: Vergleich der Wärmeflüsse zwischen Erdreich und Einzelrohr, bzw. Rohrregister am EWT des DLR.

	Wärmeaufnah- me (Heizbeitrag) pro Rohr in kWh für 1996	Veränderung Rohrregister gegenüber Einzelrohr	Wärmeabgabe (Kühlbeitrag) pro Rohr in kWh für 1996	Veränderung Rohrregister gegenüber Einzelrohr
ER _{1,5}				
Messung	296,7		67,7	
GAEA	274,3		74,7	
ER _{3,0}				
Messung	353,2		84,3	
GAEA	323,5		83,7	
RR _{1,5}				
Messung	256,1	-13,7 %	61,1	-9,8 %
GAEA	235,3	-14,2 %	61,0	-18,3 %
RR _{3,0}				
Messung	294,2	-16,7 %	79,6	-5,6 %
GAEA	236,3	-27,0 %	59,8	-28,6 %



EWT am DLR: Lufttemperatur nach Rohrregister in 1,5 m Tiefe Temperaturleitfähigkeit a = 5,29 * 10-7 m²/s

Abbildung 4.5: Vergleich der Luftaustrittstemperaturen nach dem flach verlegten Rohrregister des EWT des DLR im Winter 1996 für verschiedene Temperaturleitfähigkeiten des Erdreichs.





Umgebungstemperatur in °C

Gemessene Lufttemperatur nach dem EWT in °C

Berechnete Lufttemperatur nach dem EWT in °C





Umgebungstemperatur in °C

- Gemessene Lufttemperatur nach dem EWT in °C

Berechnete Lufttemperatur nach dem EWT in °C

Abbildung 4.6: Vergleich der Luftaustrittstemperaturen nach dem tief verlegten Rohrregister des EWT des DLR im Sommer 1996 für verschiedene Temperaturleitfähigkeiten des Erdreichs.





EWT am DLR: Lufttemperatur nach Rohrregister in 3,0 m Tiefe Temperaturleitfähigkeit a = 5,6 * 10⁻⁷ m²/s



Abbildung 4.7: Vergleich der Luftaustrittstemperaturen nach dem tief verlegten Rohrregister des EWT des DLR im Winter 1996 für verschiedene Temperaturleitfähigkeiten des Erdreichs.



EWT am DLR: Lufttemperatur nach Rohrregister in 1,5 m Tiefe Temperaturleitfähigkeit a = $5,6 \times 10^{-7}$ m²/s + Grundwassereinfluss

EWT am DLR: Lufttemperatur nach Rohrregister in 3,0 m Tiefe Temperaturleitfähigkeit a = 5,6 * 10^{-7} m²/s + Grundwassereinfluss



Abbildung 4.8: Luftaustrittstemperaturen nach den Rohrregistern des EWT des DLR im Winter 1996 bei Annahme eines Grundwassereinflusses.

4.2 EWT des L.E.O. in Köln / EWT-Modell der AG Klimaforschung, Ruhr-Universität Bochum

In Anlehnung an die Daten des EWT des Low Energy Office (L.E.O.) in Köln wurde *GAEA* mit dem numerischen EWT-Modell der AG Klimaforschung der Ruhr-Universität Bochum (RUB) verglichen. Tabelle 4.6 fasst die gemeinsamen Eingabedaten für beide Programme zusammen.

Tabelle 4.6: Eingabedaten zum EWT des Low Energy Office (L.E.O.) für den Vergleich von *GAEA* mit dem EWT-Modell der AG Klimaforschung der Ruhr-Universität Bochum (RUB).

Erdwärmetauscher:		Klima:	
Rohranzahl:	1	Wetterdaten aus Datei	
Rohrlänge:	87,0 m	Maximale Monatsmitteltemperatur	∵ 18,4 °C
Rohrdurchmesser:	800 mm	Jahresmitteltemperatur:	9,5 °C
Verlegungstiefe:	5,0 m	Minimale Monatsmitteltemperatur:	0,6 °C
Abstand zum Gebäude:	6,0 m		
EWT-Betrieb:		Erdreich:	
Ventilationsstrom:	4.000 m³/h	Bodentyp: b	enutzerdefiniert
Druckabfall im EWT:	59 Pa	Dichte:	1800,0 kg/m³
Ventilatorleistung:	0,65 kW	Wärmekapazität:	1,34 kJ/(kg K)
Ventilatorposition:	vor EWT (Schubbetrieb)	Wärmeleitfähigkeit:	1,45 W/(m K)
		Grundwassertiefe:	9,0 m

Abbildung 4.9 zeigt die Übereinstimmung der berechneten Lufttemperaturen nach dem EWT gemäß *GAEA* bzw. dem EWT-Modell nach [4]. Die Berechnungsergebnisse stimmen für das gesamte Jahr sehr gut überein, wobei die größten Abweichungen an einigen Stunden im Sommer auftreten. Alle Vergleichswerte liegen innerhalb eines Intervalls von maximal 2,25 K

Normierte Übereinstimmung GAEA - Vergleichswert



Abbildung 4.9: Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse für die Luftaustrittstemperatur nach dem EWT des L.E.O. gemäß *GAEA* und dem numerischen Modell nach [4] (100 % entspricht 8.760 h). Differenz für die Luftaustrittstemperatur nach dem EWT. Tabelle 4.7 vergleicht einige wichtige Temperaturwerte des EWT-Systems.

	Minimalwert der Temperatur in °C	Mittelwert der Temperatur in °C	Maximalwert der Temperatur in °C	Prozent. Über- einstimmung <i>GAEA</i> – Vergleichswert innerhalb ± 2,25 K
Umgebungsluft	-11,3	9,6	32,5	
Luft nach EWT				
num. Modell	-6,3	9,5	26,7	
GAEA	-7,6	10,1	29,0	100 %

Tabelle 4.7: Charakteristische	Temperaturwerte am	EWT des L.E.O.
--------------------------------	--------------------	----------------

4.3 EWT an der FernUniversität Hagen

Da der EWT an der FernUniversität zum Zeitpunkt der Untersuchungen noch nicht in Betrieb ist, konnten im Rahmen der Überprüfung von *GAEA* mit Messdaten nur Fallstudien auf der Basis der vom Ingenieurbüro Wortmann & Scheerer durchgeführten Auslegung des EWT durchgeführt werden. Zu beachten ist, dass *GAEA* eigentlich keine Betonrohre berechnen kann (wie beim EWT in Hagen verwendet), sondern nur dünnwandige Rohre - also Kunststoffrohre (siehe Kapitel 2.3.3 Wärmeübergang durch dicke Rohrwände). Ausserdem ist *GAEA* für geringere Volumenströme im Einzelrohr geplant, als sie in Hagen auftreten (ca. 11.000 m³/h).

4.3.1 Überprüfung der Auslegung des EWT

Aufgrund der Angaben des Ingenieurbüros Wortmann & Scheerer [31] wurde eine *GAEA*-Projektdatei erstellt, deren wesentliche Eingabedaten in Tabelle 4.8 zusammengefasst sind.

Erdwärmetauscher:		Klima:	
Rohranzahl:	1	Klimaregion 4: "Mittelgebirge of	ne Hochlagen"
Rohrlänge:	140,0 m	Maximale Monatsmitteltemperatur:	17,4 °C
Rohrdurchmesser:	800 mm	Jahresmitteltemperatur:	9,1 °C
Verlegungstiefe:	2,0 m	Minimale Monatsmitteltemperatur:	0,8 °C
Abstand zum Gebäude:	20,0 m		
EWT-Betrieb:		Erdreich:	
Ventilationsstrom:	11.000 m³/h	Bodentyp:	lehmig feucht
Druckabfall im EWT:	128 Pa	Dichte:	1800,0 kg/m ³
Ventilatorleistung:	1,0 kW	Wärmekapazität:	1,34 kJ/(kg K)
Ventilatorposition:	vor EWT (Schubbetrieb)	Wärmeleitfähigkeit:	1,49 W/(m K)
-		Grundwassertiefe:	5,0 m

Tabelle 4.8: Eingabedaten der GAEA-Projektdatei zur Überprüfung der Auslegung des EWT an der FernUniversität Hagen.

Als Ergebnis der Berechnung mit *GAEA* ergibt sich eine Temperaturabsenkung der Luft beim Durchströmen des EWT am wärmsten Tag des Jahres von 29,9 °C auf 27,5 °C. Die größte Temperaturanhebung im Winter ist von -13,2 °C auf -10,2 °C (siehe Abbildung 4.10a). Die Auslegung des Ingenieurbüros Wortmann & Scheerer ergab eine maximale Temperaturabsenkung im Sommer von 32 °C auf 23 °C und eine maximale Temperaturanhebung im Winter von -10 °C auf -2 °C. Die von *GAEA* berechnete Leistung des EWT ist also deutlich geringer.





Abbildung 4.10a: Temperaturverlauf im EWT der FU Hagen laut *GAEA* am wärmsten und kältesten Tag des Jahres (oben/unten; Eingabedaten gemäß Auslegung).



Abbildung 4.10b: Temperaturverlauf im EWT der FU Hagen laut *GAEA* am wärmsten und kältesten Tag des Jahres (oben/unten; Eingabedaten gemäß baulicher Ausführung).

4.3.2 Berechnung anhand des gebauten EWT

Anhand der Pläne zur baulichen Ausführung des EWT wurde eine weitere *GAEA*-Projektdatei erstellt, die leichte Unterschiede in den Eingabedaten gegenüber der Auslegungs-Projektdatei aufweist. Anhand der baulichen Situation an der FernUniversität Hagen wurde die Verlegungstiefe des EWT und dessen Abstand zu Gebäuden segmentweise bestimmt und in *GAEA* modelliert. Tabelle 4.9 fasst die Eingabedaten zusammen.

Tabelle 4.9: Eingabedaten der *GAEA*-Projektdatei anhand der Pläne zur baulichen Ausführung des EWT an der FernUniversität Hagen.

