

Luft-Erdwärmetauscher L-EWT

Planungsleitfaden Teil 2



Einleitung

Version 0.9 Januar 2004

Der zweite Teil des Planungsleitfadens für Luft-Erdwärmetauscher (L-EWT) befasst sich vorwiegend mit der Auslegung von großen L-EWT für Nichtwohngebäude.

Der Planungsleitfaden 2 besteht aus mehreren Modulen.

Das Anwendungsziel der einzelnen Module ist in der Datei LEWT_PLF2_EINLEITUNG_09.pdf detailliert beschrieben. Insgesamt existieren folgende Module:

0	LEWT_PLF2_LIESMICH_09.pdf	Übersicht
1	LEWT_PLF2_EINLEITUNG_09.pdf	Einleitung
2	LEWT_PLF2_SIMULATION_09.pdf siehe auch http://www.geographie.ruhr-uni-bochum.de/agklima/ewt/index.html	Numerisches Simulationsprogramm
3	LEWT_PLF2_BENCHMARK_09.pdf	Überschlägiges Abschätzverfahren
4	LEWT_PLF2_KENNZAHL_09.pdf	Qualitätsbewertung
5	LEWT_PLF2_DATENBLATT_09.pdf	Standardisierte Datenblätter
6	LEWT_PLF2_TECHNISCHEDetails_09.pdf	Planungshinweise, Mathematik und Details
7	LEWT_PLF2_PROJEKTE_09.pdf	Projektberichte
8	LEWT_PLF2_ANHANG_09.pdf	Anhang, Tabellen, EinzelDetails

Jedes Modul kann unter www.ag-solar.de als PDF-Version einzeln geladen werden. darüber hinaus werden die Module auf der AG-Solar CD-ROM 2004 zu finden sein.

Der erste Teil des Planungsleitfadens , der die Basisinformationen und Auslegungshinweise für einfache Kleinsysteme bei Wohngebäuden enthält, ist erhältlich über www.ag-solar.de und www2.dlr.de/ET/sonnenofen/nesa sowie als Druckversion vom DLR, Köln.

Hauptautor dieses Moduls:

Dr.-Ing. Gerd Dibowski

Kontakt: gerd.dibowski@dlr.de

INHALTSVERZEICHNIS

Die Arbeitsgemeinschaft Solar NRW	3
Der Planungsleitfaden der AG-Solar NRW	4
Beteiligte	5
"Welches-für-Was?"-Konzept	6
Motivation.....	7
L-EWT Planungsleitfaden, Teil 2 (Große Systeme).....	9
Verfahren 1 Benchmark-Verfahren	11
Verfahren 2 Numerisches Simulationsprogramm LEWTSim	12
Verfahren 3 Kennzahl-Verfahren	13
Zusätzliche Absicherung.....	14
Ergebnistabellen numerisch berechneter Systemvarianten.....	15
Technische Grundlagen.....	16
Grundprinzip eines L-EWT.....	17
Ziel der Auslegung	19
Testsysteme im Förderprojekt	21
Softwareaktivitäten im Projekt.....	22
Systembeschreibung und Anforderungen.....	23
Anwendungsbereiche und Grenzen der Nutzung	24
Einige konstruktive Grundlagen	25
Verlegeoptionen.....	26
Bodenkennwerte.....	26
Wichtige Bewertungskennzahlen.....	29
Warum ist die Berechnung eines L-EWT eigentlich schwierig?.....	32
Rechnergestützte Modellierung von Luft-Erdwärmetauschern	34
Anfänge des L-EWT.....	35

Die Arbeitsgemeinschaft Solar NRW

Die Bundesrepublik Deutschland hat sich im Kyoto-Protokoll verpflichtet, bis zum Jahre 2005 die CO₂-Emission um 25% gegenüber 1990 zu reduzieren. Als einen Beitrag dazu soll der Anteil der erneuerbaren Energien am gesamten Energieverbrauch bis zum Jahr 2010 verdoppelt werden (BMWi).

Nordrhein-Westfalen ist hinsichtlich Energieangebot und -verbrauch eines der bedeutendsten Bundesländer in Deutschland. Es will dementsprechend einen signifikanten Beitrag zur Lösung dieser Energie-Problematik durch einen forderten Ausbau von Forschung, Entwicklung und Förderung der Nutzung erneuerbarer Energiequellen leisten. Zugleich werden erhebliche Anstrengungen zur Senkung des Energieverbrauchs durch energie-einsparende Maßnahmen unternommen. NRW entwickelt sich damit zu einem Kompetenzzentrum für Energieforschung und Energietechnologien. Ziel ist der Aufbau eines integrierten Technologiestandortes von der Forschung bis zur Produktion. Damit können hochqualifizierte Arbeitsplätze in stark wachsenden Wirtschaftsbereichen und in der Forschung geschaffen werden.

Mit der "Landesinitiative Zukunftsenergien" steht eine zentrale Öffentlichkeitsplattform zur Verfügung, die eine enge Zusammenarbeit aller Partner - von der Hochschulforschung im Rahmen der AG Solar bis zur Markteinführung und Technologie-Verbreitung durch Einrichtungen wie das "REN-Programm" und die "Energieagentur NRW" - ermöglicht.

Die Arbeitsgemeinschaft (AG) Solar NRW [AGS] ist eine Einrichtung des Ministeriums für Schule und Weiterbildung, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen. Sie fördert innovative Projekte zu Techniken der Rationellen Energieverwendung und zur Nutzung der Sonnenenergie.

Bild 1

Position der Arbeitsgemeinschaft Solar NRW innerhalb des Innovationsprozesses



In der AG Solar NRW schließen sich Hochschulen, Forschungsinstitute, Wirtschaftsunternehmen und sonstige Einrichtungen mit Sitz in NRW zusammen, die Forschungs- und Entwicklungskapazitäten auf dem Gebiet der Solarenergietechnik unterhalten oder diese Techniken anwenden. Forschungs- und Entwicklungsprojekte stellen die Basis der AG Solar dar. Die fachlichen Inhalte und Zielsetzungen dieser Projekte entstehen in einem Selbstorganisationsprozess, der in vier Themenfeldern aufgeteilt ist.

Der Planungsleitfaden der AG-Solar NRW

Luft-Erdwärmetauscher (L-EWT) dienen zur Energieeinsparung bei Gebäuden. Je nach Jahreszeit liefern sie Wärme oder auch Kälte, um den Anteil konventioneller Energie zu reduzieren. Aufgrund der hohen Leistungszahlen ist das CO₂-Einsparpotenzial sehr hoch.

Um die noch existierenden Fragestellungen bezüglich L-EWT zu bearbeiten, wurde das Verbundprojekt L-EWT vom Ministerium für Schule und Weiterbildung, Wissenschaft und Forschung des Landes NRW im Rahmen der AG Solar NRW gefördert.

Projekt:

"Erdwärmetauscherverbund"

Förderkennzeichen: 25314598

Wir möchten uns an dieser Stelle für die Förderung dieses Projektes bedanken

In diesem Projekt wurden einheitliche, belastbare und einfach zu handhabende Auslegungsverfahren entwickelt, die zu reproduzierbaren Ergebnissen führen und damit Planungssicherheit gewährleisten. Es wurden drei grundsätzlich verschiedene Testanlagen in Jülich, Köln und Hagen konzipiert und messtechnisch begleitet, um die wesentlichen existierenden Unterschiede, auch aus weiteren Projekten, herausarbeiten zu können. Die inhaltliche Struktur, die Messeinrichtungen und die Software werden nachfolgend vorgestellt.

Ein bedeutendes Charakteristikum eines L-EWT ist die Anpassungsfähigkeit an die gegebenen bau- und lüftungstechnischen Randbedingungen eines Projektes, aus der folgt, dass sich die bisher gebauten L-EWT im Vergleich untereinander deutlich unterscheiden. Eine einfache Standardisierung des Planungsverfahrens erscheint aus heutiger Sicht nicht, oder nur sehr eingeschränkt möglich. Die eigentliche Planungsleistung liegt in der Anpassung und Optimierung an die individuellen bau- und haustechnischen Gegebenheiten. Die im L-EWT-Verbundprojekt zu entwickelten Planungswerkzeuge müssen diesem Umstand Rechnung tragen.

Es hat sich als notwendig erwiesen, den Planungsleitfaden zu teilen, da sich die Systemkonfigurationen und die Betriebsziele von L-EWT bei Wohnhäusern (Teil 1) wesentlich von L-EWT bei großen Anwendungen wie Bürogebäude o.ä. (Teil 2) unterscheiden. Bei Wohnhäusern ist die Luftvorwärmung, aber speziell der Frostschutz der Wärmerückgewinnung (WRG), das Hauptziel der Nutzung. Bei Bürobauten steht die sommerliche Kühlung im Vordergrund. Außerdem unterscheiden sich beide Anwendungsgebiete durch die bewegten Luftvolumenströme, die dadurch einen wesentlichen Einfluss auf die notwendige Systemkonfiguration nehmen. Sind bei Anwendungen im Wohnbereich Volumenströme von z.B. 150 m³/h die Regel, können bei großen Gebäuden Werte von über 100.000 m³/h vorkommen.

Dieser zweite Teil befasst sich mit großen L-EWT-Systemen, wie sie in Bürogebäuden, Produktionshallen und z.B. in Einkaufszentren zum Einsatz kommen.

Der erste Teil, der die Basisinformationen und Auslegungshinweise für einfache Kleinsysteme bei Wohngebäuden enthält, ist erhältlich über

<http://www.ag-solar.de/> und
<http://www2.dlr.de/ET/sonnenofen/nesa>

sowie als Druckversion vom DLR, Köln.

Beteiligte

Die Beteiligten im L-EWT-Verbundprojekt sind:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Solare Energietechnik, Köln		Testanlage: Bau und Vermessung Simulationen Planungsleitfaden VDI-Richtlinie 4640-4 Projektkoordination	Dr. Gerd Dibowski
Ingenieurbüro für Wärme- und Energietechnik		Testanlage: Bau und Vermessung Simulationen Planungsleitfaden	Dipl.-Ing. Ralph Wortmann
Solar-Institut Jülich SIJ an der Fachhochschule Aachen	 	Testanlage: Bau und Vermessung Planungsleitfaden	Dipl.-Ing. Klaus Rittenhofer Dipl.-Ing. Karsten Gabrysch (Teil 2, Benchmark)
 Ingenieurgesellschaft für technische Gebäudeausrüstung mbH Köln, Berlin		Planungsleitfaden Simulationen VDI-Richtlinie 4640-4	Dipl.-Ing. Mirjam Borowietz

Speziell Teil 1 Systeme für Wohngebäude

		Simulationsprogramm GAEA	Dr. Stephan Benkert
---	---	-----------------------------	---------------------

Speziell Teil 2 Große Systeme

Ruhr-Universität Bochum Geographisches Institut AG Klimaforschung		Simulationsprogramm LEWT-Sim Planungsleitfaden	Dr. Michael Bruse
---	---	--	-------------------

Es werden vier Verfahren zur L-EWT-Auslegung angeboten, die unterschiedlichen Arbeitsweisen und Detaillierungsanforderungen gerecht werden sollen. Hierbei wird unterschieden, ob es sich um eine schnelle, überschlägige Abschätzung (Benchmark-Verfahren) handeln soll oder um eine aufwändige aber detailgetreue, numerische Computersimulation (LEWTSim). Unterstützt werden beide Verfahren durch das Kennzahl-Verfahren, mit dem ein berechneter L-EWT auf seine energetische Qualität und auf sein CO₂-Einsparpotenzial hin bewertet werden kann. Zur weiteren Planungshilfe dienen standardisierte Datenblätter und Ergebnistabellen numerisch simulierter L-EWT.

"Welches-für-Was?"-Konzept

Ansatz	Bemerkungen
<p>Benchmark-Verfahren</p> <p>Ziel: schnelle Maximalwertauslegung als Abschätzverfahren</p>	<p>Vorteile: wenige Randbedingungen nötig, schnelles Verfahren, Vergleichsprinzip, keine indifferenten Aussagen durch unterschiedliche Betriebsprofile</p> <p>Nachteile: keine Berücksichtigung von Betriebszeiten (keine Ertragsbestimmung) und Ermüdungseffekten, nur für einfache Anlagen zu empfehlen</p>
<p>Programmsimulation L-EWTSim</p> <p>Ziel: Berechnung komplexer Systeme Abbildung des dynamischen und instationären Verhaltens</p>	<p>Vorteile: genau und detailliert, Berechnung von Maximalwerten und Erträgen über Monate und Jahre, Darstellung der instationären Einflüsse und Ermüdungseffekte, Betriebsstrategien modellierbar</p> <p>Nachteile: Einarbeitungszeit notwendig, mögliche Fehler durch falsche Annahmen der Randbedingungen</p>
<p>Kennzahlverfahren</p> <p>Ziel: Qualitative Beurteilung einer Konfiguration</p>	<p>Vorteile: Ganzheitliche Bewertung von Aufwand und Nutzen in Bezug auf die CO₂-Effizienz durch Kennzahlen, basierend auf Berechnungen mit numerischen Verfahren; Berücksichtigung von Betriebszeiten und Ermüdungseffekten, schnelles Verfahren, primärenergetisch-bezogene Umweltbilanz des Systems darstellbar</p> <p>Nachteile: Fehler durch falsche Annahmen der Randbedingungen</p>
<p>Standardisierte Datenblätter und Tabellen</p> <p>Ziel: Vergleich der Planung mit bereits durchgeführten Projekten</p>	<p>Vorteile: Zusätzliche Absicherung des Vorhabens, schnelles Erzielen einer Übersicht/ Tabellen: Zeitersparnis, da Ergebnisse bereits aufwändig numerisch gerechnet (Programmierung, Eingabe, Prozess, Auswertung); Messergebnisse erhältlich</p> <p>Nachteile: Abhängigkeit von den Zulieferern der Informationen (Datenblätter), Übertragbarkeit</p>

Motivation

Die Problematik, dass das bei der Verbrennung fossiler Energieträger frei werdende Kohlendioxid (CO₂) eine i.d.R. unerwünschte klimaverändernde Wirkung hat, ist eine mittlerweile der Allgemeinheit bekannte Gewissheit. Aus diesem Grund gibt es eine Vielzahl von Anstrengungen, auf Kohlenstoff basierende Energieträger durch regenerative Alternativen zu ersetzen. Zum Beispiel wurde auf europäischer Ebene im "Weißbuch für erneuerbare Energien" [WBuch] das indikative Ziel formuliert, den Anteil regenerativer Energien an der europäischen Energieversorgung auf 12% im Jahr 2010 zu verdoppeln. Auf deutscher Ebene bekräftigte die Bundesregierung in ihrer Koalitionsvereinbarung das Ziel, die CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2005 gegenüber 1990 um 25% zu reduzieren. An dieser Aufgabe arbeitet seit Anfang der 90er Jahre die Landesregierung Nordrhein-Westfalens in besonderem Maße. Bereits zu einer Zeit, in der weder das Problembewusstsein für Klimaveränderungen, noch eine Akzeptanz für Regenerative Energietechniken vorhanden waren, wurde die **Arbeitsgemeinschaft Solar NRW**, kurz AG-Solar, gegründet. Die AG-Solar fördert seitdem Projekte bei denen die Nutzung der Sonnenenergie eine Schlüsselrolle zur Reduzierung von CO₂-Emissionen spielt. Zu diesen Projekten zählt auch das L-EWT-Verbundprojekt. Das besondere an diesem Projekt ist, dass die Sonnenenergie bei L-EWT nicht direkt genutzt wird. Die hier indirekte Nutzung der solaren Einstrahlung bringt dennoch hervorragende Ergebnisse zustande, wie nachfolgend gezeigt werden kann. Die Nutzung des Untergrundes für thermisch-energetische Anwendungen ist nicht unbedingt auf größere Tiefen beschränkt. Schon weit oberhalb der neutralen Zone, ab einer Tiefe von etwa 1,5 m, lassen sich Wärmemengen übertragen, die insbesondere für die Wärme- und Kältekonditionierung von Gebäuden interessant sind.

Verbrauchsstatistik

Vor der Vergabe von Forschungsmitteln muss grundsätzlich die Frage nach der Rechtfertigung für die Finanzierung eines Projektes gestellt werden. Sinnvoll sind u.a. Investitionen, bei denen aus Verbrauchsstatistiken erkannt werden kann, dass bei einem großen Energie-Basisumsatz ein großes Einsparpotenzial existiert. Dies gilt wesentlich für alle Maßnahmen, die Gebäude betreffen. Gebäude sind, statistisch nachweisbar, die größten Energieverbraucher in der Bundesrepublik. Dies gilt generell für alle westlich orientierten Industrienationen.

Das Statistische Bundesamt protokolliert die anfallenden Verbräuche nach Aufkommen und Umfang in vier Gruppen. Bild 2 zeigt dabei klar, dass der Bereich Private Haushalte, die Sparten Verkehr und Industrie allein schon übertrifft. Da die Verbrauchsgruppe Kleinverbraucher hier mit einzubeziehen ist (Bürogebäude, Öffentliche Gebäude, Einkaufszentren, Fertigungshallen etc.) kommt es zu einer ausgeprägten Dominanz der Gesamtverbrauchsgruppe Private Haushalte/Gebäude.

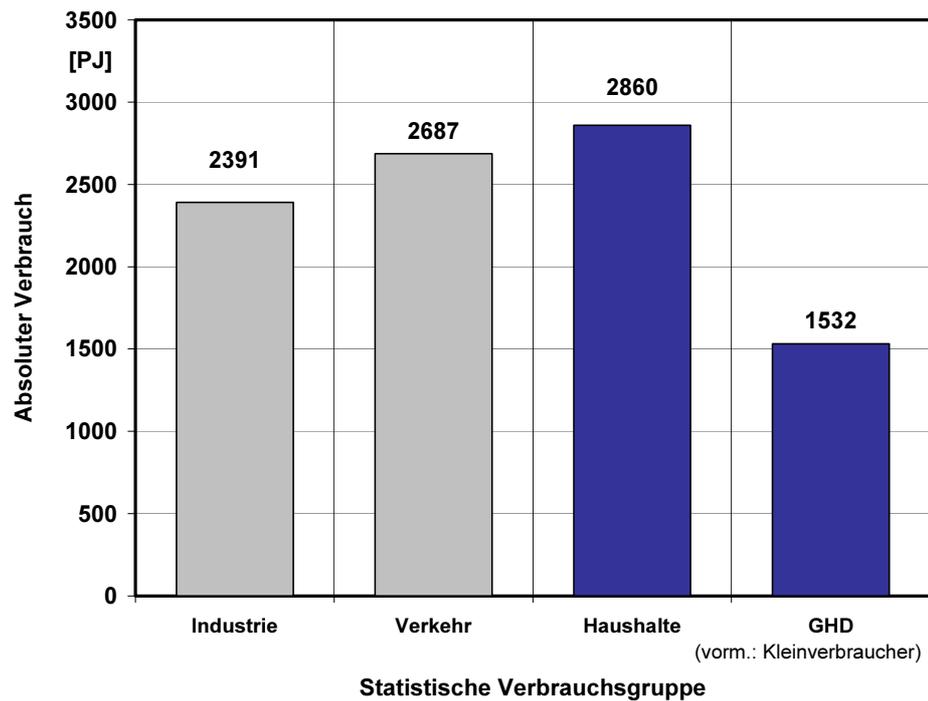
Signifikant hierbei ist, dass dieser Gesamtverbrauch mit geringen Energiedichten bzw. Temperaturdifferenzen, neben Abwärme (z.B. durch Wärmerückgewinnung oder Kraft-Wärme-Kopplung) durch Solaren ergie und Erdwärme abgedeckt werden könnte.

Bild 2

Struktur des Energieverbrauchs (Endenergie) der einzelnen statistischen Gruppen

Quelle:
Statistisches
Bundes-
amt/Arbeitsgemein-
schaft Energiebilan-
zen; Bilanz 2001

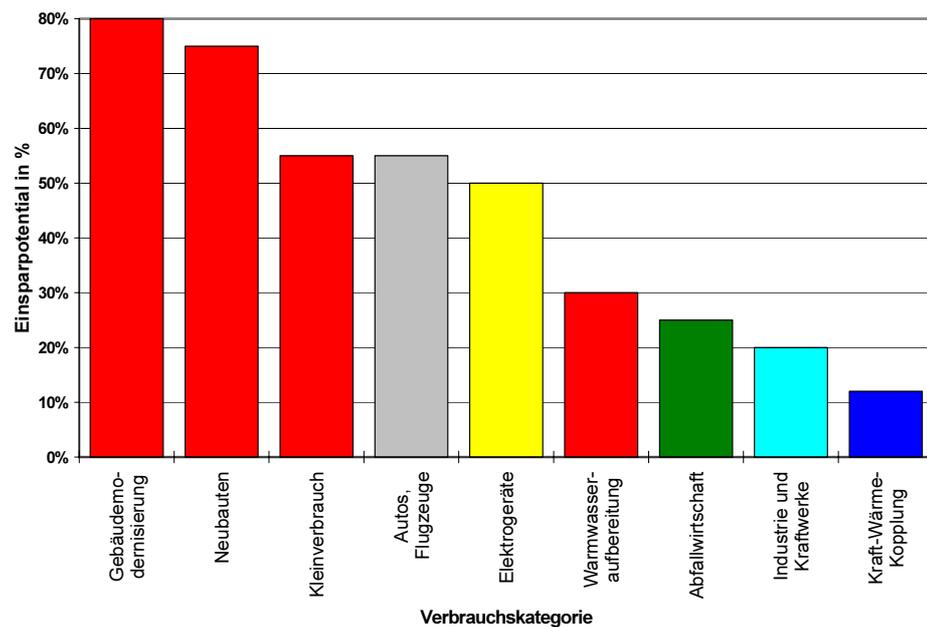
1 PJ ("Petajoule") =
 10^{15} Joule =
277.777.778 kWh



Die Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages zum Schutz der Erdatmosphäre hat die möglichen Einsparpotenziale untersucht, Bild 3 [Enquete]. Zum einen ist ein wesentlicher Teil der einsparbaren Energie im Gebäudesektor zu finden (rot), Besonders signifikant ist aber, dass es sich meistens um Wärme auf niedrigem Temperaturniveau und geringer Energiedichte handelt und somit einen besonders günstiger Ansatz zur Nutzung der solaren Einstrahlung, für die Gebäudebeheizung und -kühlung, auch in mitteleuropäischen Breiten, darstellt.

Bild 3

Energieeinspar-
bzw. CO₂-Redu-
zierungspotentiale
in Deutschland;
Quelle: Enquete-
Kommission des
Deutschen Bun-
destages zum
Schutz der
Erdatmosphäre



L-EWT Planungsleitfaden, Teil 2 (Große Systeme)

Wie bereits auf Seite 2 dargestellt, besteht der Planungsleitfaden aus Modulen, die sich jeweils durch ihr Anwendungsziel unterscheiden. Nachfolgend werden die Inhalte der Module näher erläutert. Neben den eigentlichen Berechnungseinheiten, **Benchmark-Verfahren**, **Numerische Simulation**, **Kennzahl-Verfahren** und **Standardisierte Datenblätter** werden im **Anhang Ergebnistabellen** (fast aller denkbaren) numerisch simulierter Mustersysteme angeboten. **Umfangreiche Planungshinweise**, die zusammengefassten Mess- und Betriebsergebnisse aus den innerhalb des Verbundprojektes entwickelten **Testanlagen** aus Köln, Jülich und Hagen sowie ausführliche Informationen zur **Lufthygiene** in L-EWT ergänzen die Berechnungsverfahren sinnvoll. Darüber hinaus sind im Anhang weitere Informationen wie Links, Literatur und Sonstiges abgelegt.

In Büros, Werkhallen oder anderen gewerblich genutzten Gebäuden fällt vor allem in sommerlichen Hitzeperioden ein erheblicher Kühlbedarf an, der durch die steigende thermische Wirksamkeit von inneren Wärmequellen vergrößert wird, wie Bürotechnik oder thermischen Fertigungsprozessen. Hier kann ein L-EWT einen wesentlichen Beitrag zur Gebäudekühlung und Kosteneinsparung leisten. Grundvoraussetzung ist allerdings das Vorhandensein einer mechanischen Lüftungsanlage¹.

Die Arbeitszahlen können bei geschickter Auslegung so günstig gestaltet werden, dass über die kumulierte Betriebskosteneinsparung eine Amortisation der Investitionskosten in wenigen Jahren möglich sein kann. Unter günstigen Bedingungen kann eine konventionelle Raumkühlanlage (Teilklimaanlage) vollständig ersetzt werden.

Bei L-EWT mit großen Volumenströmen ab etwa 10.000 m³/h ist man aus strömungstechnischen und konstruktiven Gründen gezwungen, ein Register einzusetzen. Dabei entsteht eine willkürliche Auswahl von Systemen, die durch Anzahl der Rohre, Länge, Durchmesser, gegenseitiger Abstand und Verlegetiefe variieren. Ergebnis ist eine große und unübersichtliche Vielzahl möglicher Registerkombinationen, aus denen die beste Konfiguration für den jeweiligen Anwendungsfall herausgefiltert werden muss. Dies ist erfahrungsgemäß mit einigen Schwierigkeiten verbunden.

Die Investitionskosten eines L-EWT für z.B. ein Bürogebäude können durchaus eine sechsstelligen Euro-Betrag erreichen. Daher sollte es selbstverständlich sein, nicht mit einfachen analytischen Verfahren zu arbeiten, die schnelle Ergebnisse liefern, auch weil sie zum Teil kostenfrei aus dem Internet geladen werden können. Anlagen dieser Größenordnungen müssen mit numerischen Verfahren gerechnet werden, die i.d.R.

- **teuer sind**
- **computerbezogene Rechenerfahrung voraussetzen** und
- **langwierig und damit personalkostenintensiv sind**

¹ L-EWT, die auf Basis der freien Konvektion funktionieren, also die natürliche Thermik ausnutzen, sind als kritisch einzustufen, weil durch die dafür benötigten sehr geringen Druckverluste auf notwendige Filter verzichtet werden muss [Hübner]. Diese Vorgehensweise widerspricht den hygienischen Anforderungen gemäß DIN [1946] und VDI [6022] demnach Luft als Lebensmittel einzustufen ist.

Daher wird es wirtschaftlich nicht tragbar sein, z.B. 15 oder 20 ausgewählte Systemvarianten mit aufwändigen, zeit- und damit kostenintensiven numerischen Verfahren zu rechnen.

Nachfolgend werden drei Verfahren vorgestellt, die dem Planer helfen sollen, in relativ kurzer Zeit einen Überblick über die wesentlichen Eigenschaften der jeweiligen Varianten für seine Entscheidungsfindung zu erhalten.

Die Grundidee besteht in der Bewertung der Systemvarianten über Kennzahlen. Auf Basis dieser Kennzahlen kann eine Filterung zugunsten der besten zwei oder drei Varianten durchgeführt werden, für die letztlich eine numerische Berechnung, z.B. mit dem hier beige-fügten numerischen Programm LEWTSim, stattfinden kann.

Gestützt werden diese Ergebnisse durch tabellierte Eckdaten von numerischen Berechnungen wesentlicher Konfigurationen, variiert über die Bodenzusammensetzung, dem Standort, der Betriebsart und der Verlegetiefe sowie von einer größeren Anzahl von standardisierten Datenblättern auf Basis konkret durchgeführter Projekte. Abgeschlossen wird dieser Planungsleitfaden durch die Darstellung von signifikanten Messergebnissen untersuchter Anlagen und Angaben zu praktischen und wirtschaftlichen Aspekten bei der Planung und der baupraktischen Umsetzung. In Bild 4 ist Zuordnung der einzelnen Planungsmodule dargestellt und der mögliche Planungsablauf dargestellt..

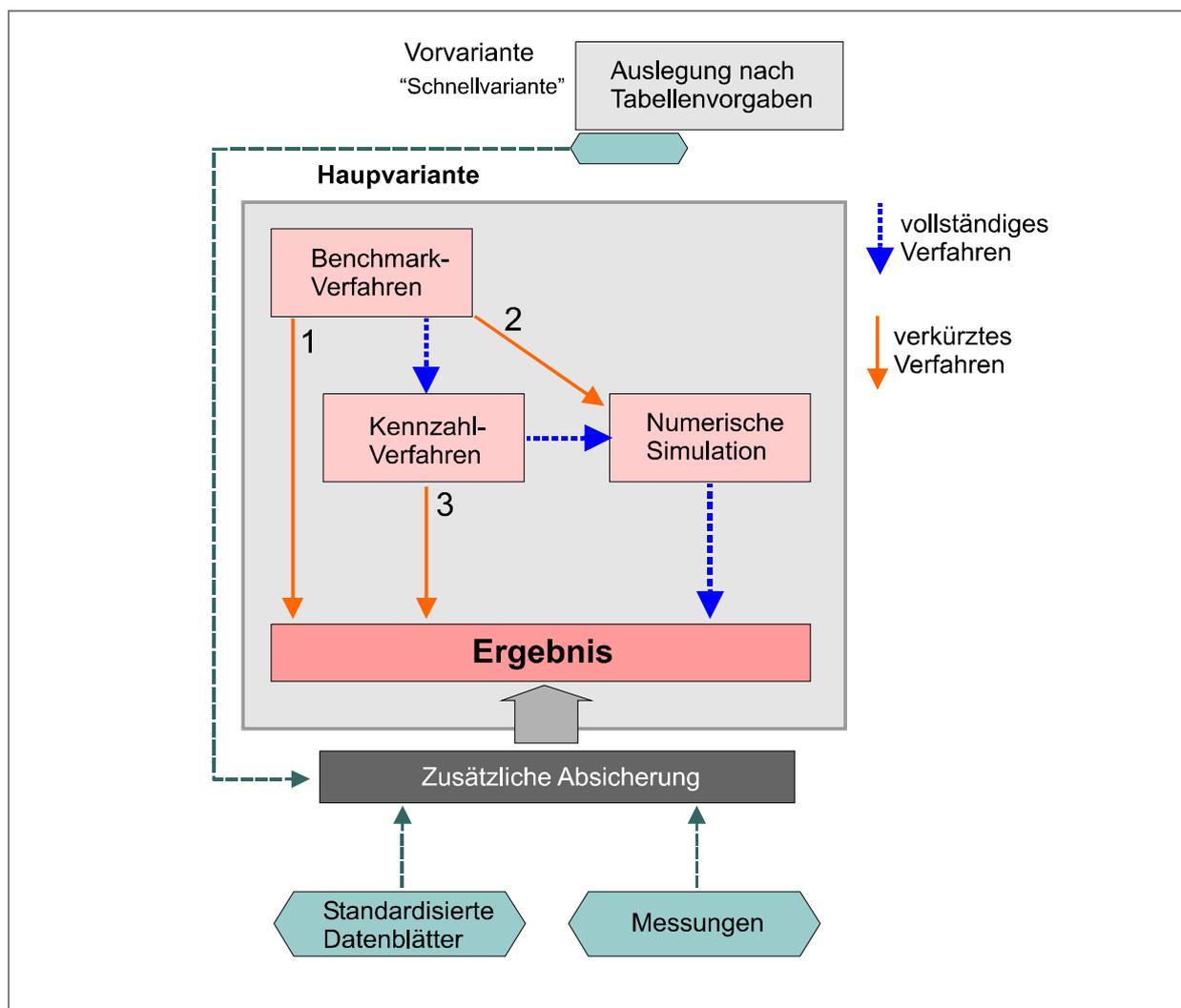


Bild 4 Bearbeitungsschemata innerhalb des Planungsleitfadens

Jedes der einzelnen Verfahren ist mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad in der Lage, dem Planer wichtige Informationen zu liefern. Es liegt letztlich im Ermessen des Planers, ob er nur ein bestimmtes Modul anwendet, oder die gesamte Prozedur durchläuft. Entscheidend ist, dass der Planer für sich die Sicherheit gewinnt, eine gute Entscheidung zu treffen. Dies kann u.U. durchaus auch mit einem einzigen Modul erreicht werden, weil der Planer z.B. bereits über eine ausreichende Projekterfahrung verfügt. Die drei Module, die vollständig angewendet in der in Bild 4 gezeigten Reihenfolge anwendbar wären, werden nachfolgend beschrieben.