Erdwärmetauscher:		Klima:	
Rohranzahl:	1	Klimaregion 4: "Mittelgebirge ol	nne Hochlagen"
Rohrlänge:	140,0 m	Maximale Monatsmitteltemperatur:	17,4 °C
Rohrdurchmesser:	800 mm	Jahresmitteltemperatur:	9,1 °C
Mittlere Verlegungstiefe:	2,8 m	Minimale Monatsmitteltemperatur:	0,8 °C
Mittlerer Abstand zum G	ebäude: 4,8 m		
EWT-Betrieb:		Erdreich:	
Ventilationsstrom:	11.000 m³/h	Bodentyp:	lehmig feucht
Druckabfall im EWT:	128 Pa	Dichte:	1800,0 kg/m³
Ventilatorleistung:	1,0 kW	Wärmekapazität:	1,34 kJ/(kg K)
Ventilatorposition:	vor EWT (Schubbetrieb)	Wärmeleitfähigkeit:	1,49 W/(m K)
		Grundwassertiefe:	5,0 m

Abbildung 4.10b zeigt deutlich den Einfluss, den wechselnde Überdeckung des EWT mit Erdreich und variierende Gebäudeabstände auf den Verlauf der Erdreichtemperatur entlang des EWT haben. Dies spiegelt sich im Verlauf der Erdreichtemperatur an der Rohrwand wider, jedoch kaum im Verlauf der Lufttemperatur im Rohr. Insgesamt sind auch die Temperaturhübe ähnlich denen der Auslegungsuntersuchung. Als Ergebnis der Berechnung mit *GAEA* ergibt sich eine Temperaturabsenkung am wärmsten Tag des Jahres von 29,9 °C auf 27,4 °C. Die größte Temperaturanhebung im Winter ist von -13,2 °C auf -9,8 °C.

4.3.3 Variationen zum gebauten EWT

Ausgehend vom gebauten EWT wurden Änderungen des Layouts untersucht, um die Wirkung von Auslegungsänderungen abzuschätzen.

Wäre der EWT einen Meter tiefer verlegt worden, so hätte er eine mittlere Verlegetiefe von 3,8 m (bei wechselnder Überdeckung mit Erdreich). Als Ergebnis der Berechnung mit *GAEA* ergibt sich eine Temperaturabsenkung am wärmsten Tag des Jahres von 29,9 °C auf 26,7 °C. Die größte Temperaturahebung im Winter ist von -13,2 °C auf -9,2 °C. Dies bedeutet eine geringfügige Erhöhung der Temperaturhübe um 0,7 K bzw. 0,6 K am Ausgang des EWT.

Eine größere Ausführung des EWT mit einer Länge von 160 m und einem Durchmesser von 1000 mm bei gleicher Verlegungstiefe wie der tatsächlich gebaute EWT erzielt ein ähnliches Ergebnis wie der tiefer verlegte EWT. Die Lufttemperatur nach dem EWT am wärmsten Tag des Jahres beträgt ebenso 26,7 °C. Die Lufttemperatur nach dem EWT am kältesten Tag beträgt nun -9,1 °C.

Schließlich wurde untersucht, wie der EWT sich in einer Registerausführung verhielte. Da im Realfall vorhandene eine Rohr wurde um drei weitere gleichartige Rohre ergänzt. Dadurch dass der Luftstrom nun auf vier Rohre verteilt ist, verlängert sich die Verweilzeit der Luft im EWT und der gesamte Wärmeaustausch zwischen Luft und Rohr nimmt zu. Wie erwartet nehmen die Temperaturhübe deutlich zu. Am wärmsten Tag sinkt die Lufttemperatur beim Durchströmen des EWT von 29,9 °C auf 24,8 °C, am kältesten Tag steigt sie von -13,2 °C auf -6,9 °C. Selbstverständlich wäre die Ausführung des EWT als Rohrregister mit vier Rohren statt nur einem deutlich aufwendiger und teurer, so dass der größere energetische Ertrag nicht unbedingt eine größere Wirtschaftlichkeit des EWT bedeutet. Außerdem ist zu beachten, dass auch unter der Annahme eines Rohrregisters berechneten die GAEA von

Tabelle 4.10: Charakteristische Temperaturwerte am EWT der FU Hagen.

	Minimalwert der Temperatur in °C	Maximalwert der Temperatur in °C
Umgebungsluft	-13,2	29,9
Luft nach EWT Auslegung GAEA	-2,0	23,0
- Auslegung	-10,2	27,5
- Ausführung	-9,8	27,4
- EWT 1 m tiefer	-9,2	26,7
 größerer EWT 	-9,1	26,7
- Rohrregister	-6,9	24,8

Temperaturhübe geringer sind als die vom Ingenieurbüro Wortmann & Scheerer bei der Auslegung des EWT prognostizierten. Tabelle 4.10 vergleicht die Temperaturen gemäß den verschiedenen Auslegungen.

4.4 EWT an der Fachhochschule in Jülich

Auch der EWT am Auditorium des Solar-Campus der FH in Jülich besteht aus einem Betonrohr, das durch seine Wärmespeicherfähigkeit und den nicht vernachlässigbaren Widerstand bei der Wärmeleitung durch die Rohrwand die Wärmeaustauschprozesse zwischen der Luft im Rohr und dem Erdreich beeinflusst. Diese Effekte werden bei der Berechnung mit *GAEA* nicht berücksichtigt. Tabelle 4.11 fasst die Eingabedaten zum EWT der FH in Jülich für die Berechnung mit *GAEA* zusammen.

Tabelle 4.11: Eingabedaten der *GAEA*-Projektdatei zur Überprüfung der Auslegung des EWT am Auditorium des Solar-Campus der FH in Jülich.

Erdwärmetauscher:	Klima:
Rohranzahl: 1	Wetterdaten aus Datei, ergänzt durch Daten der
Rohrlänge: 138,0 m	Klimaregion 2: "Norddeutsches Tiefland"
Rohrdurchmesser: 1.000 mm	Maximale Monatsmitteltemperatur: 17,3 °C
Verlegungstiefe: gemäß baulicher Ausführung	Jahresmitteltemperatur: 8,8 °C
Abstand zum Gebäude: gemäß Lageplan	Minimale Monatsmitteltemperatur: 0,2 °C
EWT-Betrieb:	Erdreich:
Ventilationsstrom aus Datei: 011.300 m ³ /h	Bodentyp: lehmig feucht
Ventilatorposition: vor EWT (Schubbetrieb)	Dichte: 1800,0 kg/m ³
Ventilatorwirkungsgrad: 78 %	Wärmekapazität: 1,34 kJ/(kg K)
El. Ventilatorleistung: 1,439 kW	Wärmeleitfähigkeit: 1,49 W/(m K)
bei 3,33 m³/s und 338 Pa (total)	Grundwassertiefe: 20,0 m
Fester Druckabfall (Filter etc.): 300 Pa	

4.4.1 Berechnung der Erdreichtemperaturen

Zur Überprüfung der von *GAEA* berechneten ungestörten Erdreichtemperaturen wurden diese mit am EWT gemessenen Temperaturen verglichen, deren Messpunkte etwa 5 m von den Rohrmitten entfernt in gleicher Tiefe wie das Rohr positioniert sind. Eine Schwierigkeit ergibt sich daraus, dass die Überdeckung des EWT zum Zeitpunkt der Messungen noch nicht plangemäß erfolgt ist und außerdem die Messlanzen zum Teil nicht in die vorgesehene Tiefe eingebracht werden konnten [14, 15]. Statt einheitlich 2,0 m beträgt die Verlegungstiefe des Rohres entlang der Rohrlänge nun zwischen 1,5 m und 2,1 m, dies gilt ähnlich für die Messsensoren zur Messung der Erdreichtemperatur.

Für die untersuchten Betriebszeiträume sind die von *GAEA* berechneten Werte wie beim EWT des DLR zum Teil deutlich niedriger als die Messergebnisse (Abbildung 4.11). Auffällig ist allerdings vor allem die große Spannweite der gemessenen Erdtemperaturen (Temperaturunterschied bis etwa 5 K), eine Folge der unterschiedlichen Überdeckung der Sensoren mit Erdreich.

Eine mögliche Erklärung für die Abweichung der berechneten von den gemessenen Werten liegt darin, dass die Vorgeschichte des Wetters am Standort Jülich nicht bekannt ist. Die Wetterdaten vor Beginn der Messungen wurden für *GAEA* anhand einer typischen Klimadatei ermittelt, die selbstverständlich keinen Bezug zu dem tatsächlichen Wetterverlauf im Jahr 1999 aufweist. Zusätzlich wurde das Erdreich durch die Bautätigkeit am Solar-Campus insbesondere beim Verlegen des EWT empfindlich gestört, so dass die Erdreichtemperaturen nicht dem langfristigen Verhalten entsprechen dürften.

Die großen Unterschiede zwischen den an verschiedenen Punkten gemessenen Erdtemperaturen aufgrund der unterschiedlichen Verlegungstiefen lassen sich mit *GAEA* nur teilweise reproduzieren. Bei der Eingabe des Projekts zur Berechnung wurde versucht, die wechselnde Überdeckung des Rohres in die Projektdatei zu übernehmen. In *GAEA* kann so für 100 Rohrsegmente die Verlegungstiefe unabhängig angegeben werden. Die hieraus berechneten ungestörten Erdreichtemperaturen lassen sich jedoch nur bedingt mit den gemessenen Erdreichtemperaturen vergleichen, da die Tiefe der Messsensoren meist nicht mit der Rohrtiefe übereinstimmt. Sonstige lokale Störungen wie Inhomogenitäten im Erdreich sind nicht bekannt und können deshalb für die Berechnung nicht berücksichtigt werden. Der Abstand des EWT zum Gebäude wurde für die gesamte Länge des EWT berechnet und in *GAEA* modelliert. Das Gebäude hat jedoch – außer bei den letzten Metern des EWT – keinen nennenswerten Einfluss auf die berechneten Erdtemperaturen. Es ist unwahrscheinlich, dass der Gebäudeeinfluss sich so deutlich bei den Messergebnissen bemerkbar machen sollte.

4.4.2 Berechnung der Lufttemperatur nach dem EWT

Die Überprüfung der berechneten Luftaustrittstemperaturen zeigt, dass die von *GAEA* berechnete Leistung des EWT unter der tatsächlichen EWT-Leistung liegt. Dies folgt zum Teil aus den im Vergleich zur Messung von *GAEA* zu niedrig angenommenen Temperaturen im Erdreich. Weitere Abweichungen zwischen Berechnung und Messung ergeben sich aus der Wärmespeicherfähigkeit des Betonrohres, die zu einer Amplitudendämpfung in den Tagesgängen der Luftaustrittstemperatur vor allem im Sommer führt. Tabelle 4.12 fasst charakteristische Temperaturen am EWT der FH in Jülich zusammen. Abbildung 4.13 zeigt die Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Luftaustrittstemperaturen als Häufigkeitsverteilung der Temperaturdifferenzen. Abbildung 4.12 zeigt die Temperaturverläufe laut Messung und Berechnung für die untersuchten Betriebszeiträume im Sommer und Herbst.

	Minimalwert der Temperatur in °C	Mittelwert der Temperatur in °C	Maximalwert der Temperatur in °C	Prozent. Über- einstimmung GAEA – Vergleichswert innerhalb ± 2,25 K
Umgebungsluft	-1,2	10,6	28,0	
Luft nach EWT				
Messung	8,7	13,7	24,3	
GAEA	2,2	10,7	25,7	22 %

Tabelle 4.12: Charakteristische	Temperaturwerte am E	EWT der FH in Jülich.