Eine wesentliche Eigenschaft des L-EWT-Planungsleitfadens ist die dabei Möglichkeit, bei der Entscheidungsfindung variabel vorgehen zu können um den unterschiedlichen Umständen zu Beginn einer Auslegungsplanung gerecht zu werden. Vor diesem Hintergrund werden die Variationsmöglichkeiten des Ablaufschemas aus Bild 4 erläutert.

Verfahren 1 Benchmark-Verfahren

Ein detailliertes und sicher validiertes numerisches Verfahren ist die beste Lösung zur Berechnung eines L-EWT. Numerische Simulationsprogramme sind allerdings komplexe Gebilde, mit langer Entwicklungszeit, die auch heute noch dem Nutzer abverlangen, sich mit der Bedienung einige Zeit einzulassen. Im "rauen" Planungsbetrieb ist dies aber oft nicht möglich. Des weiteren benötigt ein solches Programm eine weit höhere Zahl von Eingabeparametern, als die bekannten Einfachverfahren.

Für schnelle überschlägige, vergleichende Abschätzungen zur LEISTUNGS-Fähigkeit eines L-EWT wurde das Benchmark-Verfahren entwickelt.

Das Benchmark-Verfahren zeigt mögliche gute Auslegungen auf Basis der Maximalleistung auf und ist für überschlägige und schnelle Abschätzungen geeignet.

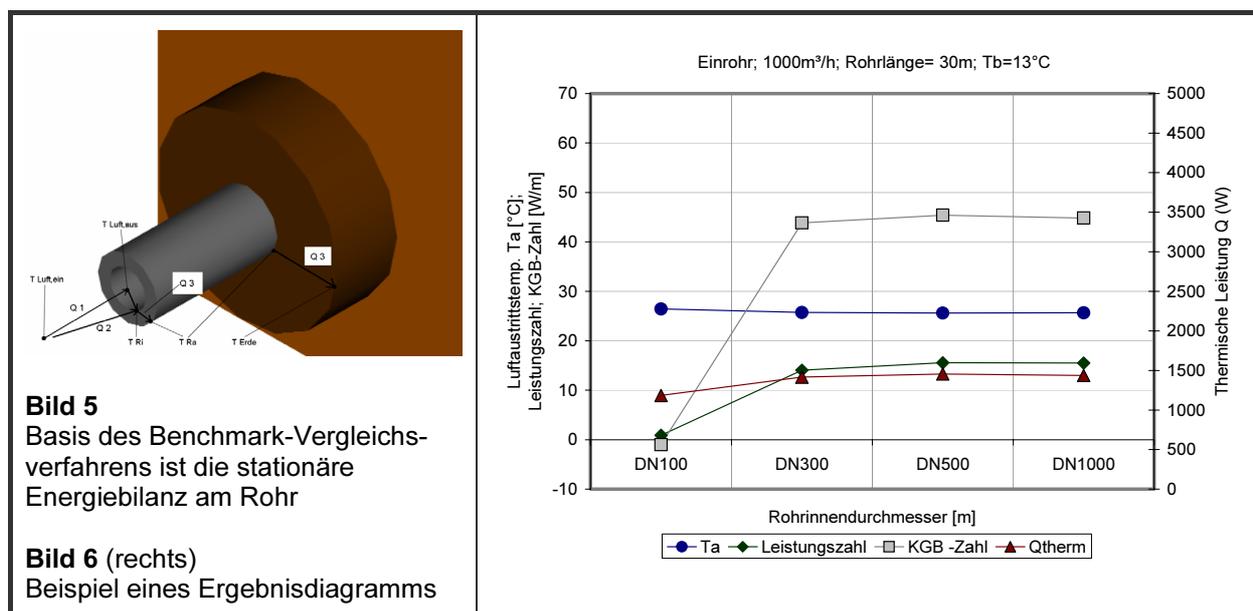


Tabelle 1 Beispiel einer Ergebnis- und Auslegungstabelle (Ausschnitt) im Benchmark-Vergleichsverfahren

Temp Boden	Länge	Temp Luft ein	dRa	dRi	V gesamt	Rohr-anzahl	V Einzel-rohr	Ta	Qtherm	delta p	Pvent	Leistungs-zahl	KGB - Zahl
°C	M	°C		m	m³/h		m³/h	°C	W	Pascal	kW		W/m
										Rohr+200Pa			
10	30	30	DN100	0,104	50000	5	10000	29,47	8730,21	150419,98	3481,94	0,00	-1,00
10	30	30	DN300	0,300	50000	5	10000	29,26	12285,75	1186,42	27,46	0,45	-1,00
10	30	30	DN500	0,476	50000	5	10000	29,14	14290,05	309,40	7,161	2,00	47,52
10	30	30	DN1000	1,000	50000	5	10000	28,83	19452,60	203,22	4,70	4,14	98,32
10	60	30	DN100	0,104	50000	5	10000	28,97	17083,04	300639,96	6959,26	0,00	-1,00
10	60	30	DN300	0,300	50000	5	10000	28,56	23961,04	2172,84	50,3	0,48	-1,00

Das Verfahren beruht auf der Betrachtung der momentanen Wärmebilanz des L-EWT-Rohres (Bild 5) und der umschließenden konzentrischen Schichten (Rohrwand, Verdichtung und Erdreich). Bei Vorgabe bestimmter Wandtemperaturen (Erdreich) und der Luft-Eintrittstemperatur kann die Austrittstemperatur für den stationären Betriebspunkt überschlägig ermittelt werden. Für eine große Zahl von Systemkonfigurationen wurde dies durchgeführt und die Ergebnisse tabellarisch abgelegt (Bild 6).

Die äußeren Randbedingungen wie Standort, Bodenart und Verlegetiefe wurden variiert. Liegt für den Planungsfall ein Volumenstrom vor, der diesen gerechneten Systemwerten, wie sie im Anhang abgelegt sind, entspricht, können die angegebenen Daten i.d.R. als Planungsergebnis direkt verwendet werden, sofern keine besonderen Abweichungen von üblichen Randbedingungen vorliegen. Abweichungen wären z.B. Verlegung eines L-EWT im Grundwasser, an einem meteorologisch extremen Standort (z.B. Küste, Alpen) oder unter einem Gebäude.

Das Benchmark-Verfahren sollte nur für erste, vergleichende Abschätzungen und nicht für zu komplexe Anlagen eingesetzt werden. Hierfür eignet sich insbesondere das numerisch-dynamische Verfahren LEWTSim.

Verfahren 2

Numerisches Simulationsprogramm LEWTSim

Die Hauptvariante liefert das Maximum an technischen, ökonomischen und umweltrelevanten Informationen. Diese Variante ist allerdings relativ zeitaufwändig. Bei großen Anlagen ist aufgrund der hohen Investitionskosten dieser Aufwand allerdings zu empfehlen, da innerhalb einer Volumenstromgruppe der thermische Ertrag je nach Rohrkonfiguration durchaus um den Faktor fünf variieren kann. Dem Programm liegt ein umfangreiches Handbuch bei, das die Menüführung detailliert beschreibt. Es ist darüber hinaus eines der wenigen numerischen Programme, das frei verfügbar ist, eine verständliche Eingabemaske bereithält und mit Hilfe der Arbeitsgemeinschaft Solar NRW frei erhältlich ist (Bild 7).

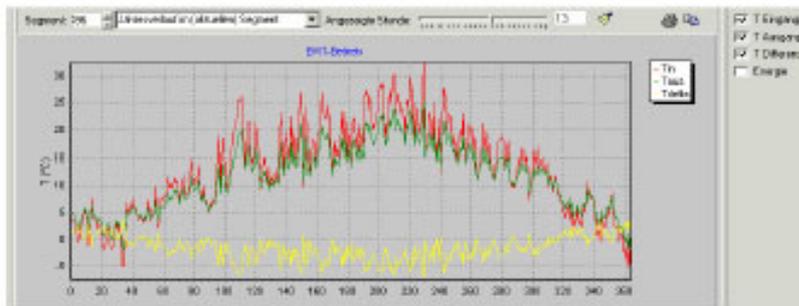
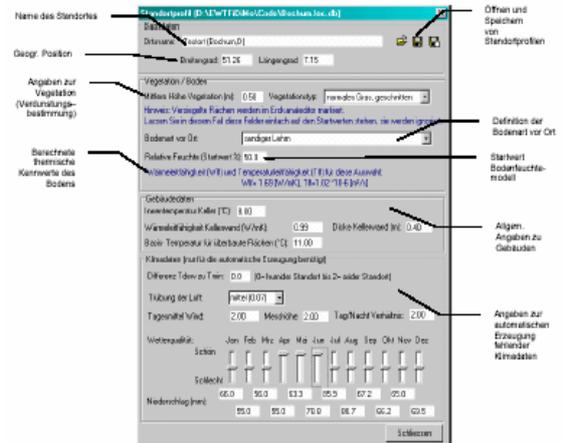
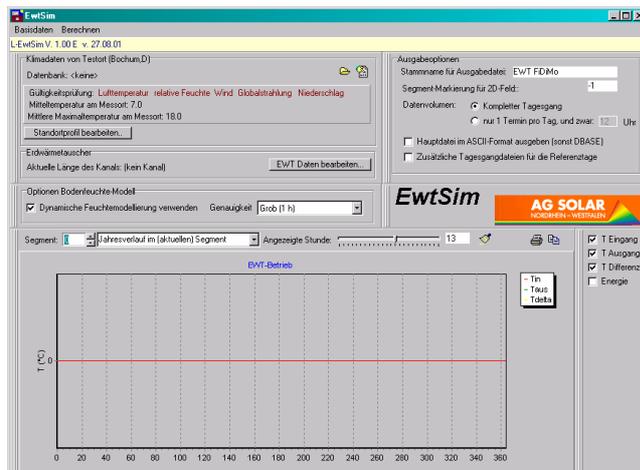


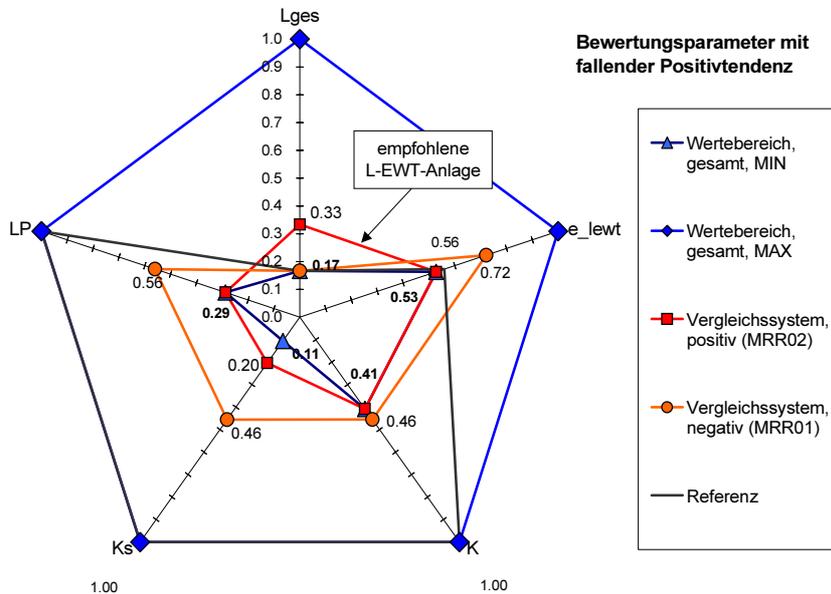
Bild 7
Eingabemasken und
Ergebnisdarstellung in
L-EWTSim

Verfahren 3 Kennzahl-Verfahren

Ein L-EWT kommt wegen seines niedrigen Energiebedarfs und möglicher guter Aufwandszahlen als umweltfreundliche Versorgungskomponente für Gebäude in Betracht. Dabei ist besonders vorteilhaft, dass ein L-EWT die Umgebungsluft je nach Jahreszeit nicht nur vorwärmen sondern auch kühlen kann. Der Einsatzbereich eines L-EWT liegt zwischen Volumenströmen von $100 \text{ m}^3/\text{h}$ und mehreren $100.000 \text{ m}^3/\text{h}$. Aus dieser Bandbreite und den instationären Randbedingungen entstehen erhebliche Schwierigkeiten, allgemeingültige Aussagen über das zu erwartende thermische Systemverhalten aus der Vielzahl möglicher Konstruktionsvarianten zu treffen.

Hauptziel des Kennzahl-Verfahrens ist es, auf Basis umfangreicher, mehrjähriger Messungen an der eigens konzipierten Testanlage und eines speziell angepassten numerischen Rechenmodells, Kennzahlen darzustellen, die es ermöglichen, die Betriebseigenschaften eines L-EWT im Planungsalltag zu bestimmen und ein technisch, ökologisch wie ökonomisch effizientes System zu identifizieren. Es werden die Kennzahlen e_{LewT} (Aufwandszahl), QV (Netto-Volumenleistung), ME (Meterertrag), sowie die Kombination aus v (Strömungsgeschwindigkeit) und VL (Metervolumenstrom) definiert, die zu wichtigen Informationen führen, mit denen die Qualität von Systemvarianten in der Planungsphase bewertet werden können.

Die Aufwandszahl e_{lewt} sollte einen Wert von 0,3 nicht überschreiten. Der Wert für QV sollte oberhalb von 18 kW/m³ liegen. Die weiteren Kennzahlen wie ME (*Meterertrag* in kW/(ma)), die (dimensionslose) Leistungszahl ε oder K_{INV} (*Investitionskosten* in €) sind nachrangig und unterstützen die Entscheidungsfindung bei Anwendung eines Netzdiagramms.



Mit den Kennzahlen wird in der Vorplanungsphase eine Eingrenzung auf wenige, gute L-EWT ermöglicht, wodurch der sonst notwendige, sofortige Zugriff auf ein komplexes und kostenintensives numerisches Simulationsverfahren vermieden wird.

Bild 8 Entscheidungs-Netzdiagramm zur Systembewertung

Schnell-Abschätzmethode

Es wird gezeigt, dass in der Vorplanung eines L-EWT, ohne die Kenntnis von konkreten Basisdaten, die Qualität einer L-EWT-Variante über die Kennzahlen VL (*Metervolumenstrom* in m³/(hm)) und v (*Geschwindigkeit* in m/s) vorbestimmt werden kann. Für geeignete Anlagen liegt VL unterhalb von 40 m³/(hm), die Strömungsgeschwindigkeit der Luft v ist kleiner als 4 m/s. Insbesondere bei großen L-EWT-Registern, können dadurch bereits viele mögliche Planungsvarianten in Bezug auf Anzahl der Rohre, Durchmesser und Länge als uneffizient ausgefiltert werden.

Zusätzliche Absicherung

Jedes einzelne Modul liefert Informationen für den Planer. Wie aus Bild 1 hervorgeht, können die Module in verschiedener Weise abgearbeitet werden oder auch ausgelassen werden. Letztendlich entscheidet der Planer, wann er sich ausreichend informiert fühlt und welche Module er dafür verwenden möchte. Liegt z.B. der Schwerpunkt der Systemleistung eher bei der sommerlichen Kühlung liefert das Benchmark-Verfahren gute Informationen, da es Maximalleistungen bzw. maximale Temperaturspreizungen der Systemvariante angibt. Ist die CO₂-Einsparung des L-EWT von erster Priorität (wobei sich die verschiedenen Prioritäten nicht gegenseitig ausschließen müssen) ist das Kennzahl-Verfahren das geeignete Mittel.