EWT FH in Jülich: Erdreichtemperatur (2,0 m Tiefe) Temperaturleitfähigkeit a = 5,95 * 10⁻⁷ m²/s



Abbildung 4.11: Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Erdreichtemperaturen am EWT der FH in Jülich in Tiefe des Rohres während zweier Betriebszeiträume im Sommer (oben) und Herbst (unten).





Umgebungstemperatur in °C Gemessene Lufttemperatur nach dem EWT in °C Berechnete Lufttemperatur nach dem EWT in °C

EWT FH in Jülich: Luftaustrittstemperatur

Temperaturleitfähigkeit a = 5,95 * 10⁻⁷ m²/s



Abbildung 4.12: Luftaustrittstemperaturen nach dem EWT der FH in Jülich für Betriebszeiträume im Sommer (oben) und Herbst (unten).



Normierte Übereinstimmung GAEA - Vergleichswert

Abbildung 4.13: Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse gemäß *GAEA* mit den Messergebnissen für die Luftaustrittstemperatur nach dem EWT der FH in Jülich (100 % entspricht 1.007 h).

4.4.3 Berechnung des Wärmeaustauschs

Die Ergebnisse für die Berechnung des sensiblen Wärmeaustauschs zwischen Luft im Rohr und Rohr folgen den Ergebnissen für die Luftaustrittstemperatur: Die von *GAEA* berechnete Leistung des EWT ist im Vergleich zu den Messwerten zu gering. Zusätzlich findet im EWT durch Kondensation und Verdunstung von Wasser eine Umwandlung von latenter in sensible Wärme statt, die den Wärmeaustausch zwischen Luft im Rohr und Rohr sowie zwischen Rohr und Erdreich beeinflusst. Bei Annahme einer gleichbleibenden Temperatur der Luft im EWT (entspricht bei Annahme konstanter Materialeigenschaften gleichbleibender sensibler Wärme) führt das Auftreten von Kondensation zum Freiwerden latenter Wärme, die im einfachen Modell einer dünnen Rohrwand (ohne Wärmespeicherung) vom Rohr an das Erdreich abgegeben wird. Umgekehrt führt Verdunstung von Wasser zu einem Wärmefluss vom Erdreich an das Rohr. In *GAEA* werden Kondensations- und Verdunstungsprozesse im EWT nicht für die Berechnung berücksichtigt. Tabelle 4.13 fasst den Wärmeaustausch im EWT während des untersuchten Betriebszeitraums zusammen.

	Sensibler Wärmefluss zwischen Rohr und Luft im EWT in kWh		Umwandlung latenter Wärme im EWT in kWh		Gesamter Wärmefluss zwischen Erdreich und Rohr in kWh	
	Wärmeauf- nahme durch die Luft (Lufttempe- ratur steigt)	Wärmeabgabe durch die Luft (Lufttempe- ratur sinkt)	Verdunstung (Wärmeauf- nahme durch das Rohr)	Kondensation (Wärme- abgabe durch das Rohr)	Wärmeauf- nahme durch das Rohr	Wärmeabgabe durch das Rohr
Messung	950	801	442	48	1392	849
GAEA	516	285	-	-	516	285

Tabelle 4.13: Wärmeaustausch im EWT der FH in Jülich während des untersuchten Zeitraums von Juli bis Oktober 1999.

4.4.4 Berechnung der Ventilatorleistung

Die in den Messdaten zum EWT der FH in Jülich enthaltenen Angaben zur Ventilatorleistung (über die Messung der im Ventilator umgesetzten elektrischen Energie) sind höchst fraglich. Sie geben Werte an, die zum Teil dem Zehnfachen und zum Teil einem Zehntel der realistischerweise zu erwartenden Ventilatorleistung entsprechen. Für die Überprüfung mit *GAEA* wurde angenommen, dass die in den Messdaten angegebenen Einheiten falsch sind. Nach einer entsprechenden Korrektur der Messdaten stimmen diese auch mit den Veröffentlichungen zum Betrieb des EWT überein [15].

Der Vergleich der in *GAEA* berechneten Ventilatorleistung mit den (korrigierten) Messwerten zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der Werte. In [15] wird für den dort untersuchten Betriebszeitraum eine konstante elektrische Leistung des Schubventilators von 1,8 kW genannt. *GAEA* berechnet die nötige elektrische Leistung zum Luftvortrieb zu 1,34 kW. Während dieses Betriebszeitraums lagen annähernd Nennbedingungen bzgl. der Auslegung des Ventilators vor, so dass die gemessene und berechnete Leistung mit der in den Datenblättern des Ventilators angegebenen Nennleistung von 1,439 kW verglichen werden können. Die von *GAEA* be-

rechnete Leistung stimmt dabei sogar noch besser mit dem Wert des Datenblatts überein als die gemessene Leistung.

Die Integration der von *GAEA* berechneten Ventilatorleistung über die untersuchten BetriebsTabelle 4.14: Vom Ventilator des EWT der FH in Jülich umgesetzte elektrische Energie.

	Vom Ventilator umgesetzte elektrische Energie in kWh27.7. bis 4.8.9913.10. bis 28.11.99		
Messung	70,7	36,0	
GAEA	61,5	39,7	

zeiträume vom 27.7. bis 4.8.99 und vom 13.10. bis 28.11.99 ermöglicht den Vergleich mit der am Ventilator gemessenen elektrischen Energie (Tabelle 4.14). Die Abweichung des berechneten Werts vom gemessenen Wert ist mit -13,0 % bzw. +10,3 % hinnehmbar.

4.5 EWT des Schwerzenbacherhofs in Schwerzenbach (Zürich)

4.5.1 Berechnung der Erdreichtemperaturen / Berücksichtigung von Grundwasser

Der EWT des Schwerzenbacherhofs ist unterhalb der Bodenplatte des Gebäudes in 6,5 m Tiefe in grobkiesigem Boden bei stehendem Grundwasser verlegt. Aufgrund der Verlegungstiefe und dem Kontakt zum Grundwasser ist zu erwarten, dass die ungestörte Erdreichtemperatur in der Umgebung der Rohre ganzjährig eine weitgehend konstante Temperatur aufweist. Dies ist auch das Ergebnis der Berechnung mit *GAEA* (rote Kurven in Abbildung 4.14 oben). Tatsächlich zeigt die Erdreichtemperatur um die Rohre des EWT einen Jahresverlauf, wie er für sehr viel geringere Verlegungstiefen charakteristisch ist (grüne Kurven in Abbildung 4.14)¹. Für die Überprüfung von *GAEA* wurden deshalb zwei Fälle untersucht: Zum einen wurde der EWT für eine Verlegungstiefe von 6,5 m gemäß der baulichen Ausführung [33] berechnet. Zum anderen wurde eine Verlegungstiefe von 0,5 m angenommen, für die die Erdreichtemperaturen von Messung und *GAEA* übereinstimmen (siehe Abbildung 4.14 unten).

¹ Auffällig sind auch – wie beim EWT des DLR und beim EWT der FH Jülich – die großen Unterschiede zwischen den Erdreichtemperaturen an verschiedenen Messpunkten in gleicher Tiefe.





- Umgebungstemperatur in °C

- Gemessene Erdreichtemperatur (mehrere Messpunkte in 6,5 m Tiefe) in °C

Berechnete Erdreichtemperatur laut GAEA (mehrere Segmente in 6,5 m Tiefe) in °C

Schwerzenbacherhof: Erdreichtemperatur (Berechnung mit GAEA für 0,5 m Tiefe)



Gemessene Erdreichtemperatur (mehrere Messpunkte in 6,5 m Tiefe) in °C
 Berechnete Erdreichtemperatur laut GAEA (mehrere Segmente in 0,5 m Tiefe) in °C

Abbildung 4.14: Simulation des Jahresgangs der Erdreichtemperaturen am Schwerzenbacherhof: Gute Übereinstimmung bei Annahme einer geringen Verlegungstiefe.

Warum die Erdreichtemperaturen am Schwerzenbacherhof einen für die Verlegungstiefe nicht typischen ausgeprägt jahreszeitlich schwankenden Verlauf zeigen, konnte nicht geklärt werden. Evers vermutet in seiner Arbeit [8] einen starken Einfluss des Gebäudes, ohne dies jedoch zu belegen.

Für die Berechnung mit *GAEA* ist es nicht möglich, einen Grundwasserspiegel oberhalb der Verlegungstiefe der Rohre anzugeben. In den Projektdateien wurde der Grundwasserspiegel deshalb als direkt unterhalb der Rohre definiert. Das Vorhandensein von Grundwasser in unmittelbarer Umgebung der Rohrwand führt im Berechnungsmodell dazu, dass der Wärmeübergang zwischen Rohrwand und Erdreich verbessert wird und die Rohrwandtemperatur schließlich gleich der ungestörten Erdreichtemperatur ist (siehe 2.2.4 Berücksichtigung von Grundwasser). Die Annahme eines Grundwasserspiegels knapp unterhalb der Rohre ist dabei für die Überprüfung des Berechnungsmodells von *GAEA* in guter Näherung gleichbedeutend mit der Annahme eines Grundwasserspiegels oberhalb der Rohre.

Von den 43 parallel verlegten Rohren des Rohrregisters des EWT des Schwerzenbacherhofs wurden zwei Rohre (Rohr #10 und Rohr #32) genauer betrachtet. Tabelle 4.15 fasst die Eingabedaten der *GAEA*-Projektdateien für die untersuchten Fälle zusammen.

Tabelle 4.15: Eingabedaten der	GAEA-Projektdatei zur	Berechnung des EWT am
Schwerzenbacherhof.	-	-

Erdwärmetauscher:	Klima:	
Rohranzahl: 43	Wetterdaten aus Datei	
Rohrlänge: 23,0 m	Maximale Monatsmitteltemperatur:	20,8 °C
Rohrdurchmesser: 230 mm	Jahresmitteltemperatur:	9,7 °C
Verlegungstiefe: 6,5 m	Minimale Monatsmitteltemperatur:	-1,3 °C
Verlegungstiefe (Variante): 0,5 m		
Abstand zum Gebäude (Bodenplatte): 0,75 m		
EWT-Betrieb:	Erdreich:	
Ventilationsstrom aus Datei: 018.500 m ³ /h	Bodentyp:	grobkiesig
Rohr #10: 0350 m ³ /h	Dichte:	2.000,0 kg/m ³
Rohr #32: 0350 m ³ /h	Wärmekapazität:	1,84 kJ/(kg K)
Ventilatorposition: nach EWT (Saugbetrieb)	Wärmeleitfähigkeit:	0,52 W/(m K)
	Grundwassertiefe:	6,65 m
	Grundwassertiefe (Variante):	0,65 m

4.5.2 Berechnung der Lufttemperatur nach dem EWT

Für die Berechnung der Luftaustrittstemperaturen am Ende der Rohre #10 und #32 wurde direkt die am Eingang der Rohre gemessene Lufteintrittstemperatur anstelle der ebenfalls gemessenen Umgebungstemperatur als Eingabegröße für die Außentemperatur in *GAEA* verwendet. So konnte der Einfluss des etwa 60 m langen Verteilerkanals auf die Temperaturänderung der Luft im EWT ausgeblendet werden.