Statistische Datenblätter

Die Standardisierten Datenblätter, die Ergebnisse der Messdatenauswertung der Versuchsanlagen sowie auch die tabellierten Werte der gerechneten Systemvarianten (Variante 1) können als zusätzliche Absicherung für eine Konfigurationsentscheidung herangezogen werden. Welche charakteristischen Eigenschaften die einzelnen Module im Detail aufweisen und wie sie intern aufgebaut sind, wird nachfolgend beschrieben.

Weiterführende Erkenntnisse über die genauere Abschätzung von Bodenkenwerten werden dargestellt. Die hygienische Situation der durch den L-EWT transportierten Luft wird für die warme Jahreszeit, aufgrund auftretender Tauwasserbildung, beschrieben. Aus diesem Grund werden alle relevanten lufthygienischen Parameter in mehreren aufwendigen Messkampagnen erfasst und auf pathogene Wirkungen überprüft. Es wird über Sensitivitätsanalysen gezeigt, welche Fehler bei Annahme falscher Randbedingungen eintreten. Weiterhin werden in dieser Arbeit wesentliche, grundsätzliche Erkenntnisse aufbereitet, die sich aus der Betriebsbeobachtung und der Auswertung der umfangreich vorliegenden Messdaten mehrerer Anlagen ergeben haben und für die praktische Umsetzung und die Betriebsführung bedeutend sind. Hinweise zu Materialeigenschaften und zur Systemwirtschaftlichkeit sind detailliert aufgeführt.

Ergebnistabellen numerisch berechneter Systemvarianten

Über die Laufzeit des Verbundprojektes wurden etwa 600 Systemvarianten numerisch-dynamisch gerechnet. Jede einzelne Simulation nimmt mit Eingabe, Rechenprozess, Datenauswertung und Dokumentation etwa einen Tag in Anspruch. Daher soll dem aktiven Planer es eine Hilfe sein, wenn zuverlässige Systemergebnisse hier in Tabellenform fertig im **Anhang** vorliegen, die je nach Entscheidungsfreudigkeit direkt zur Planung herangezogen werden können, oder aber hilfreich sind, einen unabhängig davon gerechneten L-EWT zu vergleichend zu bewerten.

Technische Grundlagen

Luft-/Erdwärmetauscher (kurz: L-EWT) bestehen aus horizontal im Erdreich verlegten Rohren oder Rohrregistern, durch die Außenluft als Wärmeträgermedium über die konventionelle Lüftungsanlage in das Gebäude geleitet wird. Die Temperaturdifferenz vom Erdreich zur Außenluft, die bis zu 25 K betragen kann, führt je nach Jahreszeit zu einem Kühl- oder Heizeffekt für die transportierte Luft bzw. für das belüftete Gebäude. Unter günstigen Umständen kann im Sommer auf eine (Teil-)Klimaanlage vollständig verzichtet werden. Das Erdreich dient dabei als Speichermasse, die sowohl saisonal als auch im Tagesverlauf ausgleichend wirkt. Durch den relativ geringen Aufwand an elektrischer Energie für den Antriebsventilator ergeben sich sehr günstige Leistungs- bzw. Arbeitszahlen für einen L-EWT. Bei richtiger Auslegung sind deutliche Energie- und damit CO₂-Einsparungen möglich. L-EWT helfen dabei, den Leistungsbedarf von raumlufttechnischen Anlagen für Gebäude deutlich zu reduzieren.

Auch in Kombination mit Luft / Luft-Wärmepumpen sind beachtliche Energie- und damit CO₂-Einsparungen möglich. Dass diese positiven Betriebseigenschaften durch einen sehr einfachen konstruktiven Aufbau erreicht werden, macht das System L-EWT für viele Anwendungen bei der Gebäudekonditionierung besonders interessant. In beiden Anwendungsbeispielen führt der Betrieb des L-EWT zu deutlichen Primärenergieeinsparungen.

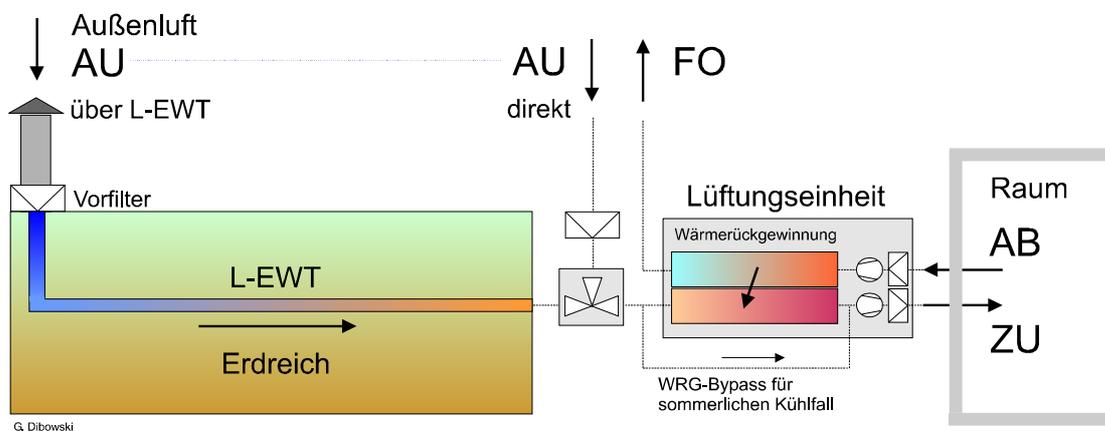
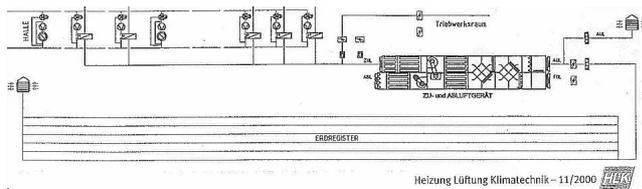


Bild 9 Prinzip der Luftführung einer Lüftungsanlage mit L-EWT



Quelle: HLK 11/2000



Grundprinzip eines L-EWT

Beispiel Winter

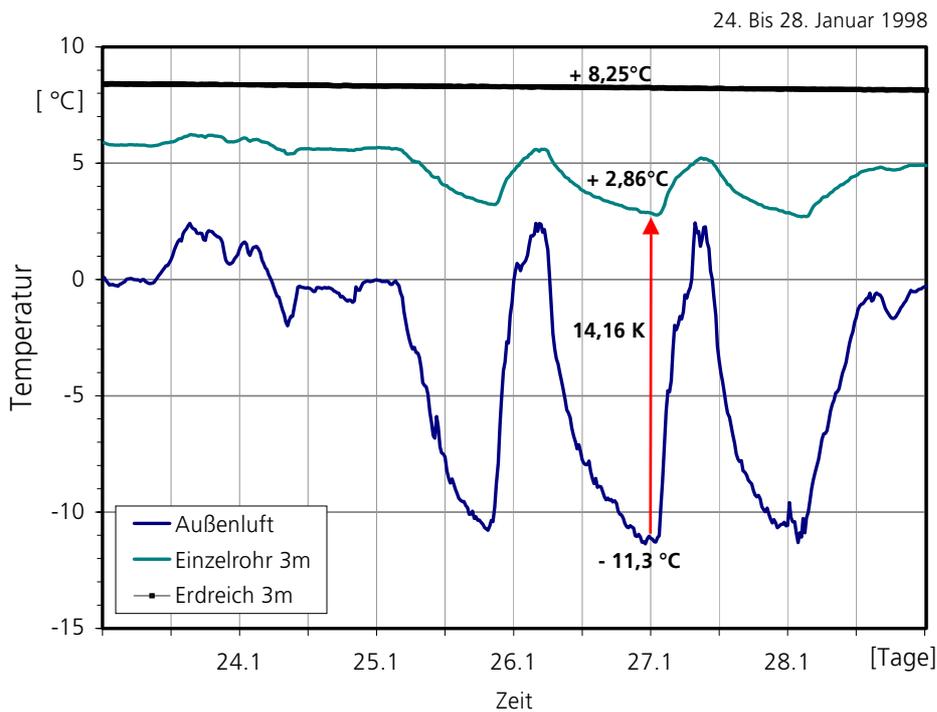
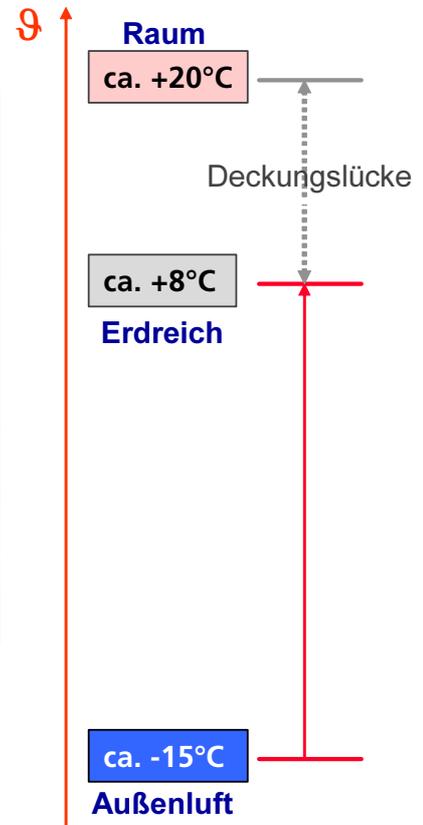
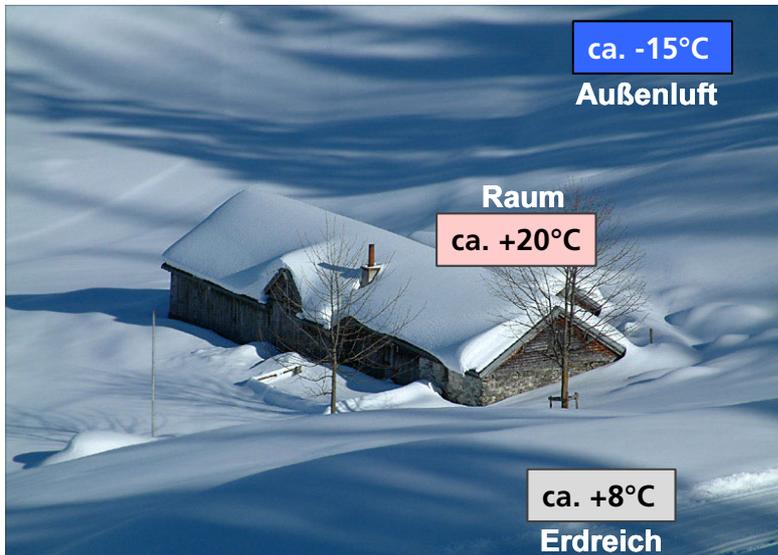
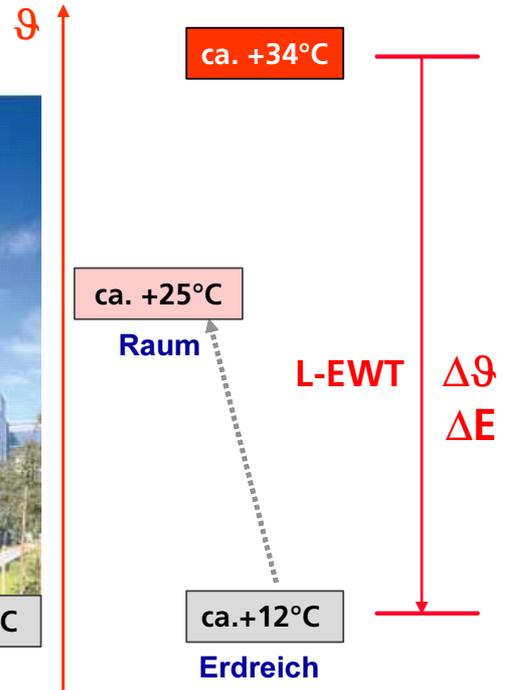
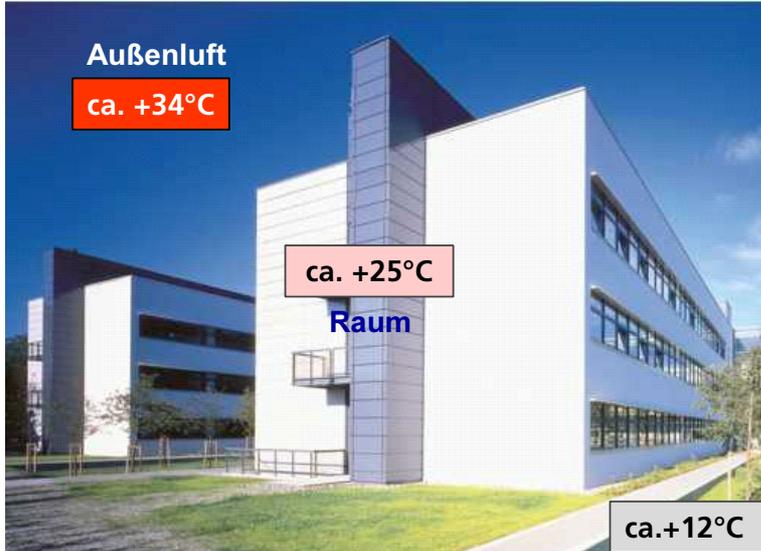
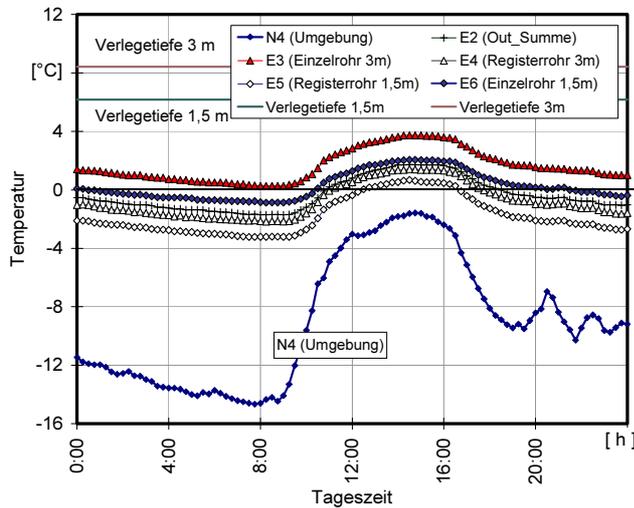


Bild 10
 Beispiel kalter Tag
 Gemessene Temperaturen an der Testanlage in Köln

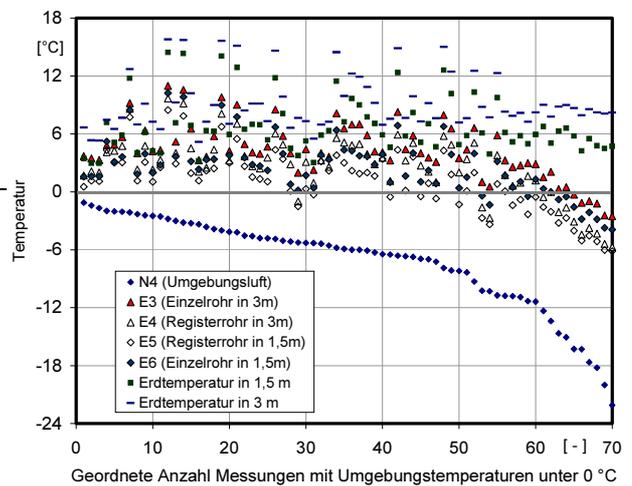
Beispiel Sommer



Messergebnisse der Versuchsanlage Beispiel Winterbetrieb



Nullpunktverhalten
Systemverhalten
Einzelrohr/Register als f(z)



Nullpunktverhalten
Geordnete
Dauerlinie

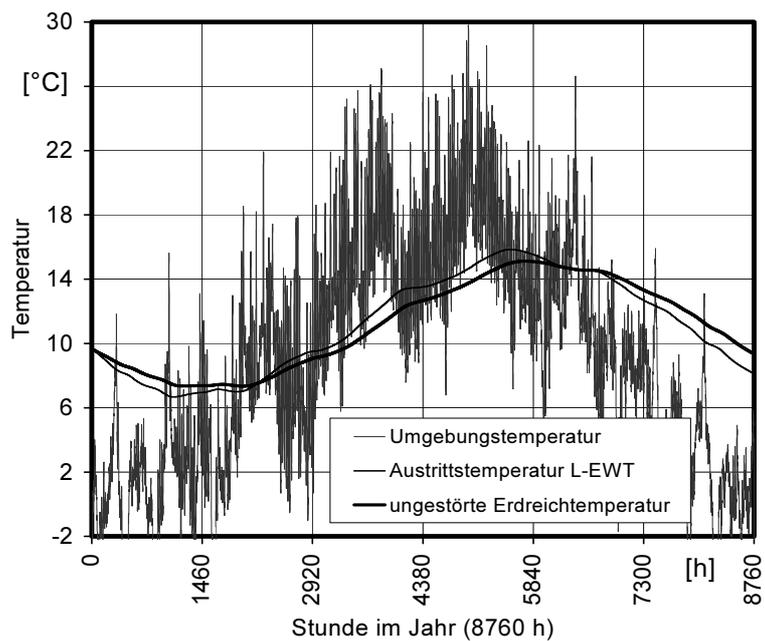
Bild 11 Beispiel Sommer; gemessene Werte der Testanlage Köln

Ziel der Auslegung

Unter Optimierung eines L-EWT ist die Auflösung eines Zielkonfliktes zu verstehen, der darin besteht, bei möglichst geringen Investitionskosten, unter Einhaltung einer relativ geringen elektrischen Leistungsaufnahme (CO₂-relevant), die Luftaustrittstemperatur des L-EWT der Bodentemperatur gemäß Bild 12 bestmöglich anzunähern. Da es über diese Darstellungsform keinen eindeutigen Grenzwert gibt, die eine Aussage über die Qualität eines L-EWT ermöglicht, stellt in der Planungsphase der relative Vergleich von mehreren Systemvarianten die richtige Auswahlstrategie dar, die durch die hier vorgestellten Kennzahlen besonders unterstützt wird.

Bild 12

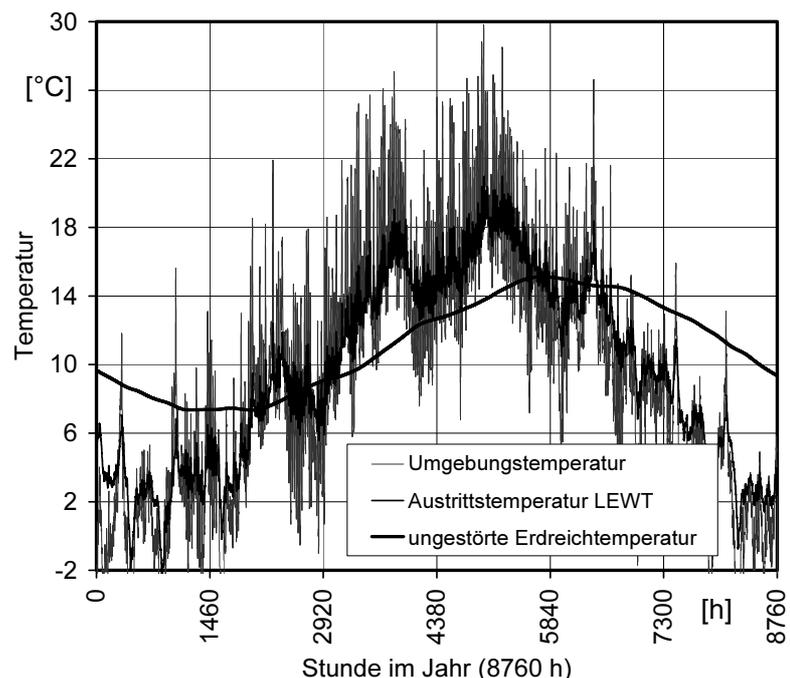
Annähernder (ideal-theoretischer) Verlauf der Luftaustrittstemperatur entlang der ungestörten Bodentemperatur über den Zeitraum eines Jahres



Im Gegensatz zum theoretischen, idealen Systemverhalten (Bild 12) weicht die Luftaustrittstemperatur, auch bei einem gut ausgelegten L-EWT, deutlich von der Bodenprofilinie ab (Bild 13).

Bild 13

Deutliche Abweichungen der Luftaustrittstemperatur von der Bodentemperatur eines real geplanten L-EWT über dem Zeitraum eines Jahres



Beim Betrieb eines L-EWT gilt es daher als Idealfall, wenn die Luft-Austrittstemperatur das Bodentemperaturprofil nahezu annimmt (Bild 12). Hierfür wäre theoretisch ein unendlich langes Rohr notwendig. Relativ lange Rohre kommen diesem Ziel bis zu einer Rest-Temperaturdifferenz zwar näher, wären aber aufgrund des Materialeinsatzes vollkommen unwirtschaftlich. Daher ist es unter Berücksichtigung ökonomischer Zwänge notwendig, die Rohrlängen zu begrenzen, was zu einer deutlich erkennbaren Abweichung zwischen Luftaustritts- und Bodentemperatur führt (Bild 13).

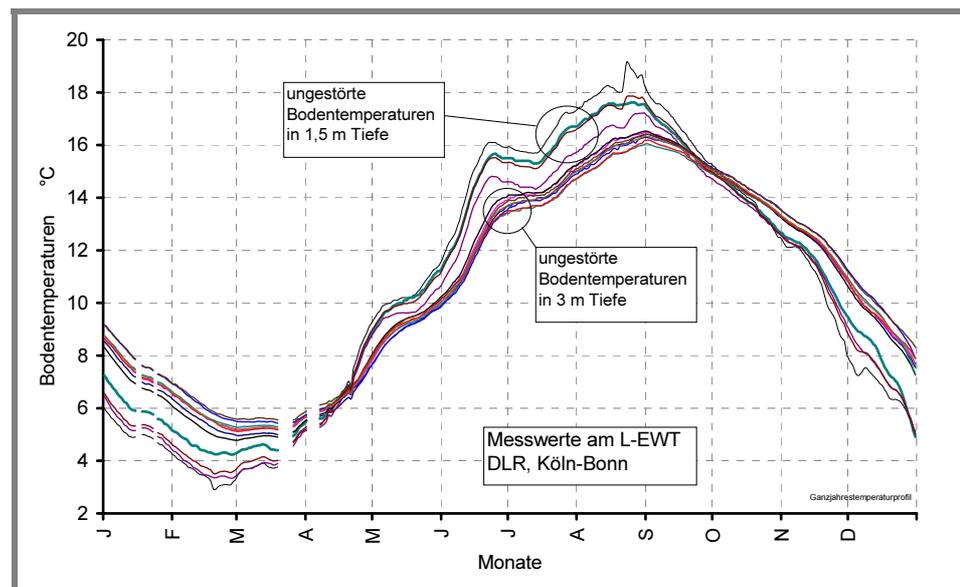
Die "Kunst" bei der Optimierung von L-EWT besteht also darin, bei einem vorgegeben Budget unter Einhaltung eines möglichst geringen elektrischen Antriebsverbrauchs (CO₂-relevant) die Luftaustrittstemperatur dem Bodenprofil bestmöglich anzunähern.

Die oberflächennahe Erdoberflächentemperatur ist eine phasenverschobene und amplitudengedämpfte Abbildung der gemittelten Umgebungstemperatur. Bestimmt wird dieses Temperaturniveau von den meteorologischen Einflüssen, den thermischen und hydraulischen Bodenparametern sowie von der Oberflächenbeschaffenheit und -nutzung. L-EWT helfen dabei, den Leistungsbedarf von raumluftechnischen Anlagen für Gebäude deutlich zu reduzieren.

Das Erdreich kann als saisonaler thermischer Speicher betrachtet werden. Es absorbiert die auftreffende Sonnenstrahlung, und steht im thermischen Kontakt mit der Atmosphäre. Im Sommer wird der Boden erwärmt und im Winter abgekühlt. Auf Grund der großen Masse und der thermischen Trägheit des Erdreiches ist, mit zunehmender Tiefe, die Erwärmung bzw. Abkühlung des Erdreiches gegenüber der Oberfläche zunehmend. So liegt die oberflächennahe Erdoberflächentemperatur in unseren Breiten auch in der Winterperiode (ab ca. 1 m) immer oberhalb des Gefrierpunktes. Die maximal möglichen nutzbaren Temperaturdifferenzen liegen bei ca. 25 K. Bild 14 zeigt die gemessenen Bodentemperaturen über ein Jahr in den Verlegetiefen 1,5 und 3 m am Standort Köln.

Bild 14

Jahresbodentemperaturprofil am Standort Köln-Porz (Flughafen Köln-Bonn)



Das in Bild 14 gezeigte charakteristische Bodentemperaturprofil, kann mit gewissen Abweichungen, für jeden Standort in Deutschland abgebildet werden. Mit ihm kann die grundsätzliche Funktionsbandbreite eines L-EWT gezeigt werden.

Testsysteme im Förderprojekt

Es wurden drei Testsysteme gebaut, vermessen und dokumentiert (Bild 15):

L-EWT-System 1 Sonnenofen-Laborgebäude DLR Köln

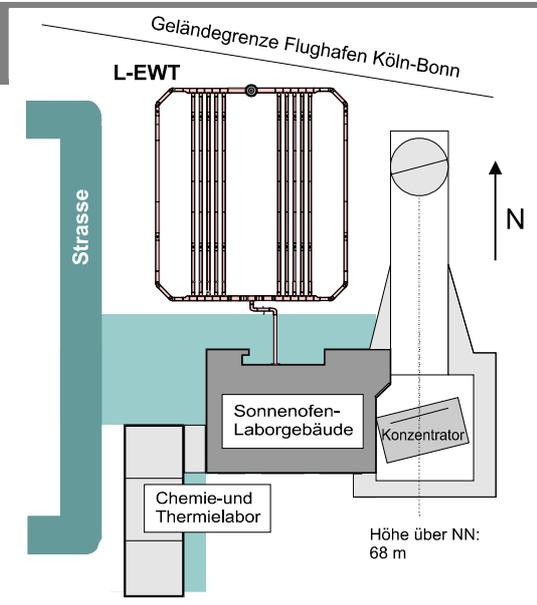
Kombisystem aus Einzelrohren und Register in zwei Verlegetiefen; Versorgung eines Laborgebäudes

Ziel:

Vergleichende Langzeitmessung zum Leistungsverhalten von L-EWT bei unterschiedlichen Konfigurationen

Status:

Betrieb seit Ende 1995; Projektkoordination; Auswertung der vorliegenden Daten; Datenbereitstellung zur Validierung von Simulationsprogrammen
lufthygienische Messungen.



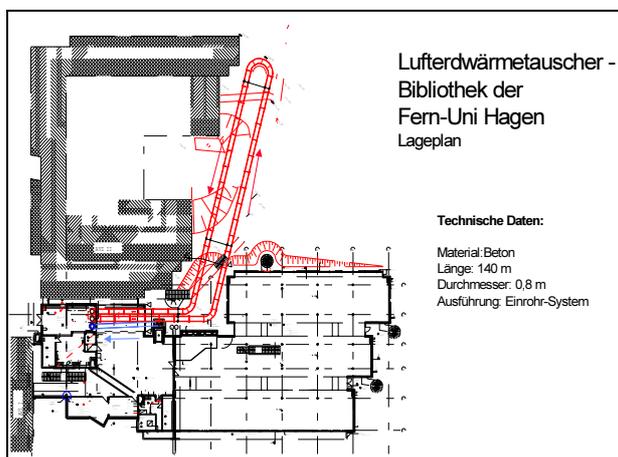
L-EWT-System 2 Solar-Campus Solar-Institut Jülich, SIJ, FH Aachen



Ziel: Messung und Dokumentation des Betriebsverhaltens

Lufthygienische Messungen **Status:** Messbetrieb und Datenaufnahme seit 7/99

L-EWT-System 3 Erweiterungsbau der Fernuniversität Hagen



Ingenieurbüro Wortmann & Scheerer,
Bochum

Ziel:

Messung und Dokumentation des Betriebsverhaltens
Lufthygienische Messungen

Status:

Messungen abgeschlossen

Bild 15

Softwareaktivitäten im Projekt

<p>Software 1</p> <p>L-EWTSim</p>	<p>Erweiterung des numerischen Rechenmodells zur Simulation von passiver Luftkühlung und -erwärmung durch Luft-Erdwärmetauscher</p> <p>Bearbeiter: Dr. Michael Bruse, Universität Bochum, Geographisches Institut, AG Klimaforschung</p> <p>Ziel: Im Rahmen des Folgeprojektes zum Projekt „L.E.O Passive Luftkühlung 1996- 1998“ wurden folgende Erweiterung und Verbesserung des entwickelten Finite-Differenzen Simulationsmodells (FD-Modell) durchgeführt: Entwicklung eines hydrologischen Teilmodells (FD-Modell); Erweiterung des Modells zur Berechnung von Rohrregistern; Bereitstellung einer graphischen Benutzeroberfläche; Beschreibung der zeitlich und räumlich variierenden Feuchteverhältnisse im Boden; Auswahl des hydrologischen Modells (Richards-Gleichung).</p>
<p>Software 2</p> <p>GAEA</p>	<p>Validierung des Programms 'Graphische Auslegung von ErdwärmeAustauschern GAEA' mit Hilfe von Messdaten im Rahmen des Verbundprojektes 'Luft-/Erwärmetauscher' der AG Solar NRW</p> <p>Bearbeiter: Dr.-Phys. Stephan Benkert, Universität Siegen, FG Bauphysik & Solarenergie</p> <p>Ziel: GAEA soll als Instrument für die überschlägige und schnelle Planung von L-EWT zum Einsatz kommen. Das Programm beruht auf einem analy-tischen Modell zur Beschreibung der Wärmeübergangsprozesse im L-EWT unter bestimmten Randbedingungen</p>
<p>Software 3</p> <p>TRNSYS Type 121</p>	<p>Modifikation und Validierung eines Berechnungsmoduls für den Wärmetransport von inkompressiblen Fluiden in erdverlegten Rohren mit dem dynamischen Simulationsprogramm TRNSYS</p> <p>Bearbeiter: Dipl.-Ing. Mirjam Borowietz, Zibell, Willner&Partner, Köln; Dr. Gerd Dibowski, DLR Köln</p> <p>Ziel: Genaueres dynamisches Simulationstool zur L-EWT-Auslegung; Möglichkeit der Registerberechnung; offene Schnittstelle zu komplexen dynamischen Systemen in TRNSYS</p>

Systembeschreibung und Anforderungen

Grundvoraussetzung zum Betrieb eines L-EWT ist der Einsatz einer mechanischen Lüftungsanlage. L-EWT, die die natürliche Thermik ausnutzen (freie Konvektion), sind als kritisch einzustufen, weil durch die dafür benötigten sehr geringen Druckverluste auf notwendige Filter verzichtet werden muss [Hübner]. Diese Vorgehensweise widerspricht den hygienischen Anforderungen gemäß DIN [1946] und VDI [6022] demnach Luft als Lebensmittel einzustufen ist. Außerdem kann ein L-EWT so nicht kontrolliert, also mit definiertem Volumenstrom, betrieben werden. Es ist darauf zu achten, dass die Außenluft im Bedarfsfall (bei ungünstigen Temperaturdifferenzen zwischen Außenluft- und Erdreich) auch weiterhin direkt (gefiltert) angesaugt werden kann.