Der Vergleich der Berechungsergebnisse für die Lufttemperatur am Ende der Rohre mit den Messergebnissen zeigt eine sehr gute Übereinstimmung bei beiden Rohren (Abbildung 4.15). Bei Annahme einer geringeren Verlegungstiefe für die Berechnung (als Variante zur baulichen Ausführung) lässt sich die Übereinstimmung sogar noch leicht verbessern (Abbildung 4.16). Tabelle 4.16 fasst charakteristische Temperaturen am EWT des Schwerzenbacherhofs zusammen.

64



Normierte Übereinstimmung GAEA - Vergleichswert

Abbildung 4.15a: Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse gemäß *GAEA* mit den Messergebnissen für die Luftaustrittstemperatur nach Rohr #10 des EWT am Schwerzenbacherhof (Verlegungstiefe in *GAEA*: 6,5 m; 100 % entspricht 1.556 h).

50 40 Häufigkeit in % 30 20 10 11 9 9 g 8 1 0 - 4 2 3 13 -1,5 -1,0 -0,5 0,0 -4,0 -3,5 -3,0 -2,5 -2,0 0,5 1,0 1,5 2,0 2,5 3,0 < 3,5 4,0 4,5 > -4,5 Temperaturdifferenz in K

Normierte Übereinstimmung GAEA - Vergleichswert

Abbildung 4.15b: Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse gemäß *GAEA* mit den Messergebnissen für die Luftaustrittstemperatur nach Rohr #32 des EWT am Schwerzenbacherhof (Verlegungstiefe in *GAEA*: 6,5 m; 100 % entspricht 1.528 h).



Normierte Übereinstimmung GAEA - Vergleichswert

Abbildung 4.16a: Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse gemäß *GAEA* mit den Messergebnissen für die Luftaustrittstemperatur nach Rohr #10 des EWT am Schwerzenbacherhof (Verlegungstiefe in *GAEA*: 0,5 m; 100 % entspricht 1.556 h).

50 40 Häufigkeit in % 30 20 13 13 13 10 9 9 8 7 5 0 -1,5 -1,0 -0,5 0,0 0,5 1,0 -4,0 -3,5 -3,0 -2,5 -2,0 1,5 2,0 2,5 3,0 3,5 < 4,0 4,5 > -4,5 Temperaturdifferenz in K

Normierte Übereinstimmung GAEA - Vergleichswert

Abbildung 4.16b: Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse gemäß *GAEA* mit den Messergebnissen für die Luftaustrittstemperatur nach Rohr #32 des EWT am Schwerzenbacherhof (Verlegungstiefe in *GAEA*: 0,5 m; 100 % entspricht 1.528 h).

Tabelle 4.16: Charakteristische Temperaturen während des Betriebs des EWT am Schwerzenbacherhof.

	Minimalwert der Temperatur in °C	Mittelwert der Temperatur in °C	Maximalwert der Temperatur in °C	Prozent. Über- einstimmung GAEA – Vergleichswert innerhalb ± 2,25 K
Luft vor				
Rohr #10	-4,2	12,4	29,9	
Luft nach Rohr #10				
Messung	6,3	14,9	24,5	
GAEA	3,9	14,3	21,6	76 %
GAEA (Variante)	2,3	14,2	24,4	79 %
Luft vor				
Rohr #32	-5,6	12,0	30,1	
Luft nach Rohr #32				
Messung	5,1	13,8	24,0	
GAEA	3,5	14,2	23,6	79 %
GAEA (Variante)	2,0	13,9	25,9	86 %

4.5.3 Berechnung des Wärmeaustauschs

Zusätzlich zur Änderung der sensiblen Wärme der Luft im EWT findet durch Kondensation und Verdunstung von Wasser eine Umwandlung von latenter in sensible Wärme statt, die in *GAEA* nicht berechnet wird. Tabelle 4.17 fasst die gemessenen und berechneten Wärmeflüsse zusammen.

Auffällig ist, dass gemäß den Messungen keine Kondensation im EWT auftritt. Dies wäre aber nötig, um später eine Verdunstung von Wasser im EWT zu ermöglichen, wie sie aus den Messungen ableitbar ist. Beim sensiblen Wärmefluss stimmt die Berechnung sehr gut mit der Messung überein, wobei die bessere Übereinstimmung zum Teil bei der Berechnung gemäß baulicher Ausführung und zum Teil bei der Berechnung der Variante gegeben ist.

Tabelle 4.17: Wärmeaustausch im EWT des Schwerzenbacherhofs während des Jahres 1992.

	Sensibler Wärmefluss zwischen Rohr und Luft im EWT in kWh		Umwandlung latenter Wärme im EWT in kWh		Gesamter Wärmefluss zwischen Erdreich und Rohr in kWh	
	Wärmeauf- nahme durch die Luft (Lufttempe- ratur steigt)	Wärmeabgabe durch die Luft (Lufttempe- ratur sinkt)	Verdunstung (Wärmeauf- nahme durch das Rohr)	Kondensation (Wärme- abgabe durch das Rohr)	Wärmeauf- nahme durch das Rohr	Wärmeabgabe durch das Rohr
Rohr #10						
Messung	211	80	420	0	631	80
GAEA	211	120	-	-	211	120
GAEA						
(Variante)	156	71	-	-	156	71
Rohr #32						
Messung	189	110	152	0	341	110
GAEA	251	178	-	-	251	178
GAEA						
(Variante)	190	101	-	-	190	101

4.6 Fallstudie mit dem Widerstands-Kapazitäten-Modell (WKM)

Im Rahmen einer Diplomarbeit an der Fachhochschule Köln [8] wurden Berechnungen zur Auslegung von EWT sowohl auf Basis eines Widerstands-Kapazitäten-Modells (WKM) wie auch mit *GAEA* durchgeführt. Leider stand die fertiggestellte Diplomarbeit erst nach Beenden der Berechnungen für diesen Bericht zur Verfügung. Im folgenden werden Ergebnisse des Vergleichs aufgrund persönlicher Informationen aus einem Briefwechsel mit Herrn Evers während dessen Arbeit an der Diplomarbeit wiedergegeben.

Vergleichsobjekt

Ziel der Arbeit war die Untersuchung des Einsatzes eines EWT für die Zuluftkonditionierung eines gewerblich genutzten Gebäudes. Tabelle 4.18 fasst die Angaben zur Auslegung des EWT zusammen.

Erdwärmetauscher:		Klima:	
Rohranzahl:	10	Wetterdaten aus Datei	
Rohrlänge:	80,0 m	Maximale Monatsmitteltemperatu	r: 17,0 °C
Rohrdurchmesser:	119 mm	Jahresmitteltemperatur:	9,5 °C
Abstand zwischen Rohrer	n: 1,2 m	Minimale Monatsmitteltemperatur	: 2,0 °C
Verlegungstiefe:	1,5 m		
EWT-Betrieb:		Erdreich:	
Ventilationsstrom:	2.500 m³/h	Bodentyp:	penutzerdefiniert
Druckabfall im EWT:	428 Pa	Dichte:	1800,0 kg/m³
Ventilatorleistung:	0,74 kW	Wärmekapazität:	1,34 kJ/(kg K)
Ventilatorposition:	vor EWT (Schubbetrieb)	Wärmeleitfähigkeit:	1,45 W/(m K)
		Grundwassertiefe:	5,0 m

Tabelle 4.18: Eingabedaten der *GAEA*-Projektdatei für eine Fallstudie mit Widerstands-Kapazitäten-Modell (WKM).

Vergleichsfall

Für den Vergleich zwischen *GAEA* und dem WKM wird zunächst angenommen, dass der EWT ständig betriebsbereit sei; er wird jedoch nur dann genutzt, wenn dies klimatechnisch und wirtschaftlich sinnvoll ist. In einem zweiten Schritt wird im WKM die Betriebsbereitschaft eingeschränkt auf sieben Tage pro Woche von 6:00 bis 22:00, bzw. fünf Tage pro Woche von 8:00 bis 17:00. Zu allen anderen Zeiten sei der EWT abgeschaltet.

Die Regelung des EWT erfolgt durch die Vorgabe einer Heiz- und Kühlgrenztemperatur der Umgebungsluft, einer Solltemperatur für die Zuluft im Gebäude und eines Temperaturoffsets für den Vergleich der Lufttemperatur nach dem EWT und der Umgebungslufttemperatur. Der EWT wird nur genutzt, wenn die Umgebungslufttemperatur weniger als 10,0 °C (Heizfall) oder mehr als 18,0 °C (Kühlfall) beträgt. Ausserdem muss die Temperatur nach dem EWT mindestens 3,0 K näher an der Solltemperatur für die Zuluft im Gebäude von 15,8 °C liegen als die Umgebungsluft, sonst wird direkt Umgebungsluft in das Gebäude geführt (Bypass). So sind laut [8] die klimatechnischen und wirtschaftlichen Anforderungen an den Betrieb des EWT erfüllt.

Als Ergebnis der Berechnungen mit *GAEA* und dem WKM ergeben sich ähnliche Werte sowohl für die Temperaturen nach dem EWT als auch für die jährlichen Wärmeerträge (siehe Tabelle 4.19). Bei Verwendung des WKM zeigen sich bei den maximalen Temperaturen der Luft nach dem EWT im Sommer bei unterschiedlichen Betriebsweisen (unterschiedliche Regelung) die Auswirkungen der berechneten Ermüdung des Erdreichs. Das Kühlpotenzial des Erdreichs ist umso größer, je weniger der EWT betrieben wird. Die von *GAEA* berechnete

68

Ergebnisse der Überprüfung

maximale Lufttemperatur nach dem EWT liegt zwischen den WKM-Werten für vergleichsweise häufigen Betrieb (sieben Tage pro Woche von 6:00 – 22:00) und eher seltenem Betrieb (fünf Tage pro Woche von 8:00 – 17:00). Die letztere Betriebsweise – angenommen für die Betriebszeit eines gewerblich genutzten Gebäudes – lässt jedoch die Möglichkeit einer Nachtkühlung des Gebäudes mit Hilfe des EWT außer Betracht und nutzt diesen somit nicht optimal. Weitergehende Untersuchungen über die Wirtschaftlichkeit verschiedener Varianten der Fallstudie sind nicht möglich, da keine Angaben zu Baukosten, Energiekosten und sonstigen wirtschaftlichen Eckwerten vorhanden sind.

Tabelle 4.19: Ergebnisse der Berechnung für eine Fallstudie mit Widerstands-Kapazitäten-Modell (WKM).

Regelung	Berechnung mit GAEA ¹	Berechnung mit WKM ²
Vergleichswerte ohne EWT	max. Umgebungsluftte	emperatur: 30,2 °C
	min. Umgebungsluftte	mperatur: -9,7 °C
EWT ständig betriebsbereit	Betriebsstunden: 2.880 h/a	Betriebsstunden: 2.440 h/a
Heizgrenztemp.: 10,0 °C	Heizbeitrag: 10,1 MWh/a	Heizbeitrag: 6,1 MWh/a
Kühlgrenztemp.: 18,0 °C	min. Temp. nach EWT: 1,8 °C	min. Temp. nach EWT: 0,2 °C
Solltemp. der Zuluft: 15,8 °C	Kühlbeitrag: 3,5 MWh/a	Kühlbeitrag: 4,2 MWh/a
Temperaturoffset: 3,0 K	max. Temp. nach EWT: 17,8 °C	max. Temp. nach EWT: 19,1 °C
EWT betriebsbereit		
von Mo – So, 6:00 – 22:00	Betriebsstunden: 1.980 h/a	Betriebsstunden: 2.010 h/a
Heizgrenztemp.: 10,0 °C	Heizbeitrag: 6,4 MWh/a	Heizbeitrag: 5,0 MWh/a
Kühlgrenztemp.: 18,0 °C	min. Temp. nach EWT: 1,9 °C	min. Temp. nach EWT: 1,4 °C
Solltemp. der Zuluft: 15,8 °C	Kühlbeitrag: 3,3 MWh/a	Kühlbeitrag: 3,9 MWh/a
Temperaturoffset: 3,0 K	max. Temp. nach EWT: 17,7 °C	max. Temp. nach EWT: 18,7 °C
EWT betriebsbereit		
von Mo – Fr, 8:00 – 17:00	Betriebsstunden: 750 h/a	Betriebsstunden: 880 h/a
Heizgrenztemp.: 10,0 °C	Heizbeitrag: 2,2 MWh/a	Heizbeitrag: 2,5 MWh/a
Kühlgrenztemp.: 18,0 °C	min. Temp. nach EWT: 3,1 °C	min. Temp. nach EWT: 2,7 °C
Solltemp. der Zuluft: 15,8 °C	Kühlbeitrag: 1,4 MWh/a	Kühlbeitrag: 1,7 MWh/a
Temperaturoffset: 3,0 K	max. Temp. nach EWT: 17,5 °C	max. Temp. nach EWT: 15,6 °C

¹ Berechnung durch das Fachgebiet Bauphysik & Solarenergie

² Berechnung durch Michael Evers [8]

5 Zusammenfassung der Überprüfung

5.1 Fazit

Die hier dargestellten Ergebnisse der Überprüfung zeigen, dass *GAEA* eine gute Hilfe ist, um in der frühen Gebäudeplanung einen EWT so auszulegen, dass er die Anforderungen der Lüftungsplanung erfüllt.

Im einzelnen erweist sich, dass in vielen Fällen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Berechnungsergebnissen und Vergleichsdaten auftritt, in manchen eine eher geringere. Die Ergebnisse des verwendeten analytischen Modells weichen nur geringfügig von denen einer numerischen Berechnung ab. Die Nachteile der analytischen Berechnung – z.B. können keine dynamischen Vorgänge im Erdreich oder beim Betrieb einer Lüftungsanlage untersucht werden – werden durch die Schnelligkeit der Berechnung aufgewogen: Leicht lässt sich eine Vielzahl an Parametervariationen durchführen, um Eckwerte für eine Auslegung zu gewinnen. Parametervariationen sind bei der Auslegung von EWT auch deshalb unumgänglich, da insbesondere die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs am Standort des EWT mit ihrer örtlichen und zeitlichen Variation unbekannt ist. Schon kleine Abweichungen von den Materialwerten eines zuvor angenommenen Bodentyps können die Leistung des EWT deutlich beeinflussen und müssen deshalb bei der Auslegung berücksichtigt werden.

Die in *GAEA* implementierten Erweiterungen des verwendeten analytischen Modells [1] führen zu einer richtigen Beschreibung des Verhaltens von Rohrregistern (im Vergleich zu Einzelrohren) und zu einem brauchbaren Berechnungsverfahren bei der Berücksichtigung von Grundwasser in der Umgebung des EWT. Bezüglich der Anlagengrößen und Volumenströme, für die sich EWT mit *GAEA* sinnvoll berechnen lassen, waren aufgrund der Überprüfung keine Grenzen ersichtlich. *GAEA* war ursprünglich für die Auslegung von EWT zu Einfamilien-, Mehrfamilienhäusern und kleineren Bürogebäuden gedacht. Im Rahmen der Validierung wurden jedoch auch Berechnungen von EWT für größere Gebäude ohne Probleme durchgeführt.

Eine Einschränkung der Anwendbarkeit von *GAEA* ergibt sich bei der Berechnung von EWT aus Betonrohren. Die Wärmespeicherfähigkeit der Rohrwand führt zu einer Dämpfung der positiven wie negativen Temperaturspitzen, die in *GAEA* nicht erfasst wird. Die Berechnung mit *GAEA* stellt somit ein "Worst-Case"-Szenario der Auslegung dar, bei dem für die Luftaustrittstemperaturen des EWT zu hohe oder zu niedrige Temperaturen berechnet werden, die in der Wirklichkeit nicht auftreten. Soll eine Auslegung eines EWT aus Betonrohren mit *GAEA* erfolgen, kann dies berücksichtigt werden, indem der angenommene Komfortbereich für die Luft nach dem EWT vergrößert wird. Dies erscheint insbesondere auch deshalb vernünftig, weil die Nutzer von Gebäuden in der Regel ohnehin bereit sind, für einen kurzen Zeitraum erhöhte Temperaturen an besonders heißen Sommertagen zu tolerieren.

5.2 Besonderheiten

Analytische Berechnung vs. numerische Berechnung

Der Vergleich von *GAEA* mit dem EWT-Modell der AG Klimaforschung der Ruhr-Universität Bochum (Kapitel 4.2) und mit dem Widerstands-Kapazitäten-Modell (Kapitel 4.6) zeigt eine große Übereinstimmung in den Berechnungsergebnissen für Lufttemperaturen im und nach dem EWT sowie für Heiz- und Kühlbeiträge des EWT für die Klimatisierung von Gebäuden.

Nur für eine detaillierte Untersuchung dynamischer Vorgänge beim Betrieb des EWT (z.B. An- und Abschaltvorgänge oder Lastwechsel) ist die Verwendung numerischer Modelle nötig. Für die Auslegung eines EWT im frühen Planungsstadium sind die für diese Untersuchungen nötigen umfangreichen Eingabewerte jedoch meist noch nicht bekannt, so dass eine Berechnung mit dem analytischen Modell ausreicht.

Dynamische Wetterdaten und Erdreichtemperaturen

Die Verwendung dynamischer Wetterdaten – entweder aus gemessenen Werten oder aus anhand typischer Klimazonen generierten Dateien – ist eine wichtige Hilfe bei der Auslegung von EWT. Die entsprechende Erweiterung des analytischen Modells in *GAEA* (2.2.1 Verwendung dynamischer Wetterdaten) ermöglicht die Berücksichtigung der charakteristischen Schwankungen der Außentemperatur. Dies erlaubt die Untersuchung des EWT-Verhaltens an bestimmten Tagen, z.B. zur Abschätzung der voraussichtlichen Luftaustrittstemperatur am kältesten und wärmsten Tag eines Jahres.

Der Einfluss kurz- und mittelfristiger Temperaturschwankungen der Umgebungsluft auf die Temperatur des Erdreichs wird in *GAEA* nur für oberflächennahe Erdschichten berücksichtigt (2.2.2 Anpassung der Temperatur oberflächennaher Erdschichten). Die Auswertung der Messdaten am EWT des DLR (Kapitel 4.1) lässt vermuten, dass darüberhinaus eine Beeinflussung auch tieferer Erdschichten durch Perioden erhöhter Umgebungslufttemperatur stattfindet. Zur genaueren Beschreibung dieser Einflüsse und vor allem zu deren Quantifizierung wäre es nötig, die Messdaten anhand eines (einfachen) Modells für die Änderung der Bodenwerte wie Feuchte, Wärmespeicherkapazität und –leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Bodentyp, der Bodenschichtung und dem Wetterverlauf (Temperatur, Strahlung, Niederschlag) im Jahresverlauf zu interpretieren. Ein solches, wissenschaftlich fundiertes, Modell ist derzeit nicht verfügbar [22], so dass auch eine entsprechende Erweiterung des Berechnungsmodells von *GAEA* vorläufig keinen Sinn macht.

Eine Beurteilung der langfristigen Änderung der Erdreichtemperatur im Jahresverlauf aufgrund des Betriebs des EWT war anhand der für die Überprüfung von *GAEA* zur Verfügung stehenden Messdaten nicht möglich. Die Datenreihen umfassten meist nur ein Jahr und es gab keine Vergleichswerte für Erdreichtemperaturen abseits der untersuchten EWT, jedoch am gleichen Standort sowie bei gleichem Erdreich und Klima. Im Berechnungsmodell von *GAEA* werden solche langfristigen Auswirkungen des EWT-Betriebs auf das umgebende Erdreich nicht berücksichtigt. Die Berechnung der – vom Betrieb des EWT – ungestörten Erdreichtemperatur erfolgt aufgrund des jährlichen Mittelwerts sowie des jährlichen maximalen Monatsmittelwerts der Umgebungslufttemperatur (2.1.2 Temperatur des Erdreichs) und ist damit abhängig von den verwendeten Wetterdaten des untersuchten Jahres.
Latente Wärme und Abwärme des Ventilators

Der Vergleich der Berechnungsergebnisse von *GAEA* mit den Messergebnissen des EWT am Standort Jülich der FH Aachen (Kapitel 4.4) und des EWT am Schwerzenbacherhof (Kapitel 4.5) zeigt, dass die Umwandlung latenter in sensible Wärme und umgekehrt bei Kondensations- und Verdunstungsvorgängen im EWT wesentlich zum Wärmeaustausch zwischen Rohr und Erdreich beiträgt. Dies wird in *GAEA* nicht berücksichtigt; hier wird lediglich die Temperaturänderung der Luft im EWT durch die Berechnung des Wärmeaustauschs im EWT beachtet. Eine Erweiterung des Berechnungsmodells von *GAEA* zur Erfassung von Kondensation und Verdunstung im Rohr ist insbesondere dann nötig, wenn die Feuchte der Luft nach dem EWT als Eingabegröße für die weitere Auslegung der Klimatisierung eines Gebäudes verwendet werden soll.