Durch die in der Heizperiode erwärmte Außenluft wird die Leistung der zusätzlich erforderlichen Nacherwärmung gegenüber einer konventionellen Heizung niedriger. Zudem erwärmt ein korrekt ausgelegter L-EWT auch sehr kalte Umgebungsluft über den Nullpunkt und übernimmt zusätzlich eine Frostschutzfunktion für die nachgeschaltete Anlagentechnik. Ein L-EWT ist als Raumluftheizungsanlage (RLT-Anlage) zu behandeln. Es gelten daher die einschlägigen Richtlinien für RLT-Anlagen, insbesondere die DIN 1946. Im Ansaugbauwerk des L-EWT ist daher ein Filter vorzusehen, der vor Verunreinigungen schützt. Bild 16 zeigt alle wesentlichen Komponenten eines L-EWT Systems:

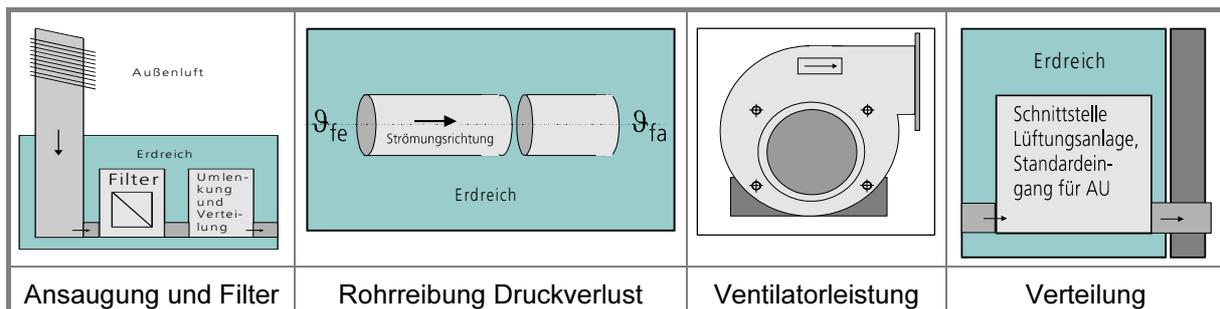


Bild 16 Die wesentlichen Komponenten eines L-EWT Systems

Der gesamte L-EWT ist wasserdicht auszuführen. Ein wesentlicher Aspekt bei der Verlegung des Rohrsystems ist die Einhaltung eines leichten Gefälles und die Installation von Kondensatscheidern an den tiefsten Stellen des Systems, da sich bei Abkühlen der Luft Kondenswasser im L-EWT bilden kann. Die Entfernung des Kondensates kann beispielsweise über einen Siphon oder in Ausnahmefällen, einen Pumpensumpf erfolgen. Beim Verdichten und Verfüllen gelten die Angaben, die vom Rohrhersteller gegeben werden. Der Verdichtungsgrad des Bodens hängt von der geplanten Oberflächennutzung (Bebauung, Parkplatz, Begrünung) ab. Weiterhin sollte sichergestellt werden, dass das ausgehobene, atlastenfreie oder ein geeignetes Bodenmaterial zur Verfüllung verwendet wird. Beimischen von Bauschutt und grobem Material können sich negativ auf die Leistungsfähigkeit des L-EWT auswirken.

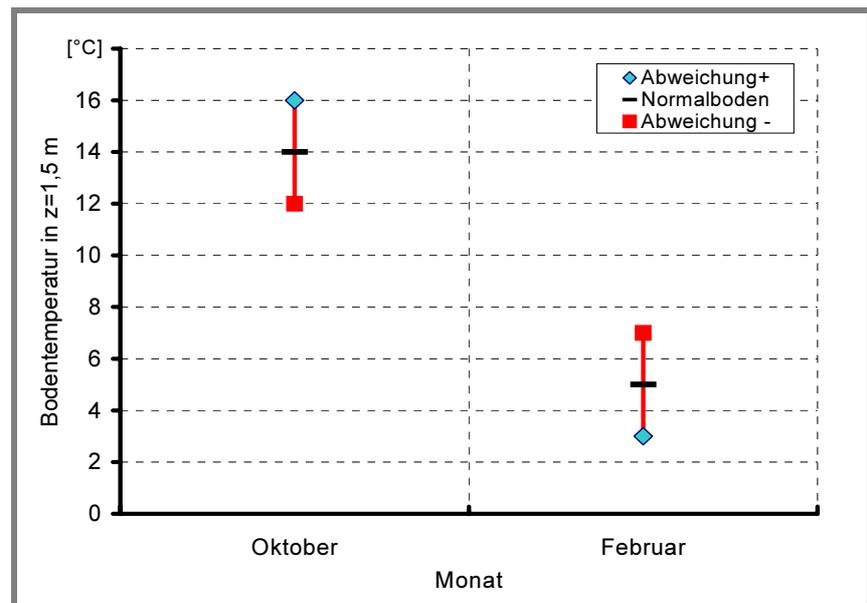
Eine Verlegung der L-EWT-Rohre in einer grundwasserführenden Schicht oder in dessen Schwankungsbereich ist möglich. Hierbei ist auf eine wasserdichte und auftriebsichere Ausführung des Systems zu achten. In derartigen Fällen können sowohl beim Bau (z.B. Wasserhaltung) als auch beim Betrieb (z.B. Aufstau bzw. Umleitung des natürlichen Grundwasserstromes) wasserrechtliche Tatbestände entsprechend § 3 Abs. 1 Nr. 5 und 6 und § 3 Abs. 2, Nr. 1 WHG betroffen sein. Diese sind wasserrechtlich zu behandeln.

Anwendungsbereiche und Grenzen der Nutzung

Das Ertragsverhalten eines L-EWT-Systems wird durch besondere Wettersituationen wie Kälte-, Hitze-, Niederschlags- und Trockenperioden mitbeeinflusst. Eine exakte, zu jedem Zeitpunkt erhältliche Nutzleistung, kann nicht prognostiziert werden. Bei geforderten, sehr genauen Leistungsanforderungen ist ein L-EWT nicht, oder nur mit entsprechenden zusätzlichen RLT-Anlagen zu betreiben. Bild 17 zeigt die Bodentemperaturgrenzen bzw. Schwankungsbreiten zu Beginn der Heizperiode und im Bereich des unteren Wendepunktes.

Bild 17

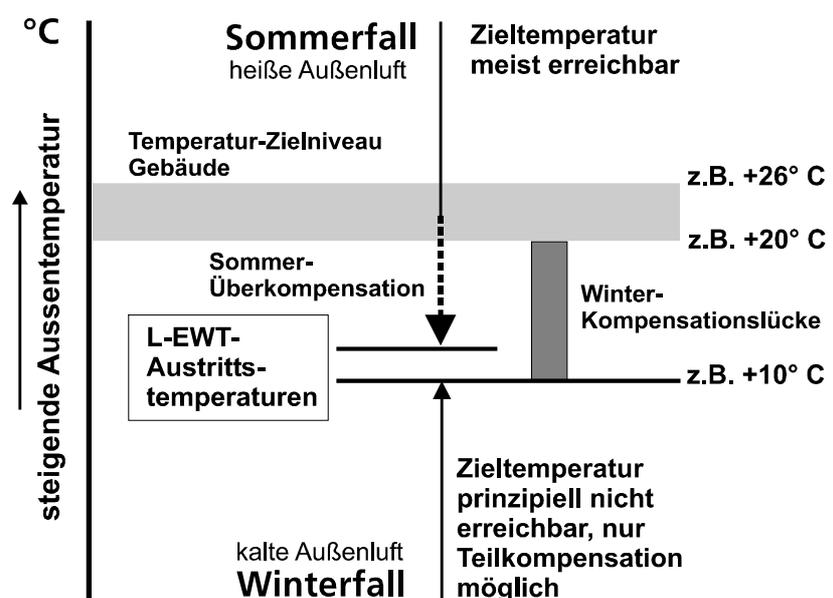
Temperatur-Schwankungsbreiten des Bodens in der Heizperiode bei einer Verlegetiefe von $z = 1,5 \text{ m}$ für einen meteorologisch mittleren Standort in Deutschland in Abhängigkeit der Bodenart



Die prinzipiell erreichbaren Temperaturniveaus eines L-EWT zeigt Bild 18:

Bild 18

Prinzipielles Leistungsvermögen von L-EWT als Funktion der Temperatur



Mit L-EWT ist eine definierte Entfeuchtung zwar nicht möglich, allerdings wird je nach Anlagenkonfiguration der Taupunkt im Sommer -messtechnisch nachweisbar- eindeutig unterschritten. Diese Entfeuchtung ist allerdings nicht genau quantifizierbar.

Für eine Lufttemperatur von 30 °C und einer relativen Feuchte von 40% liegt der Taupunkt bei 14,9 °C [DIN 4108, Teil 5]. Wird eine Systemkonfiguration gewählt (sofern man einen Spielraum bei der Festlegung des Volumenstroms hat), die unter Beachtung der vorher definierten Randbedingungen relativ nah an die Temperatur des ungestörten Erdreichs reicht, kann u.U. über Kondensatbildung eine gewisse Menge Wasser ausgeschieden werden. Ohnehin wird in der TGA die Zulufttemperatur über die Differenz aus Raum- und Untertemperatur. Dies kann bedeuten, dass je nach vorhandener Kühllast die L-EWT-Austrittstemperatur niedrig sein muss. Bei hohen Luftwechselraten sind andere Kühlsysteme, wie z.B. die wassergeführte Bauteilaktivierung vorzuziehen.

Einige konstruktive Grundlagen

Aus statischen (Erdlasten, Verkehrslasten) und Kostengründen hat sich der Bau eines L-EWT aus Rohren durchgesetzt. Andere Querschnittsformen, z.B. rechteckig oder dreieckig, sind aber ohne weiteres möglich und auch in einzelnen Projekten umgesetzt worden. Da bei runden Querschnitten auf konventionelle Rohre aus der Wasser- und Abwassertechnik zurückgegriffen werden kann, werden im folgenden nur die runden Querschnittsformen weiterbetrachtet. Grundsätzlich gilt: Es müssen die Anforderungen der VDI 6022 beachtet werden, d.h. die durch den L-EWT angesaugte Außenluft ist als Lebensmittel zu betrachten. Dementsprechend muss das verwendete Rohrmaterial ungiftig, korrosionssicher, reinigbar, glatt und dicht sein, um die hygienischen Anforderungen der einschlägigen Normen und Richtlinien zu erfüllen. Des Weiteren muss die Möglichkeit einer Inspektion und Reinigung vorhanden sein. Die Verlegung der Rohre kann als Einzelrohr oder Rohrregister erfolgen. Einzelrohr-L-EWT besitzen relativ große Durchmesser von ca. 800 mm bis einige Meter und werden üblicherweise aus Betonrohren nach DIN 4032 und DIN 4035 (Abwasserrohre/Kanalrohr) errichtet. Rohrregister-L-EWT bestehen aus mehreren parallel verlegten Einzelrohren. Als Material kommen aus Kostengründen wieder Rohre aus der Entwässerungstechnik zum Einsatz. Möglich ist der Einsatz von:

- **Kunststoffrohre aus PVC-hart, sogenannte KG-Rohre (DIN 19534)**
- **Betonrohre**
- **PE-Druckrohre, aus der Trinkwasser- bzw. Gasttechnik**

Am häufigsten werden die KG-Rohre aus PVC eingesetzt, da sie niedrige Investitionen gewährleisten. Die Verteilerrohre des Registers sollten so angeordnet sein, dass sie begehbar oder ferngesteuert erreichbar sind, um die Reinigung des Rohrsystems zu ermöglichen. Für die konstruktive Lösung eines Register-L-EWT bietet sich der Bau zweier Revisions- bzw. Sammelschächte zum Verteilen und Sammeln der Luft an. Diese sollten begehbar oder bekriechbar sein, um eine gute Kontrolle und Reinigung des Rohrregister-L-EWT zu gewährleisten. Ein Bypass zur direkten Zuführung von Außenluft zur raumlufttechnischen Anlage ist vorzusehen.

Verlegeoptionen

Die Rohre können auf verschiedene Weise verlegt werden (Bild 19), wobei der Abstand der Rohre zueinander von der gegenseitigen Einflussbreite bestimmt wird. Diese kann nur mit dynamischen Simulationsprogrammen hinreichend genau ermittelt werden.

Möglichkeiten der Rohrverlegung

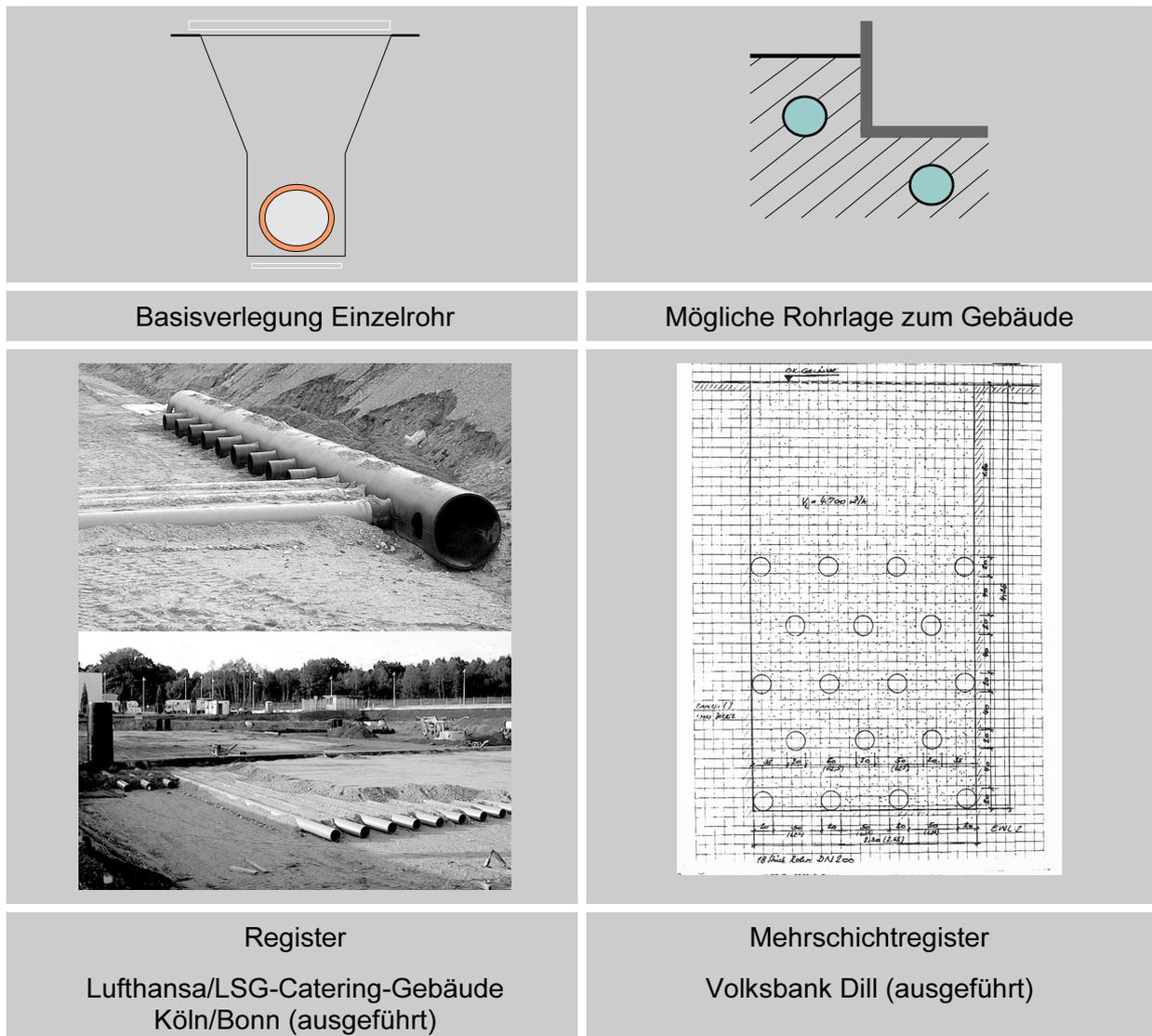


Bild 19 Möglichkeiten der Rohrverlegung

Bodenkennwerte

Die thermischen Kennwerte des Bodens spielen eine entscheidende Rolle bei der Auslegung von L-EWT. Dies sind die Dichte, die Wärmeleitfähigkeit, und die spezifische Wärmekapazität. Sie bestimmen die Größe der Amplitude des Bodentemperaturprofils und somit das theoretische Nutzpotalential. Der Einfluss der Feuchtigkeit, besonders auf die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Böden, ist sehr ausgeprägt und muss bei der Anlagenplanung berücksichtigt werden [4]. Neben der Schwierigkeit, die o.a. thermischen Bodenkenwerte zu

ermitteln "stört" die, meist schwer zu bestimmende, Bodenfeuchtigkeit zusätzlich eine zuverlässige Berechnung des Ertragsverhaltens von L-EWT [5]. Näheres dazu im Modul 6. Als Kurzfassung zu den Angaben über Stoffwerte im Modul 6 sind die Bandbreiten aller Bodenarten ermittelt aus mehreren Literaturstellen angegeben mit:

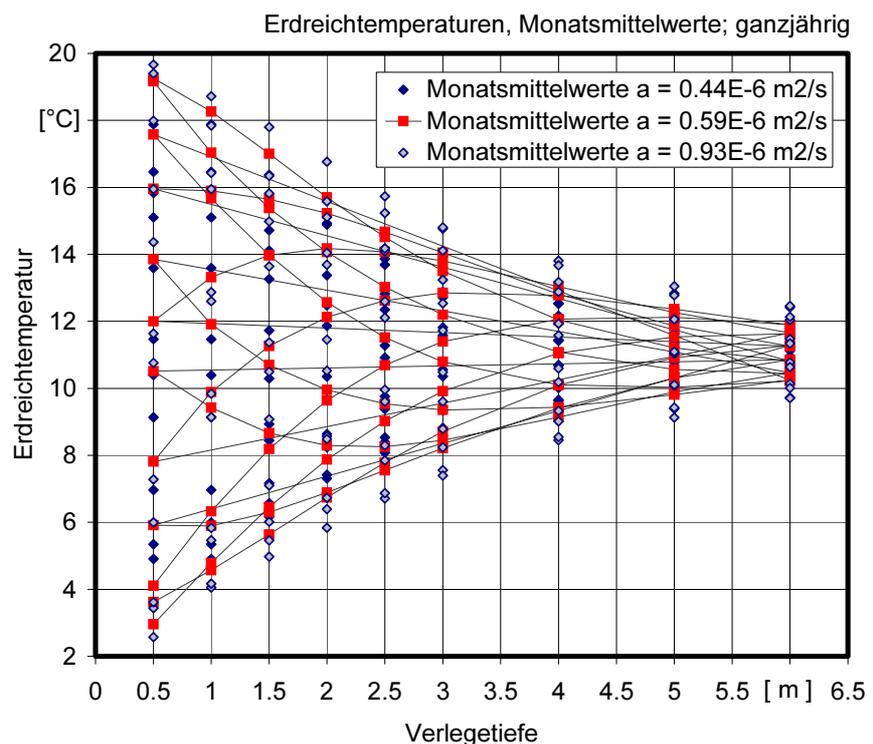
Tabelle 2 Wertebereiche der wichtigsten thermischen Bodenparameter

	von - bis	
Wärmeleitfähigkeit λ	0,3 - 2,9	W/(mK)
Dichte ρ	1100 - 2000	kg/m ³
Wärmekapazität c	840 - 1600	J/(kgK)
Temperaturleitfähigkeit a	0,5 - 1,4 *10⁶	m ² /s

Für die Untersuchung der optimalen Systemauslegung für den sommerlichen Kühlfall kann nicht von Mittelwerten ausgegangen werden. Für die Berechnung einer ausreichenden Leistung ist die Kenntnis der Temperaturprofile im Erdreich und die maximale Umgebungslufttemperatur Voraussetzung. Für den Planer ist es wichtig, bekannte Planungsunterlagen nutzen zu können. Für die Berechnung einer Gebäudekühlleistung steht ihm die VDI-Norm 2078 (VDI-Kühllastregeln) zur Verfügung. Da die Grenzbereiche des Eintretens besonders heißer Tage nicht eindeutig ist, wurde der Bereich Sommer in der VDI 2078 definiert. Die für den Standort Deutschland grundsätzlich vorkommenden Bodentemperaturen und Schwankungsbreiten in Abhängigkeit von der Bodenart und der Verlegetiefe sind in den Bildern 20 bis 22 dargestellt.

Bild 20

Ungestörte Bodentemperaturen (Monatsmittelwerte) als Funktion der Tiefe und der Temperaturleitfähigkeit a (Basiskennzahl für die mathematische Bodenbeschreibung)



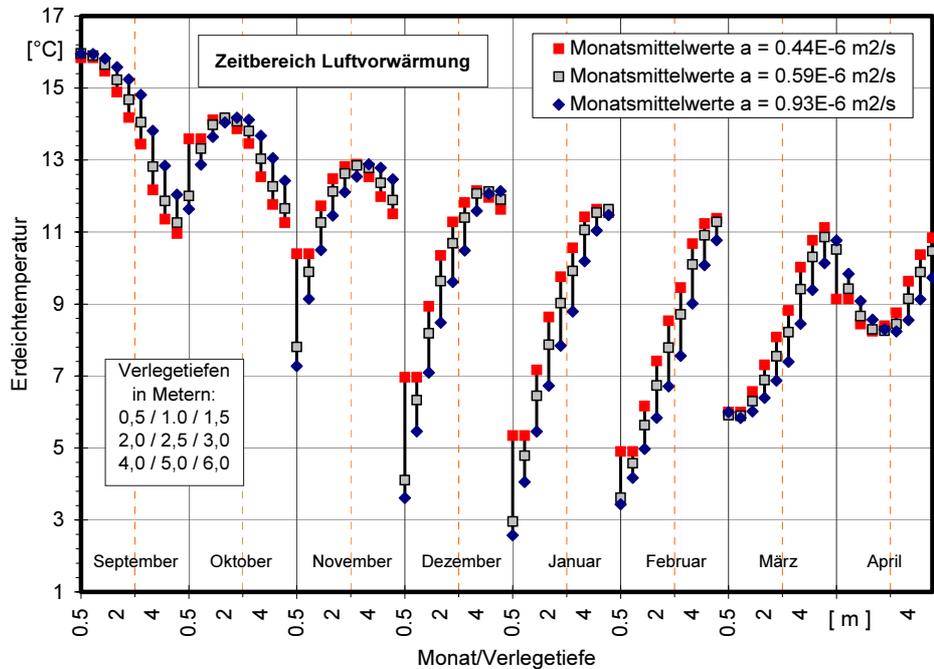
Aus den o.a. Bodenparametern lassen sich die grundsätzlichen Temperaturbereiche ableiten, die für den Standort Deutschland für jede Bodenart und als Funktion der Tiefe auftreten. Die Bilder 21 bis 22 sind somit von grundsätzlicher Bedeutung für die erste Planungsstufe zur Auslegung von L-EWT.

Bild 21

Basisauslegungsdiagramm in der Vorplanungsphase:

Mögliche ungestörte Erdreichtemperaturbereiche in Abhängigkeit von Bodenart und Verlegetiefe für einen mittleren meteorologischen Standort in Deutschland

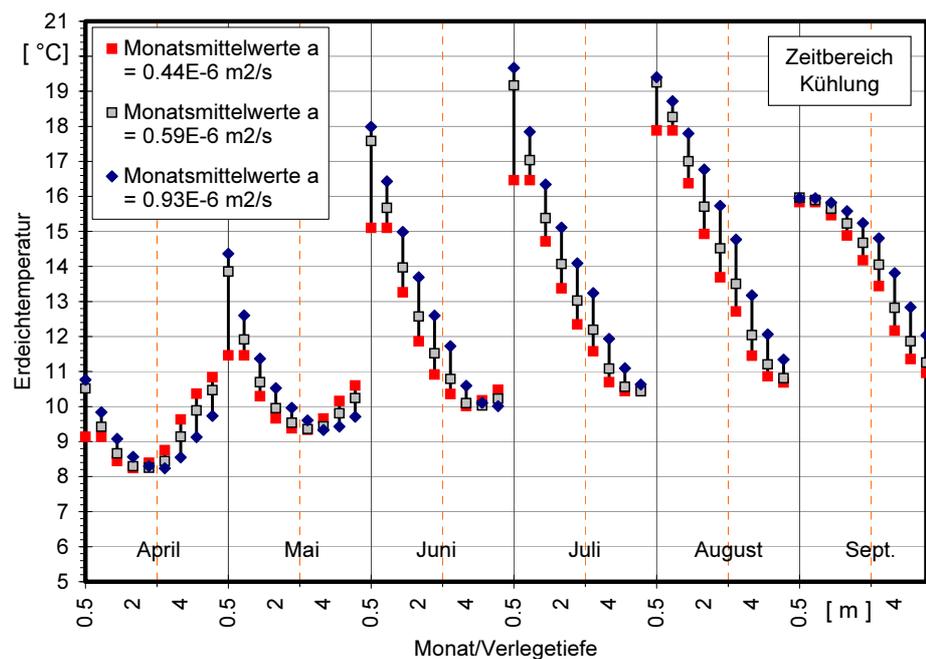
Zeitbereich Heizperiode

**Bild 22**

Basisauslegungsdiagramm in der Vorplanungsphase:

Mögliche ungestörte Erdreichtemperaturbereiche in Abhängigkeit von Bodenart und Verlegetiefe für einen mittleren meteorologischen Standort in Deutschland

Zeitbereich Gebäudekühlung



Unklarheiten über Feuchtegehalt der Literaturwerte

Da Böden im allgemeinen ein 3-Phasen-System (fest-flüssig-gasförmig) und zudem ein Vielkomponenten-System (unterschiedlich grosse Partikel, sehr variable Zusammensetzung Quarz/ Minerale/Tonminerale/organisch bzw. Substanzen verschiedenen Mengen) darstellen, handelt es sich um Mittelwerte, deren Streubreite sehr unterschiedlich sein kann. Selbst wenn ein Wert für Quarz angegeben wird, muss man sich fragen, ob es sich um ein einzelnes grosses Teilchen, um eine Packung aus vielen (gleich oder unterschiedlich grossen) Teilchen, um amorphen Quarz (Feuerstein) oder kristallinen Quarz (Bergkristall, Amethyst, Rosenquarz, Citrin, usw.) handelt. Noch vielfältiger ist die Variabilität, wenn es sich um Böden handelt, weil hier die Massenanteile der Sand-, Schluff- und Tonfraktionen und deren mineralogische Zusammensetzung und eventuell der Anteil der org. Substanz entscheidend sind². Die Wärmeleitfähigkeit λ , aber auch die Dichte ρ und die spezifische Wärmekapazität c hängen deutlich vom Feuchtesättigungsgehalt des Bodens ab. Die Beantwortung der Frage nach den richtigen Bodenparametern stellt sich als schwierig zu beantworten heraus, weil die Bezugsgrössen vielfach von der Fragestellung der Untersuchung und dem Fach des Forschers abhängen. Je nach Fragestellung geben **Hydrogeologen, Bodenkundler oder Materialforscher** unterschiedliche Antworten.

Wichtige Bewertungskennzahlen

Als Anlagenbewertungskriterien dienen Leistungs- und Arbeitszahlen, die aus dem Verhältnis von gewonnener Wärme bzw. Kälte und dem dafür notwendigen elektrischen Antriebsaufwand gebildet werden (siehe Modul 6). Unterschieden wird zwischen Angaben zur möglichen Maximalleistung (Leistungszahl ε) und den saisonalen Erträgen über die saisonale Arbeitszahl β_s eines Systems. Die Betrachtung der Leistungszahlen ε ist bei weitem nicht so bedeutend wie eine Ertragsaussage über die Arbeitszahlen β_a bzw. β_s , da die entsprechenden Extremtemperaturen nur selten im Jahr auftreten. Bei Vorgabe des Volumenstroms \dot{V} ergibt sich die thermische Leistung des L-EWT (ohne Kondensation) aus.

$$\dot{Q} = \dot{V} \cdot \rho_L \cdot c_{pL} \cdot (\vartheta_{AU} - \vartheta_{aus}) \quad \text{Gl. 1}$$

Die maximale Leistung eines L-EWT stellt sich bei Vorgabe eines bestimmten Volumenstroms bei größtmöglichem Unterschied der Temperatur $\vartheta_{AU} - \vartheta_{aus}$ ein, wobei i.d.R. die Außenluft-temperatur ϑ_{AU} als Lufteintrittstemperatur ϑ_{ein} am L-EWT angenommen werden kann.

Die vom L-EWT-System momentan aufgenommene elektrische Leistung ergibt sich aus dem Volumenstrom und dem Druckverlust im System:

$$P_{vent} = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p}{\eta} \quad \text{Gl. 2}$$

² Dr.H.H.Becher Techn. Univ. München **Lehrstuhl für Bodenkunde**, 85350 Freising, Schriftliche Mitteilung 4.2.1999

Der Druckverlust Δp beschreibt die Verluste durch Rohrreibung und Einbauten (Filter, Umlenkungen). Der Wirkungsgrad η beschreibt die Gesamtverluste bei der Umwandlung. Werte für η liegen zwischen 0,4 und 0,8. Für die Bestimmung der momentanen Anlagenleistung lässt sich die Leistungszahl ε wie folgt ermitteln:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{P_{\text{vent}}} \quad \text{Gl. 3}$$

Definition der saisonalen Erträge

Die über die Laufzeit des L-EWT in der Heizperiode oder in Phasen sommerlicher Kühlung kumulierten Erträge, die auch schon bei kleineren, aber permanenten Temperaturdifferenzen zu insgesamt großen Energieeinsparungen führen können, sind für die Anlagenbewertung von großer Bedeutung. Hierbei ist die saisonale Arbeitszahl β_s ein Maß für Ertrag und Effizienz eines L-EWT. Die Werte für β_s werden über die tatsächliche Betriebszeit der L-EWT-Anlage errechnet. Diese ergibt sich aus bestimmten Verhältnissen von Außenluft-, Erdreich-, Luft- und Luftaustrittstemperatur. Die saisonale Arbeitszahl β_s ist definiert zu:

$$\beta_{s,H} = \frac{Q_H}{W_{\text{vent}}} \quad \text{bzw.} \quad \beta_{s,K} = \frac{Q_K}{W_{\text{vent}}} \quad \text{Gl. 4}$$

mit

$$Q_H / Q_K = \dot{V} \cdot \rho_L \cdot c_{pL} \cdot \sum_{i=a}^z ((\vartheta_{\text{AU}} - \vartheta_{\text{aus}})_i \cdot t_i) \quad \text{Gl. 5}$$

mit a Beginn und z Ende des Betriebszeitraums t. Damit gilt für die elektrische Antriebsarbeit:

$$W_{\text{vent}} = P_{\text{vent}} \cdot t_{H,K} \quad \text{Gl. 6}$$

mit $t_{H,K}$ = Betriebszeiten beim Heizen und Kühlen

Für den Betrieb des L-EWT sind mehrere Bedingungen zu erfüllen, um die Wirtschaftlichkeit des Systems zu gewährleisten. Für die Summation der saisonalen Betriebszeit für ein Jahr in Stunden $t_t = \sum_{i=a}^z t_i$ gelten folgende Voraussetzungen siehe Tabelle 3:

Tabelle 3 Bedingungen zur Berechnung der Arbeitszahl für die saisonale Kühlung

	heizen	kühlen
Bedingung 0	$\vartheta_{\text{AU}} \leq \vartheta_{\text{out}} - 2$	$\vartheta_{\text{AU}} \geq \vartheta_{\text{out}} + 2$
Bedingung A	$\vartheta_{\text{AU}} \leq \vartheta_{\text{far}} - 2$	$\vartheta_{\text{AU}} \geq \vartheta_{\text{far}} + 2$
Bedingung B	$\vartheta_{\text{AU}} \geq 18 \text{ °C}$ bzw. $\vartheta_{\text{AU}} \geq \vartheta_{\text{far}} + 2$	

mit: ϑ_{AU} = Außenlufttemperatur; ϑ_{out} = L-EWT-Austrittstemperatur; ϑ_{far} = farfield-Temperatur³

³ Bodentemperatur in vom L-EWT unbeeinflussten radialen Abstand zum L-EWT

Die Erdreich-Temperatur ϑ_{far} (Farfield) befindet sich in dem Abstand zum L-EWT, bei der diese nicht mehr vom Betrieb des L-EWT beeinflusst werden kann; oft auch "ungestörte" Erdreich-Temperatur. Sind die Bedingungen aus der Tabelle 3 nicht erfüllt ist die Betriebszeit $t_i = 0$.