Für den Wärmebeitrag aufgrund der Abwärme des Ventilators zum Vortrieb der Luft im EWT ergibt die Überprüfung von *GAEA* mit den Messergebnissen des EWT der FH in Jülich (Kapitel 4.4) eine akzeptable Übereinstimmung. Leider bestand hierzu keine weitere Vergleichsmöglichkeit mit Messdaten anderer Objekte.

Rohrregisterberechnung

Die Überprüfung der Berechnung von Rohrregistern in *GAEA* mit den Messdaten des EWT am DLR (Kapitel 4.1) zeigt, dass *GAEA* die Verminderung des Ertrags pro Rohr in den Rohrregistern gegenüber dem Ertrag in den Einzelrohren tendenziell richtig berechnet. Bei den flach verlegten Rohren (Einzelrohr, bzw. Rohrregister) wird diese Ertragsverminderung vom Berechnungsmodell in *GAEA* auch quantitativ gut bestimmt. Bei den tief verlegten Rohren berechnet *GAEA* eine zu große Verringerung bei den Wärmeflüssen pro Rohr. Dies lässt sich auf Fehler bei der Berechnung der Erdreichtemperatur in größerer Tiefe zurückführen – wobei hier auch die Messwerte Fragen aufwerfen (siehe 4.1.1 Berechnung der Erdreichtemperaturen) –; möglicherweise überschätzt *GAEA* aber auch die Auswirkung der gegenseitigen Beeinflussung der Rohre im Rohrregister.

Beim ebenfalls als Rohrregister aufgebauten EWT des Schwerzenbacherhofs stimmen die Berechnungsergebnisse von *GAEA* für die Lufttemperatur nach dem EWT sowie für den sensiblen Wärmeaustausch im EWT sehr gut mit den Messergebnissen überein (Kapitel 4.5), so dass hier von einer richtigen Berechnung des Verhaltens der Rohre im Rohrregister ausgegangen werden kann.

Insgesamt scheint das Modell der Einflussbreiten und der Superposition von Wärmeströmen als Erweiterung des analytischen Berechnungsmodells für Einzelrohre (2.2.5 Berechnung von Rohrregistern) dazu geeignet zu sein, die gegenseitige Beeinflussung der Rohre im Rohrregister abschätzen zu können, um damit eine Planung von Rohrregistern durchzuführen.

Berücksichtigung von Gebäudefundamenten und Grundwasser

Das Temperaturverhalten des Erdreichs am im stehenden Grundwasser verlegten EWT des Schwerzenbacherhofs entspricht nicht den Erwartungen aufgrund der in *GAEA* implementierten Theorie. Bei einer Verlegungstiefe von 6,5 m mit Kontakt zum Grundwasser wäre zu erwarten, dass die Temperatur in der Umgebung der Rohre ganzjährig weitgehend konstant bliebe. Das Berechnungsverfahren von *GAEA* gibt diesen theoretisch erwarteten Temperaturverlauf wieder. Tatsächlich zeigt die Erdreichtemperatur eine ausgeprägte Jahresamplitude, die nur für viel geringere Tiefen charakteristisch ist (Kapitel 4.5). Warum dieses Verhalten auftritt, konnte im Rahmen der Überprüfung von *GAEA* nicht geklärt werden. Möglich ist, dass das Gebäude einen starken Einfluss auf die Erdreichtemperatur in der Umgebung der Rohre ausübt.

Der Einfluss naheliegender Gebäude auf das Verhalten von EWT konnte bei keinem der Vergleichsobjekte für die Überprüfung von *GAEA* bestimmt werden, da hierfür die Messdaten nicht ausreichend detailliert oder umfangreich genug waren. Somit war die Überprüfung der Berücksichtigung von Gebäuden im Berechnungsmodell für *GAEA* nicht möglich. Bei den Vergleichsobjekten EWT des L.E.O. (beschrieben in 3.3.2), EWT an der FU Hagen (beschrieben in 3.3.3), EWT der FH in Jülich (beschrieben in 3.3.4), EWT des Schwerzenbacherhofs (beschrieben in 3.3.5) und EWT des Autarken Solarhaus (beschrieben in 3.3.7) ist ein Gebäudeeinfluss auf das Verhalten des EWT wahrscheinlich.

Grenzen für GAEA

EWT-Betrieb:

Ventilationsstrom in m3/h

Fester Druckabfall (durch Filter etc.) in Pa

Ventilatorposition: vor/nach EWT

Obwohl *GAEA* ursprünglich für die Auslegung von EWT zu Einfamilien-, Mehrfamilienhäusern und kleineren Bürogebäuden gedacht war, wurden im Rahmen der Validierung auch Berechnungen zu EWT für größere Gebäude ohne Probleme durchgeführt. Kritische Größen für EWT (z.B. bezüglich Rohranzahl, Rohrlänge, Rohrdurchmesser oder Volumenstrom), die eine Auslegung mit *GAEA* einschränken oder verbieten, konnten nicht festgestellt werden. Aufgrund der Wünsche von Dritten, die *GAEA* für die Projektierung von EWT nutzten, wurden die in *GAEA* möglichen Wertebereiche für Eingaben zum Rohrdurchmesser, zur Rohrlänge und zum Volumenstrom erweitert. Tabelle 5.1 fasst die nun möglichen Werte zum Layout von EWT zusammen. Selbstverständlich sind nicht alle Kombinationen von Eingaben sinnvoll, z.B. sollte kein Rohr mit 20 mm Durchmesser bei einem Volumenstrom von 2.000.000 m³/h betrieben werden. *GAEA* prüft die Eingaben und fordert zur Neueingabe auf, wenn aufgrund physikalischer Gesetzmäßigkeiten oder wegen Bereichsüberschreitungen im Rechenalgorithmus keine Berechnung des EWT möglich ist.

Größe Minimum Maximum Erdwärmetauscher: Rohranzahl 1 10 1,0 200,0 Rohrlänge in m Rohrdurchmesser in mm 20 2.000 Abstand zwischen Rohren im Rohrregister in m 10,0 0.5 Verlegungstiefe in m 0.5 10.0 Abstand zu Gebäuden in m 0,1 100,0 Erdreich: Dichte in kg/m³ 500 3.000 Wärmekapazität in kJ/(kg K) 0,5 3,0 Wärmeleitfähigkeit in W/(m K) 0,1 5,0 Grundwassertiefe in m 100,0 0,1

Tabelle 5.1: Wertebereich für Angaben zur Bestimmung des Layouts von EWT in *GAEA*.

Grenzen für die Auslegung von EWT mit *GAEA* ergeben sich bei der Berechnung von EWT aus Betonrohren. Die Berechnung mit *GAEA* stellt hier – wie in 5.1 Fazit beschrieben – ein "Worst-Case"-Szenario der Auslegung dar. Dies kann bei der Planung – z.B. durch eine Vergrößerung des Komfortbereichs für die Lufttemperatur nach dem EWT – berücksichtigt werden.

0,0

0,0

2.000.000,0

100.000,0

Weiterhin ergeben sich Unwägbarkeiten für die Auslegung von EWT – mit allen Berechnungsmodellen und Programmen, nicht nur mit *GAEA* – aufgrund der Unsicherheiten über den lokalen und zeitlichen Verlauf der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs. Generell gilt, dass die Auslegung von EWT nicht mit der Auslegung z.B. einer Klimaanlage vergleichbar ist. Der EWT als natürliches, passives System hängt ab von langfristig unvorhersagbaren und unbeeinflussbaren Größen wie vor allem dem Wetter. Parametervariationen erlauben während der Planung das Abschätzen der Auswirkungen z.B. veränderter Wärmeleiteigenschaften des Erdreichs aufgrund länger andauernder Hitze- oder Kälteperioden oder erhöhter Niederschläge auf das Verhalten von EWT. Diese naturbedingten Unsicherheiten bei der Auslegung von EWT stellen also keine Grenze für die Anwendbarkeit von *GAEA* dar, sie bestimmen aber das Auslegungsverfahren für jedes natürliche, passive System.

6 Kontakte und Zusammenarbeit mit Dritten

6.1 Informationsangebot im WorldWideWeb

Unter der URL http://nesa1.uni-siegen.de/softlab/gaea.htm veröffentlicht das Fachgebiet Bauphysik & Solarenergie Informationen zur Entwicklung und Validierung von *GAEA* auch im WorldWideWeb. Sowohl die Berechnungsmethode als auch die Programmbedienung werden dabei kurz erläutert.

Seit der Fertigstellung der ersten Programmversion *GAEA* 0.9 Mitte 1998 ist die jeweils aktuellste Version auch als Demoversion auf den WorldWideWeb-Seiten für Interessierte zum Laden verfügbar.

Die Eingangsseite zu *GAEA* wurde seit Beginn des Projekts 1.981-mal aufgerufen (Stand: 31.12.1999), davon 1.438-mal auf deutsch und 543-mal auf englisch. Die Seite zum Laden der Demoversion wurde immerhin noch 914-mal aufgerufen, das sind 46 % der Zugriffe auf die Eingangsseite. Die Datei zum Installieren der Demoversion in den Versionen 0.9 bis 0.94 wurde insgesamt 401-mal geladen.

6.2 Telephonische und schriftliche Kontakte

Aufgrund der Veröffentlichung von Informationen und der Demoversion im WorldWideWeb sowie der Teilnahme an Konferenzen und Meetings (siehe: Anhang E Veröffentlichungen) ergaben sich Kontakte mit Anwendern von *GAEA*, die zum Teil wertvolle Anregungen für die Validierung und die weitere Entwicklung des Programms brachten.

So wurde z.B. ein Programmfehler entdeckt, der bei sehr kleinen oder sehr großen Rohrdurchmessern zu einer falschen Berechnung der Strömungseigenschaften der Luft im Rohr führte. Der Fehler wurde in Version 0.92 behoben. In weiteren Versionen wurde die Eingabe in *GAEA* optimiert, z.B. wurden aufgrund von Änderungsvorschlägen Zoom-Funktionen für Diagramme eingerichtet und Wertebereiche für Eingaben erweitert.

Alle Gesprächspartner des FG Bauphysik & Solarenergie zum Thema der Überprüfung von *GAEA* wurden auf das Verbundprojekt "Luft-/Erdwärmetauscher" der AG Solar NRW und speziell auf Herrn Dibowski vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Köln-Porz als Ansprechpartner für weitere Informationen hingewiesen.

A Abbildungsverzeichnis

2.1	Grundsätzliche Funktionsweise eines Erdwärmetauschers	11
2.2	Erdreichtemperaturprofile im Jahresverlauf für ungestörtes Erdreich	12
2.3	Transformation des Systems "Rohr im Erdreich" in das System "Ebene	
	Platte" über konforme Abbildung	13
2.4	Rohrgeometrie nach [19]	13
2.5	Beeinflussung des Temperaturprofils des Erdreichs durch den EWT	14
2.6	Druckverluste im EWT	16
2.7	Veränderung des Temperaturprofils oberflächennaher Erdschichten an	
	einem kalten Winter- und heißen Sommertag	18
2.8	Rohrgeometrie nach [7]	19
2.9	Vergleich eines Wärmestroms zwischen dem Erdreich und einer ebenen	
	Platte zur Ermittlung der Einflussbreite eines Rohres	20
2.10	Modelle für den Wärmefluss eines Einzelrohrs bezüglich seiner	
	Einflussbreite	21
2.11	Überlagerung der Einflussbreiten der Rohre im Rohrregister bei engem	
	Rohrabstand	22
2.12	Menü "Erdwärmetauscher / EWT" in GAEA	25
2.13	Menü "Klimawerte / Klima" in GAEA	26
2.14	Menü "Jahresauswertung / Jahr" in GAEA	27
2.15	Menü "Optimierter Erdwärmeaustauscher / Optimum" in GAEA	28
4.1	Jahresverlauf der Erdreichtemperaturen am EWT des DLR	
	in 1.5 m Tiefe und 3.0 m Tiefe	41
4.2	Jahresverlauf der Erdreichtemperaturen am EWT des DI R	
	in 0.2 m Tiefe laut Messung und Berechnung mit GAEA	42
4.3	Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Werte für die	
	Luftaustrittstemperatur nach den Einzelrohren des EWT des DLR	45
4.4	Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Werte für die	
	Luftaustrittstemperatur nach den Rohrregistern des FWT des DI R	46
45	Vergleich der Luftaustrittstemperaturen nach dem flach verlegten	
	Rohrregister des EWT des DLR im Winter 1996 für verschiedene	
	Temperaturleitfähigkeiten des Erdreichs	49
46	Vergleich der Luftaustrittstemperaturen nach dem tief verlegten	10
	Rohrregister des EWT des DLR im Sommer 1996 für verschiedene	
	Temperaturleitfähigkeiten des Erdreichs	50
47	Vergleich der Luftaustrittstemperaturen nach dem tief verlegten	00
	Rohrregister des EWT des DLR im Winter 1996 für verschiedene	
	Temperaturleitfähigkeiten des Erdreichs	51
18	Luftaustrittstemperaturen nach den Rohrregistern des EWT des DI R	01
4.0	im Winter 1996 bei Annahme eines Grundwassereinflusses	52
10	Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse für die Luftaustritte-	52
т.Э	temperatur nach dem EWT des $L \in \Omega$ demäß $CAEA$ und dem	
	numerischen Modell nach [4]	らつ
1 10	Temperaturyerlauf im FW/T der FU Hagen laut CAFA am wärmston und	55
- - .10	kältesten Tag des Jahres	55
		00

Abbildungs	verzeichnis
Abbilduliya	

4.11	Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Erdreich- temperaturen am EWT der FH in Jülich in Tiefe des Rohres während zweier Betriebszeiträume im Sommer und Herbst	59
4.12	Luftaustrittstemperaturen nach dem EWT der FH in Jülich für Betriebs- zeiträume im Sommer und Herbst	60
4.13	Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse gemäß GAEA mit den Messergebnissen für die Luftaustrittstemperatur nach dem EWT der	
	FH in Jülich	61
4.14	Simulation des Jahresgangs der Erdreichtemperaturen am	
	Schwerzenbacherhof: Gute Übereinstimmung bei Annahme einer geringen Verlegungstiefe	63
4.15	Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse gemäß GAEA mit den Messergebnissen für die Luftaustrittstemperatur nach Rohr #10 und Rohr #32 des EWT am Schwerzenbacherhof (Verlegungstiefe in	
	GAEA: 6,5 m)	65
4.16	Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse gemäß GAEA mit den Messergebnissen für die Luftaustrittstemperatur nach Rohr #10 und Rohr #32 des EWT am Schwerzenbacherhof (Verlegungstiefe in	
	<i>GAEA</i> : 0,5 m)	66

B Tabellenverzeichnis

4.1	Eingabedaten der GAEA-Projektdateien zur Überprüfung der Auslegung des EWT am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)	39
4.2	Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit des Erdreichs am EWT	
	des DLR aus der Fortpflanzung von Temperaturwellen	43
4.3	Dämpfung der Temperaturwelle in das Erdreich am EWT des DLR	44
4.4	Charakteristische Temperaturwerte am EWT des DLR	47
4.5	Vergleich der Wärmeflüsse zwischen Erdreich und Einzelrohr, bzw.	
	Rohrregister am EWT des DLR	48
4.6	Eingabedaten zum EWT des Low Energy Office (L.E.O.) für den Vergleich	
	von GAEA mit dem EWT-Modell der AG Klimaforschung der	
	Ruhr-Universität Bochum (RUB)	53
4.7	Charakteristische Temperaturwerte am EWT des L.E.O.	54
4.8	Eingabedaten der GAEA-Projektdatei zur Überprüfung der Auslegung des	
	EWT an der FernUniversität Hagen	54
4.9	Eingabedaten der GAEA-Projektdatei anhand der Pläne zur baulichen	
	Ausführung des EWT an der FernUniversität Hagen	56
4.10	Charakteristische Temperaturwerte am EWT der FU Hagen	57
4.11	Eingabedaten der GAEA-Projektdatei zur Überprüfung der Auslegung des	
	EWT am Auditorium des Solar-Campus der FH in Jülich	57
4.12	Charakteristische Temperaturwerte am EWT der FH in Jülich	58
4.13	Wärmeaustausch im EWT der FH in Jülich während des untersuchten	
	Zeitraums von Juli bis Oktober 1999	61
4.14	Vom Ventilator des EWT der FH in Jülich umgesetzte elektrische Energie	62
4.15	Eingabedaten der GAEA-Projektdatei zur Berechnung des EWT am	
	Schwerzenbacherhof	64
4.16	Charakteristische Temperaturen während des Betriebs des EWT am	
	Schwerzenbacherhof	67
4.17	Wärmeaustausch im EWT des Schwerzenbacherhofs während	
	des Jahres 1992	67
4.18	Eingabedaten der GAEA-Projektdatei für eine Fallstudie mit Widerstands-	_
	Kapazitäten-Modell (WKM)	68
4.19	Ergebnisse der Berechnung für eine Fallstudie mit Widerstands-	
	Kapazitäten-Modell (WKM)	69
- 4		
5.1	vvertebereich für Angaben zur Bestimmung des Layouts	- 4
	VON EVVI IN GAEA	14

C Nomenklatur

$\begin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$	ດໍ ດໍດໍດໍດໍດໍດໍດໍດໍ
$\begin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$	ຜູ້ ຜູ້ຜູ້ຜູ້ ຜູ້ຜູ້
$\begin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$	ວໍ ວໍວໍວໍວໍວູວູ ວໍ
$ \begin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$	သံ သံသံသံဘံ သံ
$\begin{array}{llllllllllllllllllllllllllllllllllll$	ວຸ ວີ ວີ ວີ ບີ
$\vartheta_{A,P,i}$ Eutremperatur im Rohr beim Eintritt in ein Segment $\vartheta_{E}(u,v)$ Erdreichtemperatur im System "Ebene Platte" $\vartheta_{E}(x,y)$ Erdreichtemperatur im System "Rohr im Erdreich" ungestötte Erdreichtemperatur en der Debrusset	0 2 2 2 2 2 2 2 2 2
$\vartheta_{\rm E}({\rm u},{\rm v})$ Erdreichtemperatur im System "Ebene Platte $\vartheta_{\rm E}({\rm x},{\rm y})$ Erdreichtemperatur im System "Rohr im Erdreich" ungestörte Erdreichtemperatur en der Debrussel	ວ ວ ວ ວ ວ
	0° 0° 0°
me o ungesione Ergreichtemperatur an der Konrwand	°C ℃
$\vartheta_{E,0,Geb}$ korrigierte Erdreichtemperatur zur Berücksichtigung von Gebäudeeinflüssen	°C
 terrigierte Erdreichtemperatur zur Berücksichtigung von Erdoberflächeneinflüssen 	
$\vartheta_{E,Geb}$ Erdreichtemperatur an der Gebäudewand	°C
	°C
$\vartheta_{\rm E,W}$ (korrigierte) Erdreichtemperatur an der Rohrwand	°C ⊃°
$\vartheta_{\text{E,Welle}}$ Erdreichtemperatur aufgrund der Anregung durch die Temperaturwelle an der Erdoberfläche	ۍ د
ϑ_m janrlicher Mittelwert der Umgebungslufttemperatur iöhrlicher meximeler Menetemittelwert der Umgebungslufttemperatur	0° °C
v_{max} jannicher maximaler wonatsmittelweit der Omgebungsfuttemperatur W//armeleitfähigkeit des Erdreichs W//	(m K)
$\lambda_{A,D}$ Wärmeleitfähigkeit der Luft im Rohr $W/($	(m K)
$\lambda_{\rm P}$ Rohrreibungszahl	-
V _{A.P} kinematische Viskosität der Luft im Rohr	m²/s
(typischerweise: $v_{A,P} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ bei $\vartheta_{A,P} = 20 \text{ °C}$)	
ξ dimensionsloser Parameter für die "thermische Tiefe" des Rohrs	-
ρ c volumenbezogene Warmekapazitat des Erdreichs J/(r	M ³ K)
ρ _A Lundichte K	$\frac{(g/m^3)}{m^3 k}$
	п- к)
a Temperaturleitfähigkeit des Erdreichs	m²/s
B ₀ Einflussbreite für den Wärmeaustausch eines Rohres	m 2 K)
	m m
n _B Anzahl der Rohre im Rohrregister	-
Nu Nusselt-Zahl der Luft im Rohr	-
∆p Druckabfall im Rohr	Pa
Δp_F strömungsunabhängigger (fester) Druckabfall im EWT (z.B. durch Filter)	Pa
Pr Prandti-Zani fur Luft (typischerweise: $Pr = 0,72$) R Gesemtleistung des Ventilators	-
$\dot{\circ}$ Wärmeaustausch eines Einzelrohrs	Ŵ
\dot{Q}_{ees} ges. Wärmeaustausch im EWT	W
Q Wärmefluss zwischen den Plattenoberflächen	W
Öpp Wärmeaustausch des Rohrregisters	W
Q _w Wärmefluss vom Erdreich durch die Rohrwand an die Luft im Rohr	W
Q _{w1} längenbezogener Wärmefluss zwischen Erdreich und Rohr	W/m
Q _{wz} Wärmeaustausch in einem Segment des EWT	W
R ₀ Rohrradius	m