Jahresarbeitszahl β_a

Die jährlichen Gesamterträge gewinnt man durch Zusammenfassen der Ergebnisse aus Gleichung 4 für die Heiz- und Kühlperiode. Die Jahresarbeitszahl β_a ist:

$$\beta_a = \frac{(|Q_H| + |Q_K|)}{P_{\text{vent}} \cdot (t_H + t_K)} \quad \text{Gl. 7}$$

Sollte Gl. 7 als Grundlage einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung herangezogen werden, sind die unterschiedlichen Bereitstellungskosten für Kälte und Wärme konventioneller Vergleichstechnik zu beachten. Bei der EnEV betrachtet der Gesetzgeber die gesamte Heizungs- und Warmwasseranlage als ein System, das gemeinsam bewertet wird. Hierbei entstanden die neuen neue DIN-Normen ([DIN4108-6] und [DIN4701-10]). Die dort definierte Energie-Aufwandszahl e beschreibt das Verhältnis zwischen dem Aufwand an Primärenergie (Erdöl, Erdgas, Kohle etc.) und der erzeugten Heiz- und Warmwasserwärme.

Ist die Energie-Aufwandszahl hoch, so ist das betrachtete Heizungssystem ineffektiv, weil man einen hohen Aufwand zur Erreichung eines bestimmten Nutzens hat. Je kleiner also die Energie-Aufwandszahl e ist, desto effektiver und somit besser ist das System. Eine Energie-Aufwandszahl $e=2$ würde bedeuten, dass man das Doppelte an Primärenergie verbraucht, wie man an Nutzwärme erhält. Bei der Berechnung von e wird die gesamte Kette von der Gewinnung der Energie, inklusive Förderung, Veredelung (z.B. Raffinerie), Transport, Energie-wandlung, Wärmeverteilung, Regelung usw. berücksichtigt. Die Energie-Aufwandszahl ist also ein umfassender Qualitätsmaßstab für die Heizungsanlage. In Anlehnung an diese Definition werden Überlegungen zur optimierten Auslegung von L-EWT vorgenommen und über eine spezifische Aufwandszahl e_{lewt} beschrieben. Gleichung 8 beschreibt die analytische Berechnung des phasenverschobenen und amplitudengedämpften, ungestörten Erdreich-Temperaturfeldes $\vartheta(z,t)$ als Funktion der Umgebungslufttemperatur in jeder Tiefe (unabhängig geothermischer Einflüsse) und zu jeder periodischen Betrachtungszeit (eingeschwun-gener Zustand):

$$\vartheta(z,t) = \vartheta_{\text{obf}} - \vartheta_{\text{obf}}^{\text{amp}} \cdot \exp \left\{ -z \cdot \left(\frac{\pi}{a_e \cdot T} \right)^{1/2} \right\} \cdot \cos \left\{ \frac{2\pi \cdot (t - t_0)}{T} - z \cdot \left(\frac{\pi}{a_e \cdot T} \right)^{1/2} \right\} \quad \text{Gl. 8}$$

ϑ_{obf}	Amplitude der mittleren, jährlichen Erdoberflächentemperatur (°C)
$\vartheta_{\text{obf}}^{\text{amp}}$	Temperaturamplitude bezogen auf ϑ_{obf}
z	Position unterhalb der Oberfläche (m)
a_e	Temperaturleitfähigkeit des Erdreichs $a_e = \lambda_e / (\rho_e \cdot c_e)$ (m ² /h)
T	Periodendauer des sinusförmigen Temperaturverlaufs (365 Tage bzw. 8760 h)
t	betrachteter Zeitpunkt im Jahr [h]
t_0	Phasenkonstante (35 Tage, 840 h)

Der Parameter $(t-t_0)$ ist die Differenz zwischen dem Anfang des Kalenderjahres und dem Auftreten der kleinsten Oberflächentemperatur.

Warum ist die Berechnung eines L-EWT eigentlich schwierig?

Der Einsatzbereich eines Luft-Erdwärmetauschers (L-EWT) liegt zwischen Volumenströmen von $100 \text{ m}^3/\text{h}$ und mehreren $100.000 \text{ m}^3/\text{h}$. Aus dieser Bandbreite und den instationären Randbedingungen entstehen erhebliche Schwierigkeiten, allgemeingültige Aussagen über das zu erwartende thermische Systemverhalten zu treffen. Bei Anlagen mit größeren Luftmengen ist aus strömungs- bzw. wärmetechnischen Gründen zudem die Aufteilung auf mehrere Rohre erforderlich. Die dabei entstehende Vielfalt an Systemkombinationen durch Variation von Anzahl, Durchmesser, Länge, Verlegeabstand und -tiefe führt zu einer weiteren Verunsicherung in Bezug auf die richtige Entscheidung. Planungsziel ist die Optimierung des thermischen Ertrags unter Einsatz eines geringst möglichen elektrischen Antriebsaufwands, damit eine günstige CO_2 -Emissionsbilanz, gegenüber konventionellen Systemen, entsteht.

In der Planungspraxis zeigen sich erhebliche Schwierigkeiten bei der Bestimmung des Leistungsvermögens und der Ertragsaussichten eines L-EWT. Dies liegt einerseits in der konstruktiven Heterogenität, der L-EWT prinzipiell unterliegen und andererseits in der Schwierigkeit, die für eine Berechnung oder Simulation notwendigen richtigen Randbedingungen festzulegen. Zum Beispiel bildet die Fourier'sche Wärmeleitungsgleichung (Modul 6) die Wärmetransporteigenschaften in Festkörpern nur für den homogenen, isotropen Körper ab. Die wärmetechnischen Eigenschaften des Erdreichs unterscheiden sich allerdings deutlich von diesem Ideal und sind zudem schwer zu bestimmen. Weiterhin erschwerend kommt hinzu, dass der zeit- und ortabhängig stark schwankende Feuchtegehalt im Erdreich praktisch nur punktuell messbar ist, dieser aber einen deutlichen Einfluss auf die Temperaturleitfähigkeit a im Erdreich und damit auf die Betriebs-eigenschaften eines L-EWT hat.

Ein weiteres Problem besteht darin, dass die Erdreichparameter folgerichtig vor der Auslegungsplanung und dem Baubeginn zu ermitteln sind, das Erdreich dann aber nach Umsetzung der Baumaßnahme gänzlich andere thermische Eigenschaften haben kann. So existieren bisher keine einheitlichen und einfach zu bedienende Auslegungsverfahren, die reproduzierbare Ergebnisse erzeugen und Planungssicherheit gewährleisten.

Um L-EWT zu Kühlzwecken im Bürogebäude einsetzen zu können, muss die L-EWT-Planung mit nur geringen Schwankungen gegenüber der Situation im Winter (Luftvorwärmung) hinreichend genaue Werte für eine mögliche Maximalleistung ergeben.

Weiterführende Erkenntnisse über die genauere Abschätzung von Bodenkennwerten, auch in Abhängigkeit des Feuchtegrades, werden dargestellt. Die hygienische Situation der durch den L-EWT transportierten Luft wird für die warme Jahreszeit, aufgrund auftretender Tauwasserbildung, beschrieben. Aus diesem Grund werden alle relevanten lufthygienischen Parameter in mehreren aufwendigen Messkampagnen erfasst und auf pathogene Wirkungen überprüft.

Bei der Simulation von technischen Systemen, die durch eine große Anzahl variabler Randbedingungen gekennzeichnet sind, besteht das Problem der großen Zahl an möglichen Anlagenvarianten. Schon bei relativ geringer Anzahl frei wählbarer Parameter steigt die Zahl der Simulationsdurchläufe drastisch an.

Wenn z.B. ein System aus sechs Variablen besteht, denen drei Einstellmöglichkeiten zugeordnet werden, entstehen bereits 729 (3^6) Simulationsdurchläufe. Daraus ergibt sich die zwingende Notwendigkeit, bestimmte Werte nach vernünftigen Auswahlkriterien festzulegen, um die Anzahl der Simulationen zu reduzieren.

Für die Dimensionierung eines L-EWT können die Einflussparameter in zwei Gruppen eingeteilt werden (Tabelle 4). Die erste Gruppe der Parameter ist durch den Einsatzort und Verwendungszweck festgelegt (unflexible Parameter) und sind wenig oder nicht änderbar. Hierzu zählen die Parameter des Erdreiches (ρ_E, λ_E, c_E), Höhe und Temperatur des Grundwasserspiegels, der Außenlufttemperatur bzw. die Meteorologie, die zur Verfügung stehende Grundfläche für den L-EWT und evtl. das Lastprofil des Gebäudes.

Zu der zweiten Gruppe gehören die frei wählbaren, flexiblen Parameter. Dazu gehören die Geometrie des L-EWT (Länge und Anzahl der Erdrohre, Verlegetiefe, Verlegeabstand, Rohrdurchmesser und Rohrmaterial) und der Volumenstrom. Eine Aussage über das Zusammenspiel dieser Parameter ist nicht trivial zu treffen.

Tabelle 4 Wesentliche Parameter einer L-EWT-Anlagenberechnung

L-EWT Auslegungsparameter	
Vorgegebene (unflexible) Parameter	Frei wählbare (flexible) Parameter
Standort/Wetter	Luft-Volumenstrom ²⁾
Thermische Kennwerte des Bodenmaterials (ρ_E, λ_E, c_E); Boden-Temperaturleitfähigkeit a	Rohrlänge
Bzw. Auffüllmaterial ¹⁾	Rohranzahl
Wassergehalt des Bodens ¹⁾	Rohrdurchmesser
Bodenschichtung	Rohrmaterial
Nutzbare Grundfläche	Verlegetiefe
Grundwassertemperatur und -flurabstand	Abstände zu Registerrohren oder nahen Gebäuden
Sowie deren Schwankungsbreiten	
Gebäudekühllast	Betriebscharakteristik

1) können unter erheblichem Aufwand auch geändert werden

2) häufig durch das Projekt vorgegeben

Rechnergestützte Modellierung von Luft-Erdwärmetauschern

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

Eine analytische Lösung der Wärmeleitungsgleichung ist für den eingeschwungenen Zustand nur für zweidimensionale Geometrien mit konstanten Stoffwerten und konstanten inneren Wärmequellen bekannt, siehe [2].

Das dreidimensionale Erdtemperaturfeld kann mit dem Differenzenverfahren numerisch berechnet werden, siehe [3]. Dieses numerische Differenzenmodell ist flexibler und kann das reale Erdreich (Erdschichtung, Feuchtigkeit, Vereisung etc.) und das reale Betriebsverhalten (Betriebszeiten, Entfeuchtung durch Kondensation, Wärmeentwicklung durch Strömungsverluste etc.) abbilden. Der hohe Detaillierungsgrad der Simulation bedarf eines wesentlich höheren Rechenaufwands.

Analytische Simulationsprogramme wie [GAEA] oder [PHLuft] hängen stark von den idealisierten Randbedingungen ab, die von den realistischen Zuständen mehr oder weniger abweichen. Dies liegt des weiteren daran, dass mit analytischen Modellen wichtige Einflüsse nicht darstellbar sind (s.o.). Die Programme [GAEA] und [PHLuft] basieren auf analytischen Modellen und sind somit für einfache Anforderungen und schnelle Ergebnisermittlung konzipiert. Die analytischen Methoden können zudem nicht genutzt werden, wenn mit einem Einfluss des Grundwassers auf die Temperaturbildung zu rechnen ist.

Unabhängig von der Wahl des Berechnungsprogramms muss der Planer sich bewusst sein, dass das Programm im Rahmen seiner Möglichkeiten nur so genau rechnen kann, wie die eingegebenen Randbedingungen vollständig bekannt sind. Dies ist in der Realität aber eben nicht so!

L-EWT, die instationären und z.T. nichtperiodischen Randbedingungen unterworfen sind, die zusätzlich noch stark von den feuchtebeeinflussten, thermischen Erdreichparametern abhängen wird eine genaue numerische Modellierung auch in Zukunft nur zum Teil detailliert abgebildet werden können.

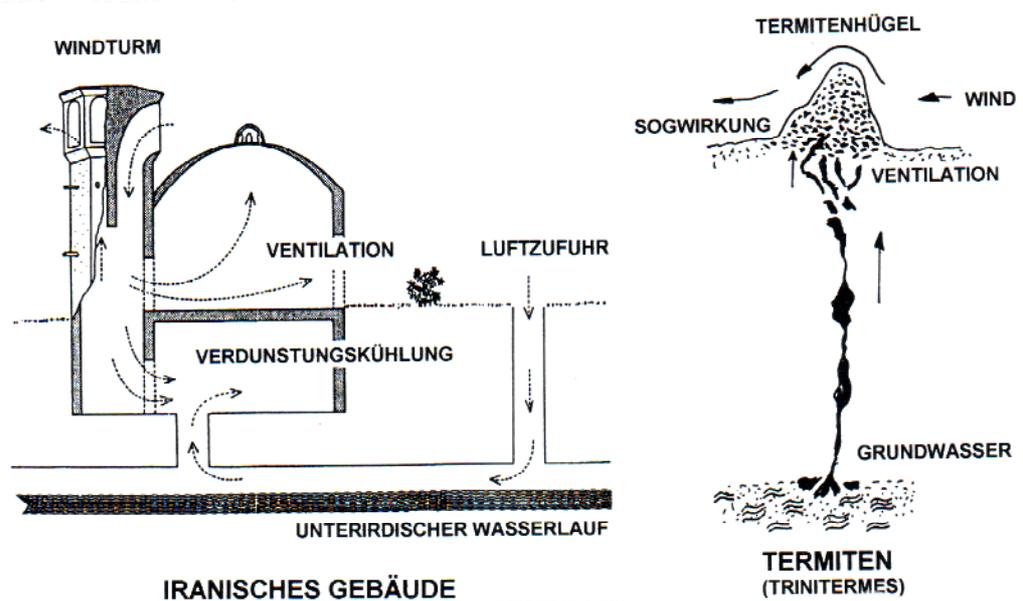
Insofern wächst der Genauigkeitsgrad nicht allein durch die weitere Verbesserung von Simulationsprogrammen, sondern durch den Erfahrungszugewinn bei dem Bau jeder weiteren L-EWT-Anlage.

Anfänge des L-EWT

Innerhalb der gemeinsamen Evolution von Pflanzen und Tieren zeigen sich nutzbringende Anpassungen an die Sonnenenergie. Insbesondere die Kombination verschiedener physikalischer Gesetze wie z.B. der Strömungsgesetze mit der Verdunstungskühlung (adiabate Kühlung) zielt auf einen optimalen Nutzen bei geringem Energiebedarf ab. Erste Hinweise für die Nutzung von erdgeführter Gebäudezuluft zur Kühlung gehen auf den Iran um 900 n.Chr. zurück [Bansal] und [Chohfi].

Bild 23

Aus der Natur adaptierte Methoden Der Luftkühlung im Iran



Die Klimatisierung eines iranischen Gebäudes durch unterirdische Verdunstungskühlung, die durch windbedingte Druckunterschiede hervorgerufen wird (links), ist auf analoge Prinzipien aufgebaut wie die der Bauten von Wüsten-Termiten (rechts) nach H. [Tribusch].

Bild 24

Persische Architektur

Belüftung des Gebäudes auf Basis natürlicher Konvektion [Hourmanesh]