	Estimate des secondeires Asserdances des Datus	
r _{1,2}	Faktoren der geometrischen Anoranung des Ronrs	m
S.	Verlegungstiefe der Rohrmitte unter der Erdoberfläche	- m
Sout	Abstand zwischen Rohr und Gehäude	m
Sciw	Tiefe des Grundwasserspiegels unter der Erdoberfläche	m
Sob	Frosteindringtiefe	m
T	Temperatur	K
	Amplitude der Temperaturwelle im Erdreich	K
	Amplitude der Temperaturwelle an der Erdoberfläche	K
t	Zeit	S
to	Dauer des Jahres (1 a \approx 31.5 x 10 ⁶ s)	S
t _{0.Welle}	Dauer der Anregung (= Periode der Śinuswelle)	S
$\Delta t_{Welle}(x)$	tiefenabhängige zeitliche Verzögerung der Temperaturwelle bei der	S
	Fortpflanzung im Erdreich	
U*	Einflussverhältnis des Wärmeaustauschs zwischen Erdreich und Rohr und	-
	zwischen Rohr und Luft im Rohr	
U* _{Geb}	Einflussverhältnis des Wärmeaustauschs zwischen Erdreich und Rohr und	-
	zwischen Gebäude und Rohr	
U* _{GW}	korrigiertes Einflussverhältnis zur Berücksichtigung von Grundwasser	-
U _{Geb}	Warmedurchgangskoeffizient der Gebaudewand	W/(m ² K)
UL	langenbezogener Warmedurchgangskoeffizient der Ronrwand	νν/(m κ)
u _w	Dicke der ebenen Platte	m
V _{A,P}		m%s
V _{A,P}	mittlere Strömungsgeschwindigkeit der Luft im Rohr	m/s
W ₀	Verlegeabstand zwischen den Rohren des Rohrregisters	m
х	liefe des Erdreichs	m
x ₀	scheinbare Tiefe der Ronrmitte für die Transformation vom System "Ronr	m
-	IIII EIGIEICH III GAS System "EDENE Platte"	
<u>ک</u>	Substitutionsgroße der Derechnung	-
ΔZ		m

84

D Literatur

[1] K.J. Albers:

Untersuchungen zur Auslegung von Erdwärmeaustauschern für die Konditionierung der Zuluft für Wohngebäude, Dissertation, Abteilung Bauwesen der Universität Dortmund, Dortmund, 1991

- St. Benkert, T. Braeske, F.D. Heidt:
 Presentation of passive solar and low energy architecture in Germany by multimedia software, in Proceedings EuroSun '96, Freiburg, Sept. 16th...19th 1996, DGS-Sonnenenergie Verlags-GmbH, München, 1996, pp. 964...969
- [3] T. Braeske, F.D. Heidt, J. Schnieders: Software to assess energy performance and energy savings economy in buildings, in Proceedings EuroSun '96, Freiburg, Sept. 16th...19th 1996, DGS-Sonnenenergie Verlags-GmbH, München, 1996, pp. 976...982
- [4] M. Bruse:
 Simulation von Erdwärmetauschern mit der Finite-Differenzen-Methode, in Kurzbericht vom Start-Meeting im "Verbundprojekt Luft-/Erdwärmetauscher", 26. Nov. 1998, DLR Köln, S. 27/28
- [5] H.L. von Cube:
 Die Projektierung von erdverlegten Rohrschlangen für Heizwärmepumpen (Erdreich-Wärmequelle), in Klima + Kälte-Ingenieur, 5, 1977, S. 217...222
- [6] H.G. Dibowski:
 NESA-Ausstattung und Meßkonzept für das Sonnenofen-Laborgebäude, in F.D.
 Heidt (Ed.): Niedrigenergie- und Solar-Architektur (NESA), Fortschritt-Berichte
 VDI, Reihe 6, Nr. 319, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1995, S. 30...42
- [7] K. Elgeti: Der Wärmeverlust eines in einer Wand verlegten Rohres, HLH 22 (1971) 3, S. 109...113
- [8] M. Evers:
 Auslegung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eines Luftkanal-Erdwärmeübertragers zur Zuluftkonditionierung am Beispiel eines Vortragssaales, Diplomarbeit, Fachgebiet Versorgungstechnik – TGA, Fachhochschule Köln, 1999
- [9] H. Fleer, M. Bruse: LEO - Passive Luftkühlung - Messung und Erstellung von Auslegungssoftware für Erdkanäle, Endbericht zum Forschungsprojekt 253 128 96 der AG Solar NRW, Arbeitsgruppe Klimaforschung, Geographisches Institut der Ruhr-Universität Bochum, 1998
- [10] V. Gnielinski: Neue Gleichungen für den Wärme- und den Stoffübergang in turbulent durchströmten Rohren und Kanälen, in Forschung im Ingenieur-Wesen, 41, 1975, S. 8...16

86	Litera
[11]	H. Gröber, S. Erk, U. Grigull:Die Grundgesetze der Wärmeübertragung, 2. Nachdruck des 3. Neudrucks der3. Aufl., Springer-Verlag, Berlin, 1988
[12]	Heliograph, Ingenieurgesellschaft für rationelle Energieverwendung mbH: Planungshilfe zur Dimensionierung von Erdwärmetauschern (EWT), Aachen, 1994
[13]	Ch. Hovermann: Der EWT auf dem Solar-Campus der FH Aachen, Abt. Jülich, in Kurzbericht vom Start-Meeting im "Verbundprojekt Luft-/Erdwärmetauscher", 26. Nov. 1998, DLR Köln, S. 1321
[14]	Ch. Hovermann: Erläuterung zum Meßsystem, Solar-Institut Jülich, 05. August 1999

- [15] Ch. Hovermann: Erste Auswertung der Meßdaten vom Erdreichwärmetauscher (EWT) des Auditoriums, Solar-Institut Jülich, 05. August 1999
- A. Huber, St. Remund: [16] Widerstands-Kapazitäten-Modell WKM LTe, Program for the Simulation of Air-Earth Heat Exchangers, IEA-BCS Annex 28 Low Energy Cooling, Subtask 2 Design Tools for Low Energy Technologies, 1999, zitiert nach [32]
- [17] F. Jäger, J. Reichert, H. Herz: Überprüfung eines Erdwärmespeichers, Research Report T81-200, BmFT, Bonn, 1981
- [18] R. Jeschar, R. Wagner: Schrifttumsübersicht über Stoffdaten und Wärmeübergangskoeffizienten, Anhang zu [17]
- O. Krischer: [19] Das Temperaturfeld in der Umgebung von Rohrleitungen, die in die Erde verlegt sind, in Der Gesundheits-Ingenieur, 59, 1936, S. 537...539
- [20] Fa. METEOTEST: METEONORM '97, Global Meteorological Database for Solar Energy and Applied Meteorology, Version 3.06, Bern, 1997
- [21] N.N.: Entwurf DIN EN 832 - Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden, Beuth-Verlag GmbH, Berlin, 1992
- [22] N.N.: Tagungsband Bodenfeuchtesymposium, Jülich, 1999, in Vorbereitung
- [23] N.N.: VDI-Wärmeatlas, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1977
- [24] Z. Nehari: Conformal Mapping, Dover Publications, New York, 1952

86

Literatur

- [25] E. Philippow (Hrsg.): Taschenbuch Elektrotechnik, Band1: Allgemeine Grundlagen, Carl Hanser Verlag, München, 1986
- [26] H. Recknagel, E. Sprenger, E.-R. Schramek (Hrsg.):
 Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, R. Oldenbourg, München, ⁶⁸1997
- [27] K. Rittenhofer:
 Implementierung eines Zuluftsystems in die Simulationsumgebung ColSim und Validierung anhand eines Erdreichwärmetauschers, Diplomarbeit, Fachgebiet Bauphysik und Technischer Ausbau, Universität Karlsruhe (TH), 1999
- P. Springl: Niedrigenergie-Bürogebäude in Köln: Planung – Umsetzung – Erfahrungen, DETAIL 3/1997, S. 375...382
- [29] K. Voss, W. Stahl, A. Goetzberger: Das Energieautarke Solarhaus, Bauphysik, 15, 1993, 1, S. 10...14 und 3, S. 90...96
- [30] A. Vujasinovic´: Energetische Analyse eines Niedrigenergielaborgebäudes mit Erdwärmetauscher auf der Basis von Meßdaten und thermischer Simulation, Diplomarbeit, FG Bauphysik & Solarenergie, Universität-GH Siegen, 1999
- [31] R. Wortmann:

Optimiertes Energiekonzept für die Bibliothek der Fern-Universität Hagen, in Kurzbericht vom Start-Meeting im "Verbundprojekt Luft-/Erdwärmetauscher", 26. Nov. 1998, DLR Köln, S. 7...12

[32] M. Zimmermann: Rationelle Energienutzung in Gebäuden: Handbuch der passiven Kühlung, EMPA, Dübendorf, Schweiz, 1999

 [33] M. Zimmermann: The "Schwerzenbacherhof" Office and Industrial Building, Switzerland: Ground Coupled Ventilation System, IEA Low Energy Cooling Demonstration, Report, 1995

E Veröffentlichungen

- [34] St. Benkert, F.D. Heidt, D. Schöler:
 Calculation Tool for Earth Heat Exchangers *GAEA*, in Proceedings Building Simulation '97, Fifth International IBPSA Conference, September 8-10, 1997, Prague, Vol. II, pp. 9...16
- [35] St. Benkert, F.D. Heidt: Designing Earth Heat Exchangers with *GAEA*, in Proceedings EuroSun '98, Sept. 14-17, 1998, Portoroz, The Franklin Company Consultants Ltd, Birmingham, pp. IV.2.2-1...7
- [36] St. Benkert:
 Entwurf von Erdwärmetauschern mit *GAEA*, in Dokumentation SolarBau : MONITOR, Workshop ErdWärmeTauscher, 15./16. Oktober 1998, Cölbe bei Marburg, S. 43...54
- [37] St. Benkert:
 Entwurf von Erdwärmetauschern mit GAEA, in Kurzbericht vom Start-Meeting im "Verbundprojekt Luft-/Erdwärmetauscher", 26. Nov. 1998, DLR Köln, S. 22...26
- [38] St. Benkert, F.D. Heidt:
 Software für die Wissensvermittlung zur Niedrigenergie- und Solararchitektur, in Beck, U. und Sommer, W. (Hrsg.): Tagungsband LearnTEC 99, 9.-11. Feb. 1999, Schriftenreihe Karlsruher Kongreß- und Ausstellungs-GmbH, Karlsruhe, S. 313...318

Weitere Veröffentlichungen, insbesondere zur Validierung von GAEA, sind geplant.